



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO
POR GOTEJO PARA UNA HUERTA AGUACATERA
PEQUEÑA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O M E C Á N I C O

P R E S E N T A:

PABLO ALVAREZ TOSTADO DELGADO

ASESOR: DR. FRANCISCO J. SOLORIO ORDAZ

MÉXICO, D. F.

2010



INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE GENERAL	i
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVOS GENERALES	3
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1. DEFINICION	4
3.2. HISTORIA	5
3.2.1. ACTUALIDAD MUNDIAL	8
3.2.1.1. TENDENCIAS	10
3.2.1.2. COSTOS	10
3.2.1.3. SITUACION DE MEXICO	10
3.3. IMPORTANCIA DEL AGUA	11
3.3.1. AGUA UN RECURSO VITAL	11
3.3.2. SITUACION DEL AGUA EN MEXICO	13
3.3.3. CAMBIO CLIMATICO	14
3.4. METODOS DE IRRIGACION	16
3.4.1. IRRIGACION POR GRAVEDAD	18
3.4.2. IRRIGACION CON MONTICULOS	18
3.4.3. IRRIGACION CON CUENCAS	19
3.4.4. IRRIGACION CON SURCOS	19
3.4.5. IRRIGACION CON FRANJAS DE LIMITE	22
3.4.6. SUBIRRIGACION	23
3.4.7. IRRIGACION CON ASPERSORES	24

3.5. PRINCIPIOS GENERALES DE LA IRRIGACION POR GOTEO	25
3.5.1. VENTAJAS	25
3.5.1.1. APLICACIÓN CONTROLADA DE AGUA	26
3.5.1.2. ALTO POTENCIAL DE AGUA EN LA TIERRA AL NIVEL DE RAICES	27
3.5.1.3. MOJADO PARCIAL DE LA TIERRA	28
3.5.1.4. FOLLAJE SECO	28
3.5.1.5. UTILIZACION DE AGUA DE BAJA CALIDAD	28
3.5.1.6. BENEFICIOS ECONOMICOS Y ENERGETICOS	29
3.5.1.7. APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, HERBICIDAS Y PESTICIDAS	29
3.5.1.8. USO DE AGUA TRATADA	29
3.5.2. DESVENTAJAS	30
3.6. COMPONENTES DE SISTEMAS DE RIEGO	31
3.6.1. EMISORES	31
3.6.2. TUBERIAS	31
3.6.3. LINEAS DE ABASTECIMIENTO	32
3.6.4. FILTROS	32
3.6.5. SISTEMAS DE FERTILIZACION	33
3.6.6. SISTEMAS DE AUTOMATIZACION	34
3.7. TIPOS DE SISTEMAS DE IRRIGACION POR GOTEO	34
3.7.1. IRRIGACION POR GOTEO SUPERFICIAL	34
3.7.2. IRRIGACION POR GOTEO SUB-SUPERFICIAL	34
3.7.3. IRRIGACION POR GOTEO DE BURBUJA	35
3.7.4. IRRIGACION POR GOTEO CON MICROASPERSORES	35
3.8. AGUACATE	36
3.8.1.1. ORIGEN	36
3.8.1.2. MERCADO Y PRODUCCION MUNDIAL	37
3.8.1.3. CARACTERISTICAS GENERALES	37

3.8.1.4. COMPOSICION DEL FRUTO Y USOS	39
3.8.1.5. EXIGENCIAS DEL AGUACATE	39
3.8.1.5.1. CLIMA	39
3.8.1.5.2. SUELO	41
3.8.1.5.3. HUMEDAD	41
3.8.1.5.4. SALINIDAD	41
3.8.1.5.5. pH DEL SUELO	42
3.8.1.5.6. AGUA	43
3.8.1.6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA COSECHA DE AGUACATE POR MEDIO DE LA IRRIGACION POR GOTEO	43
4. METODOLOGIA	48
4.1. TIPOS DE PROBLEMAS EN HIDRÁULICA DE DUCTOS A PRESIÓN	48
4.1.1. COMPROBACIÓN DE DISEÑO	48
4.1.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA	49
4.1.3. DISEÑO DE LA TUBERÍA	49
4.1.4. CALIBRACIÓN DE LA TUBERÍA	50
4.1.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA	50
4.1.6. MÉTODO DE LA ITERACIÓN DE UN PUNTO	51
4.1.7. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	53
4.2. ESPECIFICACIONES PARA LOS ACCESORIOS EN LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS	58
4.2.1. RUGOSIDAD ABSOLUTA	58
4.2.2. COEFICIENTES PARA PÉRDIDAS EN ACCESORIOS Y CODOS	60
4.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA HIDRÁULICO PARA LA HUERTA AGUACATERA	62
4.3.1. PARCELA	62
4.3.2. VARIEDAD AGUACATERA	64
4.3.3. REGIÓN	65
4.3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DE SUELO	66

