

## I.-INTRODUCCIÓN

Actualmente, de los 20 millones de hectáreas que en promedio se cosechan anualmente en México, solo 6.1% cuentan con infraestructura de riego (ICID, 1992), el valor de la producción en esta superficie es superior al 50% del valor total de la cosechada nacional, lo que significa que en áreas regadas la producción es de 2.5 a 3 veces mayor que la obtenida en áreas de temporal. La irrigación es un importante factor del desarrollo del país, pues la mitad de la producción agrícola proviene de la agricultura bajo riego.

Se estima que la eficiencia promedio del riego a nivel nacional es de un 60%, de manera que mejorando la aplicación a nivel parcelario se podría lograr un ahorro sustancial del agua que puede ser usado para incrementar la superficie bajo riego. Para lograr lo anterior, se tiene que estimar en forma precisa los requerimientos hídricos de los cultivos. Es por eso que los diferentes métodos que existen para estimar el contenido de la humedad del suelo y la calendarización del riego son de gran importancia en la agricultura ya que permiten definir la cantidad y la frecuencia del riego para que no se desperdicie el agua en riegos innecesarios, que pudieran provocar el lavado de nutrientes del suelo y percolación profunda.

Con el avance de las investigaciones para mejorar el aprovechamiento del agua se han logrado adoptar sistemas de riego cuya optimización se adecuara a la problemática de la escasez del vital líquido, en donde podemos situar la presencia de los sistemas de micro riego como una alternativa cuyas ventajas vienen a desplazar el uso de los sistemas de riegos tradicionales y que además se puede adecuar a diferentes condiciones de terreno, pero su uso está restringido a algunos cultivos especialmente de cobertura total.

Por lo anterior mencionado, en las zonas áridas y semiáridas con precipitaciones limitadas y distribución errática es necesario, mediante la investigación, eficientar el uso y manejo del agua así como la operatividad de los sistemas utilizados para la irrigación.

La utilidad práctica de las condiciones climáticas son de gran importancia ya que en muchas ocasiones permiten definir con buena precisión el cuanto y cuando regar para lograr las condiciones óptimas de producción

La programación del riego implica dos conceptos fundamentales.

a) Su determinación correcta del agua de riego

b) Su aplicación en el momento oportuno

El procedimiento de cuantificación de las laminas de riego es bastante conocido, su comprobación y conjugación con el momento oportuno de aplicación es bastante más complejo que lo que aparentan los conocidos algoritmos tradicionales. Sin embargo con el auxilio de las computadoras, es relativamente sencillo incorporar una gran variedad de factores fundamentales que intervienen en el proceso de irrigación, sobre todo para la determinación del balance hídrico para periodos de tiempos tan cortos como se deseen, adaptable a la aleatoriedad del clima.

El manejo de la información en periodos de tiempos cortos, abatiendo los factores aleatorios se le conoce como manejo en tiempo real.

El pronostico de riego en tiempo real se define como la determinación e integración espacial de las necesidades de riego instantáneas, mediante el análisis temporal (diario) de las condiciones climatológicas, del estado hídrico del suelo, de las características fisiológicas del cultivo (resistencia a déficit en las diferentes fases fenológicas), del grado de desarrollo y de la influencia de las características propias del sistema de riego. Esto permite conocer de manera instantánea los volúmenes de riego requeridos en cualquier punto de la red de distribución y las necesidades hídricas de cualquier cultivo en cualquier suelo y en cualquier lugar.

### **OBJETIVOS GENERALES**

Proyecto, diseño, instalación y automatización de un sistema de riego por microaspersión en las instalaciones del IMTA.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseño del sistema de riego por microaspersión
- Instalación del sistema de riego por microaspersión
- Operación del sistema de riego
- Calendarización de los requerimientos hídricos
- Monitoreo de las condiciones climatológicas
- Calibración del equipo utilizado para medir el contenido de humedad (TDR)
- Programación del equipo de automatización (Datalogger)

## **II.-REVISION DE LITERATURA**

### **2.1. Descripción del cultivo**

La citricultura es una rama de la fruticultura dentro de la que se incluye todos los frutos “agrios”, como son naranjas, limones, toronjas, pomelos, tangerinas, mandarinas, limas. Los cítricos son perenes y se distribuyen en áreas donde se disponga de suficiente pluviometría o posibilidades de riego para cubrir las necesidades hídricas de los árboles y siempre que el frío, si se produce, no sea tan intenso que pueda producirles la muerte.

### **2.1.1 Importancia de la citricultura en México**

La cítricultura en México es una fuente importante de divisas debido a la gran calidad de exportación de sus frutos, en cuanto a su buen sabor y presentación en el mercado. Estas características en cuanto a calidad, son resultado de las condiciones climáticas favorables de la zona productora de México (Saunt, 1991).

De acuerdo a datos recabados por el INEGI en 1990 se cosecharon 72,216 hectáreas de limón con una producción de 685,350 toneladas obteniéndose un rendimiento promedio de 9.4 toneladas por hectárea, destacando los estados de Colima, Michoacán, Oaxaca, Guerrero, Veracruz, Chiapas, Yucatán, Jalisco y Tamaulipas.

### **2.1.2 Origen y distribución geográfica**

Los cítricos se han originado a partir de especies procedentes del sureste asiático. Su cultivo data de los 300 años A.C. Los cítricos fueron introducidos a México por Juan de Grijalba, y fueron cultivados en un inicio solo en huertos de las familias acomodadas para su recreación.

Los cítricos se encuentran distribuidos en las regiones tropicales y subtropicales del mundo que presentan características similares, tales como:

- a) Latitudes entre 25° L.N. y 60° L.S.
- b) Temperaturas con límite inferior de 4 °C en invierno y entre 21 y 24 °C en verano.
- c) Un régimen pluvial entre 420 y 1542 mm anuales donde no exista riego.
- d) Suelos no alcalinos, con buen drenaje y un satisfactorio suministro de agua.

Estas características hacen que la producción de cítricos sea sobresaliente en regiones que las cumple de manera óptima.

### **2.1.3. Clasificación taxonómica de los cítricos, según Swingle**

|            |               |
|------------|---------------|
| Reino      | Vegetal       |
| Subreino   | Geraniales    |
| Familia    | Rutaceae      |
| Subfamilia | Aurantioideae |
| Tribu      | Citreae       |
| Subtribu   | Citrinae      |
| Genero     | Citrus        |
| Especie    | Gran cantidad |

#### **2.1.4 Descripción Botánica de los cítricos**

Los cítricos son perennes, su raíz es un eje vertical, con numerosas raíces secundarias, de tipo fibroso conduciéndose como si fueran adventicias (Tamaro, 1981). El sistema radical de los cítricos puede profundizar normalmente entre 1.2 y 2.0 m. Las raíces pueden desarrollarse hasta profundidades superiores a los 3 m en suelos arenosos y bien drenados.

Son árboles medianos de hojas perennes, con ramas angulares cuando son jóvenes, pero pronto toman forma redondeada, las ramas están provistas de espinas solitarias situadas en las axilas de la hoja (Praloran, 1977).

Las hojas están dispuestas en espiral, según la fórmula de tres octavos, es decir cada ciclo se compone de ocho hojas dispuestas en tres giros alrededor y de manera que la novena hoja se encuentra en la misma generatriz que la primera. El limbo de las hojas tiene glándulas de aceites esenciales que se manifiesta en forma de puntos translúcidos; peciolo alado y articulado con el limbo.

Las flores son solitarias, en corimbos, racimos terminales o axilares completas o estaminadas por abortamientos más o menos completa del pistilo; cáliz pequeño en forma de copa, tiene 4 o 5 sépalos y provistos de abundantes glándulas. Los estambres suelen ser cuatro veces superiores en número a los pétalos y, a veces, hasta de 6 a 10 veces más numerosos. El ovario es subglobuloso, el estilo del grado o truncado, pasando progresivamente a un estilo de espesor similar al de la parte superior del ovario; contiene de 8 a 18 lóculos, con 4 a 8 óvulos por lóculo, en dos hileras paralelas.

El fruto esta formado por segmentos que contienen las semillas colocadas en el ángulo interior, el resto del espacio lleno de pelos vesiculares pedunculares fusiformes, compuestos por grandes células de contenido acuoso. Los gajos están rodeados por un endocarpio blanco, en cuyo exterior se encuentra una corteza con numerosas glándulas de esencia que se vuelve amarilla al madurar.

Las semillas son ovaladas, más o menos angulosas, con uno o más embriones blancos o verdes (Pralorán, 1977).

### **2.1.5 Los cítricos y sus necesidades hídricas**

El riego es esencial para la producción de cítricos en zonas áridas y es un importante factor para mantener óptimos rendimientos y calidad en climas húmedos. Cuando el agua es insuficiente, el crecimiento se retrasa, las hojas se marchitan y caen al igual que los frutos jóvenes, y los que maduran son deficientes en cuanto a jugo y de baja calidad.

Cuando el déficit de agua en el suelo alcanza valores críticos, termina el crecimiento del árbol y posteriormente afecta a las hojas, después a las ramas jóvenes, a las ramas adultas y por ultimo a todo el árbol. Un estrés por sequía puede afectar también el fruto y crecimiento vegetativo en la temporada siguiente. El riego debe de ser calendarizado para suministrar condiciones de humedad optimas, hasta una profundidad de 0.5 a 1.0 m. debido a que es la profundidad en donde se presenta el mayor numero de raíces (10-90%), y donde la mayor absorción de agua ocurre. Los requerimientos de agua en cítricos varían con el clima, cobertura del suelo, practicas culturales, tamaño del árbol, edad, variedad y época del año. Sin embargo estas necesidades varían entre 110 a 190 lt./día/árbol adulto.

### **2.2. Calendarización del riego**

Los objetivos primordiales de la calendarización del riego son predecir cuanto y cuando aplicar el riego a los cultivos en sus diferentes etapas fisiológicas, y evaluar si los objetivos de riego fueron cumplidos. Para que se lleven a cabo estos objetivos, un buen programa de calendarización del riego involucra la determinación de los requerimientos hídricos de los cultivos, los requerimientos estacionales de riego de los cultivos, la lluvia aprovechable, la estimación del cambio en el contenido de humedad del suelo desde la

última vez que se calculó o se muestreó, la predicción de la tasa a la cual el contenido de humedad disminuirá en los próximos días sin la aplicación adicional de agua.

### 2.2.1. Indicadores de riego

Existen una infinidad de métodos para determinar cuanto y cuando regar. En general es posible calendarizar el riego basado en indicadores edáficos, vegetales, climáticos o indirectos usando un balance hídrico del sistema agua suelo planta.

Los indicadores vegetales generalmente se basan en la definición de una propiedad de la planta (color, temperatura, contenido de humedad, ángulo, enrollamiento de las hojas y apertura de los estomas) relacionado con el estrés hídrico para definir el momento del riego.

Existen dos tipos de indicadores edáficos entre los que se encuentran aquellos que se aplican para conocer la condición energética del agua en el suelo, también conocida como tensión, potencial mátrico (tensiómetros, psicrómetro-termocople, bloques porosos), y aquellos que nos permiten obtener información acerca del contenido de agua en el suelo (método gravimétrico, dispersor de neutrones y TDR). La Tabla 2.1 muestra las ventajas y desventajas de diferentes métodos para determinar el contenido de agua del suelo; reportados por Ley T.W. y P.E (1994).

| <b>Tabla 2.1 evaluación cuantitativa de aparatos para monitorear el agua del suelo</b><br>(una clasificación de 1 es des favorable, mientras que una clasificación de 10 es excelente)                                                                                                     |    |      |    |      |      |    |    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|----|------|------|----|----|-----|
| Aparato                                                                                                                                                                                                                                                                                    | NP | *TDR | GS | ATPC | HPCP | TM | GB | SGB |
| Costo inicial                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3  | 1    | 8  | 2    | 7    | 8  | 8  | 8   |
| Requerimientos de organización del sitio de campo                                                                                                                                                                                                                                          | 7  | 3    | 10 | 3    | 10   | 7  | 6  | 6   |
| Obtención de lecturas en una rutina                                                                                                                                                                                                                                                        | 8  | 8    | 1  | 8    | 4    | 10 | 8  | 8   |
| Interpretación de lectura                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10 | 10   | 10 | 10   | 3    | 5  | 3  | 5   |
| Precisión                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10 | 10   | 10 | 8    | 2    | 7  | 2  | 3   |
| Mantenimiento                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9  | 9    | 8  | 9    | 7    | 3  | 9  | 9   |
| Consideraciones especiales                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2  | 8    | 5  | 8    | 9    | 7  | 5  | 8   |
| Clasificación compuesta                                                                                                                                                                                                                                                                    | 49 | 49   | 52 |      | 42   | 47 | 41 | 47  |
| NP= Sondeo de neutrones TDR= Reflectómetro de dominancia de tiempo GS= Muestreo gravimétrico<br>HPCP= Sondeo de la capacitancia tipo varilla empujada a mano GB= Bloques de yeso<br>SGB= Bloques de yeso especiales TM= Tensiómetro ATCP= Sondeo de la capacitancia a través de un tubo de |    |      |    |      |      |    |    |     |

### 2.2.1.1 Reflectometría

Este método conocido como TDR por sus siglas en inglés (Time Domain Reflectometry) consiste en instalar dos o más varillas a las cuales se les manda un pulso eléctrico y con un sensor se estima el tiempo de recorrido del pulso desde que entra al inicio de la varilla hasta que retorna al encontrar una discontinuidad al final de la varilla

La constante dieléctrica esta inversamente relacionada a esta velocidad de propagación, una velocidad de propagación alta indica una baja constante dieléctrica y así un bajo contenido de agua en el suelo. A medida, que se incrementa el contenido de agua en el suelo, la velocidad de propagación decrece, y la constante dieléctrica se incrementa. El TDR, mide el promedio volumétrico del agua en el suelo a lo largo de la longitud de la varilla. La velocidad de propagación (v) de una onda electromagnética a través de una línea de transmisión es función del material dieléctrico existente entre el protector y el conductor de un cable coaxial, dicha velocidad se expresa en una constante dieléctrica (Ka). De acuerdo con Dalton et. al (1984) la velocidad se expresa de la siguiente manera:

$$v = \frac{c}{\sqrt{Ka}} \dots\dots\dots(1-1)$$

En donde:

v = Velocidad de propagación de la conductividad eléctrica (m.)

Ka = Constante dieléctrica aparente del suelo (adim.)

c = Velocidad de la luz al vacío  $2.997925 \times 10^8$  (m/seg.)

El valor de la (Ka) de un suelo se determina con el TDR sustituyendo el valor del material dieléctrico existente entre el protector y el conductor del cable coaxial con el suelo. Conociendo la longitud de la línea de transmisión y el intervalo de tiempo se determina (Ka) en el suelo con el TDR Es decir;

$$Ka = \left( \frac{c \times (tc - tb)}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots(1-2)$$

tc-tb = Intervalo de tiempo tc-tb que toma la onda electromagnética para recorrer una distancia desde el punto B al punto C y viceversa (Nseg).

L = Longitud de la varilla (m)

$\alpha$  = Constantes

Y por último en función de la  $k_a$  se determina el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta_v$ ) mediante una ecuación polinomial de tercer orden como se muestra a continuación:

$$\theta_v = \alpha_0 + (\alpha_1 * K_a) + (\alpha_2 * K_a^2) + (\alpha_3 * K_a^3) \dots \dots \dots (1-3)$$

La capacidad de este sistema incluye una precisión cerca del 97 % o más en suelos agrícolas. Este aparato puede ser usado tanto en suelos profundos como en suelos con pocas profundidades. Las lecturas no son afectadas por la salinidad del suelo como ocurre con otros métodos para valores de conductividad eléctrica  $< 2$  ds/m.

### 2.2.2. Definición y componentes de un balance de humedad

Norero (1976), conceptualiza el balance hídrico, como la formulación matemática de la ley de la conservación de la materia, aplicada al agua a un sistema dado, pudiendo ser este sistema de cualquier tamaño.

Maldión (1985), define el balance hídrico como la utilización de datos reales de precipitación e información climatológica, para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos.

La mayoría de los métodos para estimar el contenido de humedad del suelo mediante muestreo, son engañosos y caros; sin embargo, este contenido de humedad también puede ser estimado mediante el método de balance de humedad del suelo, si la evapotranspiración de los cultivos se estima con buena precisión (Palacios en 1980). Así, el contenido de humedad del suelo, expresado como una lámina, para el día  $i$ , puede ser estimado mediante el siguiente balance de entradas y salidas de agua en la zona radical:

$$L_{i+1} = L_i + P_{e_i} + R_i - ET_i - PP_i + OA_i - OE_i \dots \dots \dots (1-4)$$

Donde:

$L_{i+1}$  = Lamina de riego al inicio del día  $i+1$ , (mm).

$L_i$  = Lamina inicial el día  $i$  (mm)

$P_{e_i}$  = Precipitación efectiva durante el día  $i$ , (mm)

$R_i$  = Riego para el día  $i$ , (mm)

$ET_i$  = Evapotranspiración el día  $i$ , (mm)

$PP_i$  = Lámina drenada, ya sea escurrida o percolada, el día  $i$ , (mm)

$OE_i$  = Otras aportaciones.

$OE_i$  =Otras extracciones.

Para estimar el comportamiento del sistema suelo-planta-atmósfera, citado por Palacios (1984) se requiere desarrollar metodologías para:

- Calcular la evapotranspiración actual de los cultivos,
- Estimar los niveles de humedad del suelo en la zona radical,
- Relacionar dichos niveles de humedad con los rendimientos de los cultivos.

Los modelos más complejos menciona Luque (1984), aplican el flujo en medios porosos en tres dimensiones, sin embargo debido a la gran variabilidad del suelo, los métodos mas simplificados y prácticos suponen que no hay aportación freática.

La complejidad de las interacciones, del suelo, las plantas y la atmósfera, han sido el principal obstáculo en el desarrollo de un modelo dinámico y completo del sistema suelo-planta-atmósfera (Rojas, 1978).

La ecuación de predicción del contenido de humedad requiere la estimación de la humedad aprovechable del suelo, el crecimiento radical y la profundidad de las raíces, una estimación de la  $ET_c$ , registros de lluvia y riego aplicado.

La exactitud de la ecuación de predicción depende de la magnitud de los siguientes errores potenciales:

- Limitaciones en la metodología para evaluar la evapotranspiración real del cultivo: ecuaciones para predecir  $ET_o$  inexactas, coeficientes de cultivo y desarrollo radical inexactos, etc.
- Errores en la instrumentación meteorológica.
- Inexactitud en la medición de la lluvia y riego aplicado.
- Errores en la estimación de valor inicial del contenido de humedad ( $H_o$ ) o lámina inicial ( $L_o$ ).

### **2.2.2.1. Precipitación y Precipitación Efectiva**

La precipitación efectiva es la porción de la precipitación que puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas (Oliver, 1963). Por lo tanto, el aprovechamiento de la lluvia depende de varios factores, tales como:

- a).-Intensidad, duración y distribución de la lluvia.
- b).-Velocidad de infiltración en el suelo.
- c).-Cobertura vegetal.
- d).-Topografía

Es de gran importancia conocer la lluvia como fuente de abastecimiento para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo. En zonas de temporal, determinando la cantidad de lluvia se puede estimar la cantidad de agua que podrá ser utilizada por el cultivo, y con ello programar los cultivos que se desarrollan adecuadamente.

En los distritos de riego la estimación de la precipitación efectiva es muy necesaria, ya que conociendo dicha precipitación, se pueden ahorrar grandes volúmenes de agua en riegos innecesarios y con ello incrementar las áreas de riego, logrando con esto eficientar el uso de dicho recurso.

Existen diferentes métodos para la determinación de la precipitación efectiva, basados en fórmulas más o menos complejas que no coinciden en los resultados, ya que en cada uno de ellos se ponderan factores que no son representativos dando como resultado valores que están lejos de la realidad. y sus predicciones se desvían.

Se han llevado a cabo muchas investigaciones para encontrar un método que permita hacer una estimación aceptable del agua de lluvia que pueda ser aprovechada por los cultivos y existen muchos procedimientos, la mayoría de los cuales solamente dan una idea sobre la lamina que puede ser aprovechada de la que se precipita. Sin embargo, el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América proponen el método de Ogrosky y Mockus el cual permite una estimación relativamente confiable de la cantidad de agua que puede ser utilizada por el cultivo.

$$Pe=Cp \times P \dots\dots\dots(1-5)$$

$$Cp = \frac{\frac{ETc}{P}}{1.53 + 0.8 \times \frac{ETc}{P}} \dots\dots\dots(1-6)$$

En donde:

Pe = Precipitación efectiva (mm)

P = Precipitación observada (mm)

ETc = Evapotranspiración del cultivo

Cp = Coeficiente de conversión de lluvia observada a lluvia aprovechada

#### **2.2.2.2. Percolación profunda**

La percolación profunda es considerada como una pérdida de agua, sólo si el agua no puede ser recuperada, o si la cantidad del agua recuperada no es suficiente para fines de riego. El movimiento del agua de riego en las capas de suelo localizadas abajo de la zona de raíces de la planta es un problema que se puede evitar en suelos finos o pesados, pero es difícil en suelos gruesos o ligeros. Además de ser un gasto inútil de agua, la percolación profunda produce otros efectos adversos, tales como el arrastre de los nutrientes del suelo y la saturación del mismo al aumentar los niveles de las aguas freáticas. Para suelos susceptibles de permanecer prácticamente saturados, el drenaje de los mismos es necesario y efectivo. Sin embargo, los sistemas de drenaje son costosos y su deficiencia da lugar a prácticas de riego pobres y por lo tanto pérdidas de agua.

#### **3.2.2.3. Riego**

El objetivo que se pretende con el riego es satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, aplicando el agua uniformemente y de forma eficiente, es decir, que la mayor cantidad de agua aplicada quede almacenada en la zona radical a disposición del cultivo. Este objetivo debe de alcanzarse sin alterar la fertilidad del suelo y con una mínima interferencia sobre el resto de las labores del cultivo.

Los factores que se manejan para proveer a los cultivos del agua que necesitan para que su productividad sea óptima, son principalmente la energía, agua, mano de obra y sistematización o equipamiento, existiendo una completa interrelación entre ellos, de tal manera que al disminuir un factor, implica mayor necesidad de otros. La solución a adoptar será la que contenga una combinación de recursos con un resultado económico óptimo, de acuerdo con las condiciones que vengán impuestos por la realidad existente. La lámina de

riego expresada en contenido de humedad en un determinado momento puede expresarse de la siguiente manera:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_{actual}) Pr \dots \dots \dots (1-7)$$

En donde:

$L_r$  = Lámina de riego (cm)

$\theta_{cc}$  = Contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo

$\theta_{actual}$  = Contenido de humedad volumétrico inicial

$Pr$  = Profundidad de raíces (cm)

#### **2.2.2.4. Evapotranspiración**

Penman (1948) define la evapotranspiración potencial como el agua consumida por el cultivo tipo gramínea, que cubre totalmente la superficie del suelo de 8 a 15 cm de altura, un crecimiento activo y que en ningún momento le falta agua. El mismo Penman (1956), menciona Trava (1972), modifica el concepto de Thornthwaite y añade que la superficie del suelo estuviera totalmente cubierta por vegetación verde, pues se ha observado que la evapotranspiración depende de la densidad de la cubierta vegetal y de la edad de la planta.

Palacios (1980) describe la evapotranspiración como un “proceso complejo, en el que intervienen no solo factores atmosféricos sino también de la planta y del suelo. La evapotranspiración hídrica del suelo y de las hojas de las plantas, implica un cambio o transformación de la fase líquida del agua o gaseosa para ser transferida a la atmósfera circundante. Pero adicionalmente a la mencionada energía, para que se produzca la evaporación, es necesario que exista un gradiente en la presión de vapor entre la superficie líquida evaporante y el aire que la rodea, por lo que el viento que remueve el vapor cercano de la superficie evaporante tiene un importante rol en el proceso.

Para Norero (1976) la evaporación es el proceso por el cual el agua de un cuerpo terrestre experimenta un cambio de fase, de líquido a gas, y es transferido a la atmósfera circundante. La transpiración es la evaporación de agua en los organismos vivos,

incluyendo las plantas. La evapotranspiración es la evaporación simultánea desde un suelo cubierto de vegetación y desde los tejidos de las plantas, principalmente hojas.

Ocurre evaporación cuando existe:

- a) Energía para cambiar de fase líquida a gaseosa
- b) Disponibilidad en la atmósfera para absorber el vapor desprendido de la superficie.

Factores que intervienen en el proceso evapotranspirativo

a) Clima:

- Radiación solar y terrestre
- La temperatura del aire
- La humedad relativa
- El viento

b) Planta:

- Albedo o coeficiente de reflexión
- Inclinação, tamaño, forma y densidad de follaje
- Altura y flexibilidad de las plantas
- Orientación de siembra

c) Suelo:

- Textura
- Porosidad
- Conductividad hidráulica (permeabilidad)
- Color
- Capacidad de retención de humedad
- Salinidad

Para determinar la ETr se utiliza la formula siguiente:

$$E_{Tr} = E_{To} * K_c \dots \dots \dots (1-8)$$

En donde:

ETr = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

$E_{To}$  = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

$K_c$  = Coeficiente de cultivo que depende de la etapa fisiológica del cultivo (Tabla 2.2)

#### **2.2.2.4.1. Métodos para estimar la Evapotranspiración**

Los procedimientos pueden clasificarse en métodos directos e indirectos menciona Aguilera y Martínez (1980). Los primeros proveen directamente el consumo total de agua requerida, utilizando para ellos aparatos e instrumentos para su determinación; los segundos estiman el consumo de agua a través de todo el ciclo vegetativo, mediante el uso de fórmulas empíricas, que se basan en datos meteorológicos para la obtención de la evapotranspiración potencial y luego un ajuste mediante coeficientes para cada cultivo, zona y otras condiciones variantes que afectan el consumo de agua por las plantas.

La FAO ha sometido a prueba cuatro fórmulas de predicción ampliamente utilizadas, contrastándolas con los datos medidos de evapotranspiración en distintas zonas geográficas y condiciones climáticas. El método seguido por la FAO consistió en relacionar la magnitud y la variación de la evapotranspiración con uno o más factores climáticos (horas de luz, temperatura, humedad, viento, insolación). Para ello, se utilizan datos medidos de evapotranspiración de una cubierta de gramíneas. Suponiendo que la evapotranspiración de éstas es provocada en gran medida por las condiciones climáticas. Con esto se introdujo un valor de referencia ( $E_{To}$ ), que se definió como “la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que cubren totalmente el suelo y que no escasean de agua”. Las cuatro fórmulas de predicción de ensayo de la FAO son:

##### **a) Blaney-Cridde.**

Estos autores desarrollaron una fórmula en el Oeste de los Estados Unidos en el año de 1950; dicha fórmula es una de los métodos más ampliamente utilizados para calcular las necesidades hídricas de un cultivo. El método de Blaney-Cridde solo recurre a los datos de temperatura y al porcentaje de horas diurnas para predecir los efectos del clima sobre la evapotranspiración. Esto recibe el nombre de factor de uso consuntivo y se expresa de la siguiente manera:

$$f = p \times (0.46t + 8.13) \dots\dots\dots(1-8)$$

En donde:

$f$  = Evaporación estimada por Blaney-Criddle en función de la temperatura(mm)

$p$  = Porcentaje de horas diurnas anuales durante el periodo considerado

$t$  = Temperatura (°C)

Una vez determinado el factor de uso consuntivo se estima la ETo a partir de tablas que relacionan la humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diurnos. Este valor de ETp es para todos los cultivos del mismo lugar. Para calcular la evaporación de un cultivo en específico se debe de afectar la ETp por los coeficientes de cada cultivo.

El método de Blaney-Criddle solamente debe de utilizarse cuando los datos de temperatura sean los únicos datos meteorológicos concretos disponibles. Además para calcular la ETo debe de emplearse a períodos que no sean inferiores al mes.

Este método no debe emplearse en las regiones ecuatoriales, en las que la temperatura se mantiene relativamente constante pero en las que variarán otros parámetros meteorológicos. Tampoco debe utilizarse en el caso de las islas pequeñas, en las que las temperaturas del aire está en general en función de la temperatura del mar circundante, y reacciona muy poco ante la evolución estacional de la radiación. A gran altitud, el método parece incierto debido a la temperatura diaria mínima bastante baja (noches frías), incluso cuando sean muy fuertes de los niveles de radiación diurna. También en los climas en los que hay una gran variabilidad de las horas de insolación durante los meses de transición (como por decir, climas monzónicos, climas de latitud media en primavera y en otoño).

## **b) Radiación.**

Este método se usa en aquellas regiones en donde se cuente con datos de mediciones sobre la insolación, o la nubosidad o la radiación y la temperatura del aire medidas, pero no el viento y la humedad, se sugiere el empleo del método de la radiación para predecir los efectos del clima sobre las necesidades de agua de los cultivos. Se puede utilizar la medición directa de la duración de las horas de fuerte insolación o, cuando no se conozcan; observaciones de la nubosidad, para obtener una medición de la radiación solar. Solamente se necesitan además de estos datos los niveles generales de humedad y vientos.

Este método predice los efectos del clima sobre las necesidades de agua de los cultivos. Se ha calculado ya la fórmula de la radiación con respecto a un gran número de ubicaciones y climas distintos. En esos puntos, además de los medidos de temperatura y radiación solar, se disponía de datos sobre el viento y la humedad, así como de la evapotranspiración de las gramíneas medidas *in-situ*. Se establecieron unas relaciones entre la radiación y la evapotranspiración del cultivo de referencia (gramíneas), ETo; teniendo en cuenta la humedad y el viento.

Para la determinación de la ETp se utiliza la fórmula siguiente:

$$ETp = a+b*W*Rs.....(1-9)$$

En donde:

ETp= Evapotranspiración de potencial (mm/día)

Rs= Radiación solar expresada en equivalente de evaporación (mm/día)

W= Índice de ponderación que depende de la temperatura y altitud.

a,b= Son coeficientes que dependen de las condiciones climatológicas generales (HR y vientos diurnos)

Los resultados que se consiguen con el método de la radiación son más fiables que los del método de Blaney-Criddle. De hecho, en las zonas ecuatoriales, en las islas o a gran altitud, este método será mas seguro, incluso cuando no se disponga datos sobre la nubosidad o la fuerte insolación, en cuyos casos, los datos de la radiación solar preparados para la inmensa mayoría de los puntos de todo el mundo; proporcionaran los datos necesarios sobre la radiación solar.

En condiciones de vientos diurnos similares y humedad relativa, existe una buena correlación entre W.Rs y la ETp para diferentes tipos de temperatura. Como las condiciones climáticas en cada mes o en un periodo de tiempo varían y por consiguiente la ETp también, es necesario calcular la ETp para cada mes o periodo correspondiente con respecto a cada año.

| <b>Tabla 2.2 Coeficiente de cultivo (Kc)</b> |           |            |           |           |           |                          |
|----------------------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|
| Cultivo                                      | Inicial   | Desarrollo | Mediados  | Finales   | Cosecha   | Periodo vegetativo total |
| Plátano                                      |           |            |           |           |           |                          |
| Tropical                                     | 0.4-0.5   | 0.7-0.85   | 1.0-1.1   | 0.9-1.0   | 0.75-0.85 | 0.7-0.8                  |
| Subtropical                                  | 0.5-0.65  | 0.8-0.9    | 1.0-1.2   | 1.0-1.15  | 1.0-1.15  | 0.85-0.95                |
| Frijol                                       |           |            |           |           |           |                          |
| Verde                                        | 0.3-0.4   | 0.65-0.75  | 0.95-1.05 | 0.90-0.95 | 0.85-0.95 | 0.85-0.90                |
| Seco                                         | 0.3-0.4   | 0.7-0.8    | 1.05-1.2  | 0.65-0.75 | 0.25-0.3  | 0.70-0.80                |
| Col                                          | 0.4-0.5   | 0.7-0.8    | 0.95-1.1  | 0.9-1.0   | 0.8-0.95  | 0.7-0.8                  |
| Algodón                                      | 0.4-0.5   | 0.7-0.8    | 1.05-1.25 | 0.8-0.9   | 0.65-0.70 | 0.80-0.90                |
| Vid                                          | 0.35-0.55 | 0.6-0.8    | 0.7-0.9   | 0.6-0.8   | 0.55-0.70 | 0.55-0.75                |
| Cacahuete                                    | 0.4-0.5   | 0.7-0.8    | 0.95-1.1  | 0.75-0.85 | 0.55-0.60 | 0.75-0.80                |
| Maíz                                         |           |            |           |           |           |                          |
| Dulce                                        | 0.3-0.5   | 0.7-0.9    | 1.05-1.2  | 1.0-1.15  | 0.95-1.1  | 0.80-0.95                |
| Grano                                        | 0.3-0.5   | 0.7-0.85   | 1.05-1.2  | 0.8-0.95  | 0.55-0.6  | 0.75-0.90                |
| Cebolla Seca                                 | 0.4-0.6   | 0.7-0.8    | 0.95-1.1  | 0.85-0.9  | 0.75-0.85 | 0.80-0.90                |
| Cebolla Verde                                | 0.4-0.6   | 0.6-0.75   | 0.95-1.05 | 0.95-1.05 | 0.95-1.05 | 0.65-0.80                |
| Papa                                         | 0.4-0.5   | 0.7-0.8    | 1.05-1.2  | 0.85-0.95 | 0.7-0.75  | 0.75-0.90                |
| Arroz                                        | 1.1-1.15  | 1.1-1.5    | 1.1-1.3   | 0.95-1.05 | 0.95-1.05 | 1.05-1.2                 |
| Cártamo                                      | 0.3-0.4   | 0.7-0.8    | 1.05-1.2  | 0.65-0.70 | 0.2-0.25  | 0.65-0.70                |
| Sorgo                                        | 0.3-0.4   | 0.7-0.75   | 1.0-1.15  | 0.75-0.80 | 0.5-0.55  | 0.75-0.85                |
| Soya                                         | 0.3-0.4   | 0.7-0.8    | 1.0-1.15  | 0.70-0.80 | 0.4-0.5   | 0.75-0.90                |
| Remolacha azúcar                             | 0.4-0.5   | 0.75-0.85  | 1.0-1.3   | 0.9-1.0   | 0.6-0.7   | 0.8-0.9                  |
| Caña de azúcar                               | 0.4-0.5   | 0.7-1.0    | 1.05-1.3  | 0.75-0.80 | 0.5-0.6   | 0.85-1.05                |
| Girasol                                      | 0.3-0.4   | 0.7-0.8    | 1.05-     | 0.70-     | 0.35-0.45 | 0.75-0.85                |

|                                                                                                                                        |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
|                                                                                                                                        |            |            | 1.2       | 0.80      |           |            |            |            |            |            |           |           |
| Tabaco                                                                                                                                 | 0.3-0.4    | 0.7-0.8    | 1.0-1.2   | 0.90-1.0  | 0.75-0.85 | 0.85-0.95  |            |            |            |            |           |           |
| Tomate                                                                                                                                 | 0.4-0.5    | 0.7-0.8    | 1.05-1.25 | 0.80-0.95 | 0.6-0.65  | 0.75-0.90  |            |            |            |            |           |           |
| Sandía                                                                                                                                 | 0.4-0.5    | 0.7-0.8    | 0.95-1.05 | 0.80-0.90 | 0.65-0.75 | 0.75-0.85  |            |            |            |            |           |           |
| Trigo                                                                                                                                  | 0.3-0.4    | 0.7-0.8    | 1.05-1.2  | 0.65-0.75 | 0.2-0.25  | 0.80-0.90- |            |            |            |            |           |           |
| Alfalfa                                                                                                                                | 0.3-0.4    |            |           |           | 1.05-1.2  | 0.85-1.05  |            |            |            |            |           |           |
| Olivo                                                                                                                                  |            |            |           |           |           | 0.40-0.60  |            |            |            |            |           |           |
| Coeficientes de cultivo para cítricos en función de la cubierta vegetal para los diferentes meses del año                              |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |
| Cubierta vegetal (Cítricos)                                                                                                            | E          | F          | M         | A         | M         | J          | J          | A          | S          | O          | N         | D         |
| >70%, libres de malezas                                                                                                                | .5<br>.75  | .5<br>.75  | .55<br>.8 | .55<br>.8 | .55<br>.8 | .6<br>.85  | .6<br>.85  | .6<br>.85  | .6<br>.85  | .6<br>.85  | .55<br>.8 | .55<br>.8 |
| >70%, sin control de malezas                                                                                                           |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |
| 50%, libres de malezas                                                                                                                 | .45<br>.75 | .45<br>.75 | .5<br>.8  | .5<br>.8  | .5<br>.8  | .55<br>.85 | .55<br>.85 | .55<br>.85 | .55<br>.85 | .55<br>.85 | .5<br>.85 | .5<br>.8  |
| 50%, sin control de malezas                                                                                                            |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |
| <20%, libres de malezas                                                                                                                | .4<br>.85  | .4<br>.85  | .4<br>.9  | .4<br>.9  | .4<br>.9  | .45<br>.95 | .45<br>.95 | .45<br>.95 | .45<br>.95 | .45<br>.95 | .4<br>.9  | .4<br>.9  |
| <20%, sin control de malezas                                                                                                           |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |
| Fuente: Doorenbos y Kassam, 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Monografía de Riego y Drenaje de la FAO, n° 33 |            |            |           |           |           |            |            |            |            |            |           |           |

### c) Tanque Evaporímetro

Los tanques evaporímetros permiten medir los efectos integrados de la radiación, el viento, la temperatura, y la humedad en función de la evaporación de una superficie de agua libre. La capacidad de reflexión de la radiación que tiene una superficie de agua es de tan solo un 5 al 8%, sin embargo la mayoría de las superficies vegetales reflejan entre el 20 y 25% de la radiación solar total recibida.

El almacenamiento diurno de calor del tanque puede ser apreciable y provocar una distribución casi igual de la evaporación entre el día y la noche, al paso que la mayoría de los cultivos pierden un 95% o más de la que corresponda a las 24 hrs durante las horas diurnas. Así mismo, una gran diferencia entre las pérdidas de agua de los tanques y de los cultivos pueden deberse a la variación de la turbulencia del aire justo encima de esas superficies y a la temperatura y humedad del aire inmediatamente adyacentes a ellas. En el caso de tanques hundidos en el suelo, como de las que están sobre el suelo pueden haber una transferencia de calor por los costados; esto puede ser un error grave en el caso de los

tanques hundidos en un barbecho. La medición queda también afectada por el color del tanque y la utilización de pantallas para protegerla contra los pájaros. Su ubicación y el medio que la rodea influirá en los resultados medidos especialmente cuando esté colocada en campos cultivados y no en barbechados.

A pesar de estas deficiencias, con una buena colocación el mantenimiento de las condiciones del tanque y del medio que la circula normalizados, sigue estando justificado su empleo para predecir las necesidades de agua para los cultivos en períodos de 10 días o más tiempo. A fin de relacionar la evaporación en tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia  $E_{To}$ , se sugiere unos coeficientes, obtenidos empíricamente y que toman en cuenta el clima, el tipo de tanque y su medio circundante. De entre los muchos tipos de tanques se ha elegido el tanque tipo A.

Para la determinación de la  $E_{To}$  se utiliza la siguiente fórmula

$$E_{Tp} = K_p * E_o \dots\dots\dots(1-10)$$

Donde:

$E_{Tp}$  = Evapotranspiración del cultivo de referencia, mm/día

$K_p$  = Coeficiente del tanque, adimensional

$E_o$  = Evaporación del evaporímetro, mm/día

Una ventaja de gran importancia de este método, es la facilidad para la medición de la evaporación, y el instrumento es muy simple, por lo que muchas estaciones meteorológicas del país lo utilizan.

**d) Penman-Monteith**

Es quizá una de las ecuaciones semiempíricas mas usadas para estimar la evapotranspiración de referencia, debido principalmente a que se han obtenido resultados satisfactorios sobre todo para zonas húmedas. En una reunión de expertos (FAO, 1990) se determinó recomendar universalmente el método de Penman-Monteith para estimar la  $E_{To}$ . En varios estudios comparativos han mostrado que el procedimiento de Penman-Monteith es mucho más consistente y preciso que otros; además incluye la mayor parte de los

$$E_{To} = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{\gamma M_w (e_s - e_a)}{R K_{rv} (\Delta + \gamma)} \dots\dots\dots(1-11)$$

factores que influyen en la pérdida de agua de la superficie de los cultivos, por lo tanto las estimaciones se esperan más precisas para zonas áridas y semiáridas, los valores obtenidos con esta ecuación han estado por debajo de los valores reales. Actualmente la ecuación de Penman da buenas aproximaciones de la ETo para zonas áridas, debido a que se ha adaptado para condiciones de regiones secas donde la oscilación diaria de temperatura es mayor que la considerada originalmente en zonas húmedas, para las que se diseñó este método.

En donde:

$E_{Tp}$  = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

$R_n$  = Radiación neta en calorías / día

$G$  = Flujo térmico del suelo ( $Kw\ m^{-2}$ )

$M_w$  = Masa molecular del agua ( $0.018\ kg\ mol^{-1}$ )

$R$  = Constante universal de los gases ( $8.3 \times 10^{-3}\ KJ/mol\ k$ )

$K$  = Temperatura Kelvin ( $273^\circ K$ )

$e_s - e_d$  = Deficit de presión de vapor del aire (Kpa)

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua ( $2450\ KJ\ kg^{-1}$ )

$r_v$  = Resistencia al flujo de vapor de la cubierta vegetal ( $s\ m^{-1}$ )

$\Delta$  = Pendiente de la función de presión de vapor a saturación  $Pa\ ^\circ C^{-1}$ )

$\gamma$  = Constante psicométrica aparente ( $Pa\ ^\circ C^{-1}$ )

Una de las principales ventajas de este método es la precisión para estimar la ETo ya que incluye para la determinación de la evapotranspiración de referencia, el mayor número de factores que influyen en la demanda evaporativa de un cultivo.

Uno de los principales inconvenientes de este método es que requiere varios datos meteorológicos, además de que es demasiado complejo el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

#### **2.2.2.4.2. Estaciones meteorológicas**

La instrumentación de estaciones agrometeorológicas automatizadas adquiere gran importancia día con día en nuestro país. Los agricultores se van dando cuenta de las ventajas que adquiere el disponer de la información climatológica oportuna y en tiempo real. Para la toma de decisiones en sus actividades agropecuarias

El propósito principal de una estación agroclimática es proveer con las mediciones micrometeorológicas necesarias para estimar los parámetros usados para la determinación de la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de Penman-Monteith (IMTA, 1996).

La estación utilizada para el trabajo de campo es de tipo Campbell Scientific, Inc. La cual utiliza un procesador datalogger (Ver fig. 2.1). El datalogger monitorea y almacena mediciones de la radiación solar incidente de onda corta, la temperatura del aire, precipitación, la humedad relativa, la saturación de las hojas, la dirección y velocidad del viento.

El datalogger tiene un programa corriendo indefinidamente que monitorea, en intervalos de tiempo fijos menores a un minuto, cada una de las variables meteorológicas para almacenar solamente sus promedios al finalizar cada intervalo horario o diario.

La precipitación es registrada cada cinco minutos, para los periodos con precipitación, para posteriormente reportarlos como valores acumulados diarios o horarios. La evapotranspiración de referencia es calculada directamente en el datalogger (en línea) usando promedios diarios de los datos meteorológicos (radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa). Los sensores deben colocarse a una altura de 3 m, en especial el anemómetro.

El acceso telemétrico entre las estaciones agroclimáticas y una computadora base equipada con módem es realizado mediante una conexión vía radio.

La creación y modificación del programa corriendo en el datalogger, el despliegue gráfico de los datos monitoreados en tiempo real, y bajada de los datos del datalogger pueden realizarse usando software desarrollado por Campbell. También se tiene software para bajar automáticamente los datos del datalogger de acuerdo a una calendarización definida, la desventaja de la opción anterior es que el programa debe estar corriendo en la computadora base que hace la llamada.

▪ **Partes que integran una estación meteorológica (ver fig. 2.2)**

| <b>Tabla 2.3 Sensores e instrumentación</b> |                              |
|---------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Instrumento/ sensor</b>                  | <b>Parámetro (s) medidos</b> |
| Piranómetro                                 | Radiación solar incidente    |

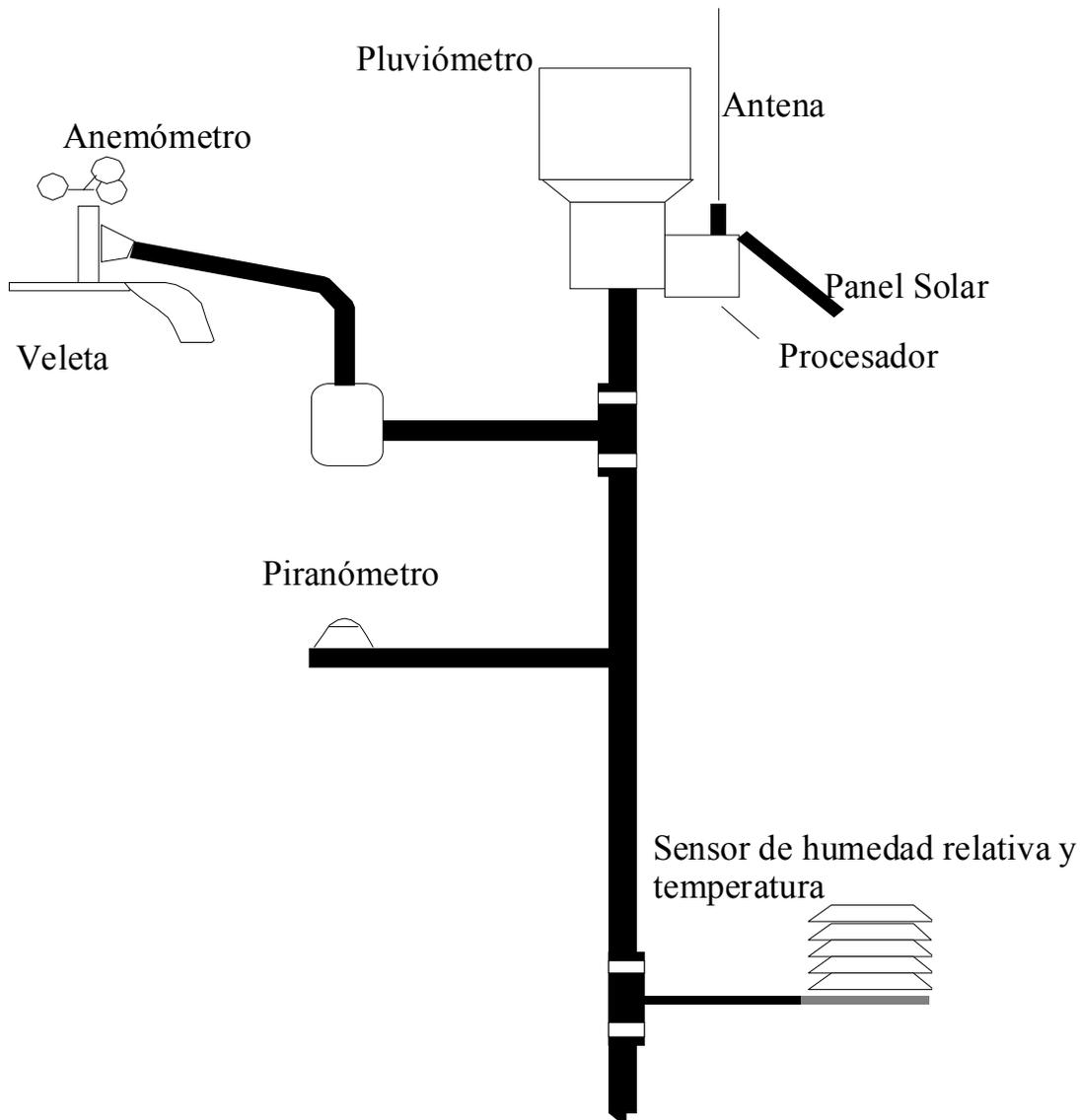
|                                               |                                                          |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Montura y nivelador                           | Para montar y nivelar piranómetro                        |
| Brazo de soporte del piranómetro              | Para asegurar el brazo del sensor a la torre.            |
| Brazo de aluminio                             | Para montar el sensor de viento y piranómetro a la torre |
| Monitor del viento con caja de unión          | Dirección y velocidad del viento                         |
| Sensor de Temperatura y HR (con 2 m de cable) | Temperatura del aire y humedad relativa                  |
| Protector                                     | Protege a los sensores de temperatura y humedad relativa |
| Cubeta de lluvia(métrica)                     | Precipitación                                            |
| Sensor de saturación de las hojas             | Saturación de las hojas                                  |

| <b>Tabla 2.4 Software para el almacenamiento y recuperación de datos</b> |                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Artículo</b>                                                          | <b>Función</b>                                                                 |
| Interface óptica aislada                                                 | Interface para transferencia de datos entre datalogger y computadora PC        |
| Cable de 9 pins                                                          | Cable para conectar computadora a datalogger                                   |
| Cable serial de 9 pins a 25 pins                                         | Cable entre interface y datalogger                                             |
| Datalogger con 128kB de memoria                                          | Procesador para almacenar programa de monitoreo de sensores y datos obtenidos  |
| Keyboard/Display                                                         | Teclado y despliegue para revisar datos en datalogger                          |
| Paquete de software básico                                               | Programas para telecomunicaciones, y análisis y programación bajo ambiente DOS |
| Software para calcular la ETo                                            | Programa para estimar la evapotranspiración de referencia bajo ambiente DOS    |

| <b>Tabla 2.5 Torre, equipo de montaje y fuente de poder</b> |                                                             |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Artículo</b>                                             | <b>Función</b>                                              |
| Caja de protección 16''x18''                                | Protección de datalogger y equipo de comunicaciones         |
| Panel solar y fijador                                       | Generar energía eléctrica para correr sistema               |
| Regulador y cargador solar                                  | Cargador de batería a través del panel solar                |
| Batería libre de ácido                                      | Batería de 12 Amp. Para alimentar sistema                   |
| Torre con dispositivo de tierra                             | Torre triangular de 3m x 30 cm para soporte de alimentación |

- **Precisión de los sensores**

Los errores máximos de los sensores usados por una estación Campbell son de 3 a 5% para el Piranómetro producido por Li-Cor, bajo condiciones naturales de luz diurna (Li-Cor, 1991), con una linealidad de 1 hasta  $300 \text{ W/m}^2$ . Para el sensor de humedad relativa de Vaisala el error es de  $\pm 2 \%$  para el rango de 0 a 90% y de  $\pm 3 \%$  para el rango de 90 a 100%, a una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para el sensor de temperatura de Vaisala el error es típicamente de  $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  y en el peor de los casos de  $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$  para temperaturas que oscilan entre  $-33$  y  $+48 \text{ }^\circ\text{C}$  (Campbell Scientific, 1992). El anemómetro Young tiene un rango de operación de entre 0 a  $215 \text{ km./h.}$  La veleta tiene un rango de oscilación de  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ . El pluviómetro tiene un error de 1% para lluvias con intensidades menores de  $5 \text{ cm/h.}$



**Fig. 2.2 Partes que integran una estación agroclimática automatizada**

▪ **Ventajas y desventajas de las estaciones meteorológicas automatizadas**

**Ventajas**

- 1.- Ocupan poco espacio debido a que los aparatos se han reducido de tamaño llegando a ocupar solamente un metro cuadrado
- 2.- No necesitan mucho personal para hacer las observaciones, una persona puede estar a cargo de varias estaciones al mismo tiempo.
- 3.- Se pueden estar midiendo temperaturas del suelo como de la planta a una altura y/o profundidad.
- 4.- Se obtienen datos de precipitación con intervalos de tiempos cortos y muy precisos.
- 5.- Se puede disponer de información meteorológica oportuna y en tiempo real, para tomar decisiones en la planeación y operación de las actividades agrícolas, siempre y cuando los sensores de las variables meteorológicas estén bien calibrados y que las estaciones estén ubicadas correctamente.

**Desventajas**

- 1.- Se requiere personal que este bien capacitado tanto para la instalación como para la bajada de datos.
- 2.- Existen varios problemas cuando se llega a desconectar la estación de la PC, esto puede deberse a alguna desorientación de alguna antena (la del campo u oficina) en donde se está enviando o recibiendo la información o debido a algún archivo de los programas base de instalación.
3. - Se requiere de un buen mantenimiento y calibración de los sensores para obtener datos que realmente nos expresen las condiciones atmosféricas del lugar, además hacer un análisis previo de los datos tratando de detectar errores, y por consiguiente desechar incertidumbre y tendencias de origen dudoso.

**2.3. Riego por Microaspersión**

En la micro-irrigación están comprendidos los sistemas de riego a baja presión como es el riego por goteo, puntual, microchorros, y microaspersión, conocidos también como sistemas de riego localizados de alta frecuencia.

La microaspersión es un medio artificial para aplicar el agua con un spray en forma de abanico o por varios chorros, por medio de dispositivos llamados microaspersores, durante tiempos de riego largos y de manera frecuente, siendo el agua conducida desde la fuente de abastecimiento hasta la planta misma, a través de tuberías a presión y descarga a presión baja.

Los sistemas de riego por microaspersión generalmente se usan en suelos muy permeables en los que el bulbo húmedo se desarrolla mucho en forma vertical y poco en forma horizontal, los patrones de mojado dependen del tipo de aspersor y deflector que se use, alcanzando un diámetro de cobertura entre 4 y 10 metros (Shlomo, 1989).

Los microaspersores pueden ser de piezas fijas o móviles

Los microaspersores de piezas fijas pueden mojar círculos completos ( $360^\circ$ ) o sectores de círculo ( $270^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Generalmente tienen una boquilla u orificio por el que se omite un chorro de agua, éste al chocar con el deflector esparce el agua en forma de lluvia o microchorros.

Los microaspersores con piezas móviles que generalmente tienen una boquilla fija y un deflector móvil que se mueve por acción del chorro generando la lluvia con patrón de mojado circular. Estos microaspersores son de gastos y radio de mojado mayores que los de piezas fijas.

Los microaspersores pueden ser de piezas fijas o móviles:

Los microaspersores se usan en cultivos de frutales, en floricultura, dentro de los invernaderos y en almácigos.

Las partes que integran un microaspersor son las siguientes (ver la fig.2.3)

- Conexión de entrada.

Tienen dos secciones dentadas, una de las cuales va insertada a la lateral o regante y la otra a un tubito alimentador.

- Tubito alimentador

Es un pequeño tubito que va conectado por un extremo a la conexión dentada y por el otro al adaptador.

- Estabilizador

Es el soporte que mantiene el micro-emisor en posición vertical. Existen diferentes estabilizadores entre los que se encuentran: la varilla metálica para mariposa, estaca plástica para mariposa, agriestaca, agro-conector, montura con elevador.

- Adaptador

En el adaptador se acomoda la boquilla y el tubito de alimentación y se coloca sobre el estabilizador.

- Boquilla

La boquilla controla la descarga del microemisor. Existen en el mercado una serie de boquillas con diferente capacidad de descarga, las cuales se identifican por el color de cada una. Así por ejemplo el rango de capacidad de la gama de boquillas producidas por la Rain Bird "Micro-Quick" va desde 14 a 144 lph, con un rango de presión de trabajo de 0.75 a 2.00 bar, como se muestran en la tabla 2.6.

- Deflector

Este componente determina el marco de distribución de agua por el micro-emisor que puede ser en forma de pájaro de estrella, mariposa, abanico, 24 rayo y abanico doble

**Tabla 2.6 Características de operación de un microaspersor (Rain Bird)**

| Modelo de la Boquilla | Presión Bar | Gasto LPH | Pájaro de estrella Diámetro (m) | Abanico doble Diámetro (m) |
|-----------------------|-------------|-----------|---------------------------------|----------------------------|
| QN-05                 | .75         | 14        | 1.3                             | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 17        | 1.45                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 21        | 1.63                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 22        | 1.68                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 25        | 1.75                            | 0.45                       |
| QN-08                 | 0.75        | 21        | 1.95                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 25        | 1.98                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 31        | 2.15                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 33        | 2.20                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 36        | 2.25                            | 0.45                       |
| QN-12                 | .75         | 31        | 2.55                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 37        | 2.63                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 45        | 2.70                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 48        | 2.73                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 52        | 2.75                            | 0.45                       |
| QN-14                 | .75         | 38        | 2.90                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 46        | 3.03                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 56        | 3.13                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 60        | 3.13                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 65        | 3.20                            | 0.45                       |
| QN-17                 | .75         | 45        | 3.20                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 54        | 3.35                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 65        | 3.45                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 72        | 3.50                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 77        | 3.55                            | 0.45                       |
| QN-24                 | .75         | 64        | 3.55                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 79        | 3.90                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 97        | 4.10                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 103       | 4.25                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 111       | 4.25                            | 0.45                       |
| QN-33                 | .75         | 92        | 3.80                            | 0.45                       |
|                       | 1.00        | 103       | 3.95                            | 0.45                       |
|                       | 1.50        | 122       | 4.15                            | 0.45                       |
|                       | 1.75        | 133       | 4.20                            | 0.45                       |
|                       | 2.00        | 144       | 4.25                            | 0.45                       |

Fuente: Rain Bird International, Micro-Quick Mod. Qn-08, Productos de Bajo Volumen, Glendora, CA 91740 USA.

### **2.3.1. Partes más importantes que integran un sistema de riego**

- a) Fuente de abastecimiento

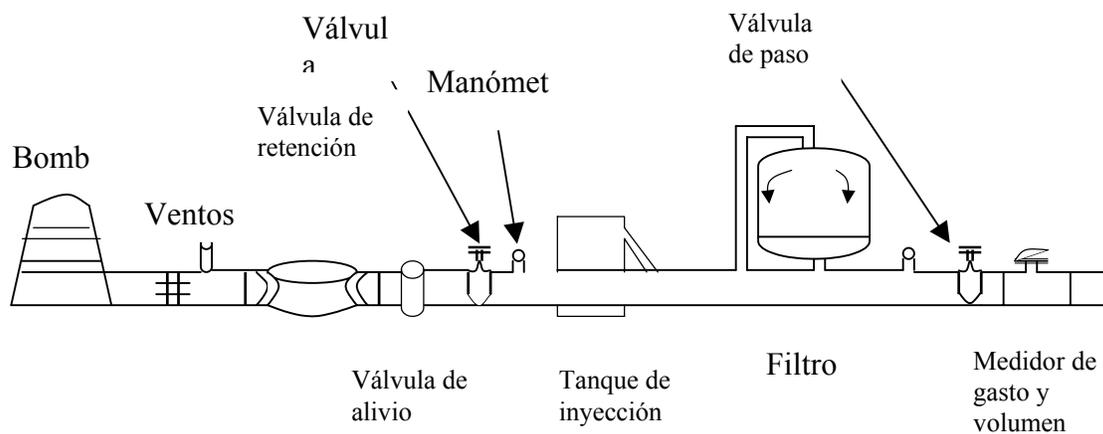
Es la parte fundamental del riego, y esta puede ser de diferente tipo: pozo, río, lagos, lagunas.

#### b) Cabezal de control

Este constituye el cerebro del sistema de micro-riego y esta formado por un conjunto de elementos que permiten el suministro del agua de riego al sistema, su filtrado, medición, el control de la presión y la aplicación de fertilizantes. La fig.2.4 muestra las partes que componen un sistema de micro-riego.

##### b.1) Equipo de bombeo

Generalmente las bombas que se emplean en los sistemas de micro-riego son las centrifugas. La función principal de la bomba es proporcionar el gasto y la presión necesaria para que el sistema de riego funcione adecuadamente. Los equipos de bombeo tienen la característica funcional de que dentro de ciertos límites de operación, al variar la carga hidráulica varía el caudal es decir a mayor carga de operación menor caudal entregado y viceversa. Las características de funcionamiento de las bombas se resumen en “curvas características” que relacionan: Carga, gasto, eficiencia, velocidad específica y potencia, y son entregadas por el fabricante para su adecuada instalación y operación.



**Figura 2.4 Partes componentes de un cabezal de control en micro-riego**

##### b.2) Dispositivos de control

su función es controlar el gasto y la presión del sistema

###### b.2.1) Válvula de paso

Dispositivo cuya función es abrir o cerrar conductos, por lo cual puede controlarse el gasto en las tuberías cerrando o abriendo dichas válvulas, al igual que la presión.

#### b.2.2) Reguladores automáticos

Son válvulas automáticas que se instalan en la línea con la tubería o las tuberías que forman la instalación y su función es controlar el gasto o la presión, según sea el tipo de regulador, permitiendo que todos los emisores trabajen en un mismo rango de presiones, con ello se logra la uniformidad de aplicación del agua en la zona de riego.

#### b.2.3) Medidores de gasto

Dispositivos que en función de la velocidad del agua en la tubería, indican el gasto instantáneo y dependiendo del medidor, pueden indicar a la vez el volumen de agua acumulado que ha pasado a través de ellos.

#### b.2.4) Manómetros

Son dispositivos, cuya función es medir la presión en diferentes puntos del sistema de riego, y pueden ser de mercurio o mecánicos. Estos indican si la presión esta correcta o si es necesario hacer ajustes para corregirla.

#### b.2.5) Controladores automáticos

Los controladores automáticos son dispositivos que sirven para controlar la aplicación del riego, disminuyendo al mínimo el uso de mano de obra (Zazueta, 1992), señala que estos pueden ser eléctricos, electromecánicos o basados en computadoras, teniendo como objeto los más simples, operar el sistema en base a tiempo de riego o volumen aplicado. Como ejemplo de ellos de acuerdo con Medina 1979 pueden citarse las válvulas volumétricas, las válvulas eléctricas, los programadores y los electrotensiómetros.

Las válvulas volumétricas sirven para marcar en ellas el volumen deseado, y una vez que éste ha pasado, se cierra automáticamente dicha válvula, cortando así el flujo de agua.

La válvula eléctrica va conectada a un programador central con reloj, en el cual se programan los tiempos de funcionamiento del sistema. De esta manera el programador central o reloj envía las ordenes a la válvula eléctrica, la cual mediante un solenoide contenido en su interior, permite la apertura o el cierre automáticamente.

Los electrotensiómetros van conectados al programador central enviándole la señal para iniciar o suspender el riego, en función de la tensión de la humedad del suelo.

### b.3) Dispositivos de seguridad

#### b.3.1) Válvulas de retención ó unidireccionales

Su finalidad es impedir el cambio de dirección no deseado de la corriente de agua; es decir, para retener la masa de agua que se encuentra en la tubería, cuando la bomba suspende su operación. Además otra función de estas válvulas es amortiguar el golpe de ariete evitando que este dañe el equipo de bombeo, o bien para evitar que la fuente de suministro de agua se contamine con los agroquímicos inyectados en el sistema.

#### b.3.2) Válvulas de alivio contra golpe de ariete

Las válvulas aliviadoras de presión tienen como finalidad permitir la fuga del agua o aire cuando la presión en la instalación sobrepasa un límite preestablecido, para proteger con ello el equipo de bombeo, tuberías y demás elementos en la conexión contra estos cambios bruscos de presión que se producen por el arranque o paro del equipo de bombeo

#### b.3.3) Purgadores o Ventosas

Los purgadores permiten la salida del aire en aquellos puntos especiales de la instalación en que pueden acumularse, codos, partes elevadas de las tuberías, filtros, tanques de fertilización.

Las ventosas son válvulas de entrada y salida de aire. Su función es permitir que salga el aire cuando se llenan las tuberías de agua, evitando la formación de burbujas en las partes altas de la instalación, y permitir que entre aire cuando las tuberías se vacían para evitar el golpe de ariete y la succión que se origina en los goteros al parar el sistema de bombeo.

#### b.3.4) Sistema de filtrado

Este comprende aquellas estructuras y equipos cuyas funciones son eliminar los materiales sólidos del agua de riego, ya sea algas, bacterias y plantas acuáticas o inorgánicas como arcilla, arena y minerales con el objetivo de evitar taponamiento en el sistema de riego.

#### b.3.5) Tanque de inyección

Es el equipo que sirve para suministrar sustancias químicas solubles benéficas al sistema de riego, a los suelos, o bien, a los cultivos que se rieguen. Tales sustancias son: Fertilizantes, fungicidas, herbicidas y soluciones compatibles para prevenir taponamiento

en goteros y tuberías. Estos equipos pueden usar energía eléctrica para su operación o la energía hidráulica del mismo sistema de riego.

#### b.3.6) Accesorios del cabezal.

Es el conjunto de piezas que se utilizan para unir y acoplar todos los dispositivos que constituyen el cabezal de control. Estos pueden ser coples, nipples, o adaptadores, extremidades, reductoras, tuercas para unir tuberías de diferente diámetro, codos, tees, y cruces para derivaciones.

#### c) Red de tuberías (ver la figura 2.5)

##### c.1 Tubería principal

Es la tubería que conecta el cabezal de control con las tuberías de distribución. Generalmente en la Micro-irrigación estas tuberías son de policloruro de vinilo (PVC)

##### c.2) Tubería de distribución o secundaria

Son las tuberías que conectan la tubería de conducción con las unidades de control autónoma. Estas generalmente son de PVC

##### c.3) Unidad de control autónomo.

Es el conjunto de válvulas, manómetros y accesorios que permiten controlar el suministro de agua de una sección de riego

##### c.4) Sección de riego

Es la superficie dominada por las tuberías regantes y sus distribuidores.

##### c.5) Distribuidores o tuberías terciarias

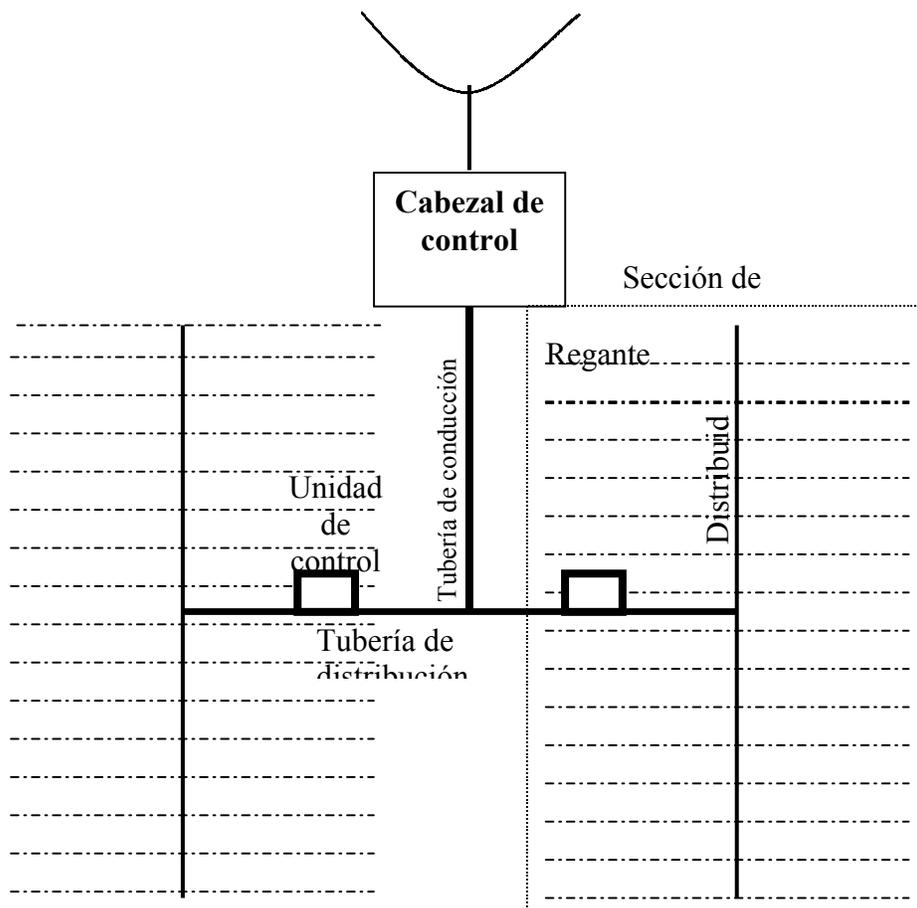
Son tuberías que abastecen de agua a las tuberías regantes. Estas tuberías pueden ser de PVC o polietileno.

##### c.6) Tuberías regantes

Son tuberías que alimenten a los emisores, ya sea goteros o microaspersores. Generalmente son de polietileno.

##### c.7) Emisores

Los emisores son los dispositivos más importantes, ya que son los que permiten la salida de agua a la zona radical de las plantas, con gastos controlados, dándole el nombre al sistema de riego.



**Fig. 2.5 Partes que componen un sistema de micro-riego (Peña, 1992)**

## **Ventajas y desventajas de los sistemas de Micro-riego**

### **Ventajas**

- **Alta uniformidad en la aplicación**  
Al lograr un mejor control de la aplicación, en función de las demandas de los cultivos permite una mayor eficiencia de aplicación, logrando con ello un ahorro de agua, energía y fertilizantes. A demás con la uniformidad de aplicación se logra un rendimiento más óptimo.
- **Ahorros de agua**  
Solo áreas pequeñas alrededor de la planta se humedecen con cantidades precisas de agua, de esta manera se ahorra agua debido a menor evaporación, menos escurrimiento y menos percolación profunda.

- **Mejor penetración del agua**

La aplicación del agua a tasas muy lentas y en áreas limitadas alrededor de las plantas mejora la penetración del agua en suelos con problemas
- **Menos malezas**

Debido a lo limitada que es el área humedecida, el desarrollo de las plantas indeseadas (malezas) queda inhibido. Las ventajas son dobles: el control de malezas crea menos problemas y se ahorra el agua y el fertilizante que utilizarían las malezas
- **Ahorros de energía**

Se requieren presiones de funcionamiento y tasas de flujo menores, por eso se necesita menos energía para el bombeo. La bomba y la red de tuberías para transportar el agua pueden ser más pequeñas y, por lo tanto, menos costosa.
- **Mejores rendimientos**

La investigación, ha mostrado que generalmente el desarrollo de las plantas, la calidad de las cosechas y el rendimiento mejoran, a menudo en forma dramática. Muchos expertos sostienen que los aumentos de rendimientos y la maduración mas temprana de las plantas se debe principalmente a la menor dificultad que las plantas encuentran para obtener agua.
  
- **Control de la salinidad**

El riego frecuentemente traslada las sales al perímetro del área humedecida y así reduce los problemas de salinidad. Estos riegos frecuentes reducen la dificultad de las plantas en obtener agua y permiten el uso de agua más salina de lo que es posible con otros sistemas.
- **Suelos marginales**

Las técnicas de riego por goteo sirven para suelos marginales pedregosos o suelos muy arenosos, pues el sistema entrega directamente a la planta cantidades precisas de agua y elementos nutritivos.
- **Terrenos inclinados**

Los campos regados con sistemas de goteo no necesitan estar nivelados. Los sistemas de riego por goteo pueden diseñarse para dar servicio en campos sin nivelar y laderas

empinadas. Los terrenos difíciles y los suelos marginales, que de otra manera serían inservibles para la agricultura, pueden tornarse productivos.

### **Desventajas**

- Elevado costo, por lo que existe una limitación de tipo económico en su aplicación.
- Se requiere mano de obra especializada, tanto para la instalación como para la operación y manejo.
- Taponamiento de los emisores debido a que su área de salida es bastante reducida es por ello que está relacionado directamente con la filtración y calidad del agua.
- En el caso de utilizar aguas con altos contenidos de sales periódicamente sin realizar lavados al final de cada ciclo, el suelo corre el riesgo de ensalitrarse a corto o mediano plazo.

### 2.3.3 Automatización de los sistemas de riego

La automatización es un medio fundamental para poder aplicar el agua en el momento más adecuado según la evolución de las necesidades del cultivo y en la cantidad necesaria. Esto permite alcanzar altos niveles de eficiencia en el uso del agua, la energía y los fertilizantes. Su objetivo es reducir costos de producción y el consumo del agua. La elección del nivel de automatización para cada caso debe hacerse atendiendo criterios técnicos económicos y las preferencias del agricultor

Una de las ventajas de la automatización es que ahorra mano de obra, facilita la gestión de la explotación y posibilita la adquisición y tratamiento de datos, lo que permite obtener estadísticas, confeccionar los recibos de consumo de agua, la energía etc.

El nivel cero de automatización consiste en la apertura y cierre manual de válvulas. Los distintos niveles de automatización comienzan por esa apertura y cierre de válvulas y continúan con el control de otros factores hasta llegar al control total de la instalación,

como se muestra en la tabla 2.7. Para el óptimo manejo del riego es conveniente disponer de sistemas automáticos de control que permitan, entre otras opciones, la mejora del rendimiento en el uso del agua, la detección de fallas o la protección de los diferentes componentes del sistema de riego

Los sistemas de control del riego pueden ser de dos tipos:

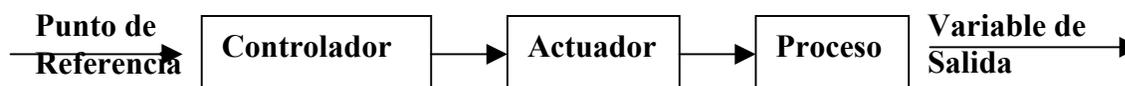
- a) Bucle abierto
- b) Bucle cerrado

| <b>Tabla 2.7 Diferentes niveles de automatización</b> |                         |                         |                                 |                 |                                |                                          |                                      |                 |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Nivel de Automatización                               | Parámetro de control    | Modo de operación       | Comienzo del Riego              | Orden de marcha | Cambio de orden de marcha      | Cambio de dosis de riego                 | (A)Arranque (P) Parada de la bomba   | Tiempo de riego |
| Cero                                                  | Tiempo o Volumen        | Manual                  | Apertura Manual                 | Cualquiera      | Sin limitaciones               | Cambiar tiempo                           | A - Manual<br>B - Posible Automático | Cualquiera      |
| Uso Parcial                                           | Volumen                 | Hidráulico              | Apertura Manual                 | Cualquiera      | Sin limitaciones               | Ajuste del dual de la volumétrica        | Idem                                 | Cualquiera      |
| Uso Secuencial                                        | Volumen                 | Hidráulico              | Apertura Manual                 | Fijo            | Cambiar conexiones Hidráulicas | Ajuste del dual de la volumétrica        | A - Manual<br>B - Automat.           | Inyectores      |
| Dos                                                   | Tiempo                  | Eléctrico o electrónico | Program Horaria                 | Cualquiera      | Sin limitaciones               | Ajuste del Tiempo                        | A - Manual<br>B - Automat            | Cualquiera      |
| Tres (Total)                                          | Tiempo, Volumen U Otras | Microcomp               | Program. Horaria o con sensores | Cualquiera      | Sin limitaciones               | Ajuste del Tiempo, Volumen o de sensores | Idem                                 | Cualquiera      |

### a) Sistemas de control abiertos (Programadores de riego o Temporizadores)

Son los más usados en la actualidad, controlando básicamente el tiempo (hora del día y duración) en el que se produce el riego o el volumen de agua por aplicar, pero si tener en cuenta factores que influyen en el riego como nivel de humedad en el suelo, estado de la planta, condiciones del viento etc.

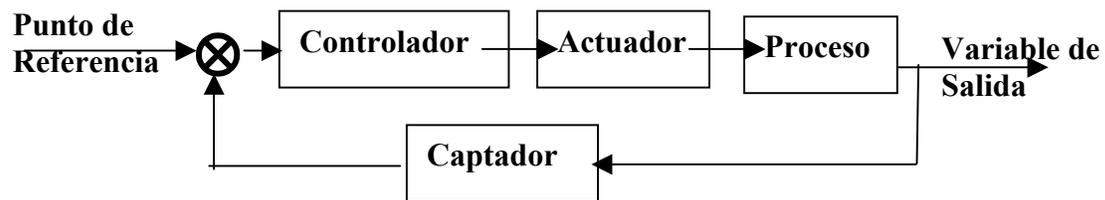
El programador conecta o desconecta el sistema de riego en función del programa que establezca el usuario (Ver fig. 2.6), en el que se fijan: las horas a las que debe iniciarse el riego y la duración del mismo (Automatización por tiempo, ver fig. 2.7), el volumen de agua que tiene que descargar el sistema (Automatización por Volumen) o una combinación de los dos (Automatización por volumen y tiempo).



**Fig. 2.6 Diagrama de un sistema de control en bucle abierto**

## **b) Sistemas de Control en Bucle Cerrado**

En este caso el usuario define una estrategia general de control para que, en base a ella, el sistema elabore y ejecute las decisiones en cuanto al momento adecuado para el riego y la cantidad de agua a aportar. Este tipo de sistema requiere la comunicación permanente de los sensores con el controlador (lo que permite conocer como se desarrolla el sistema) y del controlador con los actuadores (lo que permite tomar las decisiones de riego y ejecutarlas en caso necesario).



**Fig. 2.8 Diagrama de un sistema de control en bucle cerrado**

El estado del sistema (la medida de la humedad del suelo) utilizando un sensor es comparado con un valor de referencia y se elabora una decisión y, en su caso una actuación, en base a esa comparación.

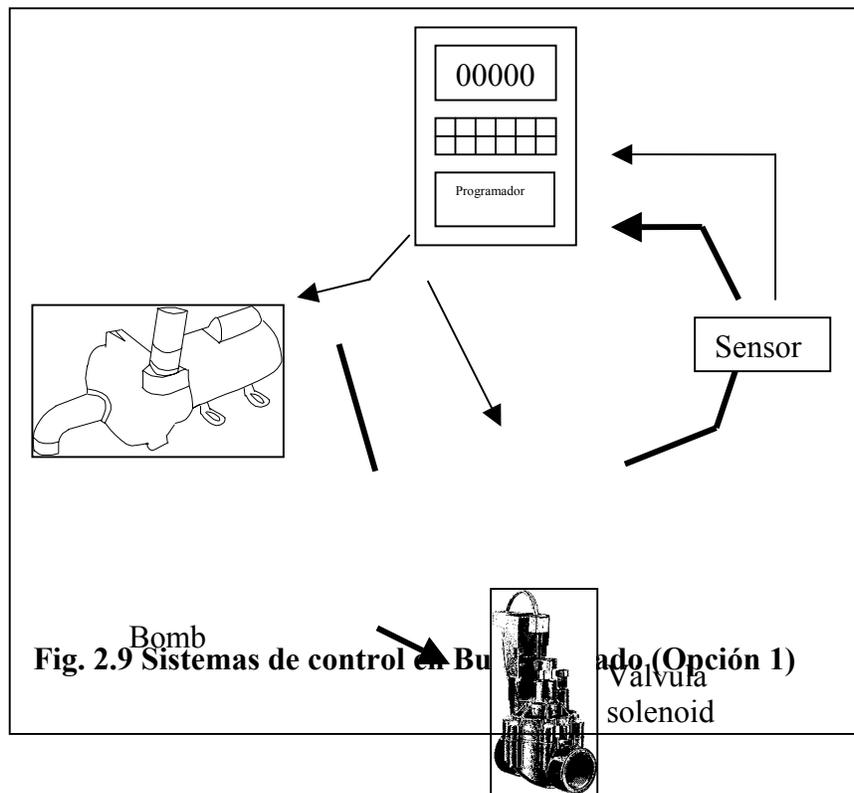
Existen diversos tipos de controladores de bucle cerrado entre las que se encuentran.

- 1) Un conjunto de medidas directas utilizando sensores (humedad del suelo, temperatura de las plantas, evaporación de un tanque evaporimetro, etc), que indican directamente la necesidad o no de regar (Ver fig.2.9).
- 2) A través de medidas indirectas, calculando las necesidades hídricas de las plantas a partir de parámetros climáticos medidos en una estación meteorológica automatizada (fig. 2.10), con monitoreo en tiempo real de los parámetros climáticos que influyen en la

demanda hídrica de las plantas. Este monitoreo debe llevarse a cabo por una computadora via modem o con un radio y la generación de base de datos para mantener un registro y cambios progresivos en el manejo del sistema.

La adquisición de datos y el control del sistema de riego consiste del sistema de cómputo automatizado en "tiempo real", el software de monitoreo y control, la instrumentación de entrada (sensores de radiación, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura del aire, precipitación, etc.), y las salidas para control (válvulas solenoides) y realizando un correspondiente balance de agua en el suelo para determinar la necesidad de regar o no.

3) Una combinación de los dos (ver figura 2.11).



**Fig. 2.9 Sistemas de control en Buzo (Opción 1)**

#### 2.3.4. Diseño del sistema de riego.

El diseño de un sistema de micro-riego consiste en las especificaciones detalladas de los componentes del sistema y de las practicas requeridas para establecer calendarios de riego, operación y mantenimiento (Zazueta, 1992).

Un sistema de riego debe de ser capaz de proporcionar la cantidad de agua requerida bajo condiciones de demanda máxima. La tabla 2.8 muestra algunos factores que influyen en la selección de un sistema de riego

Para ello es necesario que el sistema sea capaz de humedecer una fracción del volumen radicular, de dimensiones adecuadas y con un nivel de humedad que permitan satisfacer las condiciones climáticas. Los valores de la fracción húmeda sugerida es de 1/3 (20 % al 60%) de la zona radicular normal. En frutales para lograr un volumen húmedo de estas dimensiones es necesario utilizar un numero elevado de goteros o un microaspersor.

Los sistemas de goteo deben de ser utilizados bajo condiciones en las cuales la acción capilar es buena. En suelos donde la acción capilar es reducida o cuando los arboles alcanzan tamaños grandes, se debe de utilizar microaspersores.



#### **2.3.4.1. Necesidades hídricas**

Para determinar la demanda máxima de riego es necesario calcular la ET actual utilizando el mejor método posible (para nuestro caso el de Penman-Monteith, como se menciono anteriormente). Para fines de diseño, la ET actual es normalmente calculada con el valor máximo probable que ocurra durante la vida del cultivo.

El procedimiento de la evapotranspiración debe de ser ajustada a las condiciones características que tienen el riego por microaspersión mediante el cual solo una porción del área de campo es humedecida. Este ajuste es hecho multiplicando la ET estimada por un coeficiente que representa la proyección horizontal de la copa del cultivo expresado como una fracción de área sombreada. Para la mayoría de los cultivos el área sombreada es usualmente el 100%. Dicho ajuste concierne solamente a aquellos cultivos ampliamente espaciados como las huertas y viñedos.

#### **2.3.4.2 Selección del emisor**

Existen diferentes criterios para la selección de un emisor como se muestran a continuación algunos:

a) Condiciones del suelo

El gasto por emisor debe de ser de acuerdo con las características del suelo, para evitar encharcamientos que impidan obtener las condiciones de aereación y eficiencia de aplicación del agua que deba generarse con el riego (Peña, 1981).

b) Consumo del agua del cultivo y el tiempo de operación

El consumo de agua por el cultivo y el tiempo de operación en cada sección de riego, permite obtener alternativas de gasto de emisores que llevan a costos de adquisición, instalación y operación diferentes. Al determinarlas y al conjuntarlas con las características de suelo se seleccionan las más económicas (Idem)

c) Sensibilidad al taponamiento

En base al diámetro menor de la sección hidráulica y considerando la calidad del agua desde el punto de vista del contenido de sólidos orgánicos e inorgánicos.

d) Sensibilidad Hidráulica

En base al exponente de la relación del caudal del emisor, buscando emisores con exponentes hidráulicos pequeños.

e) Variación de fabricación

El coeficiente de variación de fabricación debe ser pequeño (5% para emisores puntuales y 10% para líneas de descarga continua).

f) Sensibilidad a la temperatura

La descarga del emisor no debe variar con cambios de temperatura del agua y el emisor

g) Calidad de los materiales

Resistencia a los rayos ultravioleta, químicos, productos de petróleo, etc.

#### **2.3.4.3 Diseño hidráulico de las secciones de riego**

Una vez seleccionado el emisor se procede al diseño hidráulico de las secciones de riego, conducción, distribución y finalmente el diseño del cabezal. Según Zazueta (1992) la distribución de estas tuberías esta condicionada principalmente por:

a) Distribución del cultivo

El arreglo de las plantas define la dirección de las laterales, siendo convenientes que estas estén orientadas en la dirección de las operaciones culturales.

b) Topografía

La colocación de laterales y distribuidores debe ser tal que aproveche cambios en la elevación del terreno para compensar pérdidas por fricción. Si la posición de las

laterales esta determinada por el cultivo, el factor más importante que influye en la posición de los distribuidores, y estos a su vez perpendiculares a laterales.

c) Localización de la fuente de agua

El punto en el que se encuentra la fuente de abastecimiento afecta la localización de las tuberías de conducción, de distribución y de los distribuidores. Generalmente las tuberías de distribución se colocan perpendiculares a los distribuidores, y estos a la vez, perpendiculares a laterales.

| <b>Tabla 2.8 Factores a considerar para la selección de un sistema de riego</b> |                                                                                                                                           |                                                                                                                               |                                                                                                                          |                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sistema</b>                                                                  | <b>Topografía</b>                                                                                                                         | <b>Tasa de infiltración</b>                                                                                                   | <b>Tolerancia al agua</b>                                                                                                | <b>Viento</b>                                                                               |
| Aspersión                                                                       | Terrenos nivelados o con pendientes                                                                                                       | Adaptables a cualquier tasa de infiltración                                                                                   | Adaptables a la mayoría de cultivos. Puede favorecer el desarrollo de hongos y enfermedades del follaje y la fruta       | Vientos fuertes pueden afectar seriamente la eficiencia del sistema                         |
| Superficie                                                                      | Los terrenos tienen que estar a nivel o con pendientes pequeñas (1%). Se pueden utilizar terrazas y vegetación para aumentar la pendiente | No es recomendable para suelos con tasas de infiltración mayores a unos 6 cm/hr. o suelos con tasas de infiltración muy bajas | Adaptable a la mayoría de los cultivos. Puede causar daños a tuberos y plantas que tengan baja tolerancia al anegamiento | Vientos fuertes pueden afectar la eficiencia en suelos desnudos. Usualmente no se considera |

|                                                                                    |                                                               |                                                                                                                                       |                                        |                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Subirrigación por ascensión capilar                                                | La superficie del cultivo debe ser nivelada a trazo o a nivel | Adaptable únicamente a suelos que tienen un manto impermeable bajo la zona radical o un manto freático elevado que se pueda controlar | Adaptable a la mayoría de los cultivos | El viento no tiene efecto alguno                 |
| <b>Microirrigación</b>                                                             |                                                               |                                                                                                                                       |                                        |                                                  |
| Goteo                                                                              | Adaptable a cualquier topografía                              | Adaptable a suelos con texturas medias y finas que presentan buena conducción capilar                                                 | Adaptable a cualquier cultivo          | El viento no tiene efecto alguno                 |
| Micro aspersión                                                                    | Adaptable a cualquier topografía                              | Adaptable a cualquier tipo de suelo. Especialmente útil con suelos de conducción capilar pobre                                        | Ningún problema                        | El viento puede afectar seriamente la eficiencia |
| Subirrigación por difusión capilar                                                 | El área del cultivo debe ser nivelada para limitar pendientes | Adaptable solo a suelos con texturas medias a finas que presentan buena conducción capilar                                            | Ningún problema                        | El viento no tiene efecto alguno                 |
| Fuente de J.H. Turner, Planning for a system. AAVIM. Eng. Center, Athens. GA 30602 |                                                               |                                                                                                                                       |                                        |                                                  |

Peña et. al (1979), desarrollaron una teoría para calcular las pérdidas de carga en tuberías con salidas múltiples, la cual permite diseñar las secciones tanto de riego por goteo como por microaspersión.

El análisis para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías con salidas múltiples, parte de dos supuestos:

- Las salidas a lo largo de la tubería están igualmente espaciadas
- El gasto es igual en cada salida

Haciendo el análisis por tramos, el gasto para el primero es:

$$Q_e = N \times \bar{Q}$$

Donde:

$\bar{Q}_e$  = Gasto en la entrada (1<sup>er</sup> tramo)

N = Número de salidas.

Q = Gasto medio por salida

En cada tramo existen pérdidas de carga por fricción y localizadas:

$$H_{t-1} = H_{f-1} + H_{L-1} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$H_{t-1}$  = Perdida de carga en el tramo 1, m

$H_{f-1}$  = Perdida de carga por fricción en el tramo 1, m.

$H_{L-1}$  = Perdida de carga localizadas en el tramo 1, m.

Utilizando la ecuación de Manning:

$$v = \frac{1}{C} \times P^{\frac{1}{2}} \times RH^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

v = Velocidad del flujo en la tubería, m/s.

C = Coeficiente de Manning, adimensional.

P = Pendiente hidráulica, m/m.

RH = Radio hidráulico, m.

Como:

$$P = GH = \frac{H_f}{L}$$

Donde:

GH = Gradiente hidráulico, adim.

$H_f$  = Perdida de carga en tubería simple (fricción), en m.

L = Longitud del tramo, m.

$$RH = \frac{AH}{Pm} = \frac{\frac{\pi \times D^2}{4}}{\pi \times D} = \frac{D}{4}$$

Donde:

AH = Area Hidráulica, en m<sup>2</sup>

Pm = Perímetro mojado, m.

D = Diámetro interior de la tubería, m.

Q = Gasto, m<sup>3</sup>/s

$$v = \frac{Q}{AH} = \frac{Q}{\frac{\pi \times D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi \times D^2} \dots\dots\dots(3)$$

Igualando la ecuación 2 y 3, sustituyendo valores y despejando H<sub>f</sub>

$$\frac{4Q}{\pi \times D^2} = \frac{1}{C} \times \frac{H_f^{1/2}}{L^{1/2}} \times \frac{D^{2/3}}{4^{2/3}}$$

$$H_f = \left( \frac{4^{3/3} \times Q \times C \times L^{1/2} \times 4^{2/3}}{\pi \times D^2 \times D^{2/3}} \right)^2$$

$$H_f = \frac{4^{10/3} \times C^2 \times L \times Q^2}{\pi^2 \times D^{16/3}} \dots\dots\dots(4)$$

Las pérdidas de carga localizadas se calculan de la siguiente manera:

Donde:

$$H_L = kL \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(5)$$

H<sub>L</sub> = Pérdidas de carga localizadas, m.

kL = Coeficiente de pérdidas localizadas, adim.

g = Gravedad, m/seg.

Sustituyendo la ecuación 3 en la 5

$$H_L = \frac{kL \times \left( \frac{4Q}{\pi \times D^2} \right)^2}{2 \times g} = \frac{4^2 \times kL \times Q^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \dots\dots\dots(6)$$

Sustituyendo la ecuación 4 y 6 en la 1

$$H_{t-1} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times L}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{4^2 \times kL}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \right] \times Q^2 \dots\dots\dots(7)$$

Recordar que Q es el gasto medio en el tramo,  $\bar{Q}_s$

Para el tramo final el gasto es igual al de la última salida (gasto medio de salida del emisor de la tubería regante), y para el tramo penúltimo, el gasto es dos veces al de la última salida.

$$\bar{Q}_1^2 = (1 \times \bar{Q}_s)^2 = \bar{Q}_s^2 \times 1 \quad \bar{Q}_2^2 = (2 \times \bar{Q}_s)^2 = \bar{Q}_s^2 \times 2^2 \quad \bar{Q}_n^2 = (n \times \bar{Q}_s)^2 = \bar{Q}_s^2 \times n^2$$

Donde:

$$\bar{Q}_1 = \text{Gasto medio en el tramo 1}$$

$$\bar{Q}_s = \text{Gasto medio de salida del emisor en la tubería regante}$$

Así, las pérdidas de carga por tramo quedan de la siguiente manera:

$$H_{t-1} = F \times (1 \times \bar{Q}_s)^2 = F \times 1^2 \times \bar{Q}_s^2$$

$$H_{t-2} = F \times (2 \times \bar{Q}_s)^2 = F \times 2^2 \times \bar{Q}_s^2$$

$$H_{t-n} = F \times (n \times \bar{Q}_s)^2 = F \times n^2 \times \bar{Q}_s^2$$

Como la pérdida de carga en toda la tubería es la sumatoria de las pérdidas de carga por tramos; entonces

$$H_{TSM} = \sum_{i=1}^n i^2 \times \bar{Q}_s^2 \times F \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

$$H_{TSM} = \text{Pérdidas de carga en tubería con salidas múltiples}$$

Usando algunas propiedades de la suma

$$\sum_{i=1}^n i = (1 + 2 + 3 + \dots + (n - 2) + (n - 1) + n)$$

$$\sum_{i=1}^n i = [n + (n - 1) + (n - 2) + \dots + 3 + 2 + 1]$$

$$2 \sum_{i=1}^n i = [(n + 1) + (n + 1) + (n + 1) + \dots + (n + 1) + (n + 1)]$$

$$2 \sum_{i=1}^n i = n \times (n + 1); \sum_{i=1}^n i = \frac{n(n + 1)}{2} = \frac{1}{2}(n^2 + n)$$

Otra ley de la sumatoria

$$\sum_{i=1}^n [i^3 - (i-1)^3] = N^3$$

Desarrollando lo anterior

$$\sum_{i=1}^n [i^3 - (i^3 - 3i^2 + 3i - 1)] = \sum_{i=1}^n (3i^2 - 3i + 1) = N^3$$

$$3 \sum_{i=1}^n i^2 - 3 \sum_{i=1}^n i + N = N^3 \xrightarrow{\text{tiende}} \sum_{i=1}^n i^2 = N^3 - N + 3 \sum_{i=1}^n i$$

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{2N^3}{6} - \frac{2N}{6} + \frac{3N^2}{6} + \frac{3N}{6}$$

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \dots\dots\dots(9)$$

Sustituyendo el valor de F y la ecuación 9 en la 8

$$H_{TSM} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times L}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^2} \right] \times \bar{Q}_s^2 \times \left[ \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right] \dots\dots\dots(10)$$

Considerando:

$$\bar{Q}_s = (Q_p \times Q_u)^{1/2}$$

Donde:

$\bar{Q}$  = Gasto medio del emisor en la sección

$Q_p$  = Gasto del primer emisor de la sección.

$Q_u$  = Gasto del ultimo emisor de la sección.

Si  $Q_p = 1.1 Q_u$  para que la diferencia de gastos entre el primero y el último emisor sea del 10%.

$$\bar{Q}_s = (1.1Q_u \times Q_u)^{1/2} = 1.1^{0.5} \times Q_u$$

$$\bar{Q}_s = 1.04881Q_u \dots\dots\dots(11)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la 10

$$H_{TSM} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times L}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^2} \right] \times (1.0488 \times Qu)^2 \times \left[ \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right] \dots\dots\dots(12)$$

Ecuación típica para calculara las perdidas de carga en una tubería de riego por aspersión, donde toda la perdida de carga permisible se pierde en la tubería regante.

Para determinar el coeficiente de salidas múltiples (CSM)

$$CSM = \frac{H_{TSM}}{H_{Qe}} \dots\dots\dots(13)$$

Donde:

$H_{Qe}$  = Perdida de carga generada por el gasto a la entrada de la regante

$LT$  = Longitud total de la tubería, m.

$$H_{Qe} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times LT}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2 \times N}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \right] \times Qe^2 \dots\dots\dots(14)$$

Como:

$LT = N \times Es$ ;  $Qe = N \times Qs$ ;  $Qe^2 = N^2 \times Qs^2$ ;  $Es = L$

Donde:

$N$  = Número de emisores

$Es$  = Espaciamiento entre emisores, m

Sustituyendo expresiones anteriores en la ecuación 14

$$H_{Qe} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times Es \times N}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2 \times N}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \right] \times N^2 \times \bar{Qs}^2 \dots\dots\dots(15)$$

De igual modo:

$$H_{Qe} = F \times N^3 \times \bar{Qs}^2 \dots\dots\dots(16)$$

Sustituyendo 10 y 16 en 13

$$CSM = \frac{F \times \overline{Q_s^2} \times \left( \frac{2N^3 \times 3N^2 \times N}{6} \right)}{F \times \overline{Q_s^2} \times N^3}$$

$$CSM = \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6N^3} \dots\dots\dots(17)$$

Por lo tanto:

Cuando  $N \longrightarrow \infty$ ;  $CSM \longrightarrow 0.333333$

Como se menciona anteriormente para que la diferencia de gastos entre el primer emisor y el último sea del 10%.

$$Q_p = 1.1 Q_u$$

$$Q_p = k \times H_p^x \longrightarrow \text{Gasto en el primer emisor}$$

$$Q_u = k \times H_u^x \longrightarrow \text{Gasto en el ultimo emisor}$$

Donde:

$k$  = Coeficiente.

$x$  = Exponente, el cual para emisores de flujo turbulento es igual a 0.5

Sustituyendo y despejando  $H$ :

$$Q_p = k \times H_p^{0.5} = 1.1 \times k \times H_u^{0.5}$$

$$H_p = 1.1^2 \times H_u \rightarrow H_p = 1.21 \times H_u$$

Por lo tanto las pérdidas de carga permisibles en la sección serán:

$$H_{ps} = H_p - H_u = 1.21H_u - H_u$$

$$H_{ps} = 0.21H_u$$

Y la pérdida de carga en la tubería regante ( $H_{tr}$ ) y el distribuidor ( $H_d$ ) serán;

$$H_{tr} = P \times 0.21H_u$$

$$H_d = (1 - P) \times 0.21H_u$$

Donde:

$P$  = Porcentaje de pérdidas en la tubería regante.

$(1 - P)$  = Porcentaje de pérdidas en el distribuidor.

$$H_s = H_{tr} + H_d$$

$$H_s \leq H_{ps}$$

La carga en el primer emisor de la regante

$$H_p = H_u + H_{ptr} = H_u + 0.21 \times P \times H_u$$

$$H_p = (1 + 0.21P) \times H_u$$

Por lo tanto el gasto medio en la regante  $\bar{Q}_r$ :

$$\bar{Q}_r = (Q_p \times Q_u)^{0.5} = (k \times H_p^{0.5} \times k \times H_u^{0.5})^{0.5}$$

Sustituyendo la  $H_p$ :

$$\bar{Q}_r = k \left[ (1 + 0.21P)^{0.5} \times H_u^{0.5} \times H_u^{0.5} \right]^{0.5}$$

$$\bar{Q}_r = k \times H_u^{0.5} \times (1 + 0.21P)^{0.25} = (1 + 0.21P)^{0.25} \times Q_u$$

$$\bar{Q}_r = (1 + 0.21P)^{0.25} \times Q_u \dots \dots \dots (18)$$

$$\bar{Q}_r^2 = \left[ (1 + 0.21P)^{0.25} \times Q_u \right]^2 \dots \dots \dots (19)$$

Sustituyendo en la ecuación 10

$$H_{tr} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times E_s}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \right] \times (1 + 0.21P)^{0.5} \times \bar{Q}_r^2 \times \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \dots \dots \dots (20)$$

Ecuación para calcular las pérdidas de carga en una tubería regante considerando un porcentaje decimal como permisible de pérdidas y un número de salidas. Como son dos incógnitas se debe resolver a prueba y error, para un valor fijo de P, debe hacerse iteraciones con N. Para facilitar esto debe obtenerse una ecuación para estimar N.

$$H_{ptr} = 0.21P \times H_u$$

$$CSM = \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6N^3}$$

Sustituir  $H_{ptr}$ , dividir entre  $N^3$  y despejar N

$$\frac{0.21P \times Hu}{N^3} = \left[ \frac{4^{10/3} \times C^2 \times Es}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \right] \times (1 + 0.21P)^{0.5} \times \bar{Q}u^2 \times CSM \dots \dots \dots (21)$$

$$N = \left[ \frac{0.21 \times P \times Hu}{\left( \frac{4^{10/3} \times C^2 \times Es}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^2} \right) \times (1 + 0.21P)^{0.5} \times Qu^2 \times CSM} \right]^{1/3} \dots \dots \dots (22)$$

Para calcular N se propone P y se usa  $CSM = 0.35$  como una primera iteración, luego se calcula el CSM correspondiente a N como entero, es decir despreciando la fracción decimal y se sustituye de nuevo en la ecuación, sosteniendo el valor de P hasta que N, tiende a ser constante.

Considerando la pendiente

$$d = \frac{S \times N \times Es}{\sqrt{1 + S^2}} \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

S =Pendiente del terreno

Es = Espaciamiento entre salidas

N = Número de emisores

Se calcula para condición horizontal y luego se aplica en las ecuaciones siguientes:

$$N = \left[ \frac{(0.21 \times P \times Hu) \pm d}{\left( \frac{4^{10/3} \times C^2 \times Es}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^2} \right) \times (1 + 0.21P)^{0.5} \times Qu^2 \times CSM} \right]^{1/3} \dots \dots \dots (24)$$

Se usa (+) cuando la pendiente es a favor y (-) cuando es en contra. El numero obtenido después de iterar aguas arriba y aguas abajo ubican la entrada del distribuidor cuando las regantes están a nivel y el distribuidor en la máxima pendiente. Cuando las regantes y el distribuidor tienen pendiente, entonces ambos deben ajustarse.

Sin embargo a causa de que esta ecuación es demasiado complicada; el mismo Peña en 1997 (Manual para diseño de zonas de riego pequeñas) determina algunos coeficientes como se muestran en las tablas 2.9 y 2.10, el cual hacen más practico el uso de estas ecuaciones. Considerando que se pierde el 30% y el 70% de la perdida de carga permisible en la lateral y en la distribuidora respectivamente. Por lo tanto la ecuación para la determinación del número máximo de emisores queda de la siguiente manera:

$$N = \frac{\left[ \frac{6.47248}{0.21 \times 0.30 \times H \pm d} \right]^{1/3}}{\left( \frac{4^{10/3} \times 0.009^2}{\pi^2 \times \left( \frac{1}{1000} \right)^{16/3}} + 0 \right)^{1/3} \times (1 + 0.21 \times 0.30)^{1/6} \times \left( \frac{1}{3600000} \right)^{2/3} \times (0.35)^{1/3} \times \frac{Es^{1/3} \times Q^2}{D^{16/9}}}$$

$$N = \frac{\left( \frac{6.78}{0.063 \times H \pm d} \right) \times D^{16/9}}{0.615 \times Es^{1/3} \times Q^{2/3}}$$

$$N = \frac{(k_2 \times H \pm d)^{1/3} \times D^{16/9}}{k_3 \times Es^{1/3} \times Q^{2/3}} \dots \dots \dots (25)$$

Donde:

- H = Carga del emisor (m)
- D = Diámetro interior de la tubería (mm)
- Es = Espaciamiento entre salidas (m)
- Q = Gasto del emisor

Ahora para la determinación de la ecuación de perdida de carga

La ecuación 20 dividir ambos términos entre N<sup>3</sup>

$$\frac{H_{tr}}{N^3} = \frac{4^{10/3} \times 0.009^2}{\pi^2 \times D^{16/3}} + \frac{kL \times 4^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \times (1 + 0.21 \times 0.30)^{0.5} \times (1 + 0.21P)^{0.5} \times Q^2 \times CSM$$

Donde:

$$\frac{H_{tr}}{N^3} = \frac{K_5 \times E_s \times Q^2}{D^{16/3}} \left[ \frac{4 \times 10^3 \times 0.009^2}{\pi^2 \times \left(\frac{1}{1000}\right)^{16/3}} + \frac{0 \times 4^2}{2 \times 9.81 \times \pi^2 \times D^4} \right] \times (1 + 0.21 \times 0.30)^{0.5} \times \left(\frac{1}{3600000}\right)^2 \times 0.35 \dots (26)$$

K5

$$\frac{H_{tr}}{N^3} = \frac{0.2324 \times E_s \times Q^2}{D^{16/3}}$$

Es = Espaciamiento entre salidas (m)

Q = Gasto del último emisor (LPH)

N = Número de salidas en la tubería

D = Diámetro interior de la tubería (mm)

| <b>Tabla 2.9 Coeficientes de calculo del numero de salidas</b> |             |                |                |
|----------------------------------------------------------------|-------------|----------------|----------------|
| Tipo de tubería                                                | Opción      | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> |
| Regante                                                        | S/Regulador | 0.063          | 0.615          |
| Regante                                                        | C/R         | 0.21           | 0.628          |
| Distribuidor                                                   | S/R         | 0.147          | 0.623          |
| Distribuidor                                                   | C/R         |                |                |

| <b>Tabla 2.10 Coeficientes de calculo de perdida de carga</b> |        |                |
|---------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Tubería                                                       | Opción | K <sub>5</sub> |
| Regante                                                       | S/R    | 0.2324         |
| Regante                                                       | C/R    | 0.2480         |
| Distribuidor                                                  | S/R    | 0.2489         |
| Distribuidor                                                  | C/R    | 0.2254         |

#### 2.3.4.4. Diseño de las tuberías de conducción y distribución

Debido a que ambas son continuas, su diseño se hace de la misma manera, y consiste en seleccionar el diámetro más apropiado por tramos, ya que cada uno de ellos las condiciones de gasto, carga requerido y topografía son diferentes (Martínez, 1991). De este modo para c/tramo se pueden seleccionar uno o varios diámetros de acuerdo al criterio que se utilice, el cual depende de aspectos hidráulicos y/económicos.

Desde el punto de vista hidráulico se puede hacer usando los siguientes criterios:

- Velocidad permisible en la tubería

Para evitar taponamientos en los emisores por velocidades bajas; así como golpe de ariete por velocidades altas, las velocidades en las tuberías deberán estar dentro de un rango permisible, el cual de acuerdo con algunos autores son las siguientes: velocidades de 0.3 a 1.5 m/s (SARH, 1980), de 1.5 a 3 m/s (Martínez, 1991), y de 0.9 a 2 m/s (Peña, 1993). Una vez que se fija la velocidad, el diámetro se obtiene de la siguiente forma:

$$Q = A \times V$$

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

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D = \left( \frac{4 \times Q}{V \times \pi} \right)^{1/2}$$

Donde:

D = Diámetro interior (m)

Q = gasto (m<sup>3</sup>/seg)

V = Velocidad (m/seg.)

### 3.3.5. Instalación del sistema de riego

Cada sistema de riego es único por lo tanto, no hay guía de instalación que cubra todas las situaciones. Sin embargo, hay muchos trabajos y numerosos problemas que son comunes a todas las instalaciones.

Rodrigo y otros 1996 señalan los siguientes aspectos:

- Materiales para la instalación

En el proyecto deberán especificarse las cantidades de cada uno de los materiales, así como sus detalles de instalación.

- Herramientas y equipo de trabajo requerido

Estas dependen de las dimensiones del proyecto, y son las siguientes: Herramientas básicas tales como palas, sierras limas, palancas, llave inglesa, destornilladores, taladros, etc.; medios de transportes, remolques, y/o carretilla para transporte de materiales y en caso necesario una retroescavadora para abrir zanjas; grúas portátiles para levantar piezas pesadas como filtros, válvulas grandes, bombas tanques etc.

- Montajes de uniones y otras piezas especiales  
Para esto es muy conveniente realizar el trabajo de montaje en el almacén central, ya que se cuenta con el mayor equipo necesario.
- Topografía y Replanteo  
El topógrafo, debe replantear las tuberías principales y subprincipales, límites de las fincas, localización de los cables o tuberías subterráneas que son de utilidad.
- Zanjas  
Estas se abrirán a lo largo de los trazados de las tuberías principales y subprincipales.
- Montajes de tuberías y accesorios  
Estas se distribuyen sobre el terreno y se procede a unirlos utilizando el pegamento o lubricante adecuado, para el caso de tuberías de PVC. En dichas tuberías se instalan tees, codos, elevadores, válvulas, etc. Según el proyecto.
- Instalación de cables eléctricos  
En instalación de válvulas eléctricas o hidráulicas controladas, los cables eléctricos o los microtubos se colocaran en el fondo de la zanja holgadamente, tratando de mantenerlos alejado de los bordes vivos de las piezas especiales y de las rocas. Estos deberán probarse antes de enterrarse. Además se debe permitir suficiente holgura en cada válvula subprincipal para hacer conexiones con las válvulas de control en campo para permitir contracciones. La siguiente tabla muestra el tipo de cable que deben usar las válvulas solenoides. La tabla 2.11 se muestra el tipo de cable que deben usar las válvulas solenoides dependiendo de la presión de operación y la longitud entre los controles y las válvulas solenoides.
- Colocación de la tubería en zanjas  
Las tuberías tanto principales como subprincipales deben depositarse en las zanjas cuidadosamente.
- Instalación de juntas, válvulas y elevadores  
La última parte de la instalación debe completarse con la instalación de válvulas y demás piezas especiales, conectar los cables de control a las válvulas de control de campo, así como pintar las tuberías de PVC, para protegerlas de los rayos del sol y prevenir el crecimiento de algas.
- Relleno parcial de las zanjas

Después de que la tubería se ha colocado en las zanjas, se procede a hacer un relleno parcial de estas. En tiempos de calor el relleno debe de hacerse en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde por el efecto de contracción.

- **Instalación de bloques de anclaje.**

Estos se ponen con la finalidad de que no se produzcan fuerzas hidrostática de empujes significativos y estos generalmente se colocan en tees, codos, reductores, elevadores y válvulas.

- **Instalación de tuberías laterales**

Se tienden sobre el terreno las tuberías laterales (regantes), pero no se conectan a los distribuidores sin antes haberlos lavados para evitar que las laterales se contaminen de tierra, insectos, etc., conservando los extremos de las tuberías laterales tapados.

- **Lavado, presurización y prueba de instalación**

Para permitir que salga al exterior todas las impurezas, se deben de llenar las tuberías principales con sus válvulas de salida abiertas. Una vez que se han lavado las tuberías se cierran las válvulas y entonces la presión dentro de la tubería deberá llevarse hasta la presión de prueba. Si existen fugas, se debe terminar la prueba, reparar las fugas, lavar la tubería y repetir la prueba.

- **Conexión de tuberías laterales a los distribuidores**

Con las finales de las laterales abiertas, conectarse a los distribuidores. La conexión se hará más fácilmente si por esta ultima corre agua. Dejar que se laven laterales y después cerrar los finales de estas, llevando la presión del sistema hasta la de trabajo. Ajustar todas las presiones en los distribuidores a su valor requerido. Verificar las perdidas, cortar el funcionamiento del sistema y reparar todas las fugas en las subprincipales y líneas laterales.

- **Prueba de funcionamiento**

Una vez que se ha comprobado que todos los componentes del sistema funcionan correctamente se procede a hacer el llenado final de las zanjas.

| Tabla 2.11 Selección del tamaño de cable para la válvula solenoide |                                |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Tamaño AWG                                                         | No debe exceder cierta presión |

| Diámetro<br>No | Pulgada | 5.3<br>kg/cm <sup>2</sup> | 6.0<br>kg/cm <sup>2</sup> | 7.0<br>kg/cm <sup>2</sup> | 8.8<br>kg/cm <sup>2</sup> | 10.55<br>kg/cm <sup>2</sup> |
|----------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 18             | 0.040   | 2200                      | 2000                      | 1600                      | 1100                      | 700                         |
| 16             | 0.051   | 3600                      | 3200                      | 2500                      | 1800                      | 1100                        |
| 14             | 0.064   | 5700                      | 5000                      | 4000                      | 3000                      | 1700                        |
| 12             | 0.081   | 9000                      | 8000                      | 6400                      | 4700                      | 2800                        |
| 10             | 0.102   | 14000                     | 12700                     | 10200                     | 7400                      | 4400                        |
| 8              | 0.129   | 22700                     | 20200                     | 16200                     | 11800                     | 7000                        |

### 3.3.6. Operación de los sistemas

La operación de un sistema de micro-irrigación comprende toda la manipulación con el propósito que funcione y entregue, con la mayor eficiencia posible, el agua, los fertilizantes y otros agroquímicos aplicados a través de este, en las cantidades deseadas y en periodos de tiempos predeterminados.

Para esto el operador debe conocer el funcionamiento del equipo, su capacidad y sus presiones de trabajo, es decir la cantidad de agua por conducir a través de su red de tuberías y la entrega por cada emisor bajo ciertas condiciones de presión que deben ser conocidas, deben tener a la mano los calendarios de riego y fertilización, los cuales deben de tener las fechas y cantidades de aplicación, y por último, contar con programas de evaluación, para verificar que funcione correctamente. Un indicador importante del sistema son las presiones de trabajo. Con la información de las presiones se conoce cuando deben de limpiarse los filtros, cuanto fertilizante se aplica por unidad de tiempo y si el sistema esta funcionando con el gasto hidráulico requerido. Es por ello que el sistema cuenta con manómetros en puntos clave.

En el cabezal de control se requiere conocer las presiones de operación antes y después del decantador, del dosificador de agroquímicos y del filtro en la salida del cabezal. En la entrada de las secciones de riego, la presión debe estar definida y variar lo menos posible, por lo que generalmente en la unidad autónoma se incluye un regulador de presión, y posteriormente después del regulador se incluye un manómetro.

### III.-MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción del lugar

El trabajo se llevo a cabo en la parcela experimental de la Coordinación de Tecnología del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Progreso, Jiutepec, Morelos. Su ubicación geográfica esta dada entre el paralelo 18°52' latitud Norte y el meridiano 99°9' longitud Oeste. Se caracteriza por tener un clima intermedio en cuanto a humedad, con lluvias de verano y un régimen de lluvia invernal menor de 5 mm. El rango del régimen pluvial es de 820 mm/año, y el de la temperatura media anual oscila entre 22 y 24 °C.



**Fig. 3.1 Ubicación de las instalaciones del**

### 3.1.1 Fuente de abastecimiento

Se cuenta con un pozo profundo el cual se encuentra ubicado en la parte norte del IMTA. Este pozo esta equipado con una bomba de turbina vertical, la cual bombea a una cisterna de aproximadamente 270 m<sup>3</sup>, de la cual se deriva el agua por diferencia de cotas a otro depósito ubicado en la parte sur de las instalaciones del instituto (laboratorio de riego y drenaje), la cual tienen una capacidad de 15 m<sup>3</sup>, y es el punto donde se bombea para el sistema de riego.

### 3.1.2 Tipo de suelo

Los suelos de la zona tienen altos contenidos de arcilla mayores del 60% de formación aluvial, como se muestra en la tabla 3.1. La capa superficial tiene un espesor de 10 cm, es de textura arcillosa, de color olivo claro, estructura granular y bloc subangular.

El primer estrato del subsuelo profundiza de 10 a 35 cm, el contenido de arcilla es mayor de 60%, tienen una estructura columnar. El segundo estrato profundiza de los 35 a 75 cm su textura es arcillosa y el último estrato profundiza de los 70 a 100 cm, su textura es arcillosa de color negro.

| Prof.  | % A | % L | %Arci. | % M.O. | Da gr/cm <sup>3</sup> | Text. | CC    | PMP   |
|--------|-----|-----|--------|--------|-----------------------|-------|-------|-------|
| 0-10   | 18  | 26  | 56     | 1.68   | 1.2                   | Arci. | 0.447 | 0.32  |
| 10-35  | 26  | 24  | 50     | 1.896  | 1.3                   | Arci. | 0.417 | 0.295 |
| 35-70  | 18  | 22  | 60     | 3.16   | 1.2                   | Arci. | 0.46  | 0.338 |
| 70-100 | 24  | 20  | 56     | 1.264  | 1.2                   | Arci. | 0.44  | 0.351 |

## 3.2 Diseño del sistema de riego

### 3.2.1 Uso consuntivo

La evapotranspiración del cultivo es estimada multiplicando la evapotranspiración potencial por un coeficiente de cultivo (Kc). La evapotranspiración potencial es calculada cada hora por medio de una estación meteorológica automatizada, usando sensores y un sistema para la adquisición de datos y control. Al estar calculando la ETp cada hora, el

grado de error en el cálculo de la ETr se minimiza significativamente, logrando con ello una buena calendarización del riego por medio de estación meteorológica.

Como se menciona en la revisión de literatura la demanda de un cultivo de referencia máxima es calculada por medio del método de Penman-Monteith para el mes más crítico y multiplicada por un coeficiente de cultivo

$$E_{Tr} = E_{To} * K_c$$

$$E_{Tr} = 6.5 * 0.75$$

$$E_{Tr} = 4.875 \text{ mm/día}$$

### **3.2.2 Diseño hidráulico de las secciones de riego**

Como se mencionó en la revisión, el sistema debe de ser capaz de proporcionar la cantidad de agua bajo condiciones de demanda crítica, además determinar los diámetros y longitudes de las regantes y distribuidores así como dimensionar las cargas de operación en las entradas de las secciones.

Para las secciones de cítricos, el diseño del sistema de microaspersión se hizo considerando la evapotranspiración máxima correspondiente al mes de mayo que corresponde a un valor de 6.5 mm/día . La huerta de cítricos está en proceso de rehabilitación y cuenta con una superficie de 2736 m<sup>2</sup>, sus árboles están dispuestos en un marco de plantación de 6m x 6m, como se muestra en la figura 3.2. La edad de los árboles es de 8 años pertenecientes a la especie C. Persa de injerto.

Información requerida

Diámetro de la regante

$$D_r = 13 \text{ mm}$$

Espaciamiento entre emisores

$$E_e = 6 \text{ m}$$

Espaciamiento entre regantes

$$E_r = 6 \text{ m}$$

Coefficiente de variación (propuesto)

$$C_v = 0.05$$

Factor de ajuste por operación

F1 = 7 días/semana

Factor de ajuste por área

F2 = 0.75

Evapotranspiración crítica

ET = 6.5 mm/día

Pendientes en las regantes

1 y 1.5 %

$Q_{asp} = 7.153 H^{0.54}$

H = 15 m

Qasp = 31 lph

### SECCIÓN # 1

Determinación del volumen bruto diario

$$V_b = \frac{E_e * E_r * E_{Tr} * F_1 * F_2}{1 - C_v}$$

Vb = Volumen bruto diario (lpd)

Ee = Espaciamiento entre emisores (m)

Er = Espaciamiento entre regantes (m)

ETr = Evapotranspiración máxima (mm/día)

F1 = Factor de ajuste por área (Adim.)

F2 = Factor de ajuste por operación (decimal)

Cv = Coeficiente de variación de gasto

$$V_b = \frac{6 \times 6 \times 6.5 \times 0.75 \times 1}{1 - 0.05} = \frac{205.355}{0.95} = 184.7 \text{ L/D/A}$$

Tiempo de riego

El gasto del microaspersor seleccionado fue de 31 lph con una carga de 15 mca

$$T = \frac{Vb}{Qasp}$$

Tr = 5hr. con 57min (Para periodos de máxima demanda)

#### **Perdida de carga permisible en la sección**

La diferencia de presiones de operación entre los emisores con las condiciones más desfavorables en una sección de riego no debe exceder el 21% de la carga del último emisor para conservar la diferencia de gastos menor o igual al 10% de gasto del último emisor

$$Hps = K_2 * He$$

Donde

$K_2$  = Carga permisible en la sección

He = Carga del emisor

$$Hps = 0.21 He = 0.21 * 15 = 3.15 \text{ m.}$$

Al no usar regulador de presión en la regante ni en la distribuidora. Se aplica un criterio para disipar el 30 y el 70 % de energía en la regante y en la distribuidora respectivamente (Peña, 1996). Por lo que las pérdidas de carga permisibles en la regante y en la distribuidora quedan de la siguiente manera:

#### **Perdida de carga permisible en la regante**

$$Hpr = 0.21 * 0.30 * 15 = 0.945 \text{ m.}$$

#### **Perdida de carga permisible en la distribuidora**

$$Hpd = 0.21 * 0.70 * 15 = 2.205 \text{ m}$$

#### **Numero máximo de emisores en la tubería regante**

Las tuberías (regantes y distribuidoras) tienen un número máximo de salidas las cuales dependen de la topografía del terreno.

Para esto se utiliza la ecuación 25, y los coeficientes de la tabla 2.9, según sea el caso.

$$N = \frac{(k_2 \times H \pm d)^{1/3} \times D^{16/3}}{k_3 \times Ee^{1/3} \times Q^{2/3}}$$

Primeramente se hace la primera iteración considerando que no existe pendiente es decir;

$$d = 0$$

$$D = 13 \text{ mm.}$$

$$H_e = 15 \text{ m.}$$

$$Ee = 6 \text{ m.}$$

$$Q_e = 31 \text{ LPH}$$

Ahora considerando la pendiente del 1% (a favor)

$$d = \frac{S \times E_s \times N}{(1 + S^2)^{1/2}}$$

$$N = \frac{(0.063 \times 15 \pm 0)^{1/3} \times 13^{16/3}}{0.615 \times 6^{1/3} \times 31^{2/3}}$$

| Tabla 3.2 Determinación del número máximo de salidas en la regante con pendiente a favor (1ª sección). |       |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----|
| # de iteración                                                                                         | d (m) | N  |
| 1                                                                                                      | 0     | 8  |
| 2                                                                                                      | 0.509 | 9  |
| 3                                                                                                      | 0.589 | 10 |

Por lo tanto se pueden adaptar como máximo 10 emisores, sin embargo; en nuestra sección solo se cuenta 9 emisores

#### Perdida de carga en la tubería regante (pendiente a favor)

para esto se utiliza la ecuación 26 y la tabla 2.10

$$H_r = \frac{0.2324 \times 6 \times 31^2 \times 9^3}{13^{16/3}}$$

$$H_r = 1.12 \text{ m}$$

Se verifica con la perdida de carga permisible mas el desnivel del terreno

$$H_p = 0.063 * 15 + 0.509$$

$$H_p = 1.449$$

$$1.449 > 1.12$$

**Numero máximo de salidas en el distribuidor**

Para esto se requiere el gasto medio en la regante por lo que se utiliza la ecuación 18

$$\bar{Q}_r = (1 + 0.21 * P)^{0.25} * Q$$

$$\bar{Q}_r = (1 + 0.21 * 0.30)^{0.25} * 31$$

$$\bar{Q}_r = 1.0154 * 31$$

$$\bar{Q}_r = 31.47$$

$$Q_{etr} = 31.47 * 9 = 283.29$$

Utilizando la ecuación 25 y con la tabla 2.9 se determina el numero máximo de salidas en el distribuidor.

$$N = \frac{(0.147 \times 15 \pm d)^{1/3} \times 19^{16/3}}{0.623 \times 6^{1/3} \times 283.29^{2/3}}$$

y con pendiente del 1% (a favor)

$$H = 15 \text{ m}$$

$$D = 19 \text{ mm}$$

$$Q = 283.29$$

$$E_s = 6 \text{ m}$$

| # Iteración | d (m) | N |
|-------------|-------|---|
| 1           | 0     | 5 |
| 2           | 0.30  | 5 |
| 3           | 0.310 | 5 |

Cabe mencionar que 5 es el número máximo de salidas que puede existir en una distribuidora, pero la distribuidora de la parcela solo cuenta con 3 salidas, esto con el objetivo de mantener una mejor uniformidad del riego.

**Pérdida de carga en el distribuidor (Pendiente a favor)**

Para esto se utiliza la ecuación 26 y la tabla 2.10

$$H_d = \frac{0.2489 \times 6 \times 283.29^2 \times 3^3}{19^{16/3}}$$

$$H_d = 0.4897$$

$$H_{pd} = 0.147 * H_e + d$$

$$H_{pd} = 0.147 * 15 + 0.12 = 2.325$$

$$2.325 > 0.4897$$

Para que un diseño se acepte se debe cumplir con la siguiente condición

$$H_{ps} \geq H_{sección}$$

$$3.15 \geq 1.12 + 0.4897$$

$$3.15 > 1.6097$$

Por lo tanto se acepta

**SECCIÓN # 2**

$$H_{ps} = 3.15$$

$$H_{pr} = 0.945$$

$$H_{pd} = 2.205$$

Número de salidas 10

**Pérdida de carga en la tubería regante (pendiente a favor)**

$$H_r = \frac{0.2324 \times 6 \times 31^2 \times 10^3}{13^{16/3}} = 1.535$$

$$H_{pr} = 0.945 + 0.81 = 1.755$$

$$1.755 > 1.535$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora (pendiente a favor)**

$$H_{d1} = \frac{0.2489 \times 6 \times 314.77^2 \times 1^3}{13^{16/3}} = 0.1695$$

$$H_{pd1} = 2.205 + 0.355 = 2.56$$

$$2.56 > 0.1695$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora aguas arriba (pendiente en contra)**

$$H_{d2} = \frac{0.2489 \times 6 \times 314.77^2 \times 1^3}{13^{16/3}} = 0.1695$$

$$H_{pd2} = 2.205 - 0.355 = 1.85$$

$$1.85 > 0.1695$$

**SECCIÓN # 3**

$$H_{ps} = 3.15$$

$$H_{pr} = 0.945$$

$$H_{pd} = 2.205$$

Numero de emisores 8

**Pérdida de carga en la tubería regante (Pendiente a favor)**

$$H_r = \frac{0.2324 \times 6 \times 31^2 \times 8^3}{13^{16/3}} = 0.7859$$

$$H_{pr} = 0.945 + 0.63 = 1.575$$

$$1.575 > 0.7859$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora (Pendiente a favor)**

$$H_{d1} = \frac{0.2489 \times 6 \times 251.81^2 \times 1^3}{13^{16/3}} = 0.108$$

$$H_{pd1} = 2.205 + 0.015 = 2.22$$

$$2.22 > 0.108$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora (pendiente en contra)**

$$Hd2 = \frac{0.2489 \times 6 \times 251.81^2 \times 1^3}{13^{16/3}} = 0.108$$

$$Hpd2 = 2.205 - 0.015 = 2.19$$

$$2.19 > 0.108$$

**SECCIÓN # 4**

$$Hps = 3.15$$

$$Hpr = 0.945$$

$$Hpd = 2.205$$

Numero de salidas 6, 5, 3, 2

Numero de salidas promedio en cada distribuidora = 4 emisores

**Pérdida de carga en la tubería regante (Pendiente a favor)**

$$Hr = \frac{0.2324 \times 6 \times 31^2 \times 4^3}{13^{16/3}} = 0.098$$

$$Hpr = 0.945 + 0.27 = 1.215$$

$$1.215 > 0.098$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora (Pendiente a favor)**

$$Hd1 = \frac{0.2489 \times 6 \times 125.9^2 \times 1^3}{13^{16/3}} = 0.027$$

$$Hpd1 = 2.205 + 0.075 = 2.28$$

$$2.28 > 0.027$$

**Pérdida de carga en la tubería distribuidora (Pendiente en contra)**

$$Hd2 = \frac{0.2489 \times 6 \times 125.9^2 \times 3^3}{13^{16/3}} = 0.732$$

$$Hpd2 = 2.205 + 0.155 = 2.05$$

2.05 > 0.732

### 3.2.3 Diseño de las tuberías de conducción y distribución

De acuerdo a la distribución de la tubería en campo se seleccionaron 2 tipos de tuberías (como se muestran en la tabla 3.4); de polietileno y PVC de 1 y 2 pulgadas respectivamente, para minimizar pérdidas de carga por fricción y por consiguiente seleccionar una bomba de carga pequeña.

#### ▪ Pérdidas de carga en la conducción

Las pérdidas de carga en la conducción fueron calculadas por la ecuación de Hazen-Williams.

$$H_f = \frac{1.21 \times 10^{10}}{D^{4.87}} \times \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} \times L$$

Donde:

H<sub>f</sub> = Pérdidas de carga por fricción (m)

D = Diámetro interior (mm)

Q = Gasto (lps)

C = Coeficiente de fricción (150)

L = Longitud de la tubería (m)

| Tramo | L(m)  | D(mm) | Q(lps) | H <sub>f</sub> (m) |
|-------|-------|-------|--------|--------------------|
| A-B   | 14    | 25    | 0.138  | 0.063              |
| B-C   | 12    | 25    | 0.267  | 0.183              |
| C-D   | 20.5  | 25    | 0.43   | 0.755              |
| D-E   | 102.5 | 50    | 0.654  | 0.254              |

#### ▪ Pérdidas de carga hidráulica en el sistema

| Concepto | Pérdida de carga (m) |
|----------|----------------------|
|----------|----------------------|

|                                            |                   |
|--------------------------------------------|-------------------|
| Microaspersor                              | 15                |
| Perdida de carga en la sección mas critica | 0.732+0.098 =0.83 |
| Pérdida en la conducción                   | 1.255             |
| Pérdida de carga en el filtro              | 1                 |
| Pérdida de carga en la válvula solenoide   | 2.0               |
| Pérdida de carga localizadas               | 2.0               |
| TOTAL                                      | 22.1              |

▪ **Pérdidas de carga localizadas**

Para las pérdidas de carga localizadas se considera que se pierde el 10% de la pérdida de carga total (sin considerar el desnivel del terreno); por lo que quedan de la siguiente manera:

$$H_{Loc} = H_t * 0.1$$

$$H_{Loc} = (15 + 0.732 + 1.128 + 1 + 2.0) * 0.1$$

$$H_{Loc} = (19.86 * 0.10) = 1.986 \text{ m}$$

▪ **Carga hidráulica total requerida**

Para determinar la carga potencial por posición, se toma en cuenta el desnivel topográfico desde el punto más critico de la sección hasta la bomba.

| Concepto               | H (m) |
|------------------------|-------|
| Perdida de carga total | 22.1  |
| Desnivel del terreno   | 2.01  |
| Altura de bombeo       | 2.5   |
| Total                  | 26.61 |

Una vez determinada la carga total requerida y el gasto máximo requerido por unidad operacional, se procede a buscar una bomba en el mercado que cumpla de manera muy eficiente con los requerimientos del proyecto. La elección del equipo de bombeo se realiza con base a las curvas características de los modelos existentes en el mercado.

En conclusión para el proyecto se requiere una bomba que sea capaz de bombear 0.654 lps con una carga total de 25.656 mca considerando que para elevar el agua desde un nivel de la cisterna de 2 m por lo que se seleccionó una bomba de 1.5 HP. En la figura 3.3 se presenta la curva característica de la bomba seleccionada para el sistema de riego.

### **3.3 Materiales**

Los materiales y equipos utilizados durante la instalación y operación del sistema de riego se presentan a continuación. Se incluye (Apéndice 1) el material para la instalación del subsistema de riego por microaspersión (cítricos), así como para los subsistemas de riego por goteo de cinta (maíz, hortalizas) y por aspersión (pasto de jardín)

### **3.4 Instalación del sistemas de riego**

La instalación de los sistemas se realizó de acuerdo a las etapas de desarrollo siguiente:

1. Excavación de las zanjas para instalar las tuberías de conducción y distribución
2. Tendido de tuberías, accesorios y unidades de control para su instalación
3. Cubierta parcial de las zanjas
4. Una vez instalado fue necesario hacer una prueba para verificar que no existieran fugas y al mismo tiempo un lavado de las tuberías (purgado).
5. Tendido y conexión de las regantes a los distribuidores
6. Lavado general del sistema con las terminales de las regantes abiertas.
- 8. Cerrado de las terminales de las regantes, con el sistema de funcionamiento.**

### **3.5 Calendarización del riego**

Como se menciona en la revisión de literatura el propósito del riego es abastecer a las plantas con agua que necesitan para obtener un rendimiento óptimo y buena calidad del producto. El riego debe de aplicarse en cantidades necesarias para restablecer el nivel de humedad en el volumen de raíces en el momento oportuno. Las necesidades hídricas se pueden determinar por medio de un balance de humedad, ya que es un método simple y eficaz para el pronóstico de riego en tiempo real el cual considera las entradas y salidas de

los flujos de agua en la zona radical del cultivo. La lámina de riego se puede calcular mediante la ecuación 1-4 previamente mencionada en el capítulo II.

$$L_{i+1} = L_i + Pe_i + R_i - ET_i - PP_i + OA_i + OE_i$$

$L_{i+1}$  = Contenido de humedad al inicio del día  $i+1$ , (mm)

$L_i$  = Contenido de humedad el día  $i$  (mm)

$Pe_i$  = Precipitación efectiva durante el día  $i$  (mm)

$R_i$  = Riego para el día  $i$  (mm)

$ET_i$  = Evapotranspiración del cultivo del día  $i$  (mm)

$PP_i$  = Lámina drenada, ya sea escurrida o percolada, el día  $i$  (mm)

$OA_i$  = Otras aportaciones el día  $i$  (mm)

$OE_i$  = Otras extracciones el día  $i$  (mm)

Para utilizar la ecuación anterior es necesario determinar los parámetros que influyen en el balance de humedad en el suelo.

A continuación se presentan cada uno de los componentes.

### 3.5.1 Determinación de la lámina inicial ( $L_i$ )

Para la realización del balance hídrico en el suelo es necesario partir de un valor de contenido de humedad inicial ( $\theta_i$ ) expresado en lámina ( $L_i$ ). Para la determinación del contenido de humedad se utiliza el método del TDR como se mencionó en la literatura; para ello es necesario primero calibrarlo, comparando los valores de contenido de humedad del suelo determinado por el método gravimétrico con los valores de la constante dieléctrica del suelo ( $K_a$ ) a partir de la ecuación 1-12. Para cada tipo de suelo se debe determinar una curva de calibración, transformando los valores de contenido de humedad gravimétrica a unidades volumétricas, multiplicando el contenido de gravimétrico por la densidad aparente del suelo ( $\theta_v = \theta_g * \rho_a$ )

$$Ka = \left( \frac{c \times [tc - tb]}{2L} \right)^2$$

Donde:

Ka = Constante dieléctrica aparente del suelo

c = Velocidad de la luz al vacío  $2.997925 \times 10^8$  (m/seg.)

tc-tb = Intervalo de tiempo que toma la onda electromagnética para recorrer una distancia del punto B al punto C y viceversa (Nseg)

L = Longitud de la varilla (m)

Una vez determinada Ka, se estima el contenido volumétrico de agua en el suelo mediante una curva de calibración en forma de un polinomio de tercer orden, utilizando la ecuación 1-3

$$\theta_v = \alpha_0 + (\alpha_1 \times Ka) - (\alpha_2 \times Ka^2) + (\alpha_3 \times Ka^3)$$

Donde:

$\theta_v$  = Contenido volumétrico de humedad (%)

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  = Coeficientes

Para la calibración de un TDR modelo CS615 se realiza de la siguiente manera:

- Se realizó un muestreo de suelo representativo del área de estudio para determinar el contenido de humedad y la densidad aparente del mismo.
- Al realizar el muestreo se tomaron lecturas con el sensor para determinar el tiempo de recorrido de la onda electromagnética en el suelo.
- Se logro obtener la curva de calibración del TDR graficando la velocidad de propagación (abscisas) contra contenido de humedad volumétrico (ordenadas).
- Por ultimo se determino el polinomio de tercer grado para generalizar el procedimiento e interpolar datos en parcelas que presenten las mismas características edáficas.

A continuación se presentan datos para la calibración del TDR en un suelo de textura fina.

| Tabla 3.7 Calibración de un TDR (CS615) en un suelo de textura arcillosa |       |         |        |        |       |      |      |            |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|---------|--------|--------|-------|------|------|------------|
| Parcela                                                                  | Prof. | P. Bote | PSHB   | PSSB   | W     | D.A. | M_S  | $\theta_v$ |
| 1                                                                        | 0-30  | 21.66   | 163.58 | 127.82 | 33.69 | 1.20 | 1.86 | 40.42      |
| 1                                                                        | 0-30  | 18.82   | 159.77 | 124.83 | 32.96 | 1.20 | 1.89 | 39.55      |
| 3                                                                        | 0-30  | 21.13   | 151.27 | 123.38 | 27.28 | 1.20 | 1.77 | 32.73      |
| 4                                                                        | 0-30  | 21.29   | 144.12 | 115.04 | 31.02 | 1.20 | 1.83 | 37.22      |
| 6                                                                        | 0-30  | 22.35   | 144.82 | 118.05 | 27.97 | 1.20 | 1.68 | 33.57      |
| 7                                                                        | 30-60 | 20.92   | 135.00 | 102.43 | 39.96 | 1.20 | 2.36 | 47.95      |
| 9                                                                        | 0-30  | 21.12   | 161.2  | 123.2  | 37.23 | 1.20 | 2.04 | 44.67      |
| 1                                                                        | 30-60 | 22.35   | 178.54 | 136.49 | 36.84 | 1.20 | 2.20 | 44.21      |
| 6                                                                        | 0-30  | 21.29   | 179.92 | 142.93 | 30.41 | 1.20 | 1.80 | 36.49      |
| 6                                                                        | 30-60 | 21.62   | 169.82 | 134.96 | 30.76 | 1.20 | 1.91 | 36.91      |
| 6                                                                        | 30-60 | 18.82   | 177.85 | 137.94 | 33.50 | 1.20 | 2.07 | 40.20      |
| 6                                                                        | 0-30  | 21.23   | 163.81 | 130.81 | 30.11 | 1.20 | 1.83 | 36.14      |
| 6                                                                        | 0-30  | 22.2    | 189.47 | 151.13 | 29.74 | 1.20 | 1.88 | 35.68      |
| 6                                                                        | 30-60 | 21.12   | 142.82 | 114.07 | 30.93 | 1.20 | 2.02 | 37.12      |
| 3                                                                        | 0-30  | 21.23   | 152.93 | 125.68 | 26.09 | 1.20 | 1.49 | 31.31      |
| 3                                                                        | 30-60 | 21.29   | 156.1  | 127.03 | 27.49 | 1.20 | 1.87 | 32.99      |
| 3                                                                        | 0-30  | 20.92   | 146.46 | 116.02 | 32.01 | 1.20 | 1.80 | 38.41      |
| 4                                                                        | 0-30  | 21.62   | 163.38 | 128.51 | 32.62 | 1.20 | 1.81 | 39.15      |
| 4                                                                        | 0-30  | 21.59   | 171.17 | 133.48 | 33.68 | 1.20 | 1.96 | 40.42      |
| 4                                                                        | 30-60 | 22.2    | 195.17 | 150.16 | 35.18 | 1.20 | 2.23 | 42.21      |
| 4                                                                        | 0-30  | 22.43   | 175.04 | 138.85 | 31.09 | 1.20 | 1.84 | 37.30      |
| 4                                                                        | 30-60 | 18.82   | 166.72 | 129.62 | 33.48 | 1.20 | 2.00 | 40.18      |
| 1000                                                                     | 0-30  | 22.42   | 167.39 | 145.54 | 17.75 | 1.20 | 1.21 | 21.30      |
| 1000                                                                     | 0-30  | 20.9    | 188.29 | 154.14 | 25.63 | 1.20 | 1.73 | 30.76      |

P.Bote = Peso del bote      PSHB = Peso del suelo húmedo+bote

PSSB = Peso del suelo seco+bote    W = Contenido gravimétrico de humedad

D.A = Densidad aparente    M\_S= Velocidad de propagación de la onda electromagnética

(milésimas de segundos)       $\theta_v$  = Contenido volumétrico de humedad

$$\theta_v = -(76.375) + (144.32 \times Ka) - (66.506 \times Ka^2) + (11.684 \times Ka^3)$$

La ecuación anterior también puede expresarse en lámina de riego para llevar el suelo de un contenido inicial  $\theta_i$  a un contenido final  $\theta_f$ , si se conoce la profundidad radical del cultivo; por lo tanto:

$$Lr_i = (\theta_f - \theta_i) * Pr$$

Donde:

Pr = Profundidad radical del cultivo (cm)

$\theta_f$  = Contenido de humedad inicial ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Si se quiere conocer el contenido de humedad en términos de lámina, el valor de  $\theta_i$  se asume como cero.

### 3.5.2 Determinación de la lluvia efectiva ( $Pe_i$ )

En cambio para la determinación de la precipitación efectiva se estimó mediante la ecuación 1-5 (Ogrosky y Mockus) propuesta por el servicio de conservación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Se han realizado muchas investigaciones para encontrar un método que permita hacer una estimación aceptable de la lluvia que puede ser aprovechada por el cultivo y se llegó a la conclusión de que la ecuación de Ogrosky y Mockus es una de las más confiables para el cálculo de la precipitación efectiva además de que se ajusta a una función empírica.

$$Pe = Cp \times P$$

$$Cp = \frac{\frac{ETc}{P}}{1.53 + 0.8 \times \frac{ETc}{P}}$$

Donde:

Cp = Coeficiente de conversión de lluvia aprovechable

Pe = Precipitación efectiva (mm)

P = Precipitación observada (mm)

### 3.5.3 Determinación de la Evapotranspiración (ET<sub>p</sub>)

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>p</sub>) se utiliza el método de Penman-Monteith, ya es bastante preciso para la determinación de la ET<sub>p</sub> dado que incluye la mayoría de los factores que influyen en la pérdida de agua de las plantas a demás de que se dispone de una estación meteorológica automatizada la cual monitorea y almacena los datos necesarios para el calculo automático de la ET<sub>p</sub> en forma horaria o diaria por el método de Penman-Monteith. Para el calculo de la evapotranspiración potencial se utiliza la siguiente ecuación 1-12 la cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$ET_p = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{\gamma M_w(DPV)}{R K r_v(\Delta + \gamma)}$$

El algoritmo de Penman-Monteith requiere de los siguientes datos posicionales para calcular la evapotranspiración potencial;

Latitud IMTA (grados) = 18.88°

Longitud (grados) = 99.19°

Longitud del meridiano más cercano = 105°

Altitud de la estación = 1360

Donde:

ET<sub>p</sub> = Evapotranspiración potencial (mm/día)

R<sub>n</sub> = Radiación neta (Kw/m<sup>2</sup>)

G = Densidad del flujo de calor del suelo (Kw m<sup>-2</sup>)

M<sub>w</sub> = Masa molecular del agua (0.018 Kg. mol<sup>-1</sup>)

R = Constante universal de los gases (8.3x10<sup>-3</sup> KJ/mol /k)

K = Temperatura Kelvin (273°K)

DPV = Déficit de presión de vapor del aire (Kpa)

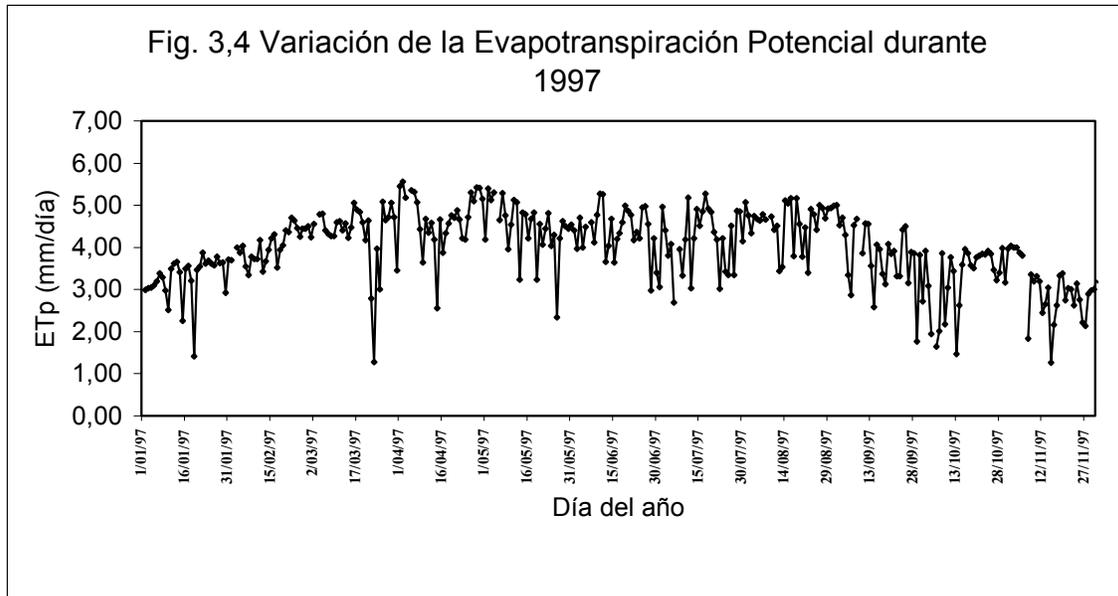
λ = Calor latente de vaporización del agua (2450 Kj kg<sup>-1</sup>)

r<sub>v</sub> = Resistencia de la capa límite y superficie foliar al flujo de vapor (s m<sup>-1</sup>)

Δ = Pendiente de la función de presión de vapor a saturación (Pa °C<sup>-1</sup>)

γ = Constante psicométrica aparente (Pa °C<sup>-1</sup>).

En la fig. 3.4 muestra la variación de la ETp en la cual se puede notar que existe una gran variabilidad de la ETp durante el período de 1997 esto debido a que las necesidades de riego varían al variar las condiciones climáticas.



Una vez calculada la evapotranspiración de potencial se procede a calcular la evapotranspiración del cultivo a partir de la ecuación 1-11 la cual se muestra a continuación:

$$ET_{r_i} = ET * K_c$$

Donde:

$ET_{r_i}$  = Evapotranspiración real al inicio del día i (mm/día)

ETp = Evapotranspiración potencial (mm/día)

Kc = Coeficiente del cultivo seleccionado de la tabla 2.2 (adim.)

**Tabla 3.8 Datos de la estación meteorológica, Progreso, Jiutepec, Mor. Para la determinación de la Precipitación efectiva y la ETc**

| mes/día/97 | Precipitación total (mm) | ETp. Diaria (mm/día) | Precipitación efectiva (mm/día) | Coefficiente de Cultivo Kc | ETc diaria (mm/día) |
|------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 7 20       | 1.52                     | 3.35                 | 1.40                            | 0.55                       | 2.68                |
| 7 21       | 3.30                     | 4.87                 | 2.76                            | 0.55                       | 2.68                |
| 7 22       | 0.00                     | 4.85                 | 0.00                            | 0.55                       | 2.67                |
| 7 23       | 6.10                     | 4.14                 | 4.24                            | 0.55                       | 2.28                |
| 7 24       | 3.30                     | 5.07                 | 2.76                            | 0.55                       | 2.79                |
| 7 25       | 10.92                    | 4.76                 | 4.96                            | 0.55                       | 2.62                |
| 7 26       | 0.25                     | 4.34                 | 0.25                            | 0.55                       | 2.39                |
| 7 27       | 0.00                     | 4.75                 | 0.00                            | 0.55                       | 2.61                |
| 7 28       | 0.00                     | 4.67                 | 0.00                            | 0.55                       | 2.57                |
| 7 29       | 0.00                     | 4.63                 | 0.00                            | 0.55                       | 2.55                |

### 3.5.4 Determinación de la Percolación profunda (PP<sub>i</sub>)

La percolación profunda es la lámina de riego que se infiltra por debajo de la zona radicular de un cultivo. Esta depende de la lámina aplicada y de la textura del suelo ya que un suelo de textura fina tiene mayor capacidad para almacenar el agua que un suelo de textura media o gruesa. Si una lamina es aplicada (riego o lluvia efectiva) en cantidades mayores a la lamina máxima que un suelo puede retener a una cierta profundidad (desde el contenido de humedad inicial hasta el contenido de humedad a capacidad de campo), esta se infiltrará más allá de la zona de raíces, por lo que no estará disponible para la planta, constituyendo lo que se conoce como percolación profunda.

Por ejemplo; si se quiere incrementar el contenido de humedad volumétrico de un nivel ( $\theta_{v1}$ ) a otro nivel ( $\theta_{v2}$ ) a una determinada profundidad (Pr).

Asumiendo una Precipitación efectiva de 14 mm., un contenido de humedad inicial de 0.197 y final de 0.217, Pr = 0.5 m. Calcular la percolación probable:

$$\theta_{v2} = \theta_{cc} = 0.217$$

$$\theta_{v1} = \theta_{inicial} = 0.197$$

$$Pe = 14 \text{ mm}$$

$$Pr = 0.5 \text{ m}$$

$L_r \text{ final} = (0.217 - 0.197) \times 0.50 = 0.01 \text{ m} = 10 \text{ mm}$  (para llevar el suelo a capacidad de campo)

$PP = 14\text{mm} - 10 \text{ mm} = 4\text{mm}$ .

### 3.5.5 Determinación de la lámina de riego final ( $L_{r_{i+1}}$ )

Los riegos aplicados deben cuantificarse e incorporarse en la ecuación general. La lámina de riego debe ser solo la suficiente para restablecer el nivel de humedad a una cierta profundidad radical. Para la determinación de la lámina de riego final ( $L_{r_{i+1}}$ ) se utiliza la ecuación 1-7:

$$L_{r_{i+1}} = \left( \theta_{cc} - \theta_i \right) Pr$$

Donde:

$L_{r_{i+1}}$  = Lámina de riego el día  $i+1$  (mm)

$\theta_i$  = Contenido volumétrico inicial

$\theta_{cc}$  = Contenido volumétrico a (cc)

$Pr$  = Profundidad radicular (mm)

### 3.5.6 Balance de humedad

Dado que las condiciones del lugar fueron lluviosas cuando se terminó la instalación del sistema de riego, y por consiguiente no se tomaron datos para realizar el balance de humedad; más sin embargo a continuación se presenta un ejemplo del balance de humedad para clarificar la metodología (Tabla 3.9).

Considerando que se requiere aplicar el riego a una profundidad radicular de 50 cm. Por lo tanto en los 50 cm de la zona de raíces se pueden almacenar alrededor 217.9 mm de agua que corresponde al contenido de humedad a capacidad de campo (datos del sitio de estudio), como el contenido de humedad inicial es de  $\theta_i = 0.414$  (propuesto), la lamina inicial almacenada en los 50 cm de suelo es de 207 mm para el día 1. El riego generalmente se aplica cuando el contenido de humedad alcanza un valor crítico  $\theta_c$  que corresponde respectivamente a una lámina disponible en el suelo; sin embargo para nuestro caso se asume que el riego se aplicara cada 2 días.

**Tabla 3.9 Simulación del balance de humedad para un período de 10 días**

| Día                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Li (mm)             | 207   | 217.9 | 215.5 | 217.9 | 215.8 | 217.9 | 215.4 | 217.9 | 215.2 | 217.9 |
| ET (mm)             | 1.84  | 2.68  | 2.67  | 2.28  | 2.79  | 2.62  | 2.39  | 2.61  | 2.57  | 2.55  |
| Pe (mm)             | 0.48  | 0.37  | 0.00  | 0.20  | 0.38  | 0.14  | 1.04  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| R (mm)              | 12.26 | 0.00  | 4.98  | 0.00  | 4.49  | 0.00  | 3.83  | 0.00  | 5.18  | 0.00  |
| PP (mm)             | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| L <sub>f</sub> (mm) | 217.9 | 215.5 | 217.9 | 215.8 | 217.9 | 215.4 | 217.9 | 215.2 | 217.9 | 215.3 |

### 3.6 Automatización del sistema de riego

A cosecuencia que los sistemas de micro-riego requieren de alta frecuencia de riego y ferti-irrigación es necesario la adopción de la automatización con monitoreo en tiempo real de varios sensores con retroalimentación y dispositivos de control .El monitoreo de las condiciones climáticas en tiempo real son de gran importancia en la calendarización del riego ya que permiten planificar y administrar el agua en todos sus niveles tanto de forma técnica como racional

El usuario debe de estar dispuesto a adoptar un monitoreo por computadora diario vía modem o con radio y a la generación de bases de datos para mantener un registro y cambios progresivos en el manejo del sistema. Un sistema automático debe de ser capaz de realizar las siguientes funciones.

La adquisición de datos y el control del sistema de riego gobernado desde un sistema de cómputo automatizado en tiempo real, el software de monitoreo y control, la instrumentación de entrada (sensores de la estación meteorológica) y las salidas (válvulas solenoides).

Para el sistema de automatización se elaboro un programa de computo (Apéndice 2) en un lenguaje de programación desarrollado por la compañía Campbell Scientific. En el programa se incluyen las siguientes consideraciones que influyen en la determinación del tiempo de riego:

Etp, Ee, Er, FA, Fo, Qe, Cv

El tiempo de riego se calcula usando la siguiente ecuación:

$$Tr = \frac{Vb}{Q}$$

Por lo tanto el tiempo de riego (Tr) queda de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{Ee \times Er \times ETo \times FA \times Fo}{Qe \times (1 - Cv)}$$

Donde:

Tr =Tiempo de riego (hrs.)

Ee = Espaciamiento entre emisores (m)

Er = Espaciamiento entre regantes (m)

ETo = Evapotranspiración potencial (mm/día)

FA = Factor de área

Fo = Factor de ajuste por tiempo de operación (unitario)

Qe = Gasto del emisor seleccionado (lph)

Cv = Coeficiente de variación

Para nuestro caso se tiene que el espaciamiento entre emisores, espaciamiento entre regantes, factor de operación, gasto del emisor seleccionado y el coeficiente de variación son constantes por lo que se determina una sola constante la cual se utilizará en el programa para definir el tiempo de riego; por lo que la ecuación se puede expresar de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{Ee \times Er \times Fo}{CA} \times ETo \times FA$$

Para la huerta de cítricos, la ecuación usada en el programa es de la siguiente manera

$$Tr = CA \times ETo \times Kc$$

En donde:

Tr = Tiempo de riego en horas

CA = Constantes para la huerta de cítricos

ETo = Evapotranspiración potencial (mm/día)

FA = Factor de ajuste por área

$$Tr = \left( \frac{1.22 \times ETo}{31 \times (1 - 0.05)} \right) \times Kc$$

Para que se logren buenos resultados es necesario estar modificando la ETp del programa con la finalidad de que determine el tiempo correcto, además el coeficiente del cultivo (Kc) se requiere modificar por lo menos cada mes ya que es un cultivo perenne y su variación es mínima a nivel diario.

En la tabla 3.10 se presenta un resumen de todas las constantes que se utilizan en el programa desarrollado para el cálculo del tiempo de riego.

| Tabla 3.10 Para la determinación de las constantes usadas en el programa |        |        |      |          |      |                    |                       |                                  |
|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|------|----------|------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Cultivo Actual                                                           | Ee (m) | Er (m) | Cv   | ETo (mm) | Kc   | Gasto emisor (lph) | Tiempo De Riego (hrs) | Constantes Usadas en El programa |
| Cítricos (A)                                                             | 6      | 6      | 0.05 | 6.5      | 0.75 | 31                 | 5:57'                 | 1.22                             |
| Rosales (B)                                                              | 0.30   | 1.5    | 0.15 | 6.5      | 0.60 | 0.91               | 2:16'                 | 0.582                            |
| Pasto (C)                                                                | 7.8    |        |      | 6.5      | 0.82 | 216                | 0:12'38"              | 0.052                            |
| Maíz (D)                                                                 | 0.30   | 1.0    | 0.15 | 6.5      | 1.2  | 0.91               | 3:1'                  | 0.387                            |
| Frijol (E)                                                               | 0.30   | 0.9    | 0.15 | 6.5      | 1.2  | 0.91               | 2:43'                 | 0.349                            |

Para el sistema de automatización, los componentes lo constituyen el hardware y el software, el software esta formado por el conjunto de programas para implementar los procedimientos lógicos necesarios para el control del sistema de riego, en cambio el hardware tiene como función principal servir como puerto para enviar la señal con la interfase de control (datalogger). El procesador o datalogger al tomar energía (12 VAC) de una fuente de poder mantiene el programa corriendo indefinidamente en la memoria del mismo para posteriormente enviar la señal a un relevador de 5VAC y posteriormente a otro relevador de 24 VAC. Su función del relevador de 24 VAC es controlar la bobina del arrancador para enviar 220 VAC a la bomba, para la apertura de la misma.

Por otra parte el datalogger envía otra señal a una relevador de 5 VAC, el relevador consta de 3 entradas y 1 salida. La primera entrada es para mantener la señal que es enviada por el datalogger el cual especifica en que momento se iniciara la apertura y cierre de la válvula, la segunda es para tomar la energía necesaria (5 VAC) para su funcionamiento el cual es tomada de la fuente de poder, la función de la tercera entrada es tomar el voltaje necesario o requerido para la apertura de la válvula (24 VAC), y por último la señal es enviada a la válvula para la apertura de la misma y por consiguiente se de inicio el tiempo de riego. Una vez terminado el tiempo de riego de la sección de cítricos el puerto 1 se cierra, y posteriormente se abre el puerto numero dos para dar inicio a otra sección de riego el cual es controlado por otra válvula solenoide (Ver fig. 3.5).

Cabe mencionar que la disposición del sistema de control sera centralizado, en el cual se dispone de una unidad central (UC) de control en donde llega la señal de la estación meteorológica y de donde se envian las señales hacia los actuadores. Los actuadores se conectan a través de cables a la unidad central de control.



## IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 Resumen de los cálculos del diseño hidráulico

La tabla 4.1 muestra los resultados del diseño hidráulico en las secciones de riego por microaspersión.

| Parámetro  | Sección 1 | Sección2 | Sección 3 | Sección 4 |
|------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Ee (m)     | 6         | 6        | 6         | 6         |
| Er (m)     | 6         | 6        | 6         | 6         |
| Hu (mca)   | 15        | 15       | 15        | 15        |
| Qu (lph)   | 31        | 31       | 31        | 31        |
| Vb/día     | 184.7     | 184.7    | 184.7     | 184.7     |
| Toperación | 5:57'     | 5:57'    | 5:57'     | 5:57'     |
| Hps (m)    | 3.15      | 3.15     | 3.15      | 3.15      |
| Hpr (m)    | 0.945     | 0.945    | 0.945     | 0.945     |
| Hpd (m)    | 2.205     | 2.205    | 2.205     | 2.205     |
| Qp (lph)   | 32.097    | 32.72    | 31.85     | 31.78     |
| Qetr (lph) | 283.29    | 314.774  | 251.819   | 125.91    |
| Qr (lph)   | 31.4774   | 31.4774  | 31.4774   | 31.4774   |

|         |        |        |         |              |
|---------|--------|--------|---------|--------------|
| Ntr     | 9      | 10     | 8       | 4            |
| Hr (m)  | 1.12   | 1.535  | 0.7859  | 0.098        |
| Hd (m)  | 0.4897 | 0.1695 | 0.108   | 0.732 (35 %) |
| Hs (m)  | 1.6097 | 1.7045 | 0.8939  | 0.83         |
| Hes (m) | 16.097 | 16.70  | 15.8939 | 15.83        |
| Nes     | 26     | 19     | 15      | 16           |

Haciendo un análisis del cuadro anterior se puede deducir que las pérdidas de carga en las secciones están por abajo de las pérdidas de carga permisibles, lo que contribuye a una mejor distribución del gasto, y por consiguiente una mejor uniformidad en el riego.

Por otra parte se observa que el porcentaje de perdidas de carga en el distribuidor está por abajo del 35%, lo que significa que no se está utilizando el número máximo de regantes permisibles en el distribuidor, lo cual indica que es posible agregarle más regantes a cada uno de los distribuidores, sin embargo debido a la topografía del terreno y con el objetivo de realizar investigaciones posteriores fue necesario diseñarlo de esta manera.

#### 4.2 Plano del proyecto

La siguiente página presenta el plano del proyecto, indicando la distribución de los componentes del sistema, materiales y sus detalles de instalación.

#### 4.3 Estaciones Agroclimáticas

La medición de las variables meteorológicas suministradas por la estación agroclimática (Apéndice 3) confirman que el sitio de estudio presenta características de un clima cálido sub-húmedo. Las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 muestran los promedios diarios de las variables meteorológicas a partir del 1 de Enero al 30 de Noviembre de 1997. Los promedios diarios de la temperatura del aire varían desde 25.70 °C en Junio a 14.40 °C en Enero como se muestran en la figura 4.1, sin embargo las temperaturas más altas generalmente se presentan en el mes de Mayo. Los promedios diarios de la radiación solar varían entre 0.33 kW/m<sup>2</sup> en primavera (Mayo) hasta 0.09 kW/m<sup>2</sup> en otoño (ver figura 4.2).

La velocidad del viento es generalmente muy baja los promedios muestran velocidades entre 0.10 m/s para el mes de marzo hasta velocidades máximas de 0.90 m/s para el mes de Mayo (figura 4.3). La velocidad máxima del viento se presenta en el mes de Marzo ya que viene acompañada por fuertes tolveras. Las lluvias son de tipo convectivas por naturaleza, acompañadas por escasas tormentas concentradas en la temporada de

verano. La precipitación medida en el sitio de estudio para el año de 1997, reporta lluvias de hasta 64.77 mm para el mes de Julio (figura 4.4). La figura 4.5 muestra la variación de la ETP, la cual se puede notar que existe una gran variabilidad de la ETP durante el período de 1997 por lo que se puede decir que las necesidades de riego varían al variar las condiciones climáticas.





#### **4.4 Requerimientos de riego**

Las necesidades de riego estimadas a partir de una estación meteorológicas automatizada usando la ecuación de Penman-Monteith es una de las alternativas de hoy en día que permiten estimar la demanda evapotranspirativa con un nivel de precisión aceptable ya que toma en cuenta la mayoría de los factores que influyen en la pérdida de agua de un cultivo.

La Fig. 4.6 muestra la lámina de riego para el cultivo de cítricos cada dos días y la fig. 4.7 la lamina de riego mensual para el periodo de 1997. En ellas se puede apreciar claramente la evapotranspiración del cultivo se incrementa en gran medida en las estaciones de primavera y verano (Tabla 4.2 y 4.3). En primavera esta demanda se incrementa por dos factores importantes. Debido principalmente a que comienza la época de calor; es decir el déficit de presión de vapor en la atmósfera es más alto lo que permite cabida en la atmósfera para absorber mas rápido el vapor de agua desprendido de la superficie del suelo o cultivo por lo que la ETc se incrementa; otro de los factores que provoca que la ETc se incremente en este periodo es el fenómeno aerodinámico ya que en la época de primavera se presentan fuertes vientos lo que provoca que la ETc se incremente debido a que al remover el vapor alrededor de las plantas disminuyendo la saturación del mismo que en ausencia se acumularía y eventualmente se saturaría con una consiguiente reducción en la tasa evaporativa.

En verano la ET se incrementa debido a dos aspectos fundamentales que son la radiación solar y el contenido de humedad. En esta época la zona (trópico de cáncer) recibe los rayos del sol de manera vertical, provocando que la ETc se incremente a gran escala dado que la radiación solar es el principal factor que afecta la demanda hídrica del cultivo. Otras de las razones por el cual la ETc se incrementa en la época de verano es por el período de lluvias ya que los cítricos son cultivos en hileras, lo que contribuye a que la cobertura vegetal no sea completamente cerrada; por lo cual existen áreas significativas de suelo húmedo y posiblemente algunos charcos remanentes durante e inmediatamente después de la lluvia lo que provoca que la evapotranspiración se incremente dramáticamente.

**Tabla 4.2 Requerimientos hídricos de los cítricos c/2 días durante el período de 1997**

| Numero. de Riego | RR c/2 días (mm/día) | Numero. de Riego | RR c/2 días (mm/día) | Numero. de Riego | RR c/2 días (mm/día) | Numero. de Riego | RR c/2 días (mm/día) | Numero. de Riego | RR c/2 días (mm/día) |
|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| 1                | 2,71                 | 34               | 4,52                 | 67               | 4,04                 | 100              | 4,32                 | 133              | 3,65                 |
| 2                | 2,77                 | 35               | 4,40                 | 68               | 4,31                 | 101              | 4,52                 | 134              | 2,77                 |
| 3                | 2,96                 | 36               | 4,77                 | 69               | 4,63                 | 102              | 4,94                 | 135              | 2,01                 |
| 4                | 2,82                 | 37               | 4,87                 | 70               | 4,17                 | 103              | 5,41                 | 136              | 3,32                 |
| 5                | 2,70                 | 38               | 4,39                 | 71               | 3,28                 | 104              | 5,00                 | 137              | 3,74                 |
| 6                | 3,27                 | 39               | 3,71                 | 72               | 4,56                 | 105              | 5,12                 | 138              | 2,70                 |
| 7                | 2,55                 | 40               | 2,63                 | 73               | 4,49                 | 106              | 5,19                 | 139              | 3,42                 |
| 8                | 3,17                 | 41               | 4,05                 | 74               | 4,19                 | 107              | 5,03                 | 140              | 4,30                 |
| 9                | 2,08                 | 42               | 4,68                 | 75               | 4,35                 | 108              | 4,37                 | 141              | 3,90                 |
| 10               | 3,15                 | 43               | 4,89                 | 76               | 4,77                 | 109              | 4,75                 | 142              | 4,16                 |
| 11               | 3,38                 | 44               | 4,45                 | 77               | 4,89                 | 110              | 5,61                 | 143              | 4,22                 |
| 12               | 3,28                 | 45               | 5,37                 | 78               | 5,79                 | 111              | 4,92                 | 144              | 4,27                 |
| 13               | 3,31                 | 46               | 5,33                 | 79               | 4,24                 | 112              | 4,58                 | 145              | 3,67                 |
| 14               | 3,27                 | 47               | 4,75                 | 80               | 4,58                 | 113              | 4,33                 | 146              | 4,06                 |
| 15               | 2,98                 | 48               | 4,16                 | 81               | 4,69                 | 114              | 5,33                 | 147              | 3,93                 |
| 16               | 3,47                 | 49               | 4,47                 | 82               | 5,27                 | 115              | 5,18                 | 148              | 4,42                 |
| 17               | 3,56                 | 50               | 3,38                 | 83               | 5,30                 | 116              | 5,29                 | 149              | 4,33                 |
| 18               | 3,11                 | 51               | 4,27                 | 84               | 4,69                 | 117              | 5,42                 | 150              | 3,01                 |
| 19               | 3,38                 | 52               | 4,45                 | 85               | 5,04                 | 118              | 5,49                 | 151              | 3,28                 |
| 20               | 3,55                 | 53               | 4,73                 | 86               | 5,24                 | 119              | 5,07                 | 152              | 3,26                 |
| 21               | 3,19                 | 54               | 4,77                 | 87               | 3,95                 | 120              | 4,20                 | 153              | 2,55                 |
| 22               | 3,67                 | 55               | 4,20                 | 88               | 3,55                 | 121              | 4,07                 | 154              | 2,16                 |
| 23               | 3,52                 | 56               | 5,01                 | 89               | 5,15                 | 122              | 4,69                 | 155              | 2,40                 |
| 24               | 3,60                 | 57               | 5,27                 | 90               | 4,33                 | 123              | 5,02                 | 156              | 3,36                 |
| 25               | 3,94                 | 58               | 5,28                 | 91               | 3,66                 | 124              | 3,38                 | 157              | 2,89                 |

|    |      |    |      |    |      |     |      |     |      |
|----|------|----|------|----|------|-----|------|-----|------|
| 26 | 4,20 | 59 | 4,80 | 92 | 4,14 | 125 | 4,42 | 158 | 2,82 |
| 27 | 3,92 | 60 | 5,22 | 93 | 4,52 | 126 | 3,58 | 159 | 2,95 |
| 28 | 4,00 | 61 | 4,97 | 94 | 5,02 | 127 | 4,36 | 160 | 2,18 |
| 29 | 3,93 | 62 | 4,36 | 95 | 5,15 | 128 | 3,98 | 161 | 2,94 |
| 30 | 4,45 | 63 | 4,84 | 96 | 5,61 | 129 | 4,25 | 162 | 3,11 |
| 31 | 4,60 | 64 | 4,15 | 97 | 5,06 | 130 | 4,21 | 163 | 3,20 |
| 32 | 4,30 | 65 | 4,81 | 98 | 3,96 | 131 | 4,26 |     |      |
| 33 | 4,44 | 66 | 4,45 | 99 | 4,21 | 132 | 3,07 |     |      |

**Tabla 4.3 Requerimientos hídricos mensuales para el cultivo de cítricos para el periodo de 1997.**

| Mes     | RR mensual (mm) | Mes        | RR mensual (mm) |
|---------|-----------------|------------|-----------------|
| Enero   | 46,08           | Julio      | 74,33           |
| Febrero | 51,42           | Agosto     | 76,23           |
| Marzo   | 68,44           | Septiembre | 49,06           |
| Abril   | 70,05           | Octubre    | 58,54           |
| Mayo    | 67,81           | Noviembre  | 39,57           |
| Junio   | 70,72           | Total      | 374,51          |

#### 4.5 Balance de humedad

El balance hídrico diario permite ó estima el contenido de humedad en la zona explorada por las raíces logrando con mayor precisión determinar cual es la lámina de riego que el cultivo requiere en un momento dado. El siguiente cuadro presenta los resultados de una simulación de un balance de humedad para un periodo de 10 días.

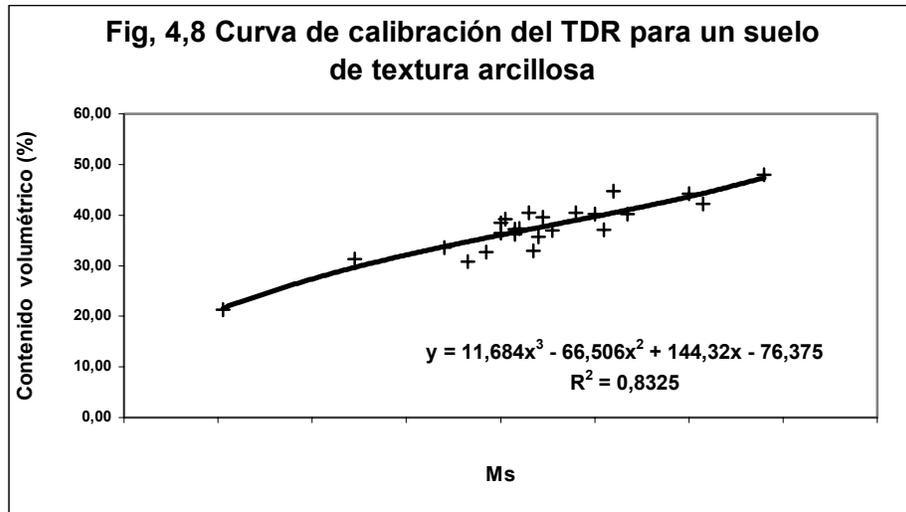
**Tabla 4.4 Simulación del balance de humedad para un periodo de 10 días**

| Día                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Li (mm)             | 207   | 217.9 | 215.5 | 217.9 | 215.8 | 217.9 | 215.4 | 217.9 | 215.2 | 217.9 |
| ET (mm)             | 1.84  | 2.68  | 2.67  | 2.28  | 2.79  | 2.62  | 2.39  | 2.61  | 2.57  | 2.55  |
| Pe (mm)             | 0.48  | 0.37  | 0.00  | 0.20  | 0.38  | 0.14  | 1.04  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| R (mm)              | 12.26 | 0.00  | 4.98  | 0.00  | 4.49  | 0.00  | 3.83  | 0.00  | 5.18  | 0.00  |
| PP (mm)             | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| L <sub>f</sub> (mm) | 217.9 | 215.5 | 217.9 | 215.8 | 217.9 | 215.4 | 217.9 | 215.2 | 217.9 | 215.3 |

De la Tabla 4.4 se puede, deducir que los requerimientos hídricos se determinan con mayor precisión minimizando pérdidas de nutrientes y/o agua por percolación profunda, logrando eficientar el uso y manejo del agua así como la operatividad del sistema de riego. Además se puede apreciar que usando un intervalo de riego fijo la lámina de riego por aplicar varía significativamente en el primer riego, ya que se tiene que restablecer el contenido de humedad hasta capacidad de campo, sin embargo una vez restablecido este contenido de humedad la lámina de riego por aplicar varía muy poco debido principalmente a que no hay mucha variación de la  $E_{Tr}$  en ese período, logrando obtener un promedio de lámina de riego por aplicar en los siguientes cuatro riegos de 4.62 mm, sin embargo es más conveniente establecer un valor mínimo permisible o valor crítico de humedad en el suelo y cuando el sensor reporta ese contenido de humedad el riego debe iniciarse para evitar un estrés en la planta que pudiera afectar el rendimiento.

#### **4.6 Estimación del contenido de humedad (TDR)**

El uso del método del TDR (CS615) para medir el contenido de humedad en el suelo es una herramienta valiosa en la calendarización del riego; ya que permite estar monitoreando el contenido volumétrico de humedad en el suelo en intervalos de tiempos cortos (según sean las necesidades) y determinando promedios horarios y diarios lo que permite obtener un nivel de precisión aceptable (figura 4.8), siempre y cuando el contenido de sales sobrepasa los 2 dS/m. Para obtener niveles de precisión aceptables es necesario realizar una calibración del TDR para cada tipo de suelo.



#### 4.7 Automatización del sistema de riego

El sistema de microaspersión se automatizó usando válvula solenoides y un sistema controlador (procesador Campbell), controlando básicamente el tiempo en que se produce el riego, basado en mediciones indirectas calculando las necesidades hídricas de la planta a partir de una estación meteorológica automatizada de tipo Campbell Scientific con sus respectivos sensores (humedad, temperatura, radiación, velocidad y dirección del viento), y realizando posteriormente el balance de agua en el suelo para determinar la cantidad de agua por aplicar, además el contenido de humedad estuvo siendo monitoreado por un sensor (TDR), el cual nos determina la constante dieléctrica y mediante un polinomio de tercer grado se puede determinar el contenido volumétrico de humedad, para posteriormente convertirlo a lamina de riego.

En la figura 4.9 se muestra el tiempo de riego cada dos días para el año de 1997 el cual se puede notar claramente que los tiempos de riego son más amplios en la época de primavera y verano; y más cortos en época de otoño e invierno por lo que se podría señalar lo siguiente:

Es conveniente aplicar intervalos de riego mas amplios en la época de verano, otoño e invierno; en verano debido a que es periodo de lluvias por lo cual las precipitaciones contribuyen con aportaciones para satisfacer las demandas hídricas del cultivo y por

consiguiente se puede lograr ampliar el intervalo de riego; sin embargo en periodos de otoño e invierno la demanda evapotranspirativa se ve reducida en gran medida debido a que son periodos en que la radiación solar recibida es muy poca al igual que los vientos son débiles, temperaturas bajas, por lo que las necesidades tienden a ser menores que en época de primavera y verano.

## V CONCLUSIONES

- El sistema de automatización es una herramienta de gran importancia en la calendarización del riego en tiempo real en un cultivo de cítricos, ya que las necesidades se pueden estimar mediante parámetros que están estrechamente relacionados con las necesidades de las plantas (directos e indirectos), ya sea considerando variables climáticas o contenidos de humedad en el suelo, permitiendo predecir con mayor precisión las necesidades de riego a cierta profundidad de raíces. El sistema además permite operar el sistema de riego por día, por semana, etc. automáticamente y también se puede usar el encendido del mismo en forma manual, para operarlo en caso de que el software no funcione o se presenten fallas eléctricas. En conclusión la automatización es la técnica más efectiva de control en el riego de alta precisión con la más alta eficiencia lograda.
- El programa de cómputo para la operación del datalogger funcionó correctamente con los tres programas (para riego en cítricos, para el sistema completo y para la realización de pruebas).
- Los emisores seleccionados se adaptaron correctamente a las características del suelo por lo que no existió encharcamiento en la parte superficial del suelo.
- El sistema electrónico para encendido del motor de la bomba y apertura y cierre de las válvulas funcionó correctamente de acuerdo con las instrucciones del programa.
- En conclusión con un adecuado funcionamiento del sistema de riego, con un buen nivel de automatización y con un acertado monitoreo de las condiciones climatológicas y del contenido de humedad en el suelo se pueden lograr grandes volúmenes de agua y los rendimientos óptimos de producción.

## VI RECOMENDACIONES

- Es recomendable adaptarle al controlador (datalogger) un mayor número de sensores que permitan una automatización integral o completa del sistema de riego, logrando un monitoreo tentativo de dispositivos de control como la presión mediante el uso de transductores de presión, calidad del agua (PH, Temperatura, CE), así como el flujo total horario y diario (Seaflow), contenido de humedad en el suelo, sensor de saturación de las hojas.
- Además es recomendable adaptarle al cabezal de control válvulas automáticas que nos permitan en un momento dado la apertura y cierre de las mismas para la inyección de fertilizantes, así como el control químico de la solución que se está aplicando mediante sensores automáticos para la medición de la solución (PH, CE, Flujo).
- Se recomienda proteger el sistema de automatización para evitar un daño que pudiera provocar una alta tensión la energía eléctrica.
- Es necesario determinar los días grados crecimiento (DGC) para ajustar los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) y profundidad radical a las condiciones climáticas del lugar, lo cual permitirá una mejor programación del riego a futuro.
- Para tener gastos controlados en cada sección de riego es necesario adaptar medidores de flujo en la entrada de cada una de las unidades de control autónomo.

## VII RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en una huerta de cítricos (*Citrus Persa*) la cual se encuentra en proceso de rehabilitación y cuenta con una superficie de 2736 m<sup>2</sup>, sus arboles están dispuestos en un marco de plantación de 6m x 6m, con una edad de los arboles de 8 años del cultivar de C. Persa con una densidad de 76 arboles, localizada el área de estudio en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Progreso, Jiutepec, Morelos.

El objetivo del presente trabajo fue la calendarización de los requerimientos hídricos de los cítricos, para lo cual se diseñó, instaló y automatizó un sistema de riego por microaspersión. El diseño se realizó considerando la evapotranspiración máxima correspondiente al mes de mayo que correspondió a un valor de 6.5 mm/día y posteriormente se ajustó a las condiciones características que tiene el riego por microaspersión, este ajuste se realizó multiplicando la ETp estimada por el método de Penman-Monteith por un coeficiente que representa un factor de área regable por el emisor (0.75). La instalación se llevó a cabo de acuerdo a los criterios especificados por Rodrigo et al. 1996 y por personas con experiencia del mismo IMTA. La automatización se realizó usando válvulas solenoides y un sistema de control (procesador Campbell). El sistema de automatización funcionó de acuerdo al siguiente procedimiento lógico desarrollado de acuerdo al software del procesador. Para lo cual se usó una PC la cual tiene como función principal servir como puerto para enviar la señal con la interface de control (datalogger). El procesador o datalogger al tomar energía (12 VAC) de una fuente de poder mantiene el programa corriendo indefinidamente en la memoria del mismo para posteriormente enviar la señal a un relevador de 5 VAC y posteriormente a otro relevador de 24 VAC de corriente alterna. El función del relevador de 24 VAC es controlar la bobina del arrancador para enviar 220 VAC a la bomba, para la apertura de la misma.

Por otra parte el datalogger envía otra señal a una relevador de 5 VAC, el relevador consta de 3 entradas y 1 salida. La primera entrada es para mantener la señal que es enviada por el datalogger el cual especifica en que momento se iniciara la apertura o cierre de la válvula, la segunda es para tomar la energía necesaria (5 VAC) para su funcionamiento el cual es tomada de la fuente de poder, la función de la tercera entrada es tomar el voltaje necesario o requerido para la apertura de la válvula (24 VAC), y por último la señal es enviada a la válvula para la apertura de la misma y por consiguiente se de inicio el tiempo de riego. Una vez terminado el tiempo de riego de la sección de cítricos el puerto 1 se cierra, y posteriormente se abre el puerto numero dos para dar inicio a otra sección de riego el cual es controlado por otra válvula solenoide.

Los evapotranspiración del cultivo se estimó a partir de mediciones indirectas calculando las necesidades hídricas de la planta a partir de una estación metereológica automatizada con sus respectivos sensores (humedad, temperatura, radiación, velocidad y dirección del viento) de tipo Campbell Scietific por medio del método de Penman-Monteith, y realizando posteriormente el balance de agua en el suelo para determinar la cantidad de agua por aplicar, a demás el contenido de humedad se monitoreó usando el reflectrometro (TDR).

## IX BIBLIOGRAFIA

Aguilera C.M. Martínez E.R. 1980 Relación-Agua-Suelo-Admosfera. Tercera edición. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio, Chapingo, Mex.

Armoni R. S. 1989 Riego por Microaspersión. Editorial Prensa XXI S.A. España.

Aranda M.H.H., Estimación de los Requerimientos de Riego Del Cultivo de Alfalfa, mediante un modelo de balance hídrico Agroclimático (Tesis), UACH, Chapingo, México, 1986.

Bolaños G.M.A., Programas de riego para Zanahoria a partir de un Balance hídrico agroclimático (Tesis), UACH, Chapingo, México, 1995.

Brown P. 1996 Landscape and Irrigation, October, 1996, pags: 66-70

Campbell Scientific, Inc., Operator's Manual CR10X Measurement and Control System 1997.

Campbell Scientific, Inc., 1991a: 03001-5R.M. Young Wind Sentry Set 03105-5 R.M. Young Wind Sentry Anemometer, 03302-5 R.M. Young Wing Sentry Vane Instruction Manual, Campbell Scientific, Inc., Revision 7/19.

Campbell Scientific, Inc, 1991b; TE525 Tipping Bucket Rain Gage, Campbell Scientific, Inc, Revisión 9/91.

Campbell Scientific, Inc, 1992: HMP35C Temperature and Relative Humidity Probe, Campbell Scientific, Inc., Revision 9/92.

Campbell Scientific, Inc, 1996, Instruction Manual, CS615 Water content Reflectometer, Campbell Scientific, Inc., Revision 10/96.

Doorenbos Y Kassam, 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Monografía de Riego y Drenaje de la FAO, n° 33, Roma.

Doorenbos Y Pruitt, 1977. Las necesidades de agua de los cultivos .Monografía de Riego y Drenaje de la FAO, n° 24, Roma.

IMTA, Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas, Jiutepec, Mor., México, 1997.

LAKE IRRIGATION, P.O. BOX 2248, Bakersfield, California USA.

Levy P. 1996 Golf Course Management, Pags. 59-62.

Ley W.T. 1994 Irrigation Journal, Abril, Pág.: 8-20

LI-COR, INC, 1991: Li-Cor Terrestrial Radiation Sensors, Type 52 Instruction Manual, Li-Cor, Publication No.8609-60, Nov1986, Revised Jan.1991.

Lynch, D.R., N. Foroud, G.C. Kozub Y B.C. Faries. 1995. The effect of moisture stress at three growth stages on the yiel, components of yiel and Processing quality of eight potato varieties. Am. Potato J. 72(6): 375-385.

Martínez E.R. 1991 Riego Localizado UACH. Chapingo, Mex.

Medina S.J.J.A. 1979 Riego por Goteo, Ediciones Minoli-Prensa, España.

MEMORIAS DE CURSO NACIONAL DE FERTIRRIGACIÓN 1997, Campo experimental del valle de Culiacán-Produce, Km 17.5 Maxipista Culiacán-Mazatlán.

Murphy A.T. 1996 Irrigation Journal, Julio/Agosto, Pags. 16-23

Norero A. 1976 Evaporación y Transpiración, CIDIAT, Mérida, Venezuela.

Ogrosky H.O. y Mockus 1964 "Hydrology of Agricultural Land" Handbook of Applied Hydrology, ed. Ven Te Chow, Megraw Hill Co. New York.

Ojeda B.W., Unland W.H., Lemus R.O. 1997. Memorias del VII Congreso Nacional de Irrigación. Hermosillo, Son., México, Pags. 1-44–1-48.

Oliver H. 1963 Riego y Clima Ed. CECSA, México.

Oropeza M.J.L., Torres B.E., C.V.M. 1997 Memorias del VII Congreso Nacional de Irrigación. Hermosillo, Son., México, Pags. 1-54–1-58.

Penman H.L. 1948 Natural Evaporation from Open, Bare Soil and Grass. Proc. Royal Soc. A193.

Peña P.E. 1981 Relación entre las Características del Suelo y el Consumo de agua por los Cultivos, en el Diseño Hidráulico de los Sistemas de Riego. Departamento de Irrigación, Chapingo, Mex.

Peña P.E Hidráulica de Sistemas de Riego Presurizado. I Diplomado de Ingeniería de Riego. Colegio de Posgraduados, Montecillos Edo. México.

Peña P.E., Escobar A.M.A. y Ramírez C.E. 1979 Análisis y Evaluación del Funcionamiento Hidráulico de Goteros. Boletín No. 4 de CENAMAR Durango, Mex.

Rodrigo L.J. 1996. Riego Localizado II, Programas Informativos 2ª Edición. Mundi Prensa. Madrid España.

Ritchie, G.A. y T.M. Hinckley 1975 The Pressure Chamber as an Instrument for Ecological Research. In Advances in Ecological Research, de. A. MacFayden, Vol. 9:165-254. London. Academic Press.

Sifuentes I.E., Ojeda B.W., Guerrero E.M. 1998 Memorias del VIII Congreso Nacional de Irrigación. Gómez Palacios, Dgo. México, Pags.: 1-54–1-58.

SARH 1981 Métodos Avanzados de Riego Tomo I México, D.F.

Tijerina CH.L. Moreno A.S. Ruiz C.V.M., Memorias del VIII Congreso Nacional de Irrigación. Gómez Palacios, Dgo. México, 1998, Pags.: 3-72 – 3-78.

Torres R.E. 1985 Agrometereología, editorial Trillas, S.A., México, D.F.

-U.A.CH. 1997. IV Curso Internacional de sistemas de riego Vol. VI. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Weems T. 1991 Irrigation Journal, January/February, Pags. 12-16.

Zazueta F. 1963. Irrigation System Controllers SS-AGE-28 Agricultural Engineering Department Florida Cooperative Extension Service.

Zazueta f. Buckling R. Jones, P.M. and Smajstrla A.g. Basic Concepts in Environmental Computer Control of Agricultural System SS. AGE-28 Agricultural Engineering Department Florida Cooperative Extension Service.

Zazueta F 1992 Micro-Irrigación ICFA Internacioal, Inc. Mex.