



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**DISEÑO, AGRONÓMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE  
RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE NOPAL (*Opuntia ficus  
indica*) VARIEDAD COPENA F1**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO AGRICOLA  
P R E S E N T A:**

**JULIO CÉSAR ROBLES RENTERIA**

**ASESOR: M. C. EDVINO JOSAFAT VEGA ROJAS**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

*A la naturaleza, en especial la jardinería que fue el medio de conocer esta noble carrera de la agricultura.*

*A la UNAM, por abrirme sus puertas al conocimiento*

*A la FESC, por permitirme conocer muchas cosas*

*A la carrera de ingeniero agrícola, por esos agrotuot a diferentes partes del país.*

*A mis profesores que siempre trataron de darme lo mejor de si.*

*Al profesor Edvino Josafat por su gran ayuda en este trabajo.*

*A mis amigos (cesar, ursus, salomon, anai, manuel) por hacer menos cansado el camino.*

*En especial al creador de la sabiduría. Por darme la vida, las fuerzas, la voluntad, Y el deseo, de terminar esta parte de mi vida.*

## DEDICATORIAS

*Al creador de todas las cosas.*

*A mi madre, por apoyarme a terminar este proyecto.*

*A mi padre, por ser mejor cada día.*

*A mis hermanos, gracias por su gran amor, y consejos*

*A mis suegros por su gran apoyo en toda mi carrera.*

*A mis amigos (cesar, ursus, salomon, anai, manuel)*

*A mis compañeros de trabajo por enseñarme el kaisen*

*En especial a mi Esposa Gaby y mis tres tesoros (Heber, Milca, Jeriel) sin ellos no hubiera sido esto posible.*



# ÍNDICE

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivos

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.2. Relación suelo – agua- planta.

- 1.2.1. Características físicas del suelo.
- 1.2.2. Determinación del contenido de humedad.
- 1.2.3. Circulación del agua a través de la planta.

### 1.3. Necesidades hídricas de los cultivos.

- 1.3.1. Definición de evapotranspiración.
- 1.3.2. Cálculo de la precipitación efectiva.

### 1.4. Calidad del agua de riego.

- 1.4.1. Salinidad.
- 1.4.2. Problemas de infiltración.
- 1.4.3. Toxicidad y otros efectos.

### 1.5. Métodos de riego.

- 1.5.1. Riego por superficie.
- 1.5.2. Riego por aspersión.

#### 1.5.3. Riego por goteo.

- 1.5.3.1. Definición de riego por goteo.
- 1.5.3.2. Ventajas e inconvenientes del riego por goteo.

##### 1.5.3.3. Componentes de la instalación.

- 1.5.3.3.1. Emisores.
- 1.5.3.3.2. Tuberías.
- 1.5.3.3.3. Elementos de control, potencia y maniobra.
- 1.5.3.3.4. Automatización de la red.
- 1.5.3.3.5. Equipos de elevación.
- 1.5.3.3.6. Equipos de filtración.

##### 1.5.3.4. Diseño agronómico.

- 1.5.3.4.1. Cálculo de las necesidades netas del cultivo.
- 1.5.3.4.2. Cálculo de las necesidades totales del cultivo.

##### 1.5.3.5. Diseño hidráulico.

### 1.6. El cultivo del nopal.

- 1.6.1. Origen
- 1.6.2. Características botánicas y taxonómicas.
- 1.6.3. Características agrícolas del cultivo.
- 1.6.4. Plagas y enfermedades.
- 1.6.5. Podas
- 1.6.6. Épocas de corte.

## **2. METODOLOGÍA.**

### **2.1. Método.**

3.1.1 Descripción del área del diseño

3.1.2 Diseño agronómico.

3.1.3 Diseño hidráulico

## **3. RESULTADOS.**

## **4. CONCLUSIONES.**

## **5. BIBLIOGRAFÍA.**

## **Anexos.**

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 2.1. Densidad aparente según su textura.
- Tabla 2.2 Características del suelo relacionados con el riego, según textura.
- Tabla 2.3 Fracción de agotamiento del agua disponible (f) para distintos cultivo.
- Tabla 2.4 Horas luz por día (p), en porcentaje del total anual, tabulada por mes y latitud.
- Tabla 2.5 Coeficiente de regresión lineal para el método de Blaney – Criddle.
- Tabla 2.6 Directrices para evaluar los problemas de salinidad
- Tabla 2.7 Directrices para evaluar los problemas de infiltración
- Tabla 2.8 Directrices para evaluar los problemas de toxicidad y otros efectos (FAO)
- Tabla 2.9 Riesgo de obstrucciones en riego localizado (FAO)
- Tabla 2.10 Valores normales de análisis de agua de riego (FAO)
- Tabla 2.11 Coeficiente de resistencia y longitud equivalente de una singularidad.
- Tabla 2.12 Valor alimenticio del nopal de verdura Cantidad respecto a 100 gr.
- Tabla 2.13 Características químicas del agua de la parcela
- Tabla 2.14 Datos requeridos para efectuar el diseño agronómico
- Tabla 2.15. Meses calculados por el método de Blaney – Criddle
- Tabla 2.16. Precipitación efectiva
- Tabla 2.17 Necesidades netas del cultivo
- Tabla 2.18 Necesidades totales de riego

## ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 2.1 Obstrucciones de goteros.
- Cuadro 2.2 Fórmulas para calcular el diámetro, según textura del suelo.
- Cuadro 2.3 Características edáficas y de altitud para el nopal.
- Cuadro 2.4 Características climáticas para el cultivo del nopal.
- Cuadro 2.5 Daño y control de las principales plagas del nopal.
- Cuadro 2.6 Daño y control de las principales enfermedades del nopal

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 Figura del triángulo de texturas
- Figura 2.2 Clasificación de las aguas de riego basada en el riego de salinidad
- Figura 2.3 Reducción de la infiltración de la salinidad y del RAS de agua de riego.
- Figura 2.4 Collarín de toma
- Figura 2.5 Goteros y tuberías emisoras
- Figura 2.6 Unión de tubos de polietileno
- Figura 2.7 Hidrociclón
- Figura 2.8 Filtro de malla y filtro de anillas
- Figura 2.9. Disposición de tuberías laterales
- Figura 2.10 Esquema de distribución de conducciones.
- Figura 2.11 Diseño de plantación



## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la agricultura consume el 93 % del agua disponible y debido a la necesidad de incrementar la producción de alimentos este porcentaje no cambiara significativamente, en varias décadas, la seguridad alimentaría del mundo depende del riego, el 17 % del área cultivada en el mundo es irrigada y produce el 40% de los alimentos. (Ángeles 2000)

México ocupa el séptimo lugar mundial, en áreas irrigadas con 6 millones de las 21 millones con las que cuenta para la agricultura; Las condiciones climáticas y edafológicas de la mayor parte del país no son favorables para una agricultura intensiva de temporal, esto porque su precipitación promedio es de 777 mm anuales y se concentra principalmente en el Sur, en donde solo el 10% es de riego y su distribución es en los meses de Verano, además de tener una evapotranspiración superior a los 1400 mm anuales lo que es el doble de precipitación y todavía peor el 67 % del territorio Nacional es árido o semiárido.(Jiménez 2001)

A pesar de tener séptimo lugar en áreas irrigadas, es uno de los que menos usa el riego presurizado (aspersión, micro aspersión, goteo), pues el 92% del riego que usa es de gravedad, con una eficiencia del 50%.

Dentro de los sistemas de riego, el presurizado cuenta con las mayores eficiencias, sólo el riego por goteo tiene cerca del 90% de eficiencia. Con esta eficiencia en el riego se obtendrían grandes beneficios para la agricultura, y un manejo adecuado del recurso agua; uno pensaría entonces que la solución a la baja eficiencia en el riego, sería implementar sistemas más eficientes como el riego por goteo u otros en toda la superficie apta para la agricultura; pero esto no es tan fácil, debido a los muchos problemas que se tienen en el campo mexicano, entre esos problemas tenemos: deficiente aplicación de agua de riego (el cuánto, el cuándo, y el cómo), otro más es el crédito deficiente e inoportuno, poca tecnología disponible, deficiente organización de los productores, etc.

La aplicación deficiente del agua en los cultivos, se puede solucionar con un manejo adecuado del agua, realizando las estimaciones precisas sobre las necesidades de los cultivos, en un proyecto de riego además de calcular las necesidades de agua de la planta, se busca optimizar los recursos, materiales, humanos y lograr mayor uniformidad en el riego; estos proyectos se realizan en dos partes un diseño agronómico y un diseño hidráulico.

En el diseño agronómico se lleva a cabo el planteamiento general del sistema en relación con las condicionantes del medio (suelo, clima, cultivo, parcelación, etc.), con el fin de conseguir un reparto uniforme del agua; Y con el diseño hidráulico se pretende realizar el dimensionamiento más económico de la infraestructura hidráulica, para conducir y distribuir el agua, con el propósito de alcanzar ese reparto de agua uniforme.

De estos dos, el diseño agronómico es el más importante, pues es el componente fundamental en el proyecto de todo sistema de riego, es en donde los errores tienen consecuencias más graves, pues de nada servirán los más afinados cálculos hidráulicos, si se parte de un diseño agronómico equivocado.

La Facultad de Estudios Superiores Cuatitlán (FESC) cuenta con una gran superficie de terrenos aproximadamente 82 hectáreas, utilizables para la agricultura, sus cultivos son principalmente forrajeros, esto para alimentar a una gran variedad de ganado con

los que cuenta la facultad; el sistema de riego que se utiliza es el de gravedad, siendo el más bajo en eficiencia. De estos terrenos la FESC tiene destinado una pequeña parte de parcelas experimentales, para realizar, proyectos de investigación, de tesis, enseñanza para los alumnos y su fin que es la divulgación.

Un proyecto que actualmente se desarrolla en estas parcelas, es el cultivo del Nopal intensivo para verdura en consumo en fresco, que pretende obtener producción todo el año, aun en las temporadas en donde las condiciones climáticas no sean las adecuadas para el desarrollo del cultivo, como es en invierno, y así aprovechar la demanda que se tiene en el mercado además de alcanzar mejores precios.

Para esto se pretende desarrollar dos subproyectos, uno es proteger el Nopal con micro túneles, de las condiciones climáticas adversas, y por otro diseñar un sistema de riego por goteo para optimizar el agua en el cultivo y así contar tanto con las condiciones climáticas como hídricas favorables todo el año.

Tomando este segundo proyecto, se desarrollará un método teórico para diseñar un sistema de riego por goteo en el cultivo del Nopal, con las condiciones climáticas, edáficas, e hídricas de la FESC, ya que no se cuenta con ello y en específico para el Nopal.

Con este trabajo se pretende dejar de una manera clara la mejor forma de diseñar el sistema de riego, además de contribuir a expandir este sistema de riego, y que sea el detonador para que los productores empiecen a utilizar este sistema, teniendo como fin el ahorro del agua y el aumento de los rendimientos.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo general.

- Diseñar un sistema de riego por goteo en el cultivo del nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad *Copena F1* en la parcela experimental Núm. 12 de la FESC.

### Objetivos particulares.

- Calcular la necesidad de agua para el cultivo del nopal de acuerdo a un diseño agronómico tomando en cuenta el suelo, clima, cultivo, parcelación y fuente de agua.
- Calcular las dimensiones hidráulicas de acuerdo al diseño agronómico para determinar, las pérdidas de carga y los diámetros más adecuados para el sistema.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Relación Suelo – agua – planta.

El objetivo central que se pretende con el riego, es satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, en el momento adecuado y en las cantidades necesarias, al aplicar el agua de manera eficiente y uniforme, para que la mayor cantidad de agua quede almacenada en las zonas de las raíces, para que la planta la pueda tomar. Para esto se debe de tener conocimientos del clima, suelo, cultivo, fuente de agua, y la forma que se relacionan entre si para poder determinar el objetivo del riego.

#### 2.1.1. Características físicas del suelo.

Un volumen de suelo está compuesto por minerales (arenas, arcillas, limo, óxidos de Fe, Al), materia orgánica y espacios que son ocupados por agua, aire y organismos micro y macroscópicos.

La proporción de los componentes minerales, la materia orgánica y el espacio poroso, según la estructura o acomodos de los componentes minerales y orgánicos le dan al suelo su capacidad para almacenar una cantidad de agua por unidad de volumen (propiedad de retención) y permite su movilidad a través de ese volumen (velocidad de infiltración), así como dejarla disponible para ser absorbida por las plantas.

Las principales características físicas del suelo que afectan a la retención del agua son: *textura, estructura, porosidad, densidad, profundidad etc.*

La textura es la porción mineral del suelo formada por partículas que, según su tamaño, se clasifican en:

Arenas (de 2 a 0.05mm)  
Limos (de 0.05 a 0.02mm)  
Arcillas (inferior a 0.002mm)

Dependiendo de su textura los suelos se pueden clasificar en: arenosos, limosos y arcillosos. El análisis granulométrico, da los porcentajes de arena, limos y arcillas que nos permite determinar las distintas clases de textura, que viene definido en el triángulo de las texturas.(Figura 2.1)

Los suelos de textura arcillosa tienen un gran número de micro poros, mientras que los macro poros predominan en los arenosos, los suelos arenosos drenan con facilidad, por que gran parte de sus poros tiene diámetros suficiente para determinar la salida del agua por gravedad, es por eso que retiene menor cantidad de agua que los suelos arcillosos.

La estructura es la disposición de las partículas minerales, para formar otras unidades de mayor tamaño llamado agregados. Las unidades estructurales pueden estar constituidas de tamaños y forma muy variada, en los agregados las partículas más gruesas de arena y limos actúan de esqueleto mientras que las más finas sirven de cemento de unión.

Entre las partículas quedan huecos o espacios llamados poros, que pueden ser grandes o macro poros o pequeños entre las partículas finas, o micro poros.

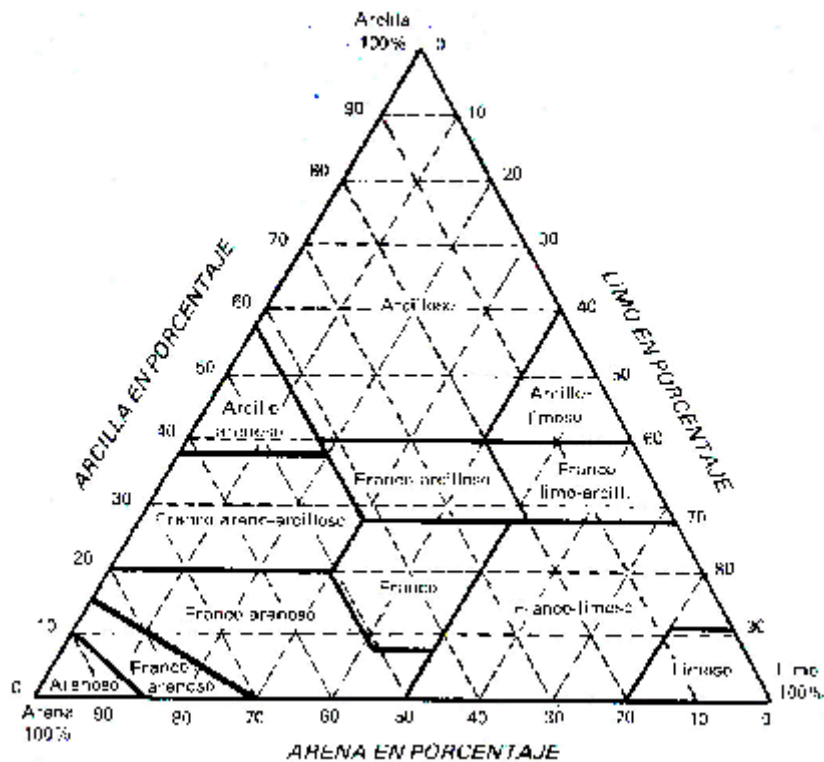


Figura 2.1 Figura del triángulo de texturas

El espacio total ocupado por estos poros es lo que se llama porosidad y es importante porque es el espacio que debe ocupar en el suelo el aire y el agua según el estado de humedad del suelo. En general, una porosidad del orden de 40 al 50 % es bastante satisfactoria.

Los suelos con buena estructura permiten una libre circulación del aire y del agua y por tanto facilita el movimiento y la difusión de los elementos nutritivos, la penetración y desarrollo de las raíces, así como el almacenamiento de agua útil para las plantas.

La estructura se puede mejorar con ciertas prácticas culturales y una buena rotación de los cultivos. La pulverización excesiva de la superficie del suelo con labores de cultivo, supone la destrucción de la estructura, provocando, la formación de costras después de la lluvia.

### Densidad

La densidad es la relación del peso con una unidad de volumen, también conocida como densidad aparente, que es igual al peso de una muestra de suelo seco dividido por el volumen, en los suelos minerales la densidad aparente varía dentro de los siguientes límites:

TEXTURA	DENSIDAD APARENTE(g/cm <sup>3</sup> )
Arenosos	1.50 a 1.80
Franco-arenoso	1.40 a 1.60
Franco	1.30 a 1.50
Franco-arenoso	1.30 a 1.40
Arcilloso	1.20 a 1.30

Tabla 2.1. Densidad aparente según su textura. ( Fuente Yagüe 1998)

## Profundidad

Existe una relación bastante estrecha entre la profundidad del suelo y el desarrollo de las plantas a un mayor volumen explorado por las raíces representa una mayor disponibilidad de agua y elementos nutritivos, una profundidad del suelo de 50 cm a 150 cm, trae incrementos de la producción del doble y hasta del triple. (Domínguez 1990).

### 2.1.2. Determinación del contenido de humedad.

El contenido de humedad del suelo se puede expresar de varias formas:

- a) **Humedad gravimétrica (Hg.)**. es el porcentaje de peso de agua que contiene el suelo (Pa) con relación al peso del suelo seco (Ps). Se considera suelo seco cuando se somete a desecación en estufa a 105°C hasta peso constante. Esta humedad se calcula por:

$$Hg = (Pa/Ps) \times 100.$$

Si tenemos 70 gr de suelo y después de secado en la estufa pesa 58 gr, la diferencia nos da el peso del agua que es de 12 gr, la Hg =  $(12/58) \times 100 = 20.68 \%$

- b) **Humedad volumétrica**. Es el porcentaje de agua que contiene el suelo con relación al volumen de suelo húmedo.

- c) **Humedad expresada en altura de agua**. De un modo semejante a como se expresa el agua caída en una precipitación, la cantidad de agua del suelo se puede expresar en longitud de altura de agua. La relación de longitudes es la misma que la de volúmenes, ya que en ambos casos la superficie de la base es la misma. La expresión de la humedad en longitud se suele presentar como fracción. Conociendo la cantidad de agua expresada en mm de altura de agua, se puede conocer fácilmente la cantidad de agua, expresada en litros o m<sup>3</sup>, contenida en la superficie unitaria (m<sup>2</sup> o hectárea).

Para una altura de 1mm, el m<sup>2</sup> contiene un volumen:

$$V = 10 \times 10 \times 0.01 = 1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ litro}$$

En esas mismas condiciones una hectárea contiene un volumen de:

$$V = 1 \times 10,000 = 1 \text{ m}^3$$

Por lo tanto: **1mm de altura de agua = 1 litro/m<sup>2</sup> = 10 m<sup>3</sup>/ha**

**Potencial de agua:** las moléculas de agua en estado líquido se encuentran en continuo movimiento, debido a fuerzas de atracción y repulsión, por tal motivo el agua se comporta como poderoso disolvente, en donde las moléculas de otras sustancias pueden moverse y reaccionar químicamente, esta movilidad de las moléculas del agua depende de su energía libre, es decir, de las fricciones de su energía total que pueden transformarlo en trabajo.

El potencial del agua o potencial hídrico es una magnitud que expresa la energía libre del agua cuando ésta entra a formar parte de diversos sistemas, tales como suelo, planta, atmósfera, etc; se mide en unidades de presión: Pascal (Pa), Mega pascales (Mpa), atmósfera (atm), Kg/cm<sup>2</sup>, o metros de columna de agua (mca), en la práctica se considera:

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 0.1 \text{ Mpa} = 10 \text{ mca}$$

El potencial del agua viene determinado por, la presión a la que está sometida, su actividad y la gravedad.

Se mide con relación a un potencial de referencia, que vale cero y que corresponde al agua pura, libre y a la presión atmosférica.

La gravedad tiene una influencia prácticamente nula en el sistema suelo – planta - atmósfera, por lo que el potencial hídrico en dicho sistema está determinado por la presión y la actividad del agua, esta depende de dos factores

- *Efecto osmótico*. Debido a la presencia de sustancias en disolución.
- *Efecto matricial*. Debido a la interacción del agua con la matriz sólida del suelo.

Las sustancias disueltas reducen la energía libre, ya que alrededor de cada partícula de soluto se forma una fina capa de moléculas de agua con menos movilidad. Cuando el agua se pone en contacto con una superficie sólida se forma una fina capa de moléculas de agua más o menos adheridas a ella y por tanto, se reduce la movilidad del agua y su energía libre. El potencial de presión es positivo para presiones a la atmósfera y negativo para presiones inferiores.

El potencial osmótico representa la disminución de movilidad del agua debida a la presencia de sustancias disueltas. Tiene un valor nulo para el agua y un valor negativo cuando hay sustancias disueltas.

El potencial matricial representa la disminución de movilidad del agua debido a interacciones con la matriz sólida del suelo, tiene un valor nulo cuando no hay interacciones.

El agua se desplaza espontáneamente (sin aporte externo de energía) desde los sitios de mayor potencial hacia los sitios de menor potencial, siendo el flujo directamente proporcional a la diferencia de potencia.

La absorción del agua del suelo por la raíz se produce en un suelo normal cuando éste contiene una adecuada cantidad de agua. Si ésta es muy escasa, su potencial matricial se hace negativo, en cuyo caso el potencial de agua en el suelo puede alcanzar valores más bajos que el potencial del agua en la raíz, con lo cual la absorción no se produce.

La transpiración es el paso del agua en estado de vapor desde las superficies evaporantes de la planta hacia la atmósfera. El agua de la atmósfera se presenta fundamentalmente en estado de vapor y su potencial depende de la humedad relativa. Cuando ésta es del 100% el potencial es cero; pero a medida que baja la humedad relativa su potencial disminuye rápidamente. Por este se produce espontáneamente la evaporación del agua del suelo y la transpiración del agua de las plantas hacia la atmósfera.

Es evidente que para que el agua circule desde los pelos absorbentes de la raíz hasta las superficies evaporantes de las hojas tiene que haber una diferencia de potencial entre ambas zonas de la planta. En ocasiones, con el fin de evitar el empleo de valores negativos, se utiliza el concepto de **tensión** que es la succión necesaria para liberar el agua del suelo, su valor es igual al del potencial, pero con signo cambiado. Desde el punto de vista de absorción del agua por las plantas no se considera las tensiones de gravedad y de presión. Se denomina **tensión del agua del suelo** a la suma de tensión matricial y osmótica.

**Retención del agua por el suelo.** La relación entre el contenido de humedad y la tensión matricial del agua de un suelo, depende de la textura y estructura del suelo, ya que viene influida por el número y el tamaño de los poros. Así tenemos que a una misma tensión los suelos arcillosos retiene más agua que los arenosos, a medida que disminuye la tensión los suelos arcillosos muestran un descenso más atenuado del contenido de humedad que los arenosos, debido a que aquellos presentan una distribución más regular del tamaño de los poros. A tensiones bajas (suelo próximo a la saturación), los suelos con buena estructura contienen más agua que los suelos compactados, debido a la mayor porosidad de aquellos. Si la tensión es alta, los suelos compactados pueden almacenar más agua que los suelos bien estructurados, debido a que con la compactación se reduce el tamaño de los poros grandes.

**Estado de agua en el suelo.** Desde el punto de vista de su utilización por las plantas cabe diferenciar los siguientes estados del agua del suelo:

- a) **Saturación:** Un suelo está saturado cuando todos sus poros están ocupados por el agua. Esta situación se presenta después de una lluvia copiosa o de un riego abundante, o cuando existe un estrato impermeable de poca profundidad, cuando un suelo saturado se deja de drenar, el sobrante de agua pasa al subsuelo por la acción de gravedad. Esta agua es llamada como *agua gravitacional o libre* que no es retenida por el suelo. Si el suelo se satura de agua por mucho tiempo las plantas no acuáticas se mueren por falta de respiración.
- b) **Capacidad de campo (C.C).** Cuando el suelo ya no pierde más agua por gravedad se dice que esta en (C.C), esto quiere decir que el agua ocupa los poros pequeños y el aire ocupa una gran parte del espacio de los poros grandes. Se admite que el estado de (C.C) se alcanza en suelos bien drenados a los tres días de una lluvia copiosa, aunque no es cierto para todos los suelos ya que en los arcillosos se alcanza con más lentitud que en los arenosos. La (C.C) se alcanza cuando la tensión matricial tiene un valor de 1/3 de atm en suelo franco, pudiendo variar desde 0.1 atm en suelos arenoso hasta 0.5 atm en suelo arcilloso. El estado de (C.C) es la situación más favorable para el desarrollo de los cultivos, ya que tienen a su disposición una gran cantidad de agua retenida por el suelo con una energía que es superada con facilidad por la succión de las raíces, a la vez que dispone de aire abundante por la respiración de las raíces.
- c) **Punto de marchitamiento (P.M).** A partir de la (C.C) , el agua del suelo se va perdiendo progresivamente por evaporación y absorbida por las plantas. Llega un momento en el que las plantas ya no pueden absorber toda el agua que necesitan y se marchitan irreversiblemente, se dice que ha alcanzado el (P.M). Es el límite inferior de aprovechamiento del agua del suelo por las plantas. Se considera que el (P.M) se alcanza cuando la tensión matricial tiene un valor de 15 atm. Aunque puede variar de 10 a 20 atm, correspondiendo la cifra más baja a los suelos muy arenosos, y la más alta a los muy arcillosos. En suelos de textura media, el punto de marchitamiento se considera igual a 0.56 veces la humedad equivalente. Aproximadamente la mitad del agua contenida en el suelo a C.C se encuentra tan fuertemente retenida que las planta no pueden absorberla a la velocidad que requieren sus necesidades y por eso se marchitan. Se considera que se ha alcanzado el punto de marchitamiento cuando la planta pierde su capacidad de recuperación, aunque se suministre agua en abundancia.

**Utilización del agua del suelo.** Desde el punto de vista de su utilización por las plantas, el agua del suelo se clasifica:

- **Agua sobrante:** es el agua que sale libremente del suelo por la acción de la gravedad. (agua gravitacional). No es utilizable por las plantas.
- **Agua disponible:** es el agua que puede ser absorbida por las raíces de la planta. Esta es la diferencia entre la C.C y el P.M
- **Agua no disponible:** es el agua retenida por el suelo con tanta fuerza que las plantas no pueden absorberla con suficiente rapidez para compensar las pérdidas por transpiración. Esta agua es la que permanece en el suelo a partir del P.M.

El aprovechamiento del agua por los cultivos es más efectivo cuando el contenido de agua en el suelo se mantiene cercano a la C.C. A medida que la planta absorbe agua del suelo, si no hay aportaciones, va disminuyendo progresivamente el contenido de agua, hasta que llega el momento, antes de alcanzar el punto de marchitamiento, que le cuesta más esfuerzo absorber el agua, con lo cual disminuye su rendimiento.



Tabla 2.2. Características del suelo relacionados con el riego, según textura

Textura de suelo	Da (gr/ cm <sup>3</sup> )	C.C (% Psp)	P.M (% Psp)
Capa superior a 0.30 m			
Arena	1.60	8.7	3.5
Arena francosa	1.60	11.9	4.5
Franco arenosa	1.55	15.4	5.8
Franco arenosa fina	1.50	19.5	7.5
Franca	1.45	23.6	9.2
Franco arcillo arenosa	1.40	27	13.5
Franco limosa	1.40	27.2	10.9
Franco arcillosa	1.40	27.3	15.1
Franco arcillo limosa	1.35	28.8	13
Arcillo limosa	1.30	28.7	18
Arcillosa	1.25	29.4	20.1
Capa debajo de los 0.30 m			
Arena	1.70	7	3
Arena francosa	1.70	10	4.20
Franco arenosa	1.65	13.40	5.60
Franco arenosa fina	1.60	18.20	8
Franca	1.55	22.60	13.30
Franco arcillo arenosa	1.50	27.60	14.50
Franco limosa	1.50	26.80	12.90
Franco arcillosa	1.50	26.30	16.30
Franco arcillo limosa	1.45	27.60	14.50
Arcillo limosa	1.40	27.90	18.80
Arcillosa	1.35	28.80	20.80

Psp: porciento de suelo seco

Fuente Ángeles 2000

El *agua fácilmente disponible* es aquella fracción del agua disponible que los cultivos pueden utilizar sin que disminuya su rendimiento.

El agua fácilmente disponible depende de los factores siguientes:

- El cultivo
- El tipo de suelo
- La magnitud de transpiración.

Los factores que condicionan la capacidad de retención de agua disponible en el suelo son: la textura la estructura, el contenido de materia orgánica, el espesor del suelo explorado por las raíces y la secuencia de capas en el perfil.

**Agua disponible para el cultivo:** el agua disponible para el cultivo (AD) para las plantas es el agua comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM):

$$AD = CC - PM$$

*La reserva de agua disponible* para las plantas es el agua disponible contenida en la profundidad del suelo que alcanza las raíces.

**Reserva disponible = (C.C - PM) X profundidad de las raíces.**

Se llama *reserva de agua fácilmente disponible* a la cantidad de agua que pueden absorber las plantas sin hacer un esfuerzo excesivo y, por tanto, sin que haya una disminución del rendimiento. La reserva de agua fácilmente disponible es igual a la reserva de agua disponible multiplicada por un coeficiente llamado *fracción de agotamiento de agua disponible*.

**Reserva fácilmente disponible = reserva disponible X fracción de agotamiento.**

La fracción de agotamiento del agua disponible depende del cultivo, el tipo de suelo y la magnitud de la transpiración.

Tabla 2.3 Fracción de agotamiento del agua disponible (f) para distintos cultivos

Cultivo	f	Cultivo	f
Alfalfa	0.60	Papa	0.30
Aguacate	0.30	Plátano	0.30
Brócoli	0.30	Prados	0.35
Caña de azúcar	0.60	Remolacha	0.50
Cebolla	0.30	Fresa	0.10
Coliflor	0.45	Frijol	0.50
Limón	0.25	Lechuga	0.35
Maíz grano	0.40	Tomate	0.45
Melón	0.20	Viñedo	0.55
Naranja	0.35	Zanahoria	0.40

### **Medición del agua del suelo**

Con vistas a las aportaciones de riego, interesa conocer el contenido de humedad, mientras que con vistas a la disponibilidad de esa agua por las plantas interesa conocer su estado de energía. Ambos parámetros se relacionan dentro de un mismo suelo, pero dada la gran variabilidad de los mismos (junto con otros factores que también influyen) se hace necesaria la determinación de ambos en cada caso particular.

*Medición directa del contenido de humedad:* Se puede realizar en forma gravimétrica o volumétrica. Para expresarlo en forma gravimétrica se pesa una muestra de suelo en estado húmedo y, después, en estado seco, haciendo el secado en estufa a 105°C hasta peso constante.

*Medición indirecta del contenido de humedad:* Consiste en medir alguna propiedad con la humedad, pasando después de aquella a ésta mediante alguna curva o tabla de calibración

- *Dispensador de neutrones:* el método se basa en emitir neutrones rápidos, que al chocar con los núcleos de Hidrógeno desvían su trayectoria y alcanzan a un detector situado en la misma sonda.
- *Reflectometría en el tiempo:* consiste en medir la constante dieléctrica del suelo (que varía con el contenido de agua) mediante el tiempo de recorrido de un pulso electromagnético, que se introduce en el suelo a través de unas varillas de acero que sirven de guía a las ondas.

*Medición directa del potencial hídrico:* mediante diversos instrumentos se mide algún componente del potencial o la suma de varios de ellos. El instrumento más utilizado es el *tensiometro*, que mide el potencial matricial del suelo.

*Medición indirecta del potencial hídrico:* los instrumentos más utilizados son los bloques de resistencia y los sensores de salinidad.

### **Movimientos del agua en el suelo**

El movimiento del agua en el suelo se debe a diferencias de potencial entre diferentes puntos, fluyendo de los puntos de mayor potencial (mayor humedad) hacia los de menor potencial (menor humedad) hasta alcanzar un equilibrio de potencial (o de humedad).

*Infiltración:* es el movimiento del agua desde la superficie del suelo hacia abajo que tiene lugar después de una lluvia o un riego. La facultad de un suelo para permitir el paso del agua a través de él, recibe el nombre de permeabilidad, que depende del número de poros, así como de su

tamaño y de su continuidad, un gran número de poros y poros grandes favorecen la permeabilidad.

La *velocidad de infiltración* se define como el volumen de agua que entra en el perfil del suelo por unidad de tiempo. No depende solo del volumen de poros, si no también de la facilidad con que el agua se transmite a las capas próximas y ello depende del tamaño y la disposición de los poros. La velocidad de infiltración se mide en mm/hora.

Cuando el suelo esta seco, la velocidad de infiltración es alta; pero a medida que las arcillas se expanden y taponean parcialmente los poros, la velocidad de la infiltración disminuye gradualmente hasta llegar a un punto en que se mantiene prácticamente constante.

Este valor se llama *velocidad de infiltración estabilizada*, que depende, fundamentalmente, de la textura del suelo. De un modo general los valores de la velocidad o tasa de infiltración son los siguientes:

Arcillosos.....	< 5	mm/hora
Franco – arcilloso.....	5 –10	
Franco.....	10 - 20	
Franco – arenoso.....	20 - 30	
Arenoso.....	>30	

Fuentes Yagüe 1998

### 2.1.3. Circulación del agua a través de la planta.

Los procesos que regulan la circulación del agua a través de la planta son la transpiración y la absorción.

**Transpiración:** la transpiración es el paso del agua en estado de vapor desde la planta hacia la atmósfera a través de los estomas, que son orificios situados en la epidermis de las hojas, aunque también ocurren en pequeñas, cantidades, a través de la cutícula de otras células epidérmicas. Cuando los estomas se cierran, la transpiración cuticular es la única que se produce. La intensidad de la transpiración viene condicionada por una serie de factores, unos dependientes de la atmósfera y otros de la planta. Los primeros son los siguientes:

- *La humedad relativa del aire.* A menor humedad relativa corresponde un menor potencial del agua en la atmósfera, lo que favorece la transpiración.
- *La temperatura del aire.* Para una misma cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera, la humedad relativa disminuye al aumentar la temperatura, por consiguiente un aumento de la temperatura favorece la transpiración, sin embargo temperaturas superiores a 30 °C estimula la respiración provocando el cierre de los estomas.
- *La velocidad del viento.* Alrededor de la superficie de la hoja se forma una delgada capa de aire con una gran cantidad de vapor procedente de la transpiración. La mayor velocidad del viento favorece la intensidad de la transpiración.

La capacidad de los estomas para abrirse o cerrarse depende del contenido hídrico de las células oclusivas, con alto contenido hídrico, el estoma se abre, y con bajo contenido hídrico, el estoma se cierra. Naturalmente el contenido hídrico de estas células viene relacionado con el contenido hídrico general de la planta, que, a su vez, depende del contenido hídrico del suelo. Cuando la absorción de agua es inferior a la perdida en la transpiración, el estoma se cierra y cesa la transpiración.

La capacidad del bióxido de carbono atmosférico necesario para la fotosíntesis se realiza, igual que la transpiración, a través de los estomas, por lo que se puede considerar a éstos como reguladores del equilibrio entre las funciones fisiológicas de la fotosíntesis y la eliminación de agua.

La transpiración contribuye a regular la temperatura de la hoja, ya que la evaporación del agua consume una gran cantidad de energía procedente de la energía solar absorbida. Si no se

consumiera por este procedimiento el exceso de energía solar absorbida por las hojas, la temperatura de éstas podría exceder los límites compatibles de actuación de las enzimas. La transpiración es también la causante de la diferencia de potencial entre la raíz y la hoja, lo que permite distribuir por toda la planta el agua y las sales minerales disueltas en ella.

**La absorción.** Es el paso del agua desde el suelo hacia la planta. Se produce como consecuencia de la diferencia de potencial existente entre el agua del suelo y el de la planta, y tiene lugar a través de los pelos absorbentes de las raíces. A través de los estomas de las hojas también se pueden absorber pequeñas cantidades de agua.

Una pequeña parte del agua absorbida se incorpora a los tejidos de la planta (agua de constitución) mientras que el resto pasa a la atmósfera por transpiración.

### **Balance hídrico de la planta.**

Es el resultado de las aportaciones y de las pérdidas. En ocasiones puede ocurrir que las aportaciones por absorción superen a las pérdidas por transpiración, sobre todo cuando ésta no se produce (de noche), en cuyo caso el exceso de agua se elimina por las hojas en forma de gotas líquidas, a través de una estructura llamadas hidatodos, mediante un proceso llamado gutación.

Es más frecuente que las pérdidas superen a las aportaciones, en cuyo caso se produce un déficit hídrico. Cuyo efecto negativo depende de su intensidad y duración y del estado fenológico de la planta

Los periodos críticos de la planta en su mayoría suelen coincidir con el periodo de rápido crecimiento, la floración y la formación de frutos y semillas.

## **2.2 Necesidades hídricas de los cultivos.**

### **2.2.1. Definición de evapotranspiración.**

La evapotranspiración (o uso consuntivo de agua) se refiere a la cantidad de agua transpirada por el cultivo y evaporada desde la superficie del suelo en donde se asienta el cultivo. Cabe distinguir dos formas de evapotranspiración.

- *Evapotranspiración potencial o máxima.* Es la cantidad de agua consumida durante un determinado periodo de tiempo, en un suelo cubierto de una vegetación homogénea, densa, en plena actividad y con buen suministro de agua.
- *Evapotranspiración real.* Es la cantidad de agua realmente consumida por un determinado cultivo durante el período de tiempo considerado.

El rendimiento del cultivo es máximo cuando la transpiración es máxima, y esto ocurre cuando el cultivo se desarrolla en las mejores condiciones posibles. Ocurre entonces que la evapotranspiración real coincide con la evapotranspiración máxima.

Tanto en la evaporación como en la transpiración, el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso, y este cambio de estado se ve favorecido cuando el aire está caliente, seco o muy movido (viento). Por otra parte, la cantidad de agua perdida por evapotranspiración depende de las disponibilidades de agua en el suelo y de la capacidad de las plantas para absorber y para transpirar esa agua contenida en el suelo. En suma, los factores que condicionan la evapotranspiración se pueden agrupar de la siguiente forma:

- *Factores concurrentes en el suelo.* tales como la capacidad de retención del agua, capacidad de calentamiento, exposición a los rayos solares, etc.
- *Naturaleza de la vegetación.* Especialmente en lo referente a los órganos encargados de la absorción y de la transpiración del agua.

- *La fase vegetativa en que se encuentra el cultivo.* La evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo. Con la planta recién nacida la mayor parte del agua consumida tiene lugar por evaporación en el suelo, pero a medida que el cultivo se desarrolla aumenta la transpiración, que se hace máxima al alcanzar la planta el máximo desarrollo foliar.
- *Condiciones meteorológicas.* Que favorecen o atenúan la evaporación, tales como intensidad de la radiación solar, vientos, humedad atmosférica, etc.

Una gran parte del agua absorbida por las plantas se consume en la evapotranspiración, ya que sólo una mínima parte (del 0.1 al 1%) se incorpora a los tejidos de la planta (agua de constitución). Por tanto, desde el punto de vista práctico se consideran las necesidades hídricas del cultivo iguales a las necesidades de evapotranspiración.

### **Cálculo de las necesidades de agua para los cultivos.**

La determinación de las necesidades de agua de un cultivo puede hacerse por diversos métodos. Un método directo es por medio del *lisímetro*, recipiente de gran tamaño lleno de tierra en donde se siembra la planta objeto de estudio y se cultiva de la forma más parecida posible a como se efectúa el cultivo en campo. Se coloca a la intemperie sobre una superficie en la que pueda recogerse el agua que escurra. Periódicamente se pesa el recipiente. Lo que permite conocer el agua perdida por evapotranspiración durante el periodo que se considere.

Otros métodos empíricos evalúan la evapotranspiración a partir de datos climáticos y de otra clase. Entre ellos destacan los métodos de Doorembos y Pruitt en la publicación de la FAO las necesidades de agua de los cultivos: métodos de Blaney – Criddle, de la radiación, de Penman y de la cubeta evaporimétrica.

Según estos métodos, para calcular la evapotranspiración de un cultivo cualquiera se valora antes la evapotranspiración de un cultivo de referencia, relacionado ambos mediante un coeficiente obtenido experimentalmente.

$$ET(\text{cultivo}) = (ET_0) (Kc) \quad (2.1)$$

**ET(cultivo)** = evapotranspiración de un cultivo determinado, expresado en mm por día.

**ET<sub>0</sub>** = evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm por día.

**Kc** = Coeficiente del cultivo, variable con el propio cultivo y con su periodo vegetativo.

ET<sub>0</sub> se define como la tasa de evapotranspiración de un cultivo extenso y uniforme de gramíneas, de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y no esté escaso de agua.

La ET (cultivo) es la evapotranspiración de un cultivo determinado en un suelo fértil sin enfermedades y con suficiente cantidad de agua para dar una plena producción.

El cálculo del ET<sub>0</sub> se hace en la misma zona de riego (método de la cubeta evaporimétrica) o mediante fórmulas que relacionan ciertos datos climáticos (método de Blaney – Criddle, de la radiación, de Penman).

Los métodos de Blaney – Criddle, de la radiación Penman se utilizan generalmente, como métodos de predicción, mientras que el método de la cubeta evaporimétrica mide la evaporación real ocurrida en dicha cubeta (que se relaciona con la evapotranspiración real) aunque también se pueden utilizar como métodos de predicción.

### **Método de Blaney – Criddle**

Las modificaciones del método de Blaney – Criddle hechas por la FAO esta dada por la siguiente ecuación:

$$E_{t_0} = C_e (a + b(f)) \quad (2.2)$$

En donde:

$E_{t_0}$  = evapotranspiración de referencia, en mm/día

$C_e$  = Factor de ajuste basado en la elevación sobre el nivel del mar

a y b = Factor de ajuste basado en datos de clima de la región.

f = Factor de uso consuntivo de Blaney –Cridle en mm/día.

El factor de corrección por elevación  $C_e$  esta dado por la fórmula:

$$C_e = 1 + 0.1 \text{ elevación} / 1000 \quad (2.3)$$

Donde:

Elevación = elevación sobre el nivel del mar.

El factor de uso consuntivo f, de Blaney - Cridle se determina a través de la fórmula

$$F = p (0.46 (T) + 8.13) \quad (2.4)$$

Donde:

T = Temperatura media diaria en C°

P = Porcentaje de horas luz, en % tabla 2.4

Los valores de a y b se obtienen de la tabla 2.5

Tabla 2.4. Horas luz por día (p), en porcentaje del total anual, tabulada por mes y latitud.

<i>Latitud norte</i>	<i>Ene.</i>	<i>Feb.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>May.</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>
<i>Latitud sur</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>	<i>Ene.</i>	<i>Feb.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>May.</i>	<i>Jun.</i>
60°	0.15	0.20	0.26	0.32	0.38	0.41	0.40	0.34	0.28	0.22	0.17	0.13
58°	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.40	0.39	0.34	0.28	0.23	0.18	0.15
56°	0.17	0.21	0.26	0.32	0.36	0.39	0.38	0.33	0.28	0.23	0.18	0.1
54°	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.38	0.37	0.33	0.28	0.23	0.19	0.17
52°	0.19	0.22	0.27	0.31	0.35	0.37	0.36	0.33	0.28	0.24	0.20	0.17
50°	0.19	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.20	0.18
48°	0.20	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.21	0.19
46°	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.35	0.34	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20
44°	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.35	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.20
42°	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
40°	0.22	0.25	0.27	0.30	0.32	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
35°	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
30°	0.24	0.26	0.27	0.29	0.31	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
25°	0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
20°	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
15°	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25
10°	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
5°	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27
0°	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

## Coeficiente del cultivo (Kc)

El valor de coeficiente del cultivo depende de las características de la planta y expresa la variación de su capacidad para extraer el agua del suelo durante su periodo vegetativo. Esta variación es evidente en cultivos anuales, que cubren todo su ciclo en un periodo reducido de tiempo. En estos cultivos hay que distinguir cuatro etapas en su periodo vegetativo:

- Primera etapa: inicial o de establecimiento del cultivo.
- Segunda etapa: etapa de desarrollo del cultivo o de rápido desarrollo de cultivo.
- Tercera etapa: etapa de mediados del periodo o de máxima evapotranspiración.
- Cuarta etapa: final o de maduración y cosecha.

**Cuando no se conoce Kc a efecto de diseñar los sistemas de riego, se le asigna a este un valor de 1.0** (Ángeles 2000)

Tabla 2.5 Coeficiente de regresión lineal para el método de Blaney – Criddle.

n /N	HR min	Velocidad del viento (m/s)	Inter (a)	Tan (b)
Alta > 0.8	Baja <20%	Baja 0.2	-2.6	1.55
		Media 2-5	-2.3	1.82
		Alta > 5	-2	2.06
	Media 20 a 50%	Baja 0.2	-2.4	1.37
		Media 2-5	-2.5	1.61
		Alta > 5	-2.55	1.82
	Alta > 50%	Baja 0.2	-2.15	1.14
		Media 2-5	-1.95	1.22
		Alta > 5	-1.7	1.31
Media 0.6 a 0.8	Baja <20%	Baja 0.2	-2.3	1.35
		Media 2-5	-2.05	1.55
		Alta > 5	-1.8	1.73
	Media 20 a 50%	Baja 0.2	-2.2	1.2
		Media 2-5	-2.15	1.38
		Alta > 5	-2.1	1.52
	Alta > 50%	Baja 0.2	-1.8	0.97
		Media 2-5	-1.75	1.06
		Alta > 5	-1.7	1.16
Baja 0.3 a 0.6	Baja <20%	Baja 0.2	-2	1.15
		Media 2-5	-1.8	1.28
		Alta > 5	-1.6	1.4
	Media 20 a 50%	Baja 0.2	-2	1.05
		Media 2-5	-1.85	1.15
		Alta > 5	-1.7	1.25
	Alta > 50%	Baja 0.2	-1.45	0.8
		Media 2-5	-1.55	0.88
		Alta > 5	-1.65	0.98

Fuente Ángeles 2000

## 2.2.2. Cálculo de la precipitación efectiva.

Existen diferentes criterios para estimar la precipitación efectiva, según se consideren de mayor o menor peso los diferentes factores que intervienen en el aprovechamiento de la precipitación caída:

1. En función de la precipitación caída durante el mes (P).

Cuando P es superior a 75 mm, la precipitación efectiva (Pe) se puede calcular mediante la fórmula:

$$Pe = 0.8P - 25 \quad (2.6)$$

Cuando P es inferior a 75 mm se aplica la fórmula:

$$Pe = 0.6P - 10 \quad (2.7)$$

2. En función de la precipitación mensual en suelos de pendiente ligera.
3. En función de la precipitación mensual (P) y del número de precipitación habidas durante el mes (n)

$$Pe = 0.8P - 12.5n$$

## 2.3 Calidad del agua de riego.

La calidad del agua para riego depende no sólo de su contenido en sales, sino también del tipo de sales. Los problemas más comunes derivados de la calidad del agua se relacionan con los siguientes efectos:

- a) Salinidad: A medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, tanto más se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo de succión para absorber el agua por las raíces. Todo ello se traduce, en última instancia, en una disminución de la cantidad de agua disponible para la planta.
- b) Infiltración del agua en el suelo: Un contenido relativamente alto de sodio y bajo de calcio significa que las partículas del suelo tienden a disgregarse, lo que ocasiona una reducción de la velocidad de infiltración del agua. Esta reducción de la infiltración puede ser de tal magnitud que implica poca disponibilidad de agua en el perfil del suelo.
- c) Toxicidad: Algunos iones, tales como Ión de sodio, cloro y boro, se pueden acumular en los cultivos en concentraciones suficientemente altas como para reducir el rendimiento de la cosecha.
- d) Otros efectos: En algunas ocasiones hay que considerar los nutrientes contenidos en el agua de riego, a efecto de restringir la fertilización o porque se produzcan excesos contraproducentes. En otras ocasiones se puede producir una corrosión excesiva en el equipo de riego, lo que aumenta el costo de mantenimiento.

### 2.3.1 Salinidad.

Las plantas extraen agua del suelo cuando las fuerzas de succión que ejercen sus raíces son mayores que las fuerzas de retención ejercidas por las partículas del suelo. A medida que disminuye el contenido de agua en el suelo, debido a la evapotranspiración las fuerzas que retienen el agua restante se incrementa y las plantas tienen que hacer mayor esfuerzo de succión.

Cuando existen sales en la solución del suelo aumentan las fuerzas de retención, debido a la afinidad de las sales por el agua, con lo cual las plantas tienen que hacer un esfuerzo suplementario para absorber el agua.

La concentración de sales en la zona radical varía con la profundidad, inmediatamente después del riego, la mayor cantidad de agua fácilmente disponible para las plantas se encuentra en la



capa superior de la zona radical que es también la capa con mayor densidad de raíces y con menor salinidad. A medida que se produce la evapotranspiración el contenido de agua en esa capa disminuye progresivamente, hasta que llega el momento en que el agua fácilmente disponible se desplaza a las capas inferiores de la zona radical. Estas capas son más salinas debido a que las sales que deja en la capa superior la gran cantidad de agua evapotranspirada arrastra hacia abajo en los riegos siguientes.

La planta extrae el agua de donde le resulta más fácil. A igualdad de agua disponible a diferentes profundidades, le resulta más fácil extraerla de la capa superior que es menos salina. Por eso el riego debe programarse de forma que no se agote el agua fácilmente disponible de la capa superior.

A la vez que se mantiene alta la disponibilidad de agua, es preciso lixiviar las sales acumuladas en la zona radical antes de que su concentración resulte peligrosa para el cultivo, para lo cual habrá que aplicar una mayor cantidad de agua que las exigencias de evapotranspiración.

Con aguas salinas se requiere mayor cantidad de agua para la lixiviación, con lo que aumente el riesgo de elevar el nivel freático en aquellas zonas que lo tienen a poca profundidad. Las sales acumuladas en la capa freática ascienden por capilaridad hacia la zona radical, aumentando la salinidad de esta zona.

Los iones más importantes contenidos en el agua de riego son los siguientes:

CATIONES: calcio, magnesio, sodio, potasio

ANIONES: cloro, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos.

El contenido de cada ion se mide en miligramos (mg) o en miliequivalentes (meq) por litro.

(El meq es igual al peso atómico, molecular o iónico expresado en mg dividido por la valencia)

La conductividad eléctrica se expresa en mho/cm a la temperatura de 25°C. Como en el agua los valores de la C.E son muy pequeños, se utilizan los submúltiplos de mho.

La C. E se suele expresar en deciSiemens/m (dS/m) y en microSiemens/cm (microS/cm):

***dS=mmho/cm; microS/cm = micromho/cm***

El contenido de sales totales (ST) y la conductividad eléctrica (C. E) están relacionados mediante la siguiente ecuación:

**ST= 0.64 CE**

ST= Contenido de sales, expresado en g/litro.

C. E = Conductividad eléctrica, expresada en dS/m.

Las directrices que se dan a continuación, propuestas por FAO citado por Yagüe 1998, son las que recomienda el Comité de Consultores de la Universidad de California:

*Tabla 2.6 Directrices para evaluar los problemas de salinidad*

Unidad	Grado de restricciones		
	Ninguna	Ligera a moderada	Severa
dS/m	< 0.7	0.7 - 3	> 3
mg/l	<450	450 - 2000	> 2000

Fuentes Yagüe 1998

Los tratamientos para solucionar los problemas de salinidad causados a largo plazo por el agua de riego son: lixiviación, drenaje, y cambio de cultivo por otro más tolerante a la salinidad. La lixiviación debería hacerse siempre, aun con aguas de buena calidad, salvo en caso de precipitaciones abundantes durante alguna época del año. El drenaje se practica cuando existen

problemas de ascensión de nivel freático. El cambio de cultivo por otro más tolerante se hace cuando las prácticas anteriores no son suficientes.

### 2.3.2 Problemas de infiltración

Cuando la velocidad de infiltración es baja (inferior a 3 mm/hr) puede ocurrir que las plantas no dispongan de la cantidad de agua que requieran sus exigencias, aparte de originar otros problemas debido al anegamiento, tales como la formación de costra superficial, falta de aireación, exceso de malas hierbas, podredumbre radical, etc. Al igual que ocurría con la salinidad se produce una reducción en el suministro de agua, aunque provocado por causas diferentes: con infiltración deficiente se reduce la cantidad de agua que penetra en la zona radical, mientras que con la salinidad se reduce la disponibilidad de agua que ya está contenida en la zona radical.

La velocidad de infiltración viene determinada por las características físicas y químicas del suelo. Una concentración alta de sales aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una concentración baja de sales o una proporción sodio con respecto al calcio y magnesio disminuye esa velocidad. Los iones de calcio y de magnesio son favorables para una buena estabilidad estructural del suelo, mientras el ion de sodio es desfavorable.

### Evaluación de los problemas de infiltración

Para evaluar los problemas de infiltración provocados por la calidad del agua se han propuesto diversos índices, siendo el más conocido el SAR o RAS (Relación de adsorción del Sodio), que valora la proporción relativa de sodio con respecto al Calcio y Magnesio y viene definido por la fórmula:

$$RAS = Na^+ / \sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}$$

Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, y Mg<sup>2+</sup>, representan, respectivamente, las concentraciones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego, expresado en meq/litro.

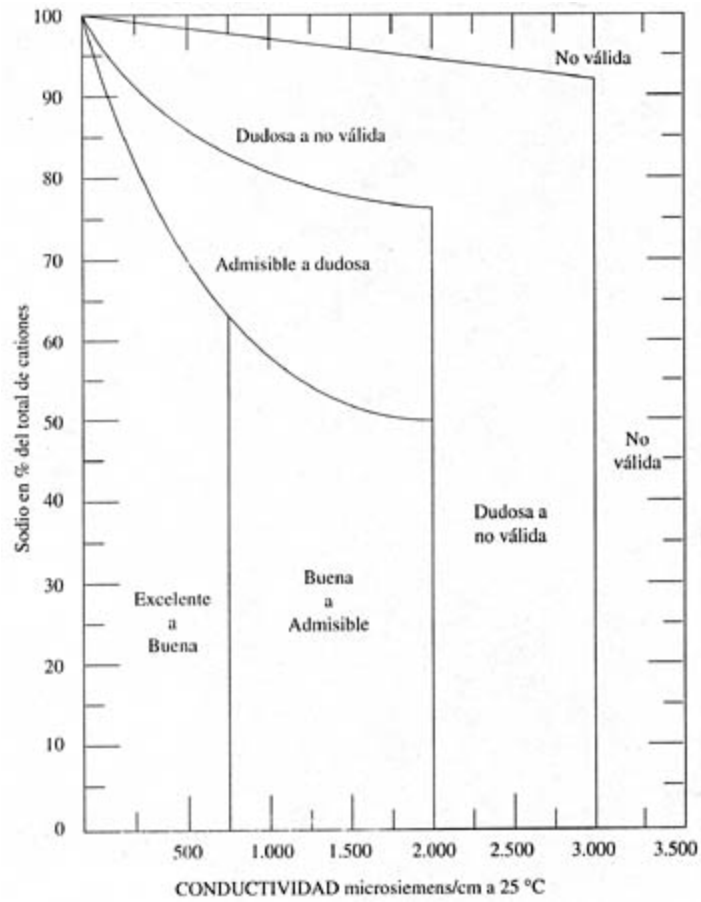
Para la clasificación del agua con respecto a los problemas de infiltración se han propuesto diversas normas. La FAO en la última edición de "La calidad del agua en la agricultura" propone las siguientes directrices de la Universidad de California (E.U) en función de la C.E y del RAS del agua de riego.

Tabla 2.7. Directrices para evaluar los problemas de infiltración

	<i>Restricciones de uso</i>		
	<i>Ninguna</i>	<i>Ligera o moderada</i>	<i>Severa</i>
RAS = 0 – 3	C.E > 0.7	0.7 – 0.2	> 0.2
= 3 – 6	< 1.2	1.2 – 0.3	> 0.3
= 6 – 12	< 1.9	1.9 – 0.5	> 0.5
= 12 – 20	< 2.9	2.9 – 1.3	> 1.3
= 20 – 40	< 5.0	5.0 – 2.9	> 2.9

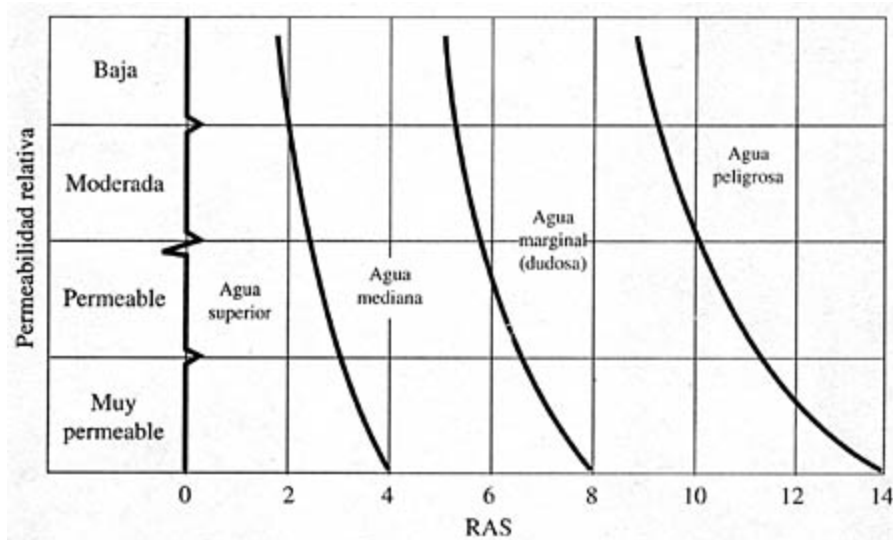
Fuentes Yagüe 1998

Las figuras muestran la reducción de la infiltración en función de la salinidad y del RAS

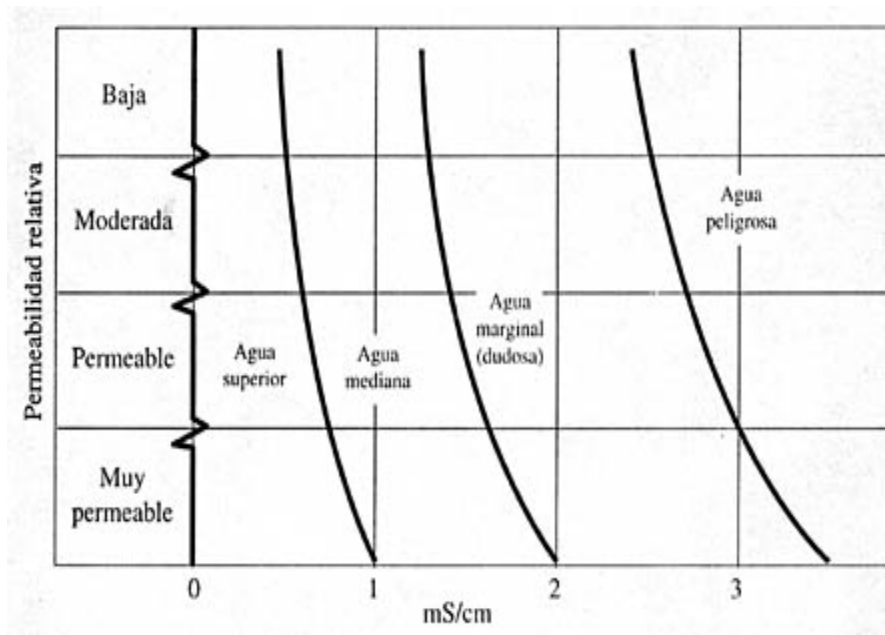


Fuente: Castañón 2000

Figura 2.2 Clasificación de las aguas de riego basada en el riego de salinidad



Fuente: Castañón 2000



Fuente: Castañón 2000

Figura 2.3 Reducción de la infiltración de la salinidad y del RAS de agua de riego.

Los tratamientos de los problemas de infiltración, para prevenir, corregir o retrasar los problemas de infiltración causados por la calidad del agua se recurre a diversos procedimientos:

- Incorporación de materia orgánica al suelo, con lo cual se favorece su estructura y, en consecuencia, la infiltración.
- Incorporación de productos (enmiendas) que modifica la composición química del agua o del suelo.
- Mezcla de agua de distinta calidad, si fuera posible.
- Manejo del riego

### 2.3.3 Toxicidad y otros efectos

Algunos iones absorbidos por las plantas en excesiva cantidad producen efectos tóxicos. Estos iones se acumulan en las zonas de transpiración más intensa, por lo general en los bordes y en las puntas de las hojas, en donde se detectan unos síntomas característicos de necrosis.

Los iones más peligrosos son: Sodio y Boro. La magnitud de los daños depende de la concentración, volumen de agua absorbida y tolerancia del cultivo. Los efectos son más rápidos cuando aumenta la temperatura (clima cálido o estación calurosa).

En la tabla 2.8 se indican las directrices para evaluar los problemas de toxicidad, dadas por el Comité de Consultores de la Universidad de California.

Tabla 2.8 Directrices para evaluar los problemas de toxicidad y otros efectos (FAO)

	Unidad	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	severa
<i>Toxicidad a iones específicos (En cultivos sensibles)</i>				
<i>Sodio:</i>				
<i>Riego por superficie</i>	<i>RAS</i>	<i>&lt;3</i>	<i>3 – 9</i>	<i>&gt;9</i>
<i>Riego por aspersión</i>	<i>meq/l</i>	<i>&lt;3</i>	<i>&gt;3</i>	
<i>Cloruro:</i>				
<i>Riego por superficie</i>	<i>meq/l</i>	<i>&lt;4</i>	<i>4 – 10</i>	<i>&gt;10</i>
<i>Riego por aspersión</i>	<i>meq/l</i>	<i>&lt;3</i>	<i>&gt;3</i>	
<i>Boro:</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;0.7</i>	<i>0.7 – 3.0</i>	<i>&gt;3.0</i>
<i>Otros efectos (en cultivos sensibles)</i>				
<i>Nitrógeno (nitrato)</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;5</i>	<i>5 – 30</i>	<i>&gt;30</i>
<i>Bicarbonato (en aspersión foliar)</i>	<i>meq/l</i>	<i>&lt;1.5</i>	<i>1.5 – 8.5</i>	<i>&gt;8.5</i>
<i>pH</i>	<i>Amplitud normal: de 6.5 – 8.4</i>			

Fuentes Yagüe 1998

### **Riesgo de obstrucciones en riego localizado.**

Las obstrucciones de los emisores de riego localizado pueden ser producidas por sólidos en suspensión, sustancias químicas y microorganismos contenidos en el agua de riego. Cuando actúan a la vez varios de estos elementos, la solución del problema resulta más difícil.

En la tabla 2.9 se incluye una escala de valores orientativos para identificar situaciones problemáticas. Las situaciones se refieren a aquellas donde hay una solución factible desde el punto de vista económico. En las situaciones de problema creciente se precisa hacer ensayos para determinar el coste de posibles soluciones.

Tabla 2.9 Riesgo de obstrucciones en riego localizado (FAO)

Obstrucciones	Unidades	Sin problema	Problema creciente	Problema grave
<i>Física</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;50</i>	<i>50 – 100</i>	<i>&gt;100</i>
<i>Sólidos en suspensión</i>				
<i>Química</i>				
<i>PH</i>		<i>&lt;7.0</i>	<i>7.0 – 8.0</i>	<i>&gt;8.0</i>
<i>Sólidos solubles</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;500</i>	<i>500 – 2 000</i>	<i>&gt;2 000</i>
<i>Manganeso</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;0.1</i>	<i>0.1 – 1.5</i>	<i>&gt;1.5</i>
<i>Hierro</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;0.1</i>	<i>0.1 – 1.5</i>	<i>&gt;1.5</i>
<i>Ácido sulfhídrico</i>	<i>mg/l</i>	<i>&lt;0.5</i>	<i>0.5 – 2.0</i>	<i>&gt;2.0</i>
<i>Biológica</i>				
<i>Poblaciones bacterianas</i>	<i>Máx.núm/ml</i>	<i>&lt;10 000</i>	<i>10 000 – 50 000</i>	<i>&gt;50 000</i>

Fuentes Yagüe 1998

En lo referente al Manganeso se presentan problemas de toxicidad a concentraciones menores de las precisas para que haya problemas graves de obstrucción.

Las partículas sólidas en suspensión se eliminan mediante sedimentación y filtración. Los precipitados químicos que se producen por exceso de carbonato o sulfatos de Calcio o de

Magnesio y por la oxidación de hierro se ven favorecidos por altas temperaturas y valores altos de pH.

Los análisis de laboratorio requerido para utilizar las directrices técnicas, así como valores normales de estos análisis en aguas de riego, viene especificado en la tabla 2.7

*Tabla 2.9 Valores normales de análisis de agua de riego (FAO)*

<b>Salinidad</b>		
Conductividad eléctrica	0.3	dS/m
Total de sólidos en solución	0 – 2 000	mg/l
Calcio	0 –20	meq/l
Magnesio	0 –5	meq/l
Sodio	0 –40	meq/l
Carbonatos	0 –0.1	meq/l
Bicarbonatos	0 – 10	meq/l
Cloruro	0 –30	meq/l
Sulfato	0 –20	meq/l
<b>Nutrientes</b>		
Nitrógeno (nitrato)	0 –10	mg/l
Nitrógeno (amonio)	0 - 5	mg/l
Fósforo (fosfato)	0 – 2	mg/l
Potasio	0 – 2	mg/l
<b>Varios</b>		
Boro	0 –2	mg/l
PH	6 – 8.5	
RAS	0 - 15	

Fuentes Yagüe 1998

## 2.4. Métodos de riego

### 2.4.1. Riego por superficie

El riego por superficie en un sistema de riego en donde el agua fluye por gravedad utilizándose la superficie del suelo agrícola como parte del sistema de distribución del agua. El caudal disminuye a medida que el agua avanza por la parcela regada, debido a la infiltración del suelo.

Las pérdidas de agua se producen principalmente por escorrentía superficial y por la percolación profunda, generalmente en este sistema de riego produce problemas por erosión si no se controla correctamente el cauce del agua, la percolación profunda produce lixiviación de nutrientes y sales del suelo.

El riego por superficie se limita a terrenos con pendientes suaves y con suelos relativamente profundos, el riego por superficie ofrece la ventaja, con respecto a otros sistemas de riego, de muy bajo costo de instalación, operación y conservación del sistema.

El riego por superficie se puede hacer de dos formas:

- **A. El riego a manta:** el agua moja toda la superficie del suelo. Se divide en dos modalidades:

**1. Riego por escurrimiento o por fajas:** este riego tiene una ligera pendiente longitudinal que facilita el avance del agua, en este caso el agua sobrante vierte en una red de desagües o se almacena. En este riego el terreno se divide en porciones rectangulares llamadas melgas,

separados unos de otro mediante caballones o bordos, estos se construyen en sentido perpendicular a las curvas de nivel, y han de tener la altura suficiente para contener el agua dentro de la fajas.

Este método de riego se utiliza sobre todo en cultivos extensivos, tales como alfalfa, pastos y cereales, los suelos adecuados para este riego son los de textura media con buena permeabilidad. En los suelos arcillosos el agua se debe distribuir con lentitud para facilitar la penetración en toda profundidad de las raíces mientras que en los arenosos debe ser rápida, para evitar pérdidas por percolación profunda. Las pendientes más recomendadas están entre 0.2 y 0.5 % en suelos arcillosos y cultivos de raíces profundas se pueden utilizar pendientes próximas 0% y en suelos arenosos se puede llegar hasta el 2 %.

**2. Riego por inundación o por estanques:** las melgas de forma rectangular están bordeadas por diques que impiden la salida del agua, un caso especial de esta modalidad es el riego del arroz en donde los caballones suelen seguir curvas de nivel. El terreno se divide en compartimientos, canchales, tableros cerrados, dentro de los cuales se echa un caudal superior a la velocidad de infiltración quedando el agua estancada hasta que penetre en el suelo, la nivelación se hace con pendiente del 0%.

Las formas de efectuar el riego son:

*Por inundación temporal:* se aplica una cantidad de agua equivalente a la dosis de riego y se deja en la superficie hasta que se infiltra totalmente. Se aplica en cultivos que toleran el terreno encharcado durante algún tiempo, tales como: forrajes, algodón, maíz, frutales etc.

*Por inundación permanente:* es el que se utiliza habitualmente para el cultivo del arroz. Los compartimientos se llenan de agua hasta el nivel deseado y una vez alcanzado ese nivel se continúa el aporte de agua pero con un caudal inferior.

**B. Riego por surcos:** el agua fluye por surcos paralelos infiltrándose por el fondo y costados del mismo, sin que la totalidad de la superficie del suelo quede mojada, los surcos pueden ser con pendiente cero en surcos cortos, o con pendientes distintas a cero en surcos largos. La forma más corriente es la sección en V abierta con una altura que varía, sobre todo con el tipo de cultivo, el rango de alturas se encuentra entre 20 \* 80 cm. Los surcos con poca altura requieren una buena nivelación del terreno para evitar el desbordamiento del agua de un surco a otro, la distancia entre el eje de los surcos depende de los siguientes factores: el tipo de suelo tipo de cultivo y maquinaria que se puede utilizar, el movimiento horizontal y vertical de la agua depende fundamentalmente de su textura.

#### **2.4.2. Riego por aspersión.**

El riego por aspersión es una técnica de riego en donde el agua se aplica en forma de lluvia por medio de unos aparatos de aspersión alimentados por agua a presión. Estos aparatos deberán asegurar el reparto uniforme sobre la superficie que se pretende regar.

El riego por aspersión puede realizarse de 2 formas:

*Riego individual,* basado en el aprovechamiento individual de una fuente de suministro de agua.

*Riego colectivo,* en donde se proporciona agua a presión en unas tomas o bocas de riego situados en las distintas unidades de explotación.

Hay dos modalidades de utilización de esta toma:

Por turno (cada toma se puede utilizar durante periodos previstos de antemano) y a la demanda (Cada toma se puede utilizar en cualquier momento). El riego por turno es recomendable en zonas de monocultivos y suelo homogéneo, el riego a la demanda supone una mayor complejidad en la distribución del agua y un mayor costo.

## Ventaja y desventajas del riego por aspersión

### Ventajas:

- Se necesita menos mano de obra.
- No es necesario la preparación previa del terreno, queda disponible para el cultivo la mayor parte del terreno regable al suprimir canales acequias y regadera.
- Se puede utilizar en gran variedad de terrenos.
- La eficiencia del riego por aspersión es del orden de un 80% frente al 40 – 70% del riego por superficie.
- Hay una mayor posibilidad de mecanizar los cultivos.
- Con respecto al riego por superficie se reduce la pérdida de elementos fertilizantes por lixiviación.
- Se puede utilizar contra heladas, fertilizaciones y tratamientos fitosanitarios.

### Desventajas:

- Elevado costo de primera instalación.
- Elevado gasto de energía.
- Dificultades en la fecundación por el mojado total que se realiza en la época de floración de algunos cultivos.
- El viento dificulta el reparto uniforme del agua.

### Dispositivos de aspersión.

Los dispositivos de aspersión tienen por objetivo pulverizar el chorro de agua en gotas finas y repartirla uniformemente por el terreno pueden ser de varias clases; tuberías perforadas, aspersores no giratorios y aspersores giratorios.

#### Tuberías perforadas.

Las tuberías perforadas están constituidas por tubos provistos de orificios calibrados o pequeñas boquillas distribuidas en toda la longitud con un espaciado de 10 a 15 cm, riegan franjas de terreno de 5 a 15m y funcionan con poca presión. Se limita a campos hortícolas o florales.

#### Aspersores no giratorios.

El aspersor tiene un orificio calibrado que dispersa el chorro al chocar con un deflector colocado en forma perpendicular al eje del aspersor, utilizan baja presión con un radio de alcance de 0.5 a 5 m, se aplican en invernaderos y jardinería.

#### Aspersores giratorios.

Están constituidos por una o más tubería con boquillas calibradas con un diámetro de 2 a 20 mm el aspersor gira alrededor de su eje que le permite regar su superficie en un círculo.

Según el mecanismo que produce el movimiento giratorio se clasifica de la siguiente forma:

- *Aspersores de brazo oscilante:* el movimiento es discontinuo debido a impulsaciones periódicas provocadas por el chorro del agua que golpea intermitentemente un brazo oscilante el cual vuelve a su posición inicial por la acción de un resorte.
- *Aspersores de reacción:* están basados en un molinete hidráulico en donde la reacción a la salida del agua provoca el movimiento giratorio, son de giro rápido, se utilizan en jardinería, y en riego bajo las copas de los árboles.
- *Aspersores de turbina:* el chorro de agua incide sobre una turbina (rueda con aspas). Suministran grandes caudales.



Según la presión de funcionamiento los aspersores giratorios se clasifican de la siguiente forma:

- De baja presión: presión inferior a 2 kg/cm<sup>2</sup> caudal inferior a 1,000 l/h, espaciamento inferior a 12 – 15 m.
- De presión media: presión comprendida entre 2 y 4 kg/cm<sup>2</sup> con un caudal entre 1 000 y 6 000 l/hr espaciamentos entre 12 x 12 m y 24 x 24 m.
- De alta presión: presión de 4 kg/cm<sup>2</sup>, caudal superior a 6 000 l/hr. dentro de esta categoría se sitúan los cañones de riego dotados de tres boquillas, con caudales de hasta 200 m<sup>3</sup>/hr

Disposición de las tuberías en los sistemas estacionarios.

- Disposición unilateral.
- Disposición bilateral.

Para la elección de la instalación de riego hay que tener en cuenta una serie de factores como: climáticos, agronómicos, técnicos, económicos, y prácticos, dentro de los factores climáticos hay que tener en cuenta la dirección del viento, porque distorsiona el modelo de reparto de los aspersores, la magnitud de esta distorsión depende de la velocidad del viento y del tamaño de las gotas es recomendable regar cuando la velocidad de éste es inferior a 2 m/seg.

El tipo y diámetro de las boquillas determinan el modelo de reparto del aspersor, cada aspersor se diseña para operar en un rango de presión, dentro del cual la distribución del agua se acomoda en reparto de agua normal. En general los marcos y espaciamentos inferiores a 12 m hace un riego más uniforme y precisan de menores presiones, los marcos superiores a 24 m presentan ventajas e inconvenientes opuestos.

El grado de cobertura de la red viene condicionado por el límite de inversión que el agricultor pueda realizar y por la disponibilidad de mano de obra. En términos generales se pueden tomar las siguientes recomendaciones:

- Es necesario que el fabricante suministre manuales con especificaciones del sistema.
- Siempre que sea posible, hacer riego nocturno, el viento es más suave y hay menos pérdidas por evaporación.
- Procurar que la pluviometría sea de 5 – 7 mm/hr.
- Regar formando bloques de riego, utilizar aspersores de baja presión con separación entre aspersores a 12 – 15 m para cultivos frágiles.
- Utilizar aspersores de mediana presión en marcos medianos 12 x 12 a 24 x 24 m para una gran variedad de cultivos extensivos e intensivos.
- Utilizar cañones de riego para riegos de auxilio en cultivos pocos frágiles y vientos poco intensos.

### **2.4.3 Riego por goteo.**

#### **2.4.3.1 Definición de riego por goteo**

El riego localizado consiste en aplicar el agua a una zona más o menos registrada del volumen del suelo que habitualmente ocupan las raíces. Sus características principales son:

- No se moja la totalidad del suelo.
- Reutilizan pequeños caudales a baja presión.
- El agua se aplica con alta frecuencia.

La localización del agua en la proximidad de las plantas se manifiesta en que se modifican algunas características de las relaciones suelo-agua-planta, tales como: reducción de la evaporación, distribución del sistema radical, régimen de salinidad, etc.

El riego localizado incluye:

- *Riego por goteo*: el agua se aplica mediante dispositivos que la echan gota a gota o mediante flujo continuo, con un caudal inferior a 16 litros/hora por punto de emisión o por metro lineal de manguera de goteo.
- *Riego por microaspersión*: el agua se aplica mediante dispositivos que la echan en forma de lluvia fina, con caudales comprendidos entre 16 y 200 litros/hora por punto de emisión.

El riego localizado en las relaciones suelo-agua-planta

La localización del agua y la alta frecuencia de su aplicación tienen unas repercusiones importantes en las relaciones suelo-agua-planta.

Pérdida de agua en el suelo

La evapotranspiración comprende las pérdidas de agua ocasionadas por evaporación en el suelo y por transpiración de la planta. En el riego localizado se moja una parte de la superficie del suelo; por tanto, las pérdidas por evaporación serán menores que en aquellos sistemas de riego en donde se moja toda la superficie del suelo. En cambio la transpiración puede ser mayor en el riego localizado, debido a que el suelo seco se calienta más que el suelo húmedo y ello provoca un aumento de temperatura del follaje.

Régimen de humedad

Existe un nivel de agua en el suelo, llamado nivel mínimo, por encima del cual la planta se desarrolla satisfactoriamente. Cuando el agua del suelo desciende por debajo del nivel mínimo, la planta tiene que hacer un esfuerzo mayor para absorber el agua, lo cual se traduce en una menor absorción y en consecuencia una menor transpiración y una disminución del rendimiento.

El nivel mínimo depende, del tipo de cultivo y de su estado de desarrollo. A su vez, el nivel mínimo se caracteriza por una cantidad de agua existente en un suelo determinado, pero de ninguna manera depende del método de riego utilizado. En el riego localizado el intervalo entre riegos se elige a voluntad, por lo que el contenido de humedad del suelo se mantiene siempre alejado del nivel mínimo.

Aireación del suelo

En los riegos localizados el suelo se satura en un volumen muy reducido próximo al emisor, con lo cual no se presentan problemas.

Distribución del sistema radical

Las plantas pueden desarrollarse normalmente con un volumen de suelo inferior al que normalmente ocupan. El sistema radical se desarrolla rápidamente en la zona húmeda disponible, por lo que no es raro que en la zona húmeda del riego localizado la concentración de raíces sea 3-4 veces mayor que en otros riegos no localizados.

En términos generales se puede asegurar que los cultivos se pueden desarrollar normalmente cuando la zona húmeda ocupa el 30-40% del área sombreada por el cultivo. Hay mayor seguridad cuando el volumen mojado cubre más de ese porcentaje, pero la instalación de riego resulta más cara.

## El bulbo húmedo

Se llama bulbo húmedo al volumen del suelo humedecido por un emisor de riego localizado. El movimiento de agua en el suelo determina la forma y tamaño del bulbo húmedo, que tiene una gran importancia, ya que en él se desarrolla el sistema radical de las plantas.

El agua en el suelo se mueve en todas direcciones, pero en unos casos lo hace con mayor facilidad que en otros, dependiendo de la porosidad del suelo; en los poros grandes el agua circula por su propio peso, desde arriba hacia abajo, mientras que en los poros pequeños el agua circula por capilaridad en todas direcciones.

La forma y tamaño del bulbo húmedo dependen de los siguientes factores:

- *La textura del suelo:* en suelos arenosos, con gran cantidad de poros grandes, el agua circula con mayor facilidad hacia abajo, mientras que en suelos arcillosos el agua se extiende con más facilidad hacia los lados. En consecuencia en suelos arenosos el bulbo tiene forma alargada y en suelos arcillosos tiene forma achatada.
- *El caudal de cada emisor:* cuando el agua empieza a salir por un emisor se forma un pequeño charco, a la vez que el suelo empieza a absorber agua en toda la superficie del mismo. El tamaño del charco depende del caudal que sale por el emisor, a mayor caudal corresponde una superficie mayor del charco y, por tanto, un bulbo más extendido en sentido horizontal.
- *El tiempo de riego:* a medida que aumenta el tiempo de riego el tamaño del bulbo aumenta en profundidad, pero apenas aumenta su extensión en sentido horizontal.

## Salinidad

Las sales contenidas en el suelo y las aportadas con el agua de riego se mantienen en disolución en el agua del suelo. La planta absorbe el agua y una pequeña parte de sales, quedando el resto en el suelo. A medida que disminuye el agua aumenta la concentración de sales, con lo cual aumenta la tensión osmótica de la disolución y las plantas encuentran mayor dificultad para absorber el agua.

En el riego localizado se mantiene un nivel alto de humedad y en consecuencia, un nivel bajo de salinidad. Por eso se pueden utilizar aguas con mayor contenido de sal que en otros métodos de riego.

## Fertirrigación.

En el riego localizado el sistema radical de las plantas está contenido en el bulbo húmedo prácticamente en su totalidad. Por tanto hay que localizar el fertilizante dentro del bulbo, y el mejor modo de hacerlo es aplicar los abonos disueltos en el agua de riego. Ello permite hacer la fertilización conforme lo exijan las necesidades de la planta.

### **2.4.3.2 Ventajas y desventajas del riego localizado**

#### Ventajas

- Mejor aprovechamiento del agua.
- Posibilidad de utilizar aguas con un índice de salinidad más alto.
- Mayor uniformidad de riego.
- Mejor aprovechamiento de los fertilizantes.
- Aumento de la cantidad y calidad de cosechas.
- Menor infestación por malas hierbas, debido a la menor superficie de suelo humedecida.
- Posibilidad de aplicación de fertilizantes, correctores y pesticidas con el agua de riego.

- Facilidad de ejecución de las labores agrícolas, al permanecer seca una buena parte de la superficie del suelo.
- Ahorro de mano de obra.

#### Desventajas

- Se necesita un personal más calificado.
- Hay que hacer un análisis inicial del agua.
- Cuando se maneja mal el riego existe riesgo de salinización del bulbo húmedo.
- Hay que vigilar periódicamente el funcionamiento del cabezal y de los emisores con el fin de prevenir las obstrucciones.
- Es preciso hacer un control de la dosis de agua, fertilizante, pesticida y productos aplicados al agua de riego.
- Exige una mayor inversión inicial.

### 2.4.3.3. Componentes de la instalación

Los componentes de la instalación de riego localizado son los siguientes:

#### 2.4.3.3.1 Emisores

Los emisores son dispositivos que controlan la salida del agua desde las tuberías laterales. Según el caudal que proporcionan se dividen en dos grupos:

- *Emisores de bajo caudal*, inferior a 16 litros/hora. Comprende los goteros y las tuberías emisoras o climas.
- *Emisores de alto caudal*, comprendido entre 16 y 200 litros/hora. Comprende los difusores y los microaspersores.

Un emisor debe reunir las siguientes características:

- De instalación fácil.
- Poco sensible a la obstrucción.
- Poco sensible a las variaciones de presión.
- De bajo costo.
- Que mantenga sus características a lo largo del tiempo.

Los emisores de bajo caudal suelen trabajar a una presión próxima a los 10 mca, mientras que los de alto caudal suelen hacerlo a 20 mca. Las cintas de exudación suelen trabajar entre 1 y 3 mca.

Relación caudal – presión.

El agua atraviesa el emisor a través de uno o varios conductos, cuya configuración determina su comportamiento hidráulico. En cualquier emisor (salvo en las cintas de exudación el caudal de descarga y la presión de servicios se relaciona mediante la ecuación) (Yagüe1998)

$$q = kh^x$$

q = Caudal del emisor, en litros / hora

k = Coeficiente característico de cada emisor, que equivale al caudal que proporcionaría a una presión de 1 mca.

h = Presión a la entrada del emisor, en mca.

X = Exponente de descarga característico de cada emisor.

Los fabricantes deberán proporcionar siempre la ecuación y la curva características del emisor, indicando, además, el intervalo de presiones efectivas de trabajo en el cual éste se comporta como autocompensante.

#### Uniformidad de fabricación:

En teoría todos los emisores de una misma marca y modelo deberían dar el mismo caudal actúan a la misma presión y temperatura, pero en la práctica no ocurre así. Las variables de fabricación (tipo de material, temperatura, desgaste de la maquinaria etc.) afectan a la dimensión del emisor, y por tanto, a su caudal. Para valorar la uniformidad de una muestra de emisor se ha establecido el *coeficiente de variación de fabricación* (C V), según el cual se establecen dos categorías de emisores:

Categoría A. Coeficiente de variación inferior a 0.05

Categoría B. Coeficiente de variación comprendido entre 0.05 y 0.1.

#### Sensibilidad a las obstrucciones

La sensibilidad a las obstrucciones depende de las características del emisor (mínimo diámetro de paso, recorrido más o menos sinuoso del agua y velocidad de circulación del agua dentro del emisor), de la calidad del agua y de las condiciones de filtrado.

Según el mínimo diámetro de paso de los emisores se establece la siguiente clasificación con respecto a su sensibilidad a las obstrucciones: cuadro 2.1

<i>Diámetro mínimo (mm)</i>	<i>Sensibilidad</i>
<i>Gotero y tuberías emisoras</i>	
<i>&lt; = 0.7</i>	<i>Alta</i>
<i>0.7 – 1.5</i>	<i>Media</i>
<i>&gt; = 1.5</i>	<i>Baja</i>
<i>Difusores y microaspersores</i>	
<i>&lt; = 0.4</i>	<i>Alta</i>
<i>0.4 – 0.7</i>	<i>Media</i>
<i>&gt; = 0.7</i>	<i>Baja</i>

Fuentes Yagüe 1998

El riesgo de obstrucción disminuye a medida que aumenta la velocidad, por cuyo motivo es preferible el régimen turbulento al laminar.

Aun cuando el emisor tenga una baja sensibilidad a las obstrucciones, éstas pueden provenir de un filtrado inadecuado o de un incorrecto manejo de las instalaciones.

#### Sensibles a los cambios de temperatura

Los emisores que trabajan a régimen laminar son muy sensibles a las variaciones de temperatura, ya que al aumentar ésta se incrementa el caudal, lo que origina una disminución de la eficiencia de riego o de la uniformidad en la distribución del agua en aquellas instalaciones en donde se riega a diferentes horas del día.

## Goteros

Los goteros cuyo régimen se aproxima al laminar son sencillos y baratos, pero son sensibles a las obstrucciones, su caudal varía mucho con los cambios de presión y, además, están influidos por la temperatura del agua los goteros de régimen turbulento más o menos perfectos son más resistentes a las obstrucciones, su caudal tiene una sensibilidad moderada con respecto a los cambios de presión (exponente de descarga alrededor de 0.5) y no son prácticamente afectados por la temperatura del agua. Los goteros se pueden clasificar:

- De largo conducto: es un tubo de pequeño diámetro y gran longitud. Su exponente de descarga varía de 0.75 a 1 debido a su régimen laminar, ya no se utiliza como gotero, sino como elemento de conducción.
- De laberinto: recorre una trayectoria en laberinto, por lo que aumenta la turbulencia del flujo (exponente de descarga entre 0.45 y 0.55) es poco sensible a las obstrucciones y a los cambios de presión y temperatura.
- De orificio: El agua descarga a través de uno o varios orificios de pequeño diámetro- su régimen es turbulento (exponente de descarga próximo a 0.5), poco sensible a las variaciones de presión y temperatura, pero se obstruye con facilidad debido a pequeño diámetro de los orificios.
- De remolino o "vortex": Tiene una cámara circular en donde se produce un remolino, en cuyo centro se localiza el punto de emisión. El exponente de descarga varía de 0.45 a 0.55, por lo que son pocos sensibles a las variaciones de presión.
- Autocompensante: Tiene un dispositivo que permite variar el tamaño del conducto con relación a la presión de entrada. El dispositivo es generalmente una membrana flexible que se deforma bajo el efecto de la presión, limitando el caudal. (Exponente de descarga de 0 a 0.3)

Los goteros pueden tener uno o varias salidas (normalmente 2, 4, o 6). En goteros de una salida, el caudal más usual es de 4 litros / hora en frutales y de 2 litros / hora en horticultura.

La conexión del gotero a la tubería puede hacerse de dos formas:

- Interlínea. Se instala entre dos secciones transversales de la tubería lateral. Cuando el gotero se conecta a tubería de polietileno, el máximo incremento de diámetro ocasionado en la tubería como consecuencia de las instalaciones del gotero debe ser del 13%.
- En derivación o sobre línea. Se instala sobre la pared de la tubería lateral mediante un orificio practicado con un sacabocados. El fabricante debe asumir la herramienta adecuada para asegurar la estanquidad de la conexión con cada tipo de gotero. El gotero puede estar desplazado de la tubería mediante un microtubo que se introduce en la tubería.

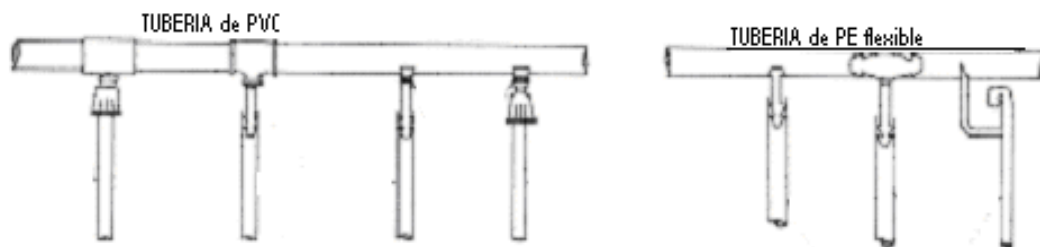


Figura 2.4 Collarín de toma

El fabricante debe suministrar al usuario los siguientes datos:

- Marca registrada o nombre del fabricante.
- Caudal nominal y presión de funcionamiento.
- Categorías del emisor (A o B).

- Instrucciones para la conexión a la tubería.
- Tipo de tubería aconsejable y sus medidas
- Dimensión mínima de paso de agua.
- Curva caudal – presión.
- Ecuación del emisor.
- Intervalo de presiones de funcionamiento.
- Instrucciones para limpieza.
- Limitaciones de uso (fertilizantes, productos químicos)
- Longitud equivalente (en metros de tubería) de la pérdida de carga originada por la conexión del emisor a la tubería.

### Tuberías emisoras

Las tuberías emisoras conducen y a la vez aplican el agua a través de unas perforaciones poco espaciadas o a través de la pared porosa. El caudal de descarga no sobrepasa de 16 litros la hora / metro lineal, por lo general son sensibles a las obstrucciones. Trabajan a presiones inferiores a 10 mca y el exponente de descarga varía de 0.5 a 0.9. Por lo general son de Polietileno, son de bajo coste y se utilizan para riego de cultivos en línea, tipo hortaliza, cuyo marco requeriría gran cantidad de goteros. Figura 2.5

Hay dos tipos de tubería emisora: manguera y cinta porosa o de exudación. A su vez la manguera puede adoptar dos modalidades:

- Manguera perforada. Es una tubería de poco espesor, con perforaciones espaciadas uniformemente. A presiones muy pequeñas gotean y a presiones mayores sale un chorro continuo. Son muy sensibles a las obstrucciones.
- Manguera de doble pared. Consta de dos tuberías concéntricas o adyacentes. El agua circula por una de ellas pasando a la otra a través de unos pequeños orificios, de donde sale el exterior por unas perforaciones.

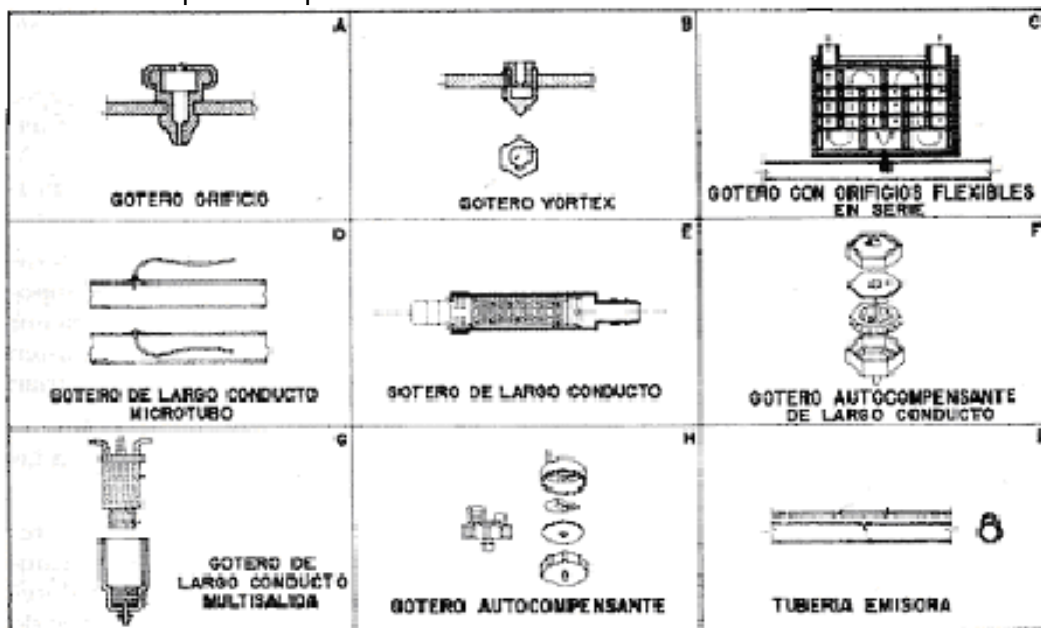


Figura 2.5 Goteros y tuberías emisoras

En las cintas porosas o de exudación el agua sale a través del material poroso del que están constituidas. Trabajan a presiones comprendidas entre 1 y 3 mca, con un caudal de 1 a 2 litros / hora

y metro lineal de cinta. Su régimen es laminar, por cuya razón se han de utilizar en terrenos de poca pendiente, si se quiere uniformidad. Su vida útil es corta.

### Microaspersión

La microaspersión consiste en aplicar el agua en forma de agua fina mediante dispositivos que la distribuyen en un radio no superior de los tres metros. Los dispositivos que tienen tuberías fijas se llaman difusores los que tienen algún elemento con movimiento de rotación se llaman microaspersores trabajan a una presión entre 10 y 20 mca, con caudales desde 16 a 200 l/hora. En los difusores el chorro de agua incide sobre un deflector que cambia la dirección del agua. Los dispositivos de microaspersión pueden ser: de largo conducto, de orificio, de remolinos o autocompensantes. Los más utilizados son los de orificio que tienen un exponente de descarga de 0.5. El riego por microaspersión es una solución para resolver estos inconvenientes: con respecto al riego por goteo presenta además estas ventajas:

- Mayor uniformidad de riego, consecuencias de mejores factores hidráulicos y de fabricación de los emisores.
- Mayor facilidad de inspección para corregir anomalías.
- Menor proporción de obstrucciones debido a un mayor diámetro de la boquilla de los emisores y a una mayor velocidad del agua.
- Mayor facilidad para controlar las sales del bulbo húmedo ya que son más fáciles los riegos de lavado.

En cambio presenta el inconveniente de un mayor costo que el goteo debido a que emplea mayor caudal (lo que obliga a incrementar el diámetro de las laterales) y una mayor presión (lo que repercute desfavorablemente en el costo de la energía). El fabricante debe suministrar al usuario los siguientes datos relativos a difusores y microaspersores:

- Marca registrada.
- Instrucciones de instalación y funcionamiento.
- Dimensión mínima del paso del agua.
- Caudal nominal e intervalo de presiones de trabajo
- Superficie regada y curvas de distribución
- Alcance efectivo
- Curva caudal presión
- Categorías del emisor, en relación con la uniformidad de distribución del caudal
- Instrucciones para la limpieza.
- Pérdida de carga originada por conexión en tubería

### 2.4.3.3.2. Tuberías

Se considera como tubería a todo conducto cerrado al desarrollo importante (mayor de 500 veces su diámetro interior), que transporta agua sin superficie libre, es decir, a presiones y en la que el movimiento del líquido no depende exclusivamente de una pendiente favorable continua.

Las tuberías empleadas en los modernos sistemas de riego son de sección circular, caracterizada por:

- a) Su diámetro exterior
- b) Su diámetro interior
- c) El área de su sección transversal
- d) Su longitud
- e) Su volumen
- f) El grosor de su pared
- g) Su clase, que expresa la presión de trabajo o nominal en atmósferas.
- h) Los revestimientos protectores interiores y /o exteriores.



Los materiales más utilizados en instalaciones de riego son: plástico (PVC y PE) fibrocemento y aluminio.

Las tuberías de plástico son: policloruro de vinilo (PVC) y polietileno (PE).

Con respecto a la presión hay que considerar:

- Presión nominal, que sirve para tipificar y timbrar los tubos.
- Presión de trabajo, que es la máxima presión interna a la que puede estar sometido un tubo en servicio a la temperatura de utilización.

Tubería de policloruro de vinilo (PVC)

El PVC tiene un peso específico de  $1.4 \text{ kg/dm}^3$  y un coeficiente de dilatación elevado ( $7 \times 10^{-5}$ ). La unión de los tubos y piezas especiales se hace por dos formas por encolado (un extremo del tubo es liso y el otro es abocardado) y por junta elástica (mediante un anillo de goma) elástica que se aloja en una ranura de un extremo abocardado.

El tubo de PVC es ligero, resistente, de fácil acoplamiento y bajo costo, suele ser el material más barato para diámetros inferiores a 200 mm (para diámetros inferiores a 50 mm suele ser mas barata la tubería instalada de polietileno). Los tubos se presentan en longitudes de 5 o 6 m

Tubería de polietileno (PE)

El polietileno es un material flexible que tiene un elevado coeficiente de dilatación lineal ( $2 \times 10^{-4}$ ). Pero este inconveniente no ofrece problemas en el tendido de esta tubería, a condiciones de que se dejen ondulaciones que absorban los alargamientos provocados por las dilataciones.

Para evitar la degradación producida por efecto de la luz solar se añade negro de humo en el proceso de fabricación, lo que permite utilizarlo en condiciones a la intemperie.

La unión de los tubos de polietileno se efectúa mediante abrazadera o manguitos. No admiten encolado ni roscado. Figura 2.6

La tubería es ligera, flexible, resistente y se puede instalar a la intemperie en cuyo caso hay que prever la temperatura alcanzada por el agua, para elegir convenientemente el timbrado adecuado

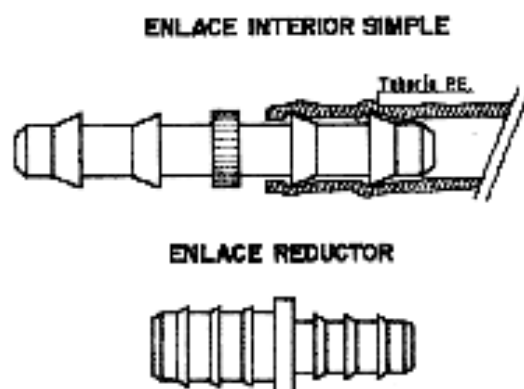


Figura 2.6 unión de tubos de polietileno

### Pérdidas de carga en tuberías a presión

Cuando el agua circula por la tubería está en contacto con toda la superficie de la misma es preciso que exista una cierta presión. Esta presión va disminuyendo a medida que el agua fluye, debido al rozamiento de las láminas del líquido entre sí y con las paredes de la tubería:

Las pérdidas de carga (h) son de presión en una tubería y pueden ser de dos clases:

- Pérdidas ocasionadas por el rozamiento del líquido a lo largo de las paredes de la tubería (hr) y,
- Pérdidas localizadas en elementos singulares (hr) debidas a los torbellinos que se forman como consecuencia de variaciones de la velocidad en magnitud, dirección o ambas cosas a la vez

Pérdidas de carga (h) = pérdidas por rozamiento (hr) + pérdidas en puntos singulares.

### **Pérdidas de carga por fricción**

Las pérdidas por rozamiento se pueden calcular mediante la fórmula fundamental de Darcy – Weisbach, que engloba las llamadas leyes de Chezy.

- Estas pérdidas son directamente proporcional a la rugosidad e inversamente proporcional al diámetro de la tubería.
- Son directamente proporcional al cuadrado de la rugosidad del líquido que circula

$$h_r = f (L/D) (V^2/2g)$$

De la fórmula anterior se deduce.

$$h_r = 0.0826 f (Q^2 / D^5) L$$

hr = Pérdidas de carga por rozamiento, en m.

f = Factor de fricción, adimensional.

V = Velocidad media del agua, en m / seg.

D = Diámetro interior de la tubería, en m.

L = longitud de la tubería, en m.

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m / seg<sup>2</sup>).

q = caudal, en m<sup>3</sup> / seg.

En rugosidad laminar, el factor de fricción (f) es independiente de la rugosidad y del estado de la tubería, aunque no de la temperatura, en régimen turbulento depende del tipo de flujo:

- En flujo turbulento liso depende del número de Reynolds (Re)
- En flujo turbulento rugoso depende de la rugosidad relativa.
- En régimen turbulento intermedio depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

Las pérdidas de carga por rozamiento se pueden calcular, con sencillez y suficiente aproximación, mediante fórmulas empíricas, a condición de que se utilicen dentro de las condiciones, estas fórmulas tienen la expresión general:

$$J = (C) (D^{-a}) (Q^b)$$

Donde:

J = Pérdida de carga en mca por metro lineal de tubería.

D = Diámetro interior, en m.

Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/seg

C, a, b son constantes características de cada fórmula (el valor de b está comprendido entre 1.75 y 2)

La fórmula más utilizada para tuberías de riego localizado para  $3\ 000 < Re < 10^5$  es la de BLASIUS. Con un régimen turbulento liso ( $b = 1.75$ ):

$$J = (0.00083) (D^{-4.75}) (Q^{1.75})$$

### Pérdidas de carga en elementos singulares

Las pérdidas localizadas en elementos singulares ( $h_s$ ) se pueden expresar de la forma:

$$h_s = (K_s) (V^2 / 2g)$$

En donde:

$h_s$  = Pérdida de carga por singularidad, en m.

$K_s$  = Coeficiente de resistencia del elemento singular.

$V$  = Velocidad media en m/seg.

$g$  = Aceleración de la gravedad (9.81m/seg)

Un método práctico de calcular las pérdidas de carga localizadas consiste en expresarlas en la forma de *longitud equivalente*, que es la longitud de tubería recta que con el mismo caudal y diámetro produce la misma pérdida de carga que el elemento singular

Las pérdidas de carga localizadas se calculan aplicando la fórmula:

$$L_e = (k_s \times D) / f$$

La longitud equivalente puede a su vez, expresarse como cierto número de ( $n$ ) de diámetros de tubo ( $D$ ).

$$L_e = n \times D$$

Lo que supone determinar  $n$  para cada elemento singular

$$n = L_e / D = K_s / f$$

Los valores de  $K_s$  y  $L_e$  se obtienen experimentalmente se dan tabulados o en ábacos. En la práctica y para cálculos rápidos se pueden utilizar los valores de la tabla 2.10

Tabla 2.10. Coeficiente de resistencia y longitud equivalente de una singularidad.

Accesorios		$k_s$	$n = L_e / D$
Válvula esférica abierta		10	350
Válvula en ángulo recto abierta		5	175
Válvula de seguridad abierta		2.5	-
Válvula de retención abierta		2	135
Válvula de compuerta	Abierta	0.2	13
	¾ de abertura	1.15	35
	½ de abertura	5.6	160
	¼ de abertura	24	900
Válvula de mariposa abierta		-	40
Té, por la salida lateral		1.80	67
Codo de 90°, con bridas y radio:	Corto	0.90	32
	Normal	0.75	27
	Grande	0.60	20
Codo de 45°, con bridas y radio:	Corto	0.45	-
	Normal	0.40	-
	Grande	0.35	-

Fuente Flores 1998

## Cálculo de tuberías

Los datos que intervienen en el cálculo de tuberías a presión son: Caudal (Q), diámetro (D), velocidad media (V) y pérdida de carga unitaria (J). Conociendo dos de ellos se pueden calcular los otros dos mediante fórmulas, tablas o ábacos que relacionan tres o los cuatro datos citados:

Se sabe que:

$$Q = 3.1416 \times D^2 \times V / 4$$

Q = Caudal expresado en m<sup>3</sup> / seg.

D = Diámetro interior expresado en m

V = Velocidad expresada en m / seg.

La velocidad viene dada por la fórmula:

$$V = 4Q / 3.1416 D^2$$

Si cambiamos las unidades en

V = Velocidad en m / s

Q = Caudal en litros / hora.

D = Diámetro, en mm.

Quedaría:

$$V = 0.353668 Q / D^2$$

### 2.4.3.3.3. Elementos de control, potencia y maniobra.

Reguladores de caudal y de presión

Un regulador es un aparato que observe el exceso de energía de la red (creando una pérdida de carga adicional) para proporcionar un valor constante de presión o de caudal. Los reguladores son de dos clases:

1. Reguladores de caudal. Mantienen un caudal constante dentro de una determinada variación de presión de entrada.
2. Reguladores de presión. Mantienen constante la presión de salida, dentro de una determinada variación de la presión de la presión de entrada.

Manómetro

La medida de la presión en varios puntos de la red garantiza el correcto funcionamiento de la instalación y detecta las averías. Por medio de manómetros metálicos, se instala en punto estratégicos.

Rotámetro

Mide el flujo que pasa a través de una tubería. Consta de una cámara cilíndrica en posición vertical, en donde se encierra un balón que se desplaza hacia arriba con mayor o menor intensidad, según la magnitud del flujo. Una escala graduada mide los desplazamientos del balón.

## Contadores

Controlan el volumen de agua. Los hay de dos tipos:

1. Woltmann
2. Proporcional

Los contadores, al igual que los manómetros y rotámetros, deben instalarse en tramos rectos de tubería, cuya longitud, antes y después del aparato, debe ser de 80 – 100 veces su diámetro.

### **2.4.3.3.4. Automatización de la red**

Se pretende reducir la mano de obra en las operaciones de riego. Para esto se dispone de una o varias válvulas, que accionadas por mecanismos eléctricos o combinación de ambos, se abre o cierran en función de valores alcanzados por diversos parámetros indicadores. Se puede hacer de varias formas:

- Por tiempos. Las válvulas se cierran después de un determinado tiempo de funcionamiento.
- Por volúmenes. Mide el agua aplicada e interrumpe su paso cuando se alcanza el volumen preciso.
- Por otros parámetros. Tales como la evaporación o el nivel de humedad del suelo.

### **2.4.3.3.5. Equipos de elevación**

La forma más usual de elevar el agua es por medio de bombas hidráulicas movidas por motores eléctricos o de explosión. Estas actúan en dos fases.

- Aspiración. Elevación del agua desde su nivel hasta la bomba.
- Impulsión. Conducción del agua desde la bomba hasta su destino.

Las bombas se clasifican en:

- Rotodinámicas
- Volumétricas
- Gravimétricas.

Las más utilizadas para el riego son la rotodinámicas que se clasifican en tres grupos, según la dirección del flujo:

- Centrífugas o de flujo radial.
- De hélice o de flujo axial
- Diagonales o de flujo mixto

Las bombas centrífugas son las más utilizadas, por sus numerosas ventajas que ofrece:

- tamaño reducido
- caudal constante
- presión uniforme
- bajo mantenimiento y
- flexibilidad de regulación.

La elección de la bomba se elige con relación a la altura y caudal requeridos. Con estos datos se elige el modelo que ofrezca al máximo rendimiento cuando trabaje en esas condiciones de altura y de caudal. Para calcular la potencia de la bomba aplicamos la siguiente fórmula:

$$HP = Q \times H / 76 \times EF$$

Q= litros por segundo (lps)

H = carga total (metros)

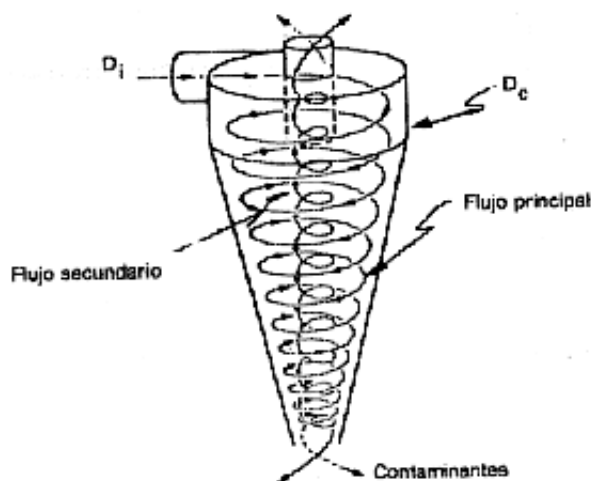
EF = eficiencia (75%)

### 2.4.3.3.6. Equipos de filtrado

#### Prefiltrado

El prefiltrado es para eliminar partículas inorgánicas antes de la entrada al cabezal de riego se hace de dos formas:

- Depósito de decantación. Separar del agua por sedimentación, las partículas minerales en suspensión (arena, limo, arcillas).
- Hidrociclón. Es un dispositivo, desprovisto de elementos móviles, que permite la separación de las partículas sólidas en suspensión cuyo tamaño sea superior a 75 micras y cuya densidad sea superior a la del agua. El hidrociclón es un separador sencillo, económico y de gran eficacia. Requiere que el caudal se mantenga constante dentro de los límites muy estrechos, que dependen de sus dimensiones. Figura 2.7



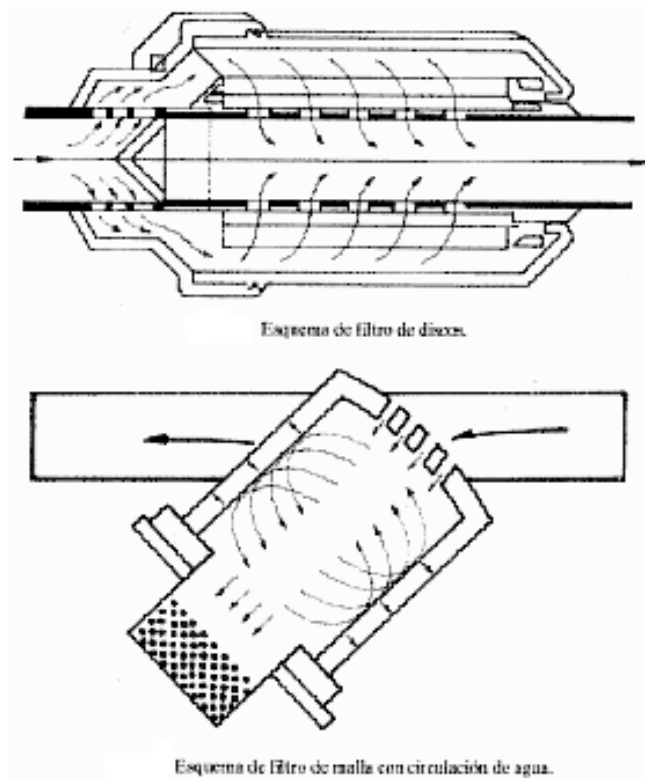
Castañón 2000

Figura 2.7 Hidrociclón

#### Filtrado

El filtrado del agua consiste en retener las partículas contaminantes en el interior de una masa porosa (filtrado de arena) o sobre una superficie filtrante (filtro de malla y filtro de anillas). Figura 2.8

- Filtro de arena. Retiene contaminantes orgánicos (algas, bacterias, restos orgánicos) e inorgánicos (arenas, limos, arcillas, precipitados químicos). Es el más adecuado para filtrar aguas muy contaminadas. Figura 2.9
- Filtro de malla. La filtración se verifica en la superficie de una o varias mallas concéntricas, fabricadas con material no corrosivo (acero, material plástico). La calidad de filtrado viene en función de la apertura de la malla. Se llama número de mesh (o número de tamiz o número de malla) al número de orificios por pulgada lineal (25.4 mm).
- Filtro de anillas. El elemento es un conjunto de discos o anillas con las caras asurcadas, que van montadas sobre un soporte central cilíndrico y con una superficie perforada. Las anillas se comprimen entre sí al roscar la carcasa. El agua se filtra al pasar por los pequeños conductos situados entre dos anillas consecutivas, pasando a continuación al interior del soporte central a través de sus orificios superficiales.



Castañón 2000

Figura 2.8 Filtro de malla y filtro de anillas

#### 2.4.3.4 Diseño agronómico

Para realizar el diseño agronómico necesitamos conocer primero las necesidades netas de riego y enseguida las totales para así saber la dosis, frecuencia y duración del riego, también el número de emisores por planta y el caudal por emisor y finalmente se decide la disposición de los emisores.

##### 2.4.3.4.1 Necesidades netas de riego.

Las necesidades netas vienen dadas por la ecuación:

**$N_n = E_{tc} - P_{e} - \Delta S$**  - Precipitación efectiva – aporte capilar – Variación de almacenamiento.

No se consideran los aportes capilares, salvo casos especiales, ni las variaciones de almacenamiento, Por tanto:

**$N_n = E_{tc} - P_e$  (2.9)**

$N_n$  = Necesidades netas  
 $E_{tc}$  = Evapotranspiración de cultivo.  
 $P_e$  = Precipitación efectiva.

#### 2.4.3.4.2 Necesidades totales de riego

Las necesidades totales son mayores que las necesidades netas, ya que es preciso aportar cantidades adicionales para compensar las pérdidas causadas por percolación profunda, por salinidad y por uniformidad de riego.

$$N_t = N_n / E_a = N_n / [R_p \times (1 - RL) (CU)] \quad (2.10)$$

$N_t$  = Necesidades totales

$N_n$  = Necesidades netas.

$E_a$  = Eficiencia de aplicación.

$R_p$  = Relación de perlocación.

$RL$  = Requerimiento de lavado.

$CU$  = Coeficiente de uniformidad.

$R_p$  y  $(1 - RL)$  no se toman simultáneamente, si no se toma sólo la de menor eficiencia.

$$\text{Si } R_p < 1 - RL \quad N_t = N_n / R_p (CU)$$

$$\text{Si } 1 - RL < R_p \quad N_t = N_n / (1 - RL) (CU)$$

Los requerimientos de lavado en riego localizado de alta frecuencia son:

$$RL = CE_a / 2 \text{ máx } CE_e$$

$RL$  = Requerimiento por lixiviación, expresado en %

$CE_a$  = Conductividad eléctrica del agua, expresado en dS / m.

máx  $CE_e$  = Conductividad eléctrica del extracto de saturación para la cual el descenso de producción es del 100 % expresado en dS / m

#### Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad (C.U) se utiliza para evaluar las instalaciones en funcionamiento y para el diseño de nuevas instalaciones.

La diferencia de caudal entre los emisores se debe, fundamentalmente, a que están sometidos a distintas presiones (factores hidráulicos) y a la falta de uniformidad en la fabricación (factores constructivos).

La causa más importante de la variación del caudal (aparte de las obturaciones, que deben ser controladas) es la variación de fabricación de los emisores y las diferencias de presión, por cuya razón se puede definir el siguiente C.U que se recomienda utilizar en el diseño.

$$CU = [1 - (1.27 CV / e)] q_m / q_a$$

$CV$  = Coeficiente de variación de fabricación del emisor.

$e$  = Número de emisores por cada planta,

$q_m$  = Caudal mínimo de los emisores considerados (se suele referir a una subunidad)

$q_a$  = Caudal medio de los emisores considerados.

Cuando el emisor tiene salidas múltiples se considera como un solo emisor en el caso de que el mecanismo de la pérdida de carga sea común a todas las salidas. Si cada salida tiene un mecanismo de pérdida de carga:



**e = Número de emisores de planta X Número de salidas.**

En el caso de que el número de plantas sea superior al de gotera, el valor de e sigue siendo igual al número de emisores que suministran agua a la misma planta, con independencia de que un emisor riegue varias plantas.

Una vez calculada las necesidades de riego hay que determinar la dosis, frecuencia y duración de riego, así como el número de emisores por planta y el caudal por emisor. Finalmente se decide la disposición de los emisores.

### **Superficie mojada por emisor.**

Es la superficie mojada por un emisor es la proyección horizontal del bulbo húmedo que forma ese emisor. El diámetro de la superficie mojada se puede calcular mediante las fórmulas siguientes que vienen en función del tipo de suelo y del caudal del emisor. (Cuadro 2.2)

<i>Textura del suelo</i>	<i>Diámetro</i>
<i>Textura fina</i>	$d = 1.2 + 0.1 q$
<i>Textura media</i>	$d = 0.7 + 0.11 q$
<i>Textura gruesa</i>	$d = 0.3 + 0.12 q$

*d = Diámetro de la superficie, en metros. Yagüe 1998*  
*q = Caudal del emisor, en litros / hora.*

### **Porcentaje de superficie mojada.**

Debido a que se moja solamente una fracción del suelo, hay que prever un mínimo de superficie mojada para que el sistema radical se desarrolle normalmente. Viene definido por:

**P = 10 X superficie mojada por planta / superficie ocupada por planta**

La superficie mojada se debe medir a 30 cm de profundidad, aunque en caso de cultivo de raíces poco profundas la medición puede hacerse a 15 cm de profundidad.

Se recomiendan los siguientes valores de P:

Cultivos de marco amplio 25 < P 35  
Cultivos de marco medio 40 < P 60  
Cultivos hortícolas 70 < P 90.

### **Número de emisores por planta.**

El número de emisores por planta (n) viene dado por las siguientes expresiones:

**N = Superficie. Mojada por planta / Superficie. Mojada por emisor =**

**Superficie. Ocupada por planta X P / 100 X superficie. Mojada por emisor.**

### **Profundidad del bulbo.**

La profundidad del bulbo debe estar comprendida entre el 90 y el 120 % de la profundidad de las raíces. La mayor profundidad del bulbo puede ser la adecuada para que actúe como fracción de lavado en el control de la salinidad, salvo que la calidad del agua aconseje mayor fracción de lavado, en cuyo caso no se considera la restricción de profundidad de bulbo expresada anteriormente.

### **Dosis, intervalo entre riego y duración del riego.**

La cantidad de agua aplicada en cada riego o dosis de riego será:

$$Dt = (n) (q) (t)$$

$$Dt = (Nt) (I)$$

Dt = Dosis total, en litros.

N = Número de emisores.

q = Caudal de cada emisor, en litros / hora.

t = Tiempo de duración del riego, en horas,

Nt = Necesidades totales, en litros por día.

I = Intervalo entre riego, en días

De ambas ecuaciones se deduce la siguiente:

$$(N) (q) (t) = (Nt) (I)$$

**El tiempo de riego** vendrá dado por la ecuación:

$$T = (Nt) (I) / (n) (q)$$

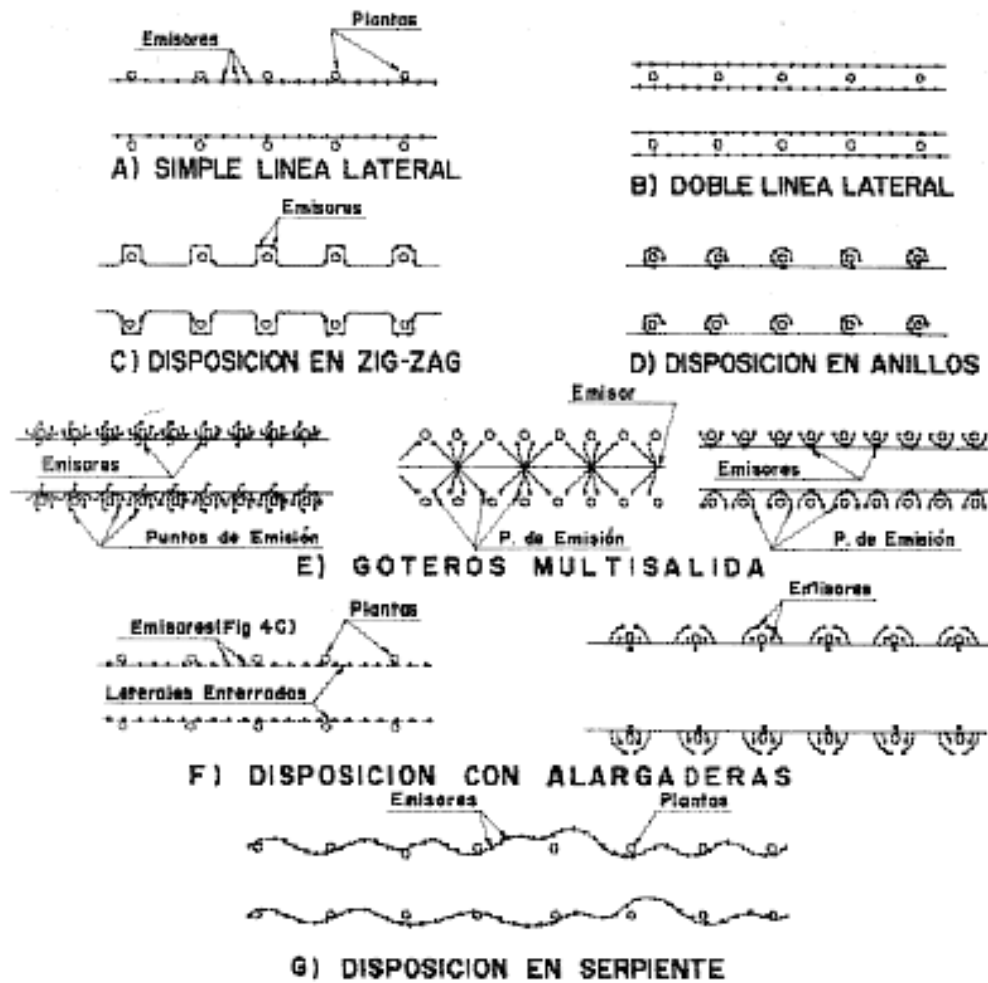
### **Disposición de emisores**

Al distribuir sobre el terreno las tuberías portaemisores hay que tener en cuenta varias consideraciones:

- Proporción a cada planta el número de emisores requeridos en el diseño agronómico.
- No dificulta las labores de cultivo.
- Hacer la mínima inversión.

La deposición de una tubería por cada fila de plantas provista de goteros interlínea se utiliza en plantas herbáceos y frutales. Los cultivos herbáceos es necesario solaparlo, porque de lo contrario las semillas que quedan entre los bulbos tendrían dificultades para germinar.

La disposición de dos tuberías por cada fila de plantas tiene el inconveniente de que se duplica la longitud de tubería.



López 1997

Figura 2.9. Disposición de tuberías laterales

### 2.4.3.5 Diseño hidráulico.

El diseño hidráulico se efectuara después del diseño agronómico y basándose en otros datos como características del emisor elegido, topografía del terreno, etc.

### Cálculo de conducciones de riego a presión

El esquema general de la distribución de las conducciones viene indicado en la figura 2.10

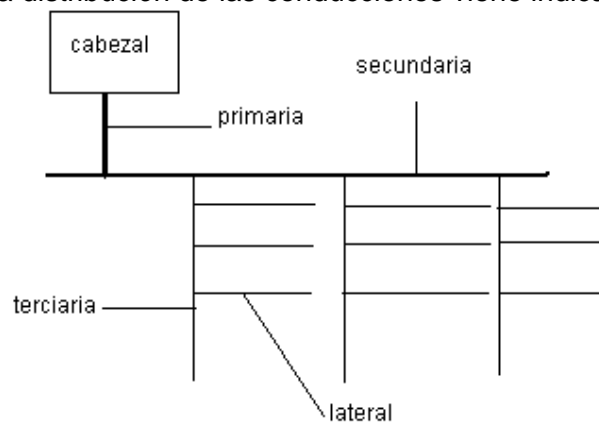


Figura 2.10 Esquema de distribución de conducciones.

## Tuberías con salidas múltiples.

Estas tuberías son con salidas uniformemente espaciadas con distribución y discretas de caudal.

Estas tuberías se denominan tuberías terciarias y líneas laterales de riego, y sobre estas últimas se ubican los emisores.

Las tuberías con salidas múltiples, se caracterizan por transportar un caudal que va disminuyendo – en la dirección del flujo- en cada tramo sucesivo comprendido entre dos derivaciones de caudal consecutivas. Por esta razón, la pérdida de carga por fricción a lo largo de éstas, será siempre menor que la pérdida que correspondería a una tubería en la que no hubiese derivaciones de caudal.

Los cálculos para determinar las pérdidas de carga por fricción se pueden hacer de dos maneras. Un procedimiento es hacer un cálculo separado de cada uno de los tramos de caudal constante –aunque no lo sea el diámetro – y la suma de la pérdida de todos ellos, será la pérdida de carga total en ésta.

El cálculo de las pérdidas por este procedimiento es muy laborioso, Christiansen desarrolló un método que simplifica los cálculos de las pérdidas de carga por fricción por lo que resulta más fácil calcular la pérdida continua en una tubería de igual longitud, diámetro y rugosidad, sin salidas intermedias y por la que circula un caudal  $Q$ . Posteriormente se multiplica por un coeficiente reductor para que las pérdidas en ambos casos sean equivalentes.

El factor  $F$  de Christiansen es un coeficiente reductor que depende de  $n$ ,  $B$ ,  $l_0$

$n$  = Número de salidas

$B$  = Constante característica de cada fórmula.

$l_0$  = Distancia del origen emisor.

En las tablas del anexo 2 se dan los valores del factor de Christiansen  $F$  para  $l_0 = l$  (la distancia del origen a la primera salida es igual a la distancia entre salidas consecutivas) y para  $l_0 = l/2$  (la distancia del origen a la primera salida es igual a la mitad de la distancia entre salidas consecutivas).

## Cálculo de tuberías laterales

Las tuberías laterales o porta emisores son las que distribuyen el agua a las plantas por medio de emisores acoplados a ellas. Desde el punto de vista hidráulico se comportan como tuberías con salidas uniformemente espaciadas, por lo que el cálculo de la pérdida de carga habrá que aplicar el Factor de Christiansen.

Para calcular el diámetro de un ramal lateral se necesita conocer los datos siguientes:

- Exponente de descarga y presión del emisor.
- Caudal en el origen del lateral.

$$Q = n \cdot q$$

$Q$  = Caudal en el origen, en litros /seg.

$n$  = Número de emisores del lateral.

$q$  = Caudal medio del emisor, en litros /seg.

- Longitud ficticia del lateral.

$$L_f = L + (n \cdot l_e)$$

$L_f$  = Longitud ficticia, en m.

$L$  = Longitud real, en m.

N = Número de emisores del lateral.  
Le = Longitud equivalente del emisor, en m.

### Variaciones de caudal y de presión

En una subunidad de riego se toma como variación máxima del caudal el 10% del caudal medio del emisor elegido. Con esta condición las variaciones admisibles de presión serían:

$$dH = (0.1 / x) H$$

dH = Pérdida de carga admisible en la subunidad.  
H = Presión de trabajo del emisor.  
x = Exponente de descarga del emisor.

Se ha comprobado que el costo mínimo de la instalación ocurre cuando al 55% de las pérdidas admisibles en la subunidad se producen en las laterales, mientras que el 45% restante se produce en las tuberías terciarias o portallaterales.

Las pérdidas de carga admisible en un lateral serían:

$$ha = ((0.1 / x) H) \cdot 0.55$$

ha = Pérdida de carga admisible en el lateral, en mca.  
H = Presión de trabajo del emisor, en mca.  
X = Exponente de descarga del emisor.

Este valor admisible de las pérdidas de carga debe coincidir con las pérdidas de carga que se produce en el lateral.

$$H = J \cdot F \cdot Lf$$

H = Pérdidas de carga en el lateral, en mca.  
J = Pérdida de carga unitaria en mca/m lineal.  
F = Factor de Christiansen.  
Lf = Longitud ficticia, en m.

Igualando las dos ecuaciones

$$ha = h$$

$$ha = ((0.1 / x) H) \cdot 0.055 = J \cdot F \cdot Lf$$

$$J = 0.055 \cdot h / x \cdot F \cdot Lf$$

Sustituyendo en la fórmula de Blasius

$$J = 0.00083 \cdot D^{-4.75} \cdot Q^{1.75} = 0.055 H / x \cdot F \cdot Lf$$

Despejando el diámetro

$$D = (0.00083 \cdot Q^{1.75} \cdot x \cdot F \cdot Lf / 0.055 \cdot H)^{1/4.75}$$

D = Diámetro del lateral, en m.  
Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/seg.  
Lf = Longitud ficticia, en m.  
H = Presión de trabajo del emisor, en mca.

Cambiando las unidades

$$D = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf / 0.055 \cdot H)^{1/4.75}$$

D = Diámetro del lateral, en mm.  
Q = Caudal, en litros / hora  
Lf = Longitud ficticia, en m.  
H = Presión de trabajo del emisor, en mca.

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo con lo cual la pérdida de carga real se calcula según Blasius, mediante la fórmula:

$$h = J \cdot F \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf) / D^{4.75}$$

h = Pérdida de carga en el lateral, en mca.  
D = Diámetro de la tubería comercial elegida, en mm.  
Q = Caudal, en litros / hora.  
Lf = Longitud ficticia, en m.

#### **Presión necesaria en el origen del lateral.**

El gradiente de presión entre dos emisores consecutivos es mayor en los primeros tramos laterales que en los últimos. Se ha comprobado experimentalmente que en un lateral horizontal la presión media corresponde a una distancia del origen de 0.39 L en goteros. En este tramo inicial se produce el 73 % si los emisores son goteros.

En un lateral portagoteros, las presiones en el origen son:

**Po = Pm + 0.73 h si el lateral es horizontal.**

**Po = Pm + 0.73 h + o – Hg / 2 si el lateral es ascendente.**

(Con signo +) o descendente ( con signo -)

Po = Presión en el origen del lateral.  
Pm = Presión de trabajo del emisor.  
H = Pérdida de carga en el lateral.

#### **Cálculo de tuberías o portalaterales.**

Para calcular el diámetro de una tubería terciaria o portalaterales se necesita conocer los datos siguientes:

- Caudal en el origen de la terciaria, que es igual al número de laterales que derivan de la terciaria por el caudal de cada uno.
- Longitud ficticia (Lf) de la terciaria, que es igual a la longitud real (L) más la longitud equivalente de los accesorios instalados. Por lo general se toma:

$$L_f = a \cdot L$$

a varía de 1.05 a 1.20

- Pérdida de carga admisible en la terciaria. Las pérdidas de carga producidas en un lateral son menores del 55% de las producidas en la subunidad, debido a que se ha tomado un diámetro comercial superior al que sale en el cálculo. Por consiguiente, las pérdidas de carga admisible en la terciaria serán igual a las pérdidas de carga admisible en la subunidad menos las pérdidas reales producidas en un lateral.

$$h'a = ((0.1 / x) H) - h$$

h'a = Pérdida de carga admisible en la terciaria.

H = Presión de trabajo del emisor.

X = Exponente de descarga del emisor.

h = Pérdida de carga real en el lateral (se toma el lateral de mayor pérdida de carga).

Este valor admisible de las pérdidas de carga (h'a) debe coincidir con las pérdidas de carga que se producen en la terciaria (h').

Realizando sustituciones se llega a la siguiente fórmula para calcular el diámetro:

$$D = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f / h'a)^{1/4.75}$$

D = Diámetro de la terciaria, en mm.

Q = Caudal, en litros / hora

Lf = Longitud ficticia, en m.

h'a = Pérdida de carga admisible, en mca.

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo. Las pérdidas de carga producida en la terciaria se calculan según Blasius, mediante la fórmula:

$$h' = J \cdot F \cdot L_f = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f) / D^{4.75}$$

h' = Pérdida de carga en la terciaria, en mca.

D = Diámetro de la tubería comercial elegida, en mm.

Q = Caudal, en litros / hora.

Lf = Longitud ficticia, en m.

La presión en el origen de la terciaria se calcula mediante la fórmula:

$$P'o = P_o + 0.73 h' + o - H_g / 2$$

P'o = Presión en el origen de la terciaria

P\_o = Presión en el origen del lateral.

H' = Pérdida de carga en la terciaria.

H\_g = Desnivel geométrico entre los extremos de la terciaria. Se toma signo + si es ascendente, y signo - si es descendente.

### Cálculo de tuberías secundarias.

Las tuberías secundarias son aquellas de las que derivan las terciarias. Para calcular su diámetro se conoce el caudal y se fija la velocidad.

$$D = 0.5947 \sqrt{Q / v}$$

D = Diámetro, en mm

Q = Caudal, en litros / hora.

V = Velocidad, en m /seg.

Se elige el diámetro comercial más próximo por exceso, con respecto al valor que sale de aplicar la fórmula.

La pérdida de carga se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$h' = J \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot Lf) / D^{4.75}$$

$h'$  = Pérdida de carga en la secundaria, en mca.

D = Diámetro de la tubería comercial elegida, en mm.

Q = Caudal, en litros / hora.

Lf = Longitud ficticia, en m.

La presión en el origen de la secundaria = presión en el origen de la tubería terciaria + pérdida de carga en el tramo considerando de la secundaria + diferencia de cotas entre los extremos del tramo de secundaria considerado (signo + cuando es ascendente y signo - cuando es descendente).

## 2.5. El cultivo del nopal

### 2.5.1. Origen.

Las cactáceas son originarias del Continente Americano, en donde se encuentra distribuida principalmente en las regiones áridas y semiáridas. Las especies del género *Opuntia* son originarias del sur de los Estados Unidos, México, Ecuador, y Perú. Para el nopal se considera como centro de origen a México, ya que además posee gran diversidad de especies.

### 2.5.2. Características botánicas y taxonómicas.

En la actualidad existen diversas variedades productoras de tuna con gran variedad en color, tamaño, grosor de cáscara y otros elementos, incluso de la flor, y por la presencia y posición de espinas en los cladodios, etc. El nopal se encuentra ubicado en la siguiente clasificación:

Reino	Vegetal
División	Angiospermae
Clase	Dicotiledóneae
Familia	Cataceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Género	<i>Opuntia</i>
Subgénero	Platyopuntia
Especie	<u><i>indica</i></u>

Las plantas correspondientes a esta familia son perennes, suculentas, con distintos hábitos; generalmente espinosas, caracterizadas por órganos especiales llamados areolas; limbo de las hojas ausente o reducido a escamas pequeñas o primordios anatómicos, solo bien desarrollados en algunos géneros. La familia se divide en tres subfamilias: *Pereskioideae*, *Opuntioideae*, y *Cereoideae*.

La Subfamilia *Opuntioideae*, las especies que la integran son cactáceas arborescentes, arbustivas y hasta rastreras, tallos cilíndricos, claviformes, casi globosos o en cladodios más o menos ramificado. Hojas con limbo pequeño, cilíndrico – tubulado y caduco, solo en algunos géneros es laminar, aunque carnosos: tubérculos más o menos prominentes. Areolas circulares y hasta elípticas, con pelos glóquidas y espinas.

Tribu Opuntiae.- Plantas con ramas cilíndricas, claviformes o laminares (cladodios) verdes. Hojas muy reducidas, cilíndricas, tabuladas, caducas. Flores diurnas.



Género Opuntia.- Son individuos arborescentes, arbustos o rastrero, simples o cespitosos. Tronco bien definido o con ramas desde la base, erectas, extendidas o postradas. Artículos globosos, claviformes, cilíndricos aplanados (cladodios), muy carnosos o leñosos. Limbo de las hojas pequeño, cilíndrico, carnosos muy pronto caduco. Areolas axilares con espinas, pelos, glóquidas y a veces glándulas; generalmente, las de parte superior de los artículos son las productoras de flores. Espinas solitarias o en grupo, desnudas o en vainas papiráceas. Flores generalmente hermafroditas. Ovario inferior, con una cavidad y muchos óvulos. Estambres numerosos, más cortos que los pétalos. Fruto en baya, seco o jugosos, espinoso o desnudo, globoso, ovoide hasta elíptico..

Subgénero *Platyopuntia*.- Esta categoría agrupa a las especies del género *Opuntia* que presentan tallos aplanados (cladodios).

Especie *indica*.- Arbustiva. Artículos oblongos hasta elípticos, de 30 a 40 cm de largo, gruesos, color oscuro hasta glauco. Hojas de 4 mm de largo, agudas, rojas, areolas. Areolas pequeñas con una o dos cerdas cortas en su parte inferior, espinas en número de 1 a 4, rígidas, casi perpendiculares, divergentes, generalmente de menos de 3 cm de largo. Blancas de color de hueso; las más gruesas, anguladas; glóquidas café, caducas. Flores amarillentas, fruto no muy jugoso. Tabla 2.9 (González 2000)

#### Características de la Variedad utilizada

La variedad Copena F1 es considerada de triple propósito (verdura, fruto y forraje), sus brotes son delgados, sin espinas con poco mucílago, no son agrios presentan buena succulencia, el nopalito es de excelente calidad. Respecto a las condiciones climáticas que requiere para su buen desarrollo, es necesario una temperatura de 16 a 20 C°, una precipitación anual de 150 a 1800 mm, una altitud de 800 msnm, sin embargo el nopal puede prosperar fuera de los límites mencionados; los suelos adecuados para su desarrollo son de textura Franca, Franca Arenoso y pocos profundos con pH de entre 6.5 y 8.5. (**Comunicación personal del profesor Edvino**)

- Raíz.- El nopal presenta un sistema radical fibroso, deriva de la radícula, aunque en ocasiones pueden estimularse el desarrollo de raíz a partir del tallo, su tamaño es generalmente proporcional al tamaño del tallo, ausencia de pelos absorbentes con escasas humedad, en cambio cuando existe agua disponible en el suelo se estimula el desarrollo de estos pelos, y la velocidad de absorción de agua y nutrientes.
- Tallo.- Al desarrollarse el tallo del embrión se forma erecto y ramificado, plano en forma de raqueta (cladodio o penca), posee cutícula gruesa y está adaptado para almacenar agua en sus tejidos, son de color verde y su función es fotosintética, ya que presentan abundante parénquima clorofílico.
- Hoja,.En el nopal solamente existen en los renuevos de pencas cuando están tiernas. Son hojas cilíndricas y caducas, en forma de cuernitos en cuyas axilas se hallan las areolas de las cuales brotan las espinas, las hojas desaparecen completamente al alcanzar cierto desarrollo el cladodio en cuyo lugar quedan las espinas.
- Flor.- La flor se produce en las areolas, localizadas en la parte superior de los cladodios, cada areola produce por lo general una flor, constan de un cáliz con tubo oval soldado al ovario y con el limbo, muchos pétalos, numerosos estambres persistentes, con los filamentos largos, coloridos y antenas longitudinales dehiscentes; un pistilo grueso y tubuloso, digitado en su extremo, formando varios lóbulos estigmáticos. La apertura de la flor tarda en promedio 55 días después de la aparición de las yemas florales. La flor permanece abierta durante 24 hrs; se considera que el momento de antesis (momento exacto de liberación de polen del cual empieza a contar la vida del fruto), es a los dos días después de la apertura de la flor.
- Fruto.- Es una baya ovoide, cilíndrica, de diversos colores, umbilicada en el extremo superior (cicatriz floral), pericarpio correoso, con semillas de color variable.

Tabla 2.11 Valor alimenticio del nopal de verdura Cantidad respecto a 100 gr.

PROPORCION COMESTIBLE	78%
ENERGÍA	27.00 Kcal
PROTEINAS	0.17 g
GRASAS	0.30 g
CARBOHIDRATOS	5.60 g
CALCIO	30.4 g
FIERRO	1.60 mg
TIAMINA	0.03 mg
RIVOFLAMINA	0.06 mg
NIACINA	0.03 mg
ACIDO ASCÓRBICO	8.00 mg

(González

2000)

Cuadro 2.3 Características edáficas y de altitud para el nopal.

CARACTERÍSTICA	CONDICIONES	OBSERVACIONES
SUELO	Preferentemente de origen calcáreo	Recomendados, aunque puede desarrollarse en suelos de otro origen.
TEXTURA	Franco, franco arenoso, franco arcilloso- arenoso, arena franca.	Las arcillas no son adecuadas debidas al fenómeno de contracción y expansión.
PROFUNDIDAD	10 – 25 cm o más profundos	Con estrato calcáreo, buen drenaje y rápida permeabilidad.
DRENAJE PERMEABILIDAD	Bueno	En casos de suelos profundos y de textura franco arenosa
PH	6 – 8.5	
PENDIENTE	3 – 15 %	En el caso de conservación de suelos, la pendiente puede ser mayor.
ALTITUD	80 – 1800 msnm	Es el intervalo óptimo; se ha encontrado que este factor no tiene mayor influencia.

(González 2000)

### 2.5.3. Características agrícolas del cultivo.

Características climáticas.

Precipitación.- Las *opuntias* tienen un escaso requerimiento de agua para sus funciones metabólicas, el óptimo desarrollo fluctúa de los 116 a los 1, 800 mm de precipitación pluvial anual, en caso de ser mayores a 1,800 mm, la planta de nopal se ve afectada y el suelo le ocasiona incidencia de patógenos (hongos y bacterias), que originan pudriciones, clorosis, y en general deficientes desarrollo vegetativo.

Temperatura.- se considera que el rango óptimo de temperaturas para el desarrollo de *Opuntia ficus indica* es de 10°C hasta 35°C, sin descartar que soporta temperaturas menores de este óptimo establecido. Las temperaturas por debajo de 10°C afectan el desarrollo del cultivo si se presentan con mayor frecuencia y periodos de retorno muy cortos, ocasionando quemaduras en los brotes tiernos e inhibiendo su desarrollo.

*Cuadro 2.4. Características climáticas para el cultivo del nopal*

<i>CONDICIONES FAVORABLES</i>	<i>OBSERVACIONES</i>
<i>Temperatura media anual: 15 – 16 °C</i> <i>Temperatura máxima: 36°C</i>	<i>El óptimo para el buen desarrollo.</i> <i>Puede desarrollarse a mayor temperatura, pero no se tiene datos de éstas relacionadas con la producción</i>
<i>Temperatura mínima: 6°C</i>	<i>Las bajas Temperaturas para no afectar al cultivo deben tener un amplio periodo de retorno.</i>
<i>Precipitación media anual: 116 – 1800 mm</i>	<i>El nopal puede prosperar arriba de 1 800 mm pero presentan problemas de enfermedades fungosas y pudriciones bacterianas.</i>

(González 2000)

#### Proceso agrícola de producción de nopal para verdura

Sistema a cielo abierto: Tiene muchas limitaciones; en primer lugar, las heladas no permiten la producción en los meses en que el mercado ofrece precios más altos; pero su establecimiento es más barato que el de microtúneles. La densidad de plantas por hectárea es de 40, 000 a un metro entre surcos y 25 cm entre planta.

Sistema bajo microtúnel: con la finalidad de obtener una producción continua durante el año se diseña, una forma sencilla y poco costosa para evitar el efecto de las heladas en el cultivo de nopal de verdura llamado microtúneles en el cual se le da un uso intensivo al suelo y hace más costea la aplicación en la época de sequía.

Fertilización: el nopal responde a la aplicación de abono orgánico; sin embargo, tomando en cuenta que se trata de una explotación intensiva se considera conveniente la aplicación de 2 toneladas de urea o 4 toneladas de sulfato de amonio al año por hectárea, en dos aplicaciones, con el objeto de ayudar al crecimiento vegetativo de la planta.

Riego: El nopal para verdura puede producir continuamente durante todas las estaciones del año, siempre y cuando se le proporcionen condiciones favorables de humedad, fertilidad y temperatura; para esto es necesario irriarlo en el periodo de sequía que es de octubre a mayo.

Existen reportes que con un riego de 3 litros de agua por metro cuadrado cada mes es suficiente para obtener una buena producción. Otro dato nos muestra un riego de 4 a 8 litros de agua por metro cuadrado cada 15 días, dependiendo de la textura del suelo. (Barbera 1999)

El nopal necesita de 1500 a 3 000 m<sup>3</sup> por hectárea al año. La cantidad y calidad de la cosecha aumenta significativamente cuando se aplican riegos en los periodos críticos, aunque la planta es capaz de producir en zonas con 150 – 300 mm de lluvia al año, mal repartidos en el tiempo sin riego y con suelos pobres. Además de que en plantaciones de Sicilia España el gasto es de 1 800 a 2 100 m<sup>3</sup> por hectárea por año. (Moreno 2000)

En Milpa Alta se tiene de precipitación 8 meses de lluvia en donde el coeficiente de evapotranspiración tiene valor positivo, en relación con la mayor humedad, lo cual indica que el nopal tiene humedad durante un periodo bastante largo. Así existe una correlación directa entre la época de lluvia y la productividad ya que hay más producción en verano debido a la mayor precipitación y mayor temperatura de esta estación. Según Velásquez (1962) citado Granados (1991) por el desarrollo óptimo en cuanto abundancia y distribución se efectúa con 400 mm de precipitación, a partir de esto la densidad disminuye conforme baja la precipitación.

Tanto la fertilidad del cladodio como el crecimiento de fruta se benefician con el riego, reporta que con 2 a 3 riegos (60 – 100 mm) aplicados durante el desarrollo del fruto aumenta el rendimiento, el tamaño del fruto y el % de pulpa

Nerd (1989) citado por FAO reportaron que en áreas donde la lluvia anual es menor a 300 mm la suspensión del riego en el invierno reduce considerablemente la fertilidad de los cladodios y retrasa la brotación de primavera. Bajo estas condiciones el riego por goteo en volúmenes diarios bajos (1- 2 mm/día) asegura altos rendimientos y crecimiento de fruto el riego (100 mm) es esencial para la refluoración después de la cosecha de verano. El riego por goteo puede ser utilizado como ventaja pero puede resultar en un lavado de nutrientes y en pudrición de raíces si no se maneja adecuadamente. El nivel de NaCl en el agua de riego no debe exceder a 25 moles/m<sup>3</sup> el Na se acumula principalmente en las raíces.

En Chapíngo bajo sistema intensivo, aplicando 100 mm de agua por mes durante el periodo de sequía se ha logrado un incremento de 10 a 25 % en rendimiento. (Barbera 1999)

#### 2.5.4. Plagas y enfermedades

*Cuadro 2.5 Daño y control de las principales plagas del nopal.*

<i>PLAGA</i>	<i>DAÑO</i>	<i>CONTROL</i>
<i>Picudo barrenador (Cactophagus spinolae) Gyll</i>	<i>La larva se alimenta del tejido interno de la planta, forma galerías color amarillo a negro.</i>	<i>Destruirlo mecánicamente, extraer la larva y pupa, con un cuchillo. Control químico.</i>
<i>Picudo de las espinas (Cylindrocapturus biradistus). Champs.</i>	<i>La larva se alimenta de tejido de la base de las espinas, produce gomosis cerosa, cintas blancas a negras con el tiempo.</i>	<i>Eliminar las pencas afectadas Control químico</i>
<i>Gusano blanco del nopal (Lanifera cyclades) Druce</i>	<i>Galerías amplias en la mayoría de las pencas en su base.</i>	<i>Destrucción mecánica. La larva es de consumo humano. Control químico.</i>
<i>Cochinilla o grana del nopal (Dactylopus indicus) Green</i>	<i>Succiona savia de la planta, en el área clorosis, parece masa de algodón</i>	<i>Destrucción mecánica. Control químico. Aprovechamiento para pigmento textil.</i>
<i>Chinche gris (Chelinidea tabulata) Burn</i>	<i>Se alimenta de jugo de la penca, manchas cloróticas y un punto verde oscuro en el centro.</i>	<i>Control químico.</i>
<i>Chinche roja (Hesperalabops gelasto) Kirk</i>	<i>Succiona la savia, produce pústulas cloróticas y se convierte en una costra café clara</i>	<i>Control químico</i>
<i>Gallina ciega (Phylophaga spp)</i>	<i>La larva se alimenta de la raíz, provoca deshidratación, marchites y muerte</i>	<i>Control químico</i>
<i>Gusano de alambre (Diabrotica spp)</i>	<i>La larva roe la raíz. Causa marchites</i>	<i>Control químico.</i>
<i>Trips del nopal (Sericotrips opuntia) Hood</i>	<i>Raspan y succionan la savia de los brotes tiernos.</i>	<i>Control químico</i>

(Gonzáles 2000)

*Cuadro 2.6. Daño y control de las principales enfermedades del nopal.*

<i>ENFERMEDADES</i>	<i>SINTOMAS</i>	<i>CONTROL</i>
<i>Mancha bacteriana</i>	<i>Manchas amarillas a café, consistencia blanda olor desagradable</i>	<i>Captan 1 - 1.5 kg/400 500 l de agua. Arazán 75 30 –45 gr/planta</i>
<i>Mancha o secamiento de la penca</i>	<i>Manchas clorótica con centro y margen oscuros</i>	<i>Captan 1 - 1.5 kg/400 500 l de agua. Arazán 75 30 –45 gr/planta</i>
<i>Antracnosis</i>	<i>Pencas color café con tono rojo, del borde a la base de la penca</i>	<i>Captan 1 - 1.5 kg/400 500 l de agua. Arazán 75 30 –45 gr/planta</i>
<i>Pudrición de la epidermis</i>	<i>Pudrición de pencas. Manchas hundidas. Oscuras, ampollas.</i>	<i>Captan 1 - 1.5 kg/400 500 l de agua. Arazán 75 30 –45 gr/planta</i>
<i>Oro del nopal</i>	<i>En la base de espinas, manchas amarillas, avanzan ala base.</i>	<i>Captan 1 - 1.5 kg/400 500 l de agua. Arazán 75 30 –45 gr/planta</i>

(González 2000)

Control de maleza: sólo se recomienda realizar 2 o 3 deshierbes al año durante la época de mayor incidencia, que es la temporada de lluvias.

### **2.5.5. Podas.**

En cuanto las podas se realizan con la finalidad de dar buenas formas a las plantas y para facilitar el manejo del huerto, evitando el estrechamiento de las calles para facilitar el acceso al interior. Además de que, con las podas, se estimula la brotación de renuevos. Es aconsejable eliminar aquellos cladodios que se localizan en posición y ángulos inadecuados a la iluminación solar, así como los que se encuentren muy juntos o en la base del tallo, dejando, para, que la planta siga creciendo, aquellos que presentan buen vigor, sanidad y libre de plagas y enfermedades. Existen podas de:

- Formación.
- Sanidad
- Rejuvenecimiento
- Estimulación de renuevos.

### **2.5.6. Épocas de corte**

La mayor cantidad de producción se obtiene durante la época de mayor humedad y temperatura (Mayo a septiembre), correspondientes estos meses al periodo de lluvias. Sin embargo, el precio es más bajo durante este tiempo por la alta producción que haya en el mercado.

La cosecha se lleva a cabo cuando los brotes alcanzan un peso aproximado de 100 a 120 g. Cada uno, mide de 10 a 15 cm, de largo, aunque no siempre se sigue este patrón de cosecha. Para realizar el corte se usa un cuchillo bien afilado, se toma el nopalito con una mano mientras con la otra se realiza el corte, justo en la unión de la base entre la penca madre y el brote, sin lastimar a una ni al otro. Realizar por la mañana la cosecha.

Con un buen manejo la producción se inicia entre el segundo y tercer mes después de efectuada la plantación, cosechando cada 8 o 15 días una cantidad promedió de tres brotes por planta durante los primeros meses.

## **1. METODOLOGÍA.**

### **3.1 Método.**

El desarrollo del presente trabajo se basa en diseñar el sistema de riego por goteo con las condiciones climáticas, edáficas e hídricas de la parcela experimental número 12.

La etapa del diseño se divide en dos fases esenciales; una fase de campo, en donde se recabaron los datos requeridos para la segunda fase en donde se desarrolló el diseño agronómico y el diseño hidráulico.

#### **3.1.1 Descripción del área de estudio.**

##### Localización

El área de estudio donde se obtuvieron los datos para diseñar el sistema de riego es a 30 Km al norte de la ciudad de México y 2.5 Km al noroeste de la población de Cuautitlán, Estado de México. Los terrenos donde se obtuvieron los datos para el sistema de riego por goteo pertenecen a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. El área de investigación está limitado al norte con el municipio de Teoloyucan, al sur con el de Tultitlán, al este con Melchor Ocampo, al oeste con el de Tepotzotlán, al noreste con Zumpango y al Sureste con Tultepec.

Geográficamente se encuentra en los 19° 42'00'' de latitud norte; a los 99° 12'00'' de longitud oeste y a una altura de 2,250 metros sobre el nivel del mar (msnm).

##### Aspectos climáticos

El clima según el sistema de Koppen modificado por García corresponde a C(Wo)(W)b (i'), esto indica un clima templado, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano e invierno seco, menos de 5% de la precipitación anual, con verano largo y fresco, con poca oscilación de temperatura.

La temperatura media anual es de 14.8 °C, con oscilación media mensual de 6.5 °C; siendo enero el mes más frío, con una temperatura promedio de 11.3°C, y junio el mes más caliente, con 18.3° C promedio. Las precipitaciones se concentran en verano de Mayo a Octubre, la precipitación promedio anual de 609.2 mm con probabilidad de lluvia invernal menor de 5%. La posible presencia de heladas tempranas es en septiembre y tardías en mayo. Las horas frío oscila entre 800 y 820 al año. (Flores 1998)

##### Aspectos edáficos

Geomorfológicamente la zona es una planicie rodeada por formaciones cerriles y montañosas de altitudes variables, que en su conjunto pueden constituir una pequeña Cuenca Cerrada. Los suelos se han formado de los sedimentos en las partes bajas acarreados por el agua y por el viento, de los cuales se tiene evidencia por los perfiles de suelo estudiado, al encontrarse estratos arenosos alternados con otros de tipo arcilloso.

Los suelos de la zona de estudio pasaron por una etapa de intrazonalidad, de hidromorfismo, donde la materia orgánica y riqueza en nutrientes se conservaron mientras se mantuvo el manto freático. Posteriormente ya en condiciones de zonalidad y de explotación agrícola los suelos aún mantienen buen nivel de fertilidad. Dado en parte porque tienen agua de riego todo el año y por el hecho de que es práctica agrícola común el incorporar estiércol, principalmente de bovino, a intervalos regulares. (Vega 2002)

## Características físicas del suelo

En la parcela experimental se tienen las siguientes características:

Arena: 32.76 %

Limo: 26.00 %

Arcilla: 41.24 %.

Textura: Arcilloso (según el triángulo de las texturas)

- Capacidad de campo: 29.4 (% Pss)
- Punto de Marchites permanente: 20.1 (%Pss)
- Densidad aparente: 1.25 (gr / cm<sup>3</sup>)
- Velocidad de infiltración: 5 mm /h

\* Los análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos de la FES-C y en el laboratorio de suelos y aguas de la UACH

## Características químicas del agua.

Por medio de un análisis de agua en el departamento de suelos de las UACH se tiene las siguientes características:

Tabla 2.13 Características químicas del agua de la parcela.

<i>PH</i>	<i>CE (dS /m)</i>	<i>Na (meq / l)</i>	<i>K (meq / l)</i>	<i>Ca (meq / l)</i>	<i>Mg (meq / l)</i>
7.18	0.33	0.97	0.16	1.04	0.94
<i>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (meq / l)</i>	<i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq / l)</i>	<i>Cl<sup>-</sup> (meq / l)</i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (meq / l)</i>	<i>B (meq / l)</i>	
ND	2.40	0.75	ND	0.08	
<i>Fe (mg / l)</i>	<i>Cu (mg / l)</i>	<i>Zn (mg / l)</i>	<i>Mn (mg / l)</i>	<i>Mo (mg / l)</i>	
ND	0.01	0.06	ND	0.14	

24 de Marzo de 2003

\*ND = no detectado por el método empleado

### 3.1.2 Diseño agronómico.

El diseño agronómico es el planteamiento general del sistema de riego en relación con las condiciones del medio (fuente de abastecimiento de agua, suelo, cultivo, clima, parcela, etc.), con la finalidad primordial de determinar los parámetros de riego (lámina de riego, intervalo de riego, tiempo de riego, etc.); garantizando que la instalación sea capaz de suministrar, con una eficiencia de aplicación óptima, las necesidades netas de riego del cultivo durante el periodo de máximo consumo, en base al tipo de cultivo y a los parámetros del clima y del suelo suficiente para su adecuado desarrollo y un efectivo control de sales.

Las necesidades totales de riego del cultivo se obtienen a partir de las necesidades netas, utilizando una estimación de la eficiencia de aplicación, la tolerancia del cultivo y la calidad de agua de riego.

Diversos elementos de la instalación de un sistema de riego por goteo tales como: tipo de emisor, número de emisores por planta, disposición de los mismos en campo, eficiencia de riego, etc, se decide en base al diseño agronómico. Además proporciona datos básicos para el posterior diseño hidráulico, como caudal por emisor y planta, duración del riego, etc.

Una vez fijado el número de emisores, su caudal y la lámina de riego a aplicar, se puede calcular el tiempo que debe durar el riego, con lo que habrá finalizado esta fase del diseño.

Los datos requeridos para efectuar el diseño agronómico son los siguientes:

**a) Clima**

- Precipitación.
- Temperatura
- Humedad Relativa
- Evaporación
- Velocidad del viento
- Porcentaje de horas luz

**b) Suelo**

- Textura
- Densidad aparente
- Contenido de humedad a capacidad de campo
- Contenido de humedad en el punto de marchites permanente
- Infiltración básica
- Profundidad del suelo.

**c) Cultivo**

- Nombre (especie y variedad)
- Etapas de desarrollo del cultivo
- Coeficiente del cultivo
- Profundidad de la zona radicular efectiva del cultivo
- Máximo aprovechamiento permisible de agua por el cultivo

**d) Fuente de agua**

- Tipo de fuente (pozo, río, presa, lago, etc. ) y localización.
- Caudal o gasto
- Horas de disponibilidad de la fuente
- Calidad física y química del agua

**e) Parcela**

- Plano (área, dimensiones, linderos y obstáculos en el terreno)
- Pendiente
- Esparcimiento entre planta y entre hileras
- Porcentaje del área bajo riego

**f) Sistema de riego**

- Tipo de sistema de riego
- Características del emisor
- Modelo
- Caudal y presión



- Diámetro de mojado y ángulo de cobertura
- Esparcimiento entre emisores y entre laterales
- Eficiencia del riego
- Número de emisores por planta.
- Horas máximas de operación por día
- Días de paro
- Coeficiente de uniformidad.

Con los datos de inicio recabados y procesados se realizó la primera fase por medio de los siguientes puntos:

- 1) Necesidades netas de riego
- 2) Necesidades totales de riego
- 3) Coeficiente de uniformidad.
- 4) Superficie mojada por emisor
- 5) Porcentaje de superficie mojada
- 6) Números de emisores por planta
- 7) Dosis, intervalo entre riego y duración del riego
- 8) Disposición de los emisores.

Los puntos anteriores se abordaron con la ayuda del marco teórico de la siguiente manera y los resultados se exponen en cuadro en los anexos.

### 1. Necesidades netas de riego

Para calcular **las necesidades netas** de riego se procederá de la siguiente forma:

- a) Se calcula primero la evapotranspiración del cultivo de referencia con el método de Blaney – Criddle. Por el método de Blaney – Criddle se ocupa la fórmula:-

$$E_{t_0} = C_e (a + (b) (f) )$$

- b) Se calcula la precipitación efectiva por medio de las fórmulas indicadas que son:

Cuando P es superior a 75 mm, la precipitación efectiva (Pe) se puede calcular mediante la fórmula:

$$Pe = 0.8P - 25$$

Cuando P es inferior a 75 mm se aplica la fórmula:

$$Pe = 0.6P - 10$$

- c) Teniendo la Eto se multiplica por el Kc dependiendo de la etapa fenológica del cultivo.

- d) La necesidad neta viene dado por la fórmula

$$N_n = E_{tc} - \text{Precipitación efectiva} - \text{aporte capilar} - \text{Variación de almacenamiento.}$$

Para el diseño, se tomarán solamente las aportaciones por precipitación efectivas.

$$N_n = E_{tc} - Pe$$

### 1. Necesidades totales de riego

Para calcular las necesidades totales de riego se procederá de la siguiente forma:

Las necesidades totales son mayores que las necesidades netas, ya que es preciso aportar cantidades adicionales para compensar las pérdidas causadas por percolación profunda, por salinidad y por uniformidad de riego y viene dada por la fórmula:

$$N_t = N_n / E_a = N_n / [R_p \times (1 - RL) (CU) ]$$

En este caso el agua no presenta problemas de salinidad, la percolación profunda es baja y solamente se conoce el CU que es de 0.81 la fórmula quedaría de la siguiente forma:

$$N_t = N_n / CU$$

Teniendo las NT por mes se divide entre los días de duración de cada mes y así obtendremos las necesidades diarias para la planta en (mm/día).

### 3) El coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad es igual a 0.81, esta tomado por medio de tablas (Fuentes 2000).

### 4) Superficie mojada por emisor

La superficie mojada por emisor se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Para textura fina } d = 1.2 + 0.1 q$$

D = diámetro de la superficie, en metros.

Q = caudal del emisor en litros / hora.

### 5) Porcentaje de superficie mojada.

Se tomará un porcentaje de 80%, esto porque según (fuentes 2000) para cultivos hortícolas es de  $70 < P < 90$ . Se tomará la media que es de 80 %.

### 6) Números de emisores por planta o cama.

Los números de emisores por planta vienen dados por la formula:

$$N = \text{Superf. Mojada por planta} / \text{Superf. Mojada por emisor} =$$

$$\text{Superf. Ocupada por planta} \times P / 100 \times \text{superf. Mojada por emisor.}$$

### 7) Dosis, intervalo entre riego y duración del riego

La cantidad de riego viene dada por la fórmula:

$$Dt = (n) (q) (t)$$

$$Dt = Nt (I)$$

**La dosis de riego** = (número de emisores) (el gasto del emisor)

**El intervalo** = (dosis de riego) / (necesidades diarias)

Para conocer el tiempo se ocupa de la fórmula:

$$T = (Nt) ( l ) / (n) ( q )$$

El caudal requerido es igual a la fórmula:

$$Qr = (NTr) (ha) / Tr$$

NTr = Necesidades totales de riego (l/m<sup>2</sup>)

ha = Superficie a regar (m<sup>2</sup>)

Tr = Tiempo de riego

El número de sectores o subunidades (Ns) es igual a la fórmula:

$$Ns = Qr / Qd$$

Qd = caudal disponible (l/h).

### 3.1.3 Diseño hidráulico.

El diseño hidráulico se efectuará después del diseño agronómico y basándose en otros datos como características del emisor elegido, topografía del terreno, etc. Consiste en dimensionar las líneas o tuberías encargadas de suministrar el agua hacia los emisores en campo (líneas laterales, secundarias y terciarias) para lo cual es necesario determinar las pérdidas de carga por fricción producidas en dichas líneas, así como las pérdidas de carga localizadas en los diferentes instrumentos de control, medición y conexión entre las líneas.

Las pérdidas de carga por fricción se determinaron para el caso de líneas laterales terciarias y secundarias

## 1. Cálculo de tuberías laterales

Para el cálculo de las tuberías laterales se emplea los siguientes pasos:

a) Para calcular el diámetro de un ramal lateral se necesita conocer los datos siguientes:

- Exponente de descarga y presión del emisor.
- Caudal en el origen del lateral.

El caudal se obtiene por medio de la fórmula en donde el exponente de descarga y /o presión del emisor es dependiendo del emisor que se vaya a escoger.

$$Q = n . q$$

.

- Longitud ficticia del lateral.

La longitud ficticia se calcula por medio de la fórmula:

$$Lf = L + (n . le)$$

- Teniendo los datos anteriores se aplicará la fórmula para obtener el diámetro:

$$D = ( 0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot x \cdot F \cdot Lf / 0.055 \cdot H )^{1/4.75}$$

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo y es el que se va a utilizar para la fórmula de la pérdida de carga

b) La pérdida de carga real se calcula según Blasius, mediante la fórmula:

$$h = J \cdot F \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf) / D^{4.75}$$

c) Por último se calcula la presión necesaria en el origen del lateral. Ésta se hace por medio de la fórmula:

$$Po = Pm + 0.73 h \text{ si el lateral es horizontal.}$$

## 2. Cálculo de tuberías o portalaterales.

Para calcular una tubería terciaria o portalaterales se siguen los siguientes pasos:

a) Conocer primero el diámetro y para calcular el diámetro necesitamos conocer:

- El caudal en el origen de la terciaria, que es igual al número de laterales que derivan de la terciaria por el caudal de cada uno.
- La longitud ficticia (Lf) de la terciaria, que es igual a la longitud real (L) más la longitud equivalente de los accesorios instalados. Para esto ocuparemos la fórmula

$$Lf = a \cdot L$$

a varía de 1.05 a 1.20

- La pérdida de carga admisible en la terciaria. Por medio de la fórmula

$$h'a = (0.1 / x) H - h$$

- Teniendo los datos anteriores se puede calcular el diámetro por medio de la fórmula:

$$D = 0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf / h'a)^{1/4.75}$$

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo.

b) Para conocer la pérdida de carga producidas en la terciaria se calculan mediante la fórmula:

$$H' = J \cdot F \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf) / D^{4.75}$$

c) Por último se calcula la presión en el origen de la terciaria mediante la fórmula:

$$P'o = Po + 0.73 h' + o - Hg / 2$$

## 3. Cálculo de tuberías secundarias.

Para el cálculo de las tuberías se sigue los pasos siguientes:

a) Para conocer el diámetro:

- Se conoce el caudal por los datos anteriores y se fija una velocidad (esta debe ser para tuberías de diámetro pequeño, estas son de 1.8 a 2)
- Teniendo los datos anteriores, el diámetro se calcula por medio de la fórmula:

$$D = 0.5947 \sqrt{Q / v}$$

Se elige el diámetro comercial más próximo por exceso, con respecto al valor que sale de aplicar la fórmula.

b) Teniendo el diámetro se puede calcular la pérdida de carga con la fórmula:

$$h'' = J \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot Lf) / D^{4.75}$$

c) Por último se calcula la presión en el origen de la secundaria = presión en el origen de la tubería terciaria + pérdida de carga en el tramo considerando de la secundaria + diferencia de cotas entre los extremos del tramo de secundaria considerado (signo + cuando es ascendente y signo - cuando es descendente).

Siguiendo estos pasos se pueden obtener tanto los diámetros, como las pérdidas de carga por fricción en el sistema de una manera fácil.

#### 4. Resultados

Los resultados del presente trabajo se desarrollan en dos fases esenciales; una fase de campo, en donde se recabaron los datos requeridos, para realizar la segunda fase, en donde se desarrolló el diseño agronómico y el diseño hidráulico.

En la primera fase se tomaron datos de clima, (Anexo 1), suelo, agua, cultivo. Tabla 2.14

Tabla 2.14 Datos requeridos para efectuar el diseño agronómico:

<b>Clima</b>	Obtenido de la estación meteorológica de FESC(anexo 1)
Precipitación.	Se tomó la pp media de cada mes (mm)
Temperatura	Se tomó la T. media de cada mes (C°)
Humedad Relativa	Se tomó la H.R media de cada mes (%)
Evaporación	-
Velocidad del viento	Se tomó a 2 m de altura del suelo para cada mes (m/s)
Porcentaje de horas luz	Se tomó para cada mes
<b>Suelo</b>	Análisis realizados en el laboratorio de suelos de la FES-C
Textura	Arcillosa
Densidad aparente	1.25 (gr/cm <sup>3</sup> )
Contenido de humedad a capacidad de campo	29.4 (P.s.s)
Contenido de humedad en el punto de marchites permanente	20.1 (P.s.s)
Infiltración básica	5 (mm/h)
Profundidad del suelo.	> 1 metro
<b>Parcela</b>	Se tomó en campo
Plano (área, dimensiones, linderos y obstáculos en el terreno)	Ancho de la parcela (36 m) Largo de la parcela (25 m) Área de la parcela (900m <sup>2</sup> ) Área útil de la parcela (468 m <sup>2</sup> ) Número de camas 13 ( 36 x 1 m = 36m <sup>2</sup> ) Número de hileras por cama ( 5)
Pendiente	-
Esporcimiento entre planta y entre hileras. Densidad de plantación	Distancia entre camas (1 m) Distancia entre hileras (0.25 m) Distancia entre planta (0.23 m) Número de plantas por hilera (155 aproximadamente) Número de plantas por cama (775 aproximadamente) Densidad total de plantación ( 10075 aprox.)
Porcentaje del área bajo riego	52 %
<b>Cultivo</b>	
Nombre (especie y variedad )	<i>Opuntia ficus indica</i> Variedad Copena F1
Etapas de desarrollo del cultivo	-
Coeficiente del cultivo	1
Profundidad de la zona radicular efectiva del cultivo	50 cm aproximadamente.
Máximo aprovechamiento permisible de agua por el cultivo	-
<b>Fuente de agua</b>	
Tipo de fuente y localización.	Toma de agua en la parcela experimental
Caudal o gasto	3 960 l/h
Horas de disponibilidad de la fuente	Sin restricciones
Calidad física y química del agua	Obtenidos a través de un análisis de agua en el laboratorio de Suelo y Aguas de la UACH (Tabla 2.13)

Con los datos de la calidad química del agua a utilizar se vieron si no había problemas por pH, salinidad e infiltración, para esto se vio el pH del agua es 7.18 el cual no tiene ningún problema según lo indica la tabla 2.9, después se vio la Conductividad Eléctrica y el RAS, el análisis de agua tenía una C.E de 0.33 dS /m, si vemos este valor en la tabla 2.6 "Directrices para evaluar los

problemas de salinidad” indica que para esa C. E no hay ninguna restricción para su uso en el riego; en cuanto la infiltración calculamos el RAS según la formula indicada y resultó de 0.98, se vio el resultado en la tabla 2.7 “Directrices para evaluar los problemas de infiltración, lo nos indica que no hay ninguna restricción en su uso, y no tendremos problemas de infiltración .

$$RAS = 0.97 / \sqrt{\frac{(1.04)^2 + (0.94)^2}{2}} = 0.9871$$

En cuanto a problemas de toxicidad el Boro no presenta problema para el cultivo. En forma general podemos decir que la calidad química del agua es buena para riego comparando los resultados con la tabla 2.9 Valores normales de análisis de agua de riego FAO.

Posteriormente se realizó el cálculo de las necesidades totales de riego del cultivo obteniéndose a partir de las necesidades netas, utilizando una estimación de la eficiencia de aplicación.

Para calcular las necesidades netas de riego. Se calculó primero la evapotranspiración del cultivo de referencia con el método de Blaney – Criddle. El resultado se multiplicó por el KC (1).

**Tabla 2.15. Meses calculados por el método de Blaney – Criddle.**

Mes	Fórmula $Et_o = C_e (a + b f)$	$Et_o$ (mm / día)	Kc	$Et_c$	$Et_c$ por mes
Enero	1.2252 (-180 + 0.97 (3.36))	1.787	1	1.787	55.4
Febrero	1.2252 (-180 + 0.97 (3.64))	2.120	1	2.120	59.36
Marzo	1.2252 (-180 + 0.97 (3.95))	2.488	1	2.488	77.12
Abril	1.2252 (-180 + 0.97 (4.29))	2.893	1	2.893	86.79
Mayo	1.2252 (-180 + 0.97 (4.63))	3.297	1	3.297	102.20
Junio	1.2252 (-145 + 0.8 (4.84))	2.967	1	2.967	89.01
Julio	1.2252 (-145 + 0.8 (4.72))	2.849	1	2.849	88.31
Agosto	1.2252 (-145 + 0.8 (4.55))	2.683	1	2.683	83.17
Septiembre	1.2252 (-145 + 0.8 (4.35))	2.487	1	2.487	74.61
Octubre	1.2252 (-145 + 0.8 (3.80))	1.948	1	1.948	60.39
Noviembre	1.2252 (-180 + 0.97 (3.54))	2.001	1	2.001	60.03
diciembre	1.2252 (-180 + 0.97 (3.40))	1.835	1	1.835	56.88

Como ejemplo tomaremos el mes de enero:

$$C = 1 + 0.1 (\text{elevación} / 1000) = 1 + 0.1 (2252 / 1000) = 1.2252 \text{ (igual para todos los meses)}$$

$$f = p (0.46 T + 8.13) = 0.25 (0.46 \times 11.61 + 8.13) 3.36$$

$$a = - 1.80 \text{ Tabla 2.5}$$

$$b = 0.97 \text{ Tabla 2.5}$$

En la tabla 2.4, se nos pide n/N, HR mínima y UD (en m/s). Para el mes de Enero tenemos que n es de 7.93 (tabla 1 anexo 1) y N = 11 (esto por estar en el Hemisferio Norte y Latitud de 20° Cuautlitlán se encuentra ubicado a 19° 42' 00''). Entonces n/N = 7.93/11 = 0.72.

La velocidad del viento (UD) es de 1.25 m/s (tenemos que 108.263 km/día lo pasamos a m/s, para esto lo multiplicamos por 0.0116 esto es = 1.25 m/s. y

La HR min = 64.05 para el mes de Enero.

Con todos los datos anteriores buscamos en la tabla 2.5 tenemos:

n / N es media

HR mínima= es alta y la velocidad del viento es baja por lo tanto nos da:

$$a = - 1.80$$

$$b = 0.97$$

Así procederemos para los demás meses restantes.

Enseguida se calculó la precipitación efectiva.

**Tabla 2.16. Precipitación efectiva**

Mes	Precipitación	Formula según P	P. e
Enero	11.31	0.6 (11.31) -10	0
Febrero	13.97	0.6 (13.97) -10	0
Marzo	12.30	0.6 (12.30) -10	0
Abril	26.33	0.6 (26.33) -10	15.73
Mayo	43.80	0.6 (23.80) -10	16.28
Junio	104.35	0.8 (104.35) -25	58.48
Julio	120.58	0.8 (120.58) -25	71.46
Agosto	109.91	0.8 (109.91) -25	62.92
Septiembre	85.93	0.8 (85.93) -25	43.74
Octubre	70.07	0.8 (70.07) -25	31.056
Noviembre	14.04	0.6 (14.04) -10	0
diciembre	8.67	0.6 (8.67) -10	0

Cuando  $P > 75$  mm  $P_e = 0.8P - 25$

Cuando  $P < 75$  mm  $P_e = 0.6P - 10$

Quedando las necesidades netas = evapotranspiración del cultivo menos la precipitación efectiva

**Tabla 2.17 Necesidades netas del cultivo**

Mes	Et <sub>c</sub> por mes	P. e	Et - Pe	Necesidades netas
Enero	55.4	-3.214 = 0	55.4 - 0	55.4
Febrero	59.36	-1.618 = 0	59.36 - 0	59.36
Marzo	77.12	-2.62 = 0	77.12 - 0	77.12
Abril	86.79	15.73	86.79 - 15.73	71.06
Mayo	102.20	16.28	102.20 - 16.28	85.9
Junio	89.01	58.48	89.01 - 58.48	30.53
Julio	88.31	71.46	88.31 - 71.46	16.85
Agosto	83.17	62.92	83.17 - 62.92	20.25
Septiembre	74.61	43.74	74.61 - 43.74	30.87
Octubre	60.39	31.056	60.39 - 31.15	29.33
Noviembre	60.03	-1.576 = 0	60.03 - 0	60.03
Diciembre	56.88	-4.798 = 0	56.88 - 0	56.88

Para calcular las necesidades totales de riego sólo se dividieron las necesidades netas entre el coeficiente de uniformidad quedando así las necesidades totales de riego.

Teniendo las NT por mes se divide entre los días de duración de cada mes y así obtendremos las necesidades diarias para la planta en (mm/día).



Tabla 2.18 Necesidades totales de riego

Mes	Necesidades netas (mm/mes)	Coefficiente de uniformidad	Necesidades totales (mm/mes)	Necesidades diarias (mm/día)	Necesidades Diarias (l/m <sup>2</sup> )	Necesidades diarias (l/cama)	Necesidades para 13camas (468 m <sup>2</sup> ) litros
Enero	55.4	0.81	68.39	2.20	2.2	79.20	1029.6
Febrero	59.36	0.81	73.28	2.61	2.6	94	1222
Marzo	77.12	0.81	95.21	3.07	3.1	110.5	1436.5
Abril	71.06	0.81	87.72	2.92	2.9	105.4	1370.2
Mayo	85.9	0.81	106.04	3.42	3.4	123.22	1600.56
Junio	30.53	0.81	37.70	1.25	1.3	45	585
Julio	16.85	0.81	20.80	0.67	0.7	24.11	313.43
Agosto	20.25	0.81	25	0.80	0.8	28.79	374.27
Septiembre	30.87	0.81	38.11	1.27	1.3	45.71	594.23
Octubre	29.33	0.81	36.20	1.16	1.2	41.75	542.75
Noviembre	60.03	0.81	74.11	2.47	2.5	88.91	1155.83
Diciembre	56.88	0.81	70.22	2.26	2.3	81.35	1057.55

Para obtener los litros por planta. Se procede a tomar el mes de mayo como ejemplo:

- Se conoce que 1mm es a 10 000 litros/ hectárea, entonces 3.42 mm (que es el máxima necesidad del mes de mayo) se obtendría:  
 $X = (3.42) (10\ 000) / 1 = 34\ 200$  litros por hectárea
- La cantidad que se obtiene es para una hectárea que es igual a 10 000 m<sup>2</sup>, pero lo que nosotros queremos es una cantidad de agua para una superficie de 468 m<sup>2</sup> que es la superficie de la parcela (Figura 2.11).

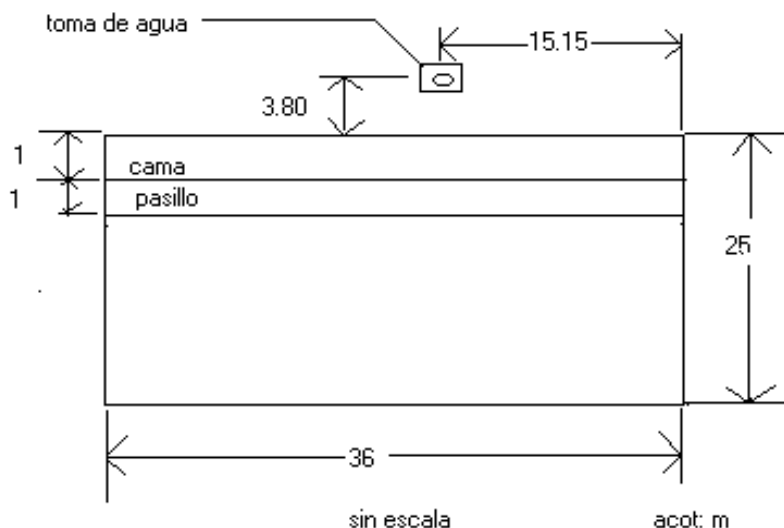


Figura 2.11 Diseño de plantación

Haciendo una regla de tres quedaría:

$$X = (468) (34\ 200) / 10\ 000 = 1\ 600.56 \text{ litros.}$$

- Los litros que se obtienen son para la superficie total útil de la parcela, para conocer los litros por planta, solo dividimos los litros entre la densidad de plantación de la parcela, esta cantidad es de 10 075 plantas entonces quedaría :

$1600.56 / 10\ 075 = 123.12$  litros por cama pero si dividimos esa cantidad entre la superficie total de la cama que es de  $36\ m^2$  nos da:  $3.42$  litro por metro cuadrado.

Este procedimiento se seguirá para todos los meses.

El coeficiente de uniformidad fue de  $0.81$ . La superficie mojado nos dio  **$1.4\ m$**  utilizando la fórmula para textura fina, y un gasto de emisor de  $2\ l/h$ .

$$d = 1.2 + 0.1 q = 1.2 + 0.1 (2) = 1.4\ m.$$

El porcentaje de superficie mojada, es de  $80\ \%$ . Con un número **de emisores por cama de 19**, se optó por calcular los emisores por cama, esto por la alta densidad de plantación que se tiene en la cama.

Partiendo de que el nopal tiene una alta densidad de plantación, se tomará la superficie de una cama de  $36\ m^2$ . Entonces tenemos que la superficie ocupada por planta es de  $36\ m^2$  el porcentaje de superficie mojada es de  $80\ \%$ , la superficie mojada por emisor es igual  $0.785\ d^2$  esto es igual a  $1.53\ m^2$  todos, estos datos los sustituimos en la fórmula:

Superf. Ocupada por planta  $\times P / 100 \times$  superf. Mojada por emisor.  $= 36 \times 80 / 100 \times 1.53 = 18.82$  esto es igual a  $19$  emisores separados a  $1.9$  metros uno de otro.

La dosis de riego es de  $38$  litros emisor esto por que la dosis de riego = (número de emisores) (el gasto del emisor)  $= 19 \times 2 = 38$  litros. El intervalo de riego fue de  $1$  día tenemos que el intervalo = (dosis de riego) / (necesidades diarias)  $= 38 / 123.22 = 0.308$ , se fija a  $1$  día el intervalo de riego.

El tiempo de riego quedó de  $3.24$  horas siguiendo la siguiente la fórmula  $T = (Nt) (l) / (n) (q)$   
Esto quedo  $123.22 \times 1 / 19 \times 2 = 3.24$  horas

El caudal requerido es igual a la fórmula:

$$Q_r = (NTr) (ha) / Tr : Q_r = 3.42 \times 468 / 3.24 = 494.40\ \text{litros/hora} = 0.137\ \text{litros/segundo}$$

El número de sectores o subunidades ( $N_s$ ) es igual a la fórmula:

$$N_s = Q_r / Q_d = 494.40 / 3960 = 0.12$$

Esto resulta que el caudal disponible, sobrepasa para abastecer el caudal requerido, por lo que no se tiene ningún inconveniente.

El diseño hidráulico se efectuará después del diseño agronómico.

## 1) Cálculo de tuberías laterales o terciarias.

### Datos:

Longitud = 36 m

Emisores = 19

Caudal por emisor = 2 l/h

Exponente de descarga del emisor = 0.54 (se tomó el emisor AZUD S-50 con un caudal de 2 l/h y

Presión de trabajo = 10 mca presión de trabajo de 10mca y longitud equivalente de 0.23 m

Longitud equivalente = 0.23 m. Con exponente de descarga de 0.54

Para el cálculo de las tuberías laterales se emplea los siguientes pasos:

- Caudal en el origen del lateral.

$$Q = n \cdot q = 19 \times 2 = 38 \text{ litros/ hora}$$

- Longitud ficticia del lateral.

$$L_f = L + (n \cdot l_e) = 36 + (19 \times 0.23) = 44.28 \text{ m}$$

- Factor de Christiansen = 0.390 ( $l_o = l \cdot B = 1.75$ ,  $n = 19$ ) ver tabla 2 anexo 2

- Teniendo los datos anteriores se calcula el diámetro:

$$D = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot x \cdot F \cdot L_f / 0.055 \cdot H)^{1/4.75}$$

$$D = (0.496 \cdot 38^{1.75} \cdot 0.54 \cdot 0.390 \cdot 44.28 / 0.055 \cdot 10)^{1/4.75}$$

$$D = 9.71 \text{ mm}$$

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo.

En este caso se toma un tubo de microirrigación PE 32 AZUB TUB con diámetro nominal de 12 mm y 10 mm de interior con presión nominal de 25 mca. Es el que se va a utilizar para calcular la pérdida de carga real.

$$h = J \cdot F \cdot L_f = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f) / D^{4.75}$$

$$h = J \cdot F \cdot L_f = (0.496 \cdot 38^{1.75} \cdot 0.390 \cdot 44.28) / 10^{4.75}$$

$$h = 0.0885 \text{ mca}$$

Por último se calcula la presión necesaria en el origen del lateral.

$P_o = P_m + 0.73 h$  si el lateral es horizontal.

$$P_o = 10 + 0.73 (0.0885) =$$

$$P_o = 10.06 \text{ mca}$$

## 2) Cálculo de portalaterales o secundarias.

Datos:

Derivan 13 laterales portagoteros

Separadas a 2 m

$l_o = l$  (2 m)

1) Para calcular una tubería terciaria o portalaterales se siguen los siguientes pasos:

- El caudal en el origen de la terciaria, que es igual al número de laterales que derivan de la terciaria por el caudal de cada uno.

$$Q = n \times q = 13 \times 38 = 494 \text{ l/h}$$

- La longitud real es:

$$L = (12 \times 2) + 2 = 26 \text{ m}$$

- La longitud ficticia (Lf) de la terciaria, que es igual a la longitud real (L) más la longitud equivalente de los accesorios instalados.

$$L_f = a \cdot L$$

a varía de 1.05 a 1.20

$$L_f = 1.20 (26) = 31.2 \text{ m}$$

- Factor de Christiansen  $F = 0.403$  ( $l_0 = 1$ ,  $B = 1.75$ ,  $n = 13$ )
- La pérdida de carga admisible en la terciaria.

$$h'_a = (0.1 / x) H - h$$

$$h'_a = (0.1 / 0.54) 10 - 0.0885$$

$$h'_a = 1.76 \text{ mca}$$

- Teniendo los datos anteriores se puede calcular el diámetro

$$D = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f / h'_a)^{1/4.75}$$

$$D = (0.496 \cdot 494^{1.75} \cdot 0.403 \cdot 31.2 / 1.76)^{1/4.75}$$

$$D = 12.74 \text{ mm}$$

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo.

En un principio se optó por la tubería de 12 mm de diámetro nominal, pero al ser del mismo diámetro que las laterales se cambió por un diámetro mayor. Para facilitar las conexiones, se tomó el tubo de PE de 20 mm de diámetro nominal y 17.4 de diámetro interno con una presión de 25 mca

2) Para conocer las pérdidas de carga producidas en la terciaria

$$h' = J \cdot F \cdot L_f = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f) / D^{4.75}$$

$$h' = J \cdot F \cdot L_f = (0.496 \cdot 494^{1.75} \cdot 0.403 \cdot 31.2) / 17.4^{4.75}$$

$$h' = 0.4133 \text{ mca}$$

3) Por último se calcula la presión en el origen de la terciaria

$$P'_o = P_o + 0.73 h' + o - H_g / 2$$

$$P'_o = 10.008 + 0.73 (0.4133) =$$

$$P'_o = 10.36 \text{ mca.}$$

### 3) Cálculo de tuberías primarias.

Para el cálculo de las tuberías se siguen los pasos siguientes:

Datos:

$$Q = 494 \text{ l/h}$$

$$P = 10.36 \text{ mca.}$$

$$L_f = a \times L = 1.20 (16) = 19.2 \text{ m}$$

Para conocer el diámetro:

- Se conoce el caudal por los datos anteriores y se fija una velocidad (esta debe ser para tuberías de diámetro pequeño, estas son de 1.8 a 2)
- Teniendo los datos anteriores, se calcula el diámetro

$$D = 0.5947 \sqrt{Q / v}$$

$$D = 0.5947 \sqrt{494 / 1.80}$$

$$D = 9.85 \text{ mm}$$

Se elige el diámetro comercial más próximo por exceso.. El tubo es igual que el de las portlaterales, teniendo el diámetro se puede calcular la pérdida de carga

$$h'' = J \cdot Lf = (0.496 \cdot Q^{1.75} \cdot Lf) / D^{4.75}$$

$$h'' = J \cdot Lf = (0.496 \cdot 494^{1.75} \cdot 19.2) / 17.4^{4.75}$$

$$h'' = 0.63 \text{ mca}$$

c) Por último se calcula la presión en el origen de la secundaria = presión en el origen de la tubería terciaria + pérdida de carga en el tramo considerando de la secundaria + diferencia de cotas entre los extremos del tramo de secundaria considerado (signo + cuando es ascendente y signo - cuando es descendente).

$$P = 10.36 + 0.63 = 10.99 \text{ mca o } 11 \text{ mca}$$

Por último para calcular la bomba utilizamos la fórmula:

$$HP = Q \cdot H / 76 \cdot EF$$

$$HP = (0.137) (11) / (76) (0.75) = 1.507 / 57$$

$$HP = 0.26 =$$

Con una bomba de ¼ de HP queda satisfecha la potencia, o para que quede sobrada con una de 1/2 HP es suficiente.

Por último se recomienda construir una cisterna para almacenar el agua a utilizar, ya que el caudal como la presión de la toma de agua es variable en el día y por lo tanto no se va a tener una uniformidad en el riego, se recomienda construir una cisterna o tambo cisterna, que tenga capacidad aproximada de 1600.56 litros que es la máxima demanda del cultivo; esto es 1.6 m3 de volumen, con una cisterna de 1 metro de ancho por 2 metro de largo y 1 de altura, es suficiente para contener el agua y queda sobrada.

En el anexo 3 queda el plano definitivo del sistema.

## Cálculo de materiales.

- Total de emisores = 247

Esto por que (19 emisores x 13 camas) se tomó el emisor AZUD S-50 con un caudal de 2 l/h y presión de trabajo de 10mca y longitud equivalente de 0.23 m Con exponte de descarga de 0.54

- Total de tubería de P.E para la lateral = 468 m

Esto por que (13 camas x 36 metros) se tomo el tubo de microrriogación PE 32 AZUB TUB con diámetro nominal de 12 mm y 10 mm de interior con presión nominal de 25 mca.

- Total de tubería de P.E para primaria y secundaria= 42 metros

Total de tubería de P.E para la secundaria = 26 m

Total de tubería de P.E para la primaria = 16 m

En estas dos tuberías se tomo el tubo el tubo de PE de 20 mm de diámetro nominal y 17.4 de diámetro interno con una presión de 25 mca.

- Tubo ciego para conectar las laterales con las secundarias= 13 metros
- 13 conectores con junta, de 20 mm con reducción a 12 mm de diámetro nominal.
- 13 tapones finales de 12 mm de nominal o simplemente hacer un doble al final de la tubería y asegurarla con una liga.
- Un codo de 90° de 20 mm de PE para conectar la secundaria con la primaria,
- Un juego de aditamentos para conectar la bomba a la cisterna (como pichancha, tubo succionador, etc).
- Un manómetro.
- Un filtro
- Una válvula de paso
- Válvula de alivio.

## 5. Conclusiones.

Se cumplió con el objetivo general de diseñar un sistema de riego por goteo en el cultivo del nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad *Copena F1* para la parcela experimental Núm. 12 de la FESC.

Por otro lado también se calcularon las necesidades de agua para el cultivo del nopal de acuerdo a un diseño agronómico tomando en cuenta el suelo, clima, cultivo, parcelación y fuente de agua.

Además de calcular las dimensiones hidráulicas de acuerdo al diseño agronómico para determinar, las pérdidas de carga y los diámetros más adecuados para el sistema.

Como el trabajo contemplo, la parte práctica analítica y teórica de diseño agronómico e hidráulico se propone implementar el sistema en campo, para ver su uniformidad de agua en campo.

Posteriormente hacer una evaluación del sistema en costo – beneficio, (principalmente rendimiento), para ver si es rentable, contar con el sistema.

Si es verdad que el trabajo se realizo para el cultivo del nopal, la misma metodología serviría para calcular los diseños agronómicos e hidráulicos de otros cultivos hortícolas, principalmente para parcelas pequeñas.

Cabe aclarar que la metodología propuesta será valida en las condiciones que se presentan en cuanto a suelo, agua, y clima.

Queda abierto el tema para implementar el sistema, dentro de la FESC, para que sirva como enseñanza, así como divulgación.

#### 4. Bibliografía.

1. Ángeles Montiel V. 2000. "Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado" Edit. UACH. Edic. 1era. Chapingo Edo. de Méx.
2. Ángeles Montiel V. 2002 "Fundamentos de Hidráulica para Diseño y Revisión de Riego Presurizado, Aspectos Teóricos" Edit. UACH. Edic. 1era. Chapingo Edo. de Méx.
3. Barbera Giuseppe, et al, 1999 "Agro ecología, cultivo y usos del Nopal" .FAO. Roma
4. Castañón Guillermo. 2000 "Ingeniería del Riego, utilización racional del agua" Edit. PARANINFO Edic. 1era. España
5. Domínguez Vivancos A 1990 "El abonado de los cultivos" Edit. Mundi – Prensa Edic. era Madrid España
6. Espinosa Bustos A. "Diseño, operación y evaluación de un sistema de riego por goteo en el cultivo de papa, en el Municipio de Guanajuato. 2000. Tesis de ing. Agrícola. FESC. Cuautlilán Izcalli, Edo. De Mex.
7. Flores Francisco G. "Caracterización agroclimática de la zona de influencia de la estación meteorológica Almaraz en Cuautlilán Izcalli, México. 1998. Tesis Ing. Agrícola FESC. Cuautlilán Izcalli, Edo. de México.
8. Fuentes Yagüe L. 1998 "Técnicas de riego". Edit. Mundi Prensa. Edic. 3ª . España Madrid.
9. González Gutiérrez E. "Tópicos selectos de la producción agrícola actual, Aportación técnica para la producción de nopal para verdura en microtunel en el Valle de Cuautlilán". 2000 Tesis de ing. Agrícola FESC. Cuautlilán Izcalli, Edo. de México.
10. Granados Sánchez D. 1991 "El nopal". Edit. Trillas. Edic. 1era. México.
11. INEGI "México Perfil de una Nación" 1987 Edic. 1era. México.
12. Jiménez Cisneros B. E. 2001 "La contaminación Ambiental en México, efectos y tecnología apropiada" Edit. Limusa. Edic. 1era. México.



13. López Rodrigo et al. 1997 "Riego localizado" Edit. Mundi Prensa Edic. 2ª España.
14. Martínez Cortijo Javier 2001 "Introducción al Riego" Edit. Universidad política de España. Valencia España.
15. Melgarejo Moreno P. 2000 "Tratado de fruticultura para zonas Áridas y semiáridas vol. 1 El medio ecológico, la higuera el acaparro y el nopal" Edit. Mundi Prensa. Edic. 1era. España.
16. Montalvo López Teodoro 1995 "Riego localizado, Diseño de instalaciones" Departamento de ingeniería rural y agroalimentaria. Universidad política de Valencia. España.
17. Moya Talens J. A. 1998 "Riego Localizado y Fertirrigación" Edit. Mundi Prensa Edic. 2ª España.

# ANEXOS

## ANEXO 1

Concentrado de datos climáticos promedio mensuales de la estación Almaraz (1987 – 1997)

Mes	T. M	PP	EVAP	ETP	H.I	R.S	P.A.M	H.A.M	V
E	11.61	11.31	98.98	74.24	7.93	396.44	584.77	64.05	108.263
F	12.78	13.97	114.08	85.56	9.03	482.21	584.35	63.90	118.448
M	14.12	12.30	165.51	124.13	9.01	536.21	583.63	60.91	141.759
A	15.64	26.33	160.15	120.11	8.16	520.30	583.52	60.04	133.850
M	17.08	43.80	151.72	113.79	8.69	537.95	583.98	64.20	137.720
J	17.43	104.35	144.79	108.60	7.41	511.33	584.02	69.38	143.690
J	16.57	120.58	128.57	96.43	7.14	509.27	584.86	77.58	145.618
A	16.48	109.91	113.00	84.75	7.07	493.53	585.59	74.01	141.262
S	16.11	85.93	100.33	75.25	5.96	449.64	585.22	74.29	132.237
O	14.17	70.07	97.46	73.09	6.84	421.11	585.39	70.78	104.671
N	13.17	14.04	85.94	64.46	8.03	401.90	585.84	67.30	107.703
D	11.96	8.67	79.69	59.77	8.09	388.18	588.61	66.00	77.212

*Flores 1998*

T. M = TEMPERATURA MEDIA C°

PP = PRECIPITACIÓN mm.

EVAP = EVAPORACIÓN.

ETP = EVAPOTRANSPIRACIÓN.

H. I = HORAS INSOLACIÓN.

R. S = RADIACIÓN SOLAR.

P. A. M = PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA.

H. A. M = HUMEDAD RELATIVA MEDIA.

V = VELOCIDAD DEL VIENTO Km /día

## ANEXOS 2

Tabla 2. Factor de Christiansen F

Tabla 2: Factor de Christiansen F

n	l <sub>0</sub> = 1					n	l <sub>0</sub> = l/2				
	β = 1,75	β = 1,80	β = 1,85	β = 1,90	β = 2,00		β = 1,75	β = 1,80	β = 1,85	β = 1,90	β = 2,00
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,650	0,644	0,639	0,634	0,625	2	0,532	0,525	0,518	0,512	0,500
3	0,546	0,540	0,535	0,528	0,518	3	0,455	0,448	0,441	0,434	0,422
4	0,497	0,491	0,486	0,480	0,469	4	0,426	0,419	0,412	0,405	0,393
5	0,469	0,463	0,457	0,451	0,440	5	0,410	0,403	0,397	0,390	0,378
6	0,451	0,445	0,435	0,433	0,421	6	0,401	0,394	0,387	0,381	0,369
7	0,438	0,432	0,425	0,419	0,408	7	0,395	0,388	0,381	0,375	0,363
8	0,428	0,422	0,415	0,410	0,398	8	0,390	0,383	0,377	0,370	0,358
9	0,421	0,414	0,409	0,402	0,391	9	0,387	0,380	0,374	0,367	0,355
10	0,415	0,409	0,402	0,396	0,385	10	0,384	0,378	0,371	0,365	0,353
11	0,410	0,404	0,397	0,392	0,380	11	0,382	0,375	0,369	0,363	0,351
12	0,406	0,400	0,394	0,388	0,376	12	0,380	0,374	0,367	0,361	0,349
13	0,403	0,396	0,391	0,384	0,373	13	0,379	0,372	0,366	0,360	0,348
14	0,400	0,394	0,387	0,381	0,370	14	0,378	0,371	0,365	0,358	0,347
15	0,397	0,391	0,384	0,379	0,367	15	0,377	0,370	0,364	0,357	0,346
16	0,395	0,389	0,382	0,377	0,365	16	0,376	0,369	0,363	0,357	0,345
17	0,393	0,387	0,380	0,375	0,363	17	0,375	0,368	0,362	0,356	0,344
18	0,392	0,385	0,379	0,373	0,361	18	0,374	0,368	0,361	0,355	0,343
19	0,390	0,384	0,377	0,372	0,360	19	0,374	0,367	0,361	0,355	0,343
20	0,389	0,382	0,376	0,370	0,359	20	0,373	0,367	0,360	0,354	0,342
22	0,387	0,380	0,374	0,368	0,357	22	0,372	0,366	0,359	0,353	0,341
24	0,385	0,378	0,372	0,365	0,355	24	0,372	0,365	0,359	0,352	0,341
26	0,383	0,376	0,370	0,364	0,353	26	0,371	0,364	0,358	0,351	0,340
28	0,382	0,375	0,369	0,363	0,351	28	0,370	0,364	0,357	0,351	0,340
30	0,380	0,374	0,368	0,362	0,350	30	0,370	0,363	0,357	0,350	0,339
35	0,378	0,371	0,365	0,359	0,347	35	0,369	0,362	0,356	0,350	0,338
40	0,376	0,370	0,364	0,357	0,345	40	0,368	0,362	0,355	0,349	0,338
50	0,374	0,367	0,361	0,355	0,343	50	0,367	0,361	0,354	0,348	0,337
60	0,372	0,366	0,359	0,353	0,342	100	0,365	0,359	0,353	0,347	0,335
80	0,370	0,363	0,357	0,351	0,340	200	0,365	0,358	0,352	0,346	0,334
100	0,369	0,362	0,356	0,350	0,338						
150	0,367	0,360	0,354	0,348	0,337						
300	0,365	0,359	0,353	0,346	0,335						
>300	0,364	0,357	0,351	0,345	0,333						

n = Número de salidas.

β = 1,75. Blasius, Cruciani-Margaritora.

β = 1,85. Hazen-Williams.

β = 1,786. Scimemi.

β = 1,90. Scobey.

β = 1,80. Iso, Veronese-Datei.

β = 2. Manning, Darcy-Weisbach.

En la práctica se toman los siguientes valores de β:

β = 1,75 para tubería de PE

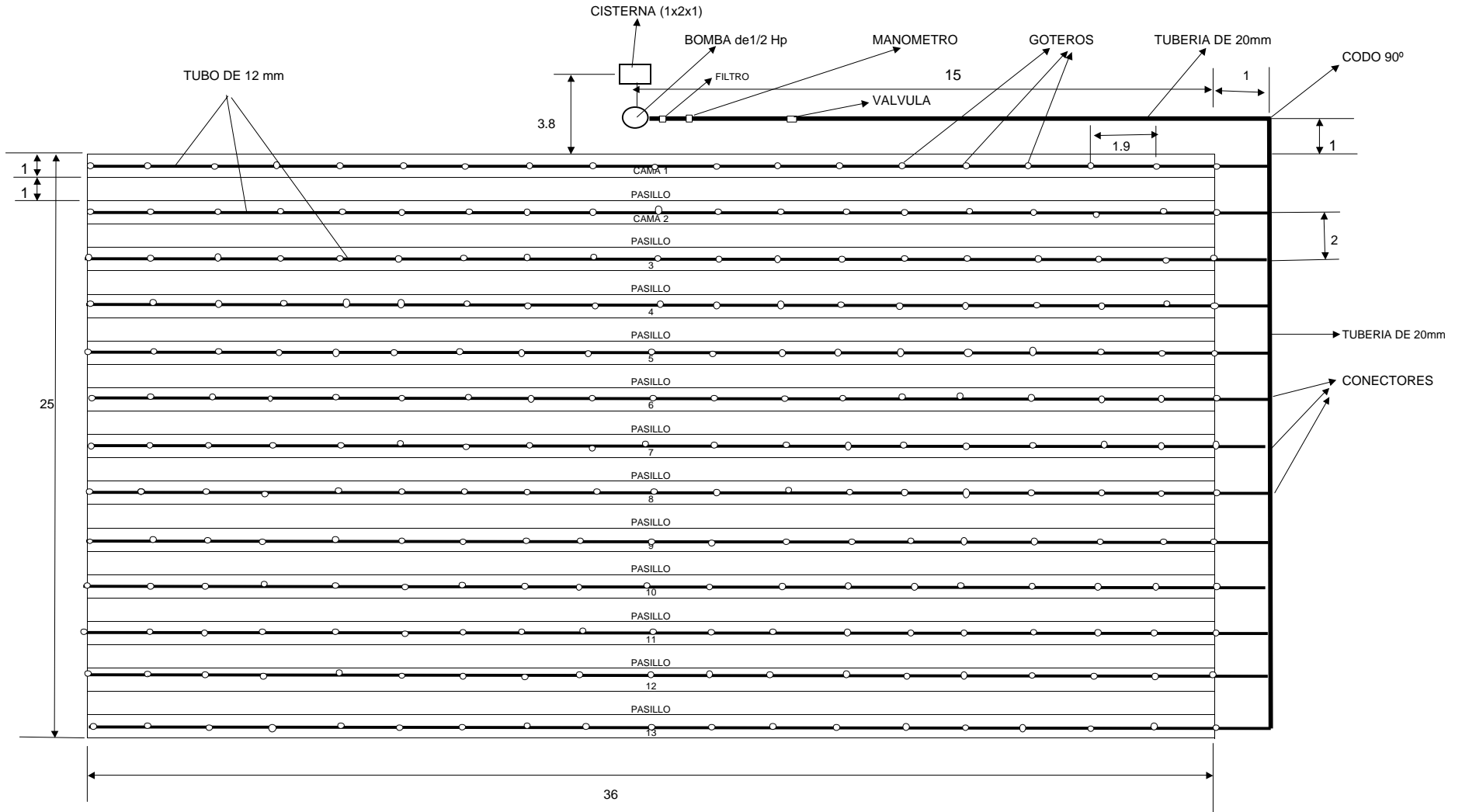
β = 1,80 para tubería de PVC

β = 1,85 - 1,90 para tubería de aluminio



ANEXO 3

PLANO GENERAL DEL SISTEMA DE RIEGO PARA EL CULTIVO DEL NOPAL



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

INGENIERIA AGRICOLA

DIBUJO: JULIO CESAR ROBLES RENTERIA

ESCALA: SIN ESCALA

PLANO DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO PARA EL CULTIVO DEL NOPAL

ACOT: METROS

FECHA: 5/MAYO/2006