4.3.5. REQUERIMIENTOS DE AGUA	68
4.3.6. EMISORES	70
5. RESULTADOS	80
5.1. CÁLCULO DEL GASTO	80
5.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA	80
5.2.1. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS	80
5.2.2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN ACCESORIOS	81
5.2.3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	82
5.2.4. CÁLCULO DE LA CABEZA DE LA BOMBA	83
5.2.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA	83
5.3. SISTEMA DE RIEGO	84
5.3.1. TUBERÍA	84
5.3.2. CABEZAL	85
5.3.3. EMISORES	87
5.3.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA	89
6. CONCLUSIONES	91
6.1. IRRIGACIÓN POR GOTEO	91
6.2. IMPLEMENTACIÓN	92
7. BIBLIOGRAFÍA	93

INDICE DE TABLAS

	Pág.	
Tabla No. 1	Área total de irrigación y área bajo irrigación por goteo en 1982 y 1992	8
Tabla No. 2	Extensión de irrigación por goteo a nivel mundial en el año 2000.	9
Tabla No. 3	Demanda de agua fresca.	12
Tabla No. 4	Producción anual estimada de gases de efecto invernadero por actividades de agricultura de acuerdo a estadísticas de la ONU	16
Tabla No. 5	Longitudes sugeridas para los surcos y flujos de acuerdo al tamaño de granulo, pendiente de la tierra y profundidad de la aplicación del agua.	20
Tabla No. 6	Tamaño sugerido de las franjas limite y flujos para diferentes tipos y pendientes de tierra.	22
Tabla No. 7	Calidad del agua	30
Tabla No. 8	Producción de aguacate por país ('000 toneladas)	37
Tabla No. 9	Características de los principales cultivares de aguacates en los subtrópicos	38
Tabla No. 10	Cantidad de fertilizante aplicado por árbol de aguacate	45
Tabla No. 11	Rugosidad absoluta (ks) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías	59
Tabla No. 12	Coeficientes para pérdidas en accesorios	60
Tabla No. 13	Valores de km para diferentes accesorios (Diámetro nominal en mm)	61
Tabla No. 14	Requerimientos buenos y marginales del desarrollo del aguacate	67
Tabla No. 15	Situación de la superficie aguacatera de Michoacán por condiciones optimas y marginales para el desarrollo del aguacate	68
Tabla No. 16	Volúmenes de riego en litros por árbol por semana de acuerdo con la edad de la plantación.	69
Tabla No. 17	Evaporación total normal 1971-2000	70
Tabla No. 18	Cantidad de agua que retienen los diferentes tipos de suelo	75
Tabla No. 19	Diámetro mojado por un emisor de 4 l/h	78
Tabla No. 20	Gasto total del sistema	80

Tabla No. 21	Datos del agua (@20 °C)	80
Tabla No. 22	Cálculo del número de Reynolds	81
Tabla No. 23	Datos de la tubería	81
Tabla No. 24	Pérdidas por accesorios	81
Tabla No. 25	Cálculo del factor de fricción	82
Tabla No. 26	Newton- Raphson	82
Tabla No. 27	Cálculo de las perdidas por fricción	83
Tabla No. 28	Cálculo de la cabeza de la bomba	83
Tabla No. 29	Cálculo de la potencia de la bomba	83
Tabla No. 30	Cálculo de la potencia de la bomba (+ 20%)	83
Tabla No. 31	Elementos del sistema	88

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.a	Unión de tuberías (Patente: US No. 146572, año 1874). 6
Fig. 1.b	Boquillas metálicas (Patente: US No. 2752201, año 1956). 6
Fig. 2	Métodos de Irrigación 17
Fig. 3	Irrigación por cuencas 19
Fig. 4	Tipo de espaciamentos en la irrigación por surcos 21
Fig. 5	Ejemplo de arado para lograr los surcos 21
Fig. 6	Método de irrigación de franjas limite 23
Fig. 7	Subirrigación 23
Fig. 8	Aspersores de cabeza rotatoria 24
Fig. 9	Irrigación por goteo 27
Fig. 10	Componentes y sistemas de irrigación por goteo 35
Fig. 11	Regiones del origen del aguacate 36
Fig. 12	Distribución de la humedad en distintos suelos mediante irrigación por goteo 44
Fig. 13	Cálculo del factor de fricción por el método de iteración de un punto 52
Fig. 14	Cálculo del factor de fricción por el método de Newton-Raphson 55
Fig. 15	Cálculo de la potencia en tuberías simples 56
Fig. 16	Acomodo en marco real 64
Fig. 17	Acomodo en tresbolillo 64
Fig. 18	Regiones aguacateras de Michoacán 66
Fig. 19	Emisor tipo vortex 72
Fig. 20	Emisor tipo autocompensante 73
Fig. 21	Volumen de agua que contiene cada tipo de suelo cuando se halla a la capacidad de campo y en el punto de marchitez 76
Fig. 22	Velocidad con que el agua penetra en los distintos tipos de suelo (infiltración) 77
Fig. 23	Tubería en la huerta 85
Fig. 24	Cabezal 86
Fig. 25	Cabezal (alternativa sin bomba) 87
Fig. 26	Distribución de emisores 88

Fig. 27	Tubería y emisores por árbol	89
----------------	------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS

L/h	Litros por hora
KPa	Kilopascales
ha	Hectáreas
FAO	Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
ICID	Comisión Internacional en Irrigación y Drenaje
IA	Irrigation Association
cm	Centímetros
m	Metros
L/s	Litros por segundo
L/h	Litros por hora
CO ₂	Dióxido de carbono
ppm	Partes por millón
UV	Ultravioleta
°C	Grados centígrados
ONU	Organización de las Naciones Unidas
DBO	Demanda biológica de oxígeno
mg/L	Miligramos por litro
mm	Milímetro
MPa	Megapascales
PVC	Policloruro de vinilo
PE	Polietileno
pH	Potencial hidrógeno
≈	Aproximadamente

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del diseño de un sistema de irrigación por goteo es el escoger los componentes apropiados para disponer de una adecuada distribución de agua (y fertilizante) a lo largo y ancho y de un campo de cultivo, con el fin de cumplir con los requerimientos de las cosechas, teniendo siempre presentes factores económicos, operacionales, cantidad y calidad de agua, y las restricciones que esto conlleva.

En la actualidad las prácticas en el diseño de sistemas de irrigación por goteo tienden a enfocarse en el desempeño del sistema hidráulico (distribución de presión en las tuberías, filtración, emisión uniforme de agua por rociador, etcétera, las cuales pueden ser optimizadas con la ayuda de sistemas de cómputo especializados), mientras que las consideradas agronómicas-hidrológicas, como las interacciones emisor-tierra-planta, reciben menos atención y con frecuencia son resueltas empleando conocimientos obtenidos empíricamente. Esta disparidad puede ser atribuida a la complejidad de los procesos agronómicos-hidráulicos que usualmente no siguen reglas de diseño simples. Consecuentemente existe una tendencia basada en el sobre diseño, para asegurar el exitoso desempeño de los sistemas de irrigación, a pesar de las detalladas consideraciones agronómicas.

Otro factor de primordial importancia que debe ser cuidado en cualquier técnica de irrigación, es la disminución de las pérdidas de agua de riego. Este problema comprende dos tendencias que se deben minimizar; primero, la disminución en el volumen de agua empleado para fines agrícolas y, segundo, la disminución en la evaporización de esta una vez aplicada en la tierra por los problemas en los cambios climáticos que esto representa.

La metodología para el diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo para una huerta aguacatera pequeña mostrada a continuación, puede ser adecuada para muchos escenarios "estándar", que compartan características climáticas, de tipo de tierra, tipo de agua y tamaño de huerto.

En el capítulo 2 se establecen los objetivos generales y específicos cumplidos en el desarrollo de esta tesis. En el capítulo 3 se da una breve descripción del proceso de irrigación por goteo (de una forma general y comparativa con otras técnicas de irrigación hasta lo particular, explicando las ventajas y desventajas de esta técnica). En el capítulo 3 se explican las generalidades de la aplicación por goteo en el cultivo de aguacate como base para el diseño hidráulico del sistema de riego por una huerta aguacatera pequeña.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES

- i. Diseño de un sistema de riego por goteo que sea de bajo costo en instalación y eficiente en el uso de agua al pequeño productor de aguacate de México.
- ii. Diseño de un sistema de bombeo de bajo costo que pueda cubrir los requerimientos del sistema de riego por goteo utilizado en la producción de aguacate.
- iii. Describir las ventajas del sistema de riego por goteo en la producción de aguacate en comparación con otros sistemas de riego.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Calcular los parámetros necesarios para el diseño del sistema de irrigación por goteo:
 - Gasto de agua para cada árbol,
 - Dimensión de la tubería principal y lateral,
 - Gasto en la bomba.
- ii. Determinar un filtro adecuado para el agua utilizada en el sistema antes de entrar a la línea principal de irrigación.
- iii. Diseño de las líneas principales y laterales de riego.
- iv. Seleccionar y especificar los emisores de las líneas de riego.

3. ANTECEDENTES

3.1. DEFINICION^(1, 2)

La irrigación por goteo es la aplicación de agua sobre o por debajo de la línea de tierra adyacente a la hilera de siembra mediante el uso de emisores o líneas de riego, los cuales mojan de manera parcial la superficie de tierra.

Otra definición similar tiene su origen en términos de microirrigación, en la cual el agua no solo es aplicada utilizando emisores, sino también mediante aspersores o rociadores a nivel del suelo, lo cual resulta de igual forma en un mojado parcial de la tierra.

La irrigación por goteo difiere de la microirrigación por el hecho de que, en la irrigación por goteo solo una parte de la superficie de la tierra se humedece (la que se encuentra en la vecindad de la línea de riego). Sin embargo, en la literatura los dos términos se emplean indistintamente.

El diseño y operación de las líneas de riego dependen de diferentes factores, como las características de la tierra (localización geográfica y nutrientes) y del agua, como es el caso de la salinidad y la dureza.

Las líneas de riego se caracterizan porque el agua es aplicada a bajas velocidades de descarga (de 1 a 30 L/h por línea de riego), por periodos largos de tiempo, a intervalos frecuentes, los emisores se localizan cerca de las zonas de raíces, los sistemas de descarga trabajan a presiones de operación bajas (de 20 a 200 KPa), estos pueden operar mediante efectos de capilaridad y gravedad, y el agua empleada puede ser tratada con anterioridad para ser enriquecida con fertilizantes y otros químicos que le proporcionen nutrientes.

La irrigación por goteo, al igual que otros métodos de irrigación, no puede emplearse para cualquier tipo de cosecha, sin embargo, esta ofrece una técnica que permite avances económicos importantes comparados con otras, en cuanto al manejo del agua.

3.2. HISTORIA

La historia y los descubrimientos arqueológicos muestran que los métodos de irrigación han jugado un papel importante en el desarrollo y asentamiento de las civilizaciones. Las primeras civilizaciones se establecieron en las cercanías de cuerpos de agua, como es el caso de los ríos Nilo, Tigris, Eufrates y Amarillo, solo por mencionar algunos. La irrigación por gravedad tiene sus orígenes alrededor del año 6000 A. C. en las cercanías del río Nilo y continúa siendo el método dominante de irrigación. La metodología en el tema de irrigación no mostró avances tecnológicos importantes durante varios siglos, fue hasta la llegada del siglo XX, cuando los sistemas presurizados de riego (empleando rociadores) marcaron un cambio importante en el rubro.⁽²⁾

Aunque la irrigación por goteo es simple en cuanto a concepto, su método de mojado de tierra no fue práctico hasta tiempos muy recientes, cuando se comenzaron a emplear materiales económicos para la construcción de equipos.⁽¹⁾

Los primeros registros de esta técnica datan del año 1860, por la construcción de una combinación de sistemas de irrigación y drenaje utilizando tubos de arcilla; estas tuberías de arcilla fueron empleadas por más de 20 años.⁽²⁾ Una de las primeras patentes (US No. 146572, año 1874) permitía la emisión de agua a través de las uniones de la tubería: el fin de uno de los tubos era ligeramente más pequeño que el comienzo del siguiente, esto permitía la salida del agua sin que el flujo se obstaculizara, mediante el uso de uniones perforadas [Fig. 1.a].⁽³⁾ La primera investigación formal en cuanto a la irrigación por goteo data del año 1913, y se basó en la aplicación de agua a nivel de la zona de raíces. Fue llevada a cabo por la Universidad Estatal de Colorado (E. U. A.); y con los resultados obtenidos se concluyó que esta técnica era muy cara para ser práctica.⁽²⁾

En 1920, el parteaguas en la irrigación por goteo fue la introducción de tuberías perforadas en Alemania. Después de eso, la investigación y el desarrollo en esta técnica se enfocó alrededor del uso de tuberías de diferentes materiales a fin de

determinar en cuál de ellas el flujo de agua no dependiera en gran medida de la presión de esta.⁽²⁾

El desarrollo tecnológico a escala industrial de la irrigación por goteo tiene sus orígenes en la "era del plástico", después de la Segunda Guerra Mundial. Uno de los primeros usos fue en la producción de tomate en Inglaterra entre 1945 y 1948, en el cual el agua era proporcionada empleando tuberías delgadas de plástico entre las hileras de tomate con boquillas tipo rosca que permitían regular la descarga entre 1 y 21 L/h. Un desarrollo similar ocurrió en los Estados Unidos de Norte América e Israel.⁽¹⁾

En las décadas de los 50's y 60's numerosos artículos y patentes de mejoras a este sistema de riego y de sus componentes fueron publicados.⁽²⁾ El uso de boquillas metálicas de aluminio (semejantes a tornillos) en las tuberías comenzó a popularizarse, ya que se obtenía una mejor penetración de agua a niveles más profundos de tierra (mediante la apertura de estas se podía controlar el flujo de agua), lo que le permitía a la tierra absorber el agua y evitar encharcamientos, esta inversión fue desarrollada por Ludwig Blass (US No. 2752201, año 1956). [Fig. 1.b].⁽⁴⁾

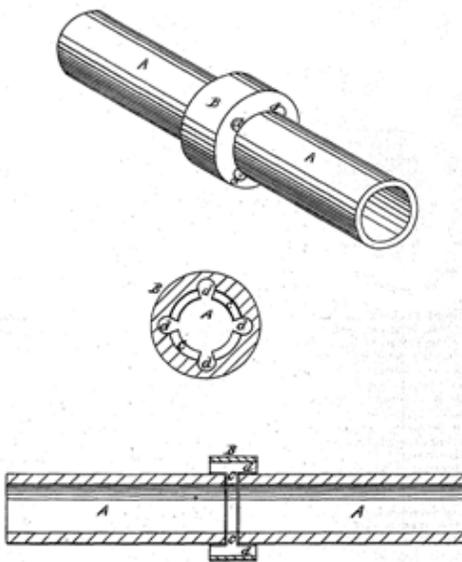


Fig. 1.a

Unión de tuberías

Patente: US No. 146572, año 1874

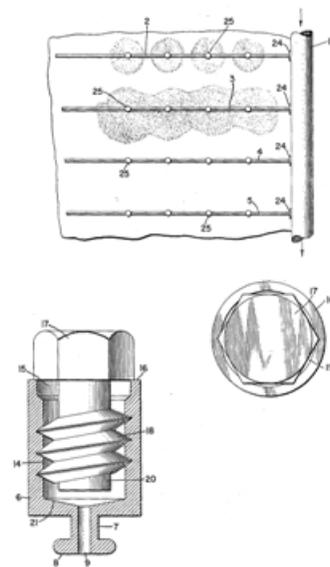


Fig. 1.b

Boquillas metálicas

Patente: US No. 2752201, año 1956

Contribuciones a la promoción y desarrollo de la irrigación por goteo fueron conducidas por diferentes países especialmente Israel, E. U. A. y Australia, las cuales conforman las bases de la metodología que se sigue actualmente en esta técnica. Fue hasta el año de 1971 cuando se realizó el Primer Congreso Internacional de Irrigación por Goteo en el cual 24 artículos de investigación en mejoras de componentes y técnicas fueron presentados. Para 1974 en el Segundo Congreso Internacional de Irrigación por Goteo realizado en San Diego California (E. U. A.), el total de artículos presentados fue de 83 y así, de manera progresiva el número de artículos de investigación sobre el tema ha ido aumentando.⁽¹⁾

Las áreas de cultivo empleando irrigación por goteo se expandieron rápidamente durante los años 70's. A principios de esta década solo 600 ha en los Estados Unidos de Norteamérica eran irrigadas utilizando dicho método, para 1976 el área se incrementó a 75000 ha, en el mismo país. La Tabla No. 1 muestra las áreas irrigadas bajo el método de goteo en 1982 y 1992 basado en estadísticas mundiales elaboradas por la FAO. Estos datos muestran que en 1982 solo el 0.3% del área total irrigada en el mundo fue por goteo. A pesar del hecho de que el área mundial bajo irrigación por goteo se incrementó más de cuatro veces para la década de los 90's, el porcentaje total de área irrigada así fue del 1.3%.⁽¹⁾

La importancia de la irrigación por goteo se debe al tipo de cultivos para los cuales es utilizada, como en los campos de azúcar de caña, para cultivos de invernadero, para vegetales de alto valor comercial, para los cultivos de algodón, en viñedos y para los cultivos de arbustos y árboles. Las razones de la limitación en el desarrollo de este método son primordialmente económicas: los elevados costos en los equipos, instalación y el mantenimiento de estos, comparados con el bajo valor del agua en muchas partes del mundo. Solo cuando el agua es severamente limitada, con altos costos y cuando su distribución es controlada por agencias, ya sean privadas o públicas. Por otra parte, el grado de control y manejo de agua ofrecido por este método presenta un avance económico real, además de que permite trabajar con agua de calidad salina altas y con tratamiento químico previo.^(1, 2)

Tabla No. 1						
Área total de irrigación y área bajo irrigación por goteo en 1982 y 1992						
PAIS	Área total (en 1000 ha)		Área bajo goteo (en 1000 ha)		Área bajo goteo (% del total)	
	1982	1992	1982	1992	1982	1992
E. U. A.	24,811	23,640	185	606	0.7	2.6
Australia	1,500	2,069	20	147	1./3	7.1
Sudáfrica	1,020	1,128	44	144	4.3	12.8
Israel	203	180	82	104	40.0	57.8
España	3,100	3,403	0	160	0	4.7
Italia	2,900	3,150	10	79	0.3	2.5
Egipto	2,540	2,645	0	68	0	2.5
México	4,800	6,100	2	60	0	1.0
Japón	3,010	2,802	0	57	0	2.0
Portugal	630	633	2	24	0	3.2
India	35,150	45,800	22	71	0	0.2
Francia	960	1,190	22	51	2.3	4.3
Tailandia	3,320	4,400	0	41	0	0.9
Chile	1,257	1,268	0	26	0	2.0
Chipre	30	37	6	25	20	67.6
China	44,594	49,030	8	19	0	0
Jordania	38	65	1	12	2.6	18.5
Marruecos	1,230	1,280	4	10	0	0.8
Otros	---	---	50	100	---	---
TOTAL	131,216	148,830	457	1,861	0.3	1.3

3.2.1. ACTUALIDAD MUNDIAL

Para principios del siglo XXI, el área total de irrigación fue del 3 millones de ha, representando el 2% de las áreas de cultivo mundiales. ⁽¹⁾

La tabla No. 2 muestra la extensión del método de irrigación por goteo a nivel mundial en el año 2000, según datos recabados por la ICID (Comisión Internacional en Irrigación y Drenaje), por sus siglas en inglés:⁽²⁾

Tabla No. 2	
Extensión de irrigación por goteo a nivel mundial en el año 2000.	
PAIS	Área bajo goteo (ha)
E. U. A.	1,050,000
India	260,000
Australia	258,000
España	230,000
Sudáfrica	220,000
Israel	161,000
Francia	140,000
México	105,000
Egipto	104,000
Japón	100,000
Italia	80,000
Tailandia	72,000
Colombia	52,000
Jordania	38,300
Brasil	35,000
China	34,000
Chipre	25,000
Portugal	25,000
Taipéi	18,000
Marruecos	17,000
Otros	177,000
TOTAL	3,201,300

3.2.1.1. TENDENCIAS

Un panorama claro en las tendencias en irrigación por goteo es impráctico, pero algunos indicadores muestran que las investigaciones en este campo se concentran en la disminución de los costos en los sistemas hidráulicos de operación y en la utilización de esta en cultivos de bajo costo comercial.⁽²⁾

3.2.1.2. COSTOS

El alto costo en la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de irrigación por goteo permanece como el principal impedimento a la expansión de esta técnica. Generalmente solo los cultivos con alto retorno monetario son considerados para la implementación de la irrigación por goteo. No se conoce ningún estudio estadístico detallado de los costos individuales de los componentes del sistema debido a la variabilidad de los costos en las diferentes regiones.⁽²⁾

Investigaciones realizadas por ICID en 1991, indican que casi todos los países tuvieron un gasto promedio de instalación y operación de sistemas de riego por goteo de entre 100 dólares y 800 dólares por ha en un año, mientras que en el mismo cultivo empleando otra técnica (irrigación por gravedad) el costo sería menor.⁽²⁾

3.2.1.3. SITUACION DE MÉXICO

La historia de la irrigación mexicana no es un tema muy abundante en la literatura debido al poco conocimiento que se ha generado respecto a las formas de producción agrícola que han existido en el país. En términos de agricultura, en épocas prehispánicas fue una de las más ricas en la historia de la humanidad, y tiene sus bases gracias a la domesticación del maíz, proseguido del frijol, el chile y la calabaza. Las técnicas de cultivo de nuestros antepasados fueron tan exitosas que mediante ellas se logró alimentar a toda la región de Mesoamérica, como es el caso de las zonas chinamperas del Valle de México, las cuales permitieron que se forjaran civilizaciones tan importantes como los aztecas. La agricultura irrigada y tecnificada, intensiva en el uso del suelo y en mano de obra, sigue siendo un hecho que todavía podemos

constatar en el campo mexicano; si bien no con el esplendor de aquella época, si conserva sus tradiciones empíricas a pesar del paso de los siglos.⁽⁵⁾

Al llegar los españoles al territorio de Mesoamérica, encontraron un sistema de irrigación ajeno a la realidad ecológica que no comprendieron y destruyeron en gran parte. Durante la época de la conquista no hubo avances en las técnicas de agricultura, solo diversificación de productos gracias a la introducción de cultivos europeos.⁽⁵⁾

Un cambio notorio en las técnicas de irrigación se dio hasta principios del siglo XX cuando la explotación de tierras de cultivo se realizó principalmente en territorios al norte del país (cercano a la frontera con E. U. A., lo que permitió el comercio) y a las costas para utilizar esta agua en el riego.⁽⁵⁾

El futuro de la irrigación en México se va a basar en gran medida no en las mejoras en las técnicas de riego, sino en el impacto en los programas de financiamiento y subsidio energético al campo, según estimaciones de la IA.⁽⁶⁾

3.3. IMPORTANCIA DEL AGUA

El agua es un elemento usado en todas las actividades humanas, de ahí la importancia de evitar pérdidas, encontrar formas para reutilizarla y conocer los efectos negativos que produce su desperdicio.

3.3.1. AGUA UN RECURSO VITAL⁽⁷⁾

El agua es fundamental para la vida. Es muy difícil imaginarnos un organismo que pueda existir sin agua. La superficie de la Tierra está cubierta en un 71% por agua. El 97.5% del agua de la Tierra es agua salada de los mares u océanos, y solamente el 2.5% es agua fresca, la cual se encuentra distribuida como 1.7% en glaciares y capas de hielo en los polos; y 0.77% en lagos, ríos, agua subterránea y atmósfera.

Las sociedades humanas necesitan agua para beber, para suministrar los campos de irrigación y en las actividades industriales. Así, el agua es un recurso no abundante y un elemento caro en la producción agrícola. También una clave determinante para la autosuficiencia nacional en la producción de alimentos. Sin embargo, a pesar de esto la

sociedad hace un uso inconsciente del agua debido a la ignorancia y a la tradición. Con un alto porcentaje de áreas de producción agrícola a merced de la inclemencia del clima del tiempo y un porcentaje pequeño en irrigación, no podemos darnos el lujo de desperdiciar el agua. Con la presión de producir más alimentos debido a la explosión demográfica, la utilización de agua tiene una gran importancia.

El uso excesivo de agua por irrigación no solo desperdicia un preciado recurso sino que también lastima la producción y daña el suelo agrícola. El incremento de salinidad en las áreas fértiles irrigadas añade un nuevo problema a la producción agrícola.

El mayor uso del agua fresca en el mundo se puede observar en la Tabla No. 3. La mayor parte del agua usada en casas e industrias es para lavado y remover materiales no deseados, y el agua usada en la producción eléctrica es usada para disipar el calor e incrementar la eficiencia del proceso. El termino de "*No Consumida*" porque el agua, aun contaminada con desechos, puede ser utilizada por los humanos para el mismo uso u otros usos si la calidad es adecuada o puede ser tratada para quitar los materiales no deseados.

En contraste con la irrigación que es llamada "*Consumida*" porque el agua aplicada no regresa a su fuente. Solo puede llegar a los mantos subterráneos o regresar a la atmósfera a través de la evaporación. Por supuesto en ambos casos el agua se reintegra al ciclo del agua.

Tabla No. 3	
<i>Demanda de agua fresca.</i>	
USO	Litros usados por persona
Consumida	
Irrigación y otros usos agrícolas	2,800
No Consumida	
Producción eléctrica	2,400
Uso industrial	1,500
Uso residencial	400

En el mundo, el uso del agua para irrigación ocupa el primer lugar (69%), el segundo uso es la industria (23%) y el tercero es para uso directo de los humanos (8%). Estos porcentajes varían mucho de una región a otra, dependiendo de la precipitación natural y el desarrollo de la zona.

La principal fuente de agua fresca son los ríos y lagos. Antes de que se tuviera el suministro municipal, cada conjunto de familias tenían su pozo. Desgraciadamente hay problemas asociados con los pozos poco profundos, como son la contaminación debido a excrementos animales o humanos que pueden contener patógenos. Aun así se estima que cerca de 1,400 millones de personas utilizan agua contaminada en países subdesarrollados. Cerca de 5 millones de niños mueren de simple diarrea cada año.

En países desarrollados también la principal fuente de agua fresca son ríos y lagos, pero los métodos de colección, tratamiento y distribución son más sofisticados. El uso de presas y plantas de tratamiento hacen que el agua esté limpia de patógenos y materiales. Además, las presas en los ríos son la principal fuente para el proceso de irrigación.

3.3.2. SITUACION DEL AGUA EN MEXICO⁽⁸⁾

La zona central de la República Mexicana se ha considerado como una región en estado crítico desde el punto de vista ambiental. Uno de los elementos limitantes para el sostenimiento y futuro desarrollo de esta zona es el recurso del agua, el cual se extrae del sistema de acuíferos para cubrir aproximadamente un 70% de la demanda, mientras que un 30% se importa de otras cuencas. La disponibilidad del recurso es un tema preocupante, debido a la población actual que de él depende. Diferentes estudios realizados, en los que se han evaluado los recursos hídricos que abarcan ciertas zonas geológicas por su relevancia en relación con el potencial de recarga al acuífero han mostrado una escasez importante de éste líquido vital y la presencia de bacterias como son estreptococos fecales y otras de tipo patógeno (con base en parámetros de tipo microbiológico utilizando las bacterias indicadoras que se mencionan en la NOM-127-SSA1-2000). También se ha determinado *Helicobacter pylori*, bacteria asociada

con gastritis crónica, úlcera gástrica y cáncer gástrico. Este estudio prospectivo nos brinda una visión general de la situación en esta zona.

3.3.3. CAMBIO CLIMATICO⁽⁹⁾

El cambio en las condiciones climáticas ha modificado los parámetros que solían conducir a los sistemas vivos en el planeta. El cambio climático es causado por el cambio en la composición de la atmósfera; por ejemplo, la concentración de CO₂ al nivel del suelo se ha incrementado de 275 ppm (antes de la era industrial, en los 1800's) a 370 ppm en la actualidad, lo que representa un incremento del 35%. Además del CO₂, existen trazas de otros gases que aumentan los efectos del cambio climático. Estos son el metano (CH₄), óxido de nitrógeno (NO₂), vapor de agua (H₂O) y el ozono (O₃) al nivel de la troposfera. La troposfera es la capa que se extiende desde el nivel del suelo hasta 11 Km de altura, y es aquí en donde se determinan las condiciones climáticas que nosotros percibimos. Aunque todos estos gases presentes en la atmósfera son producidos naturalmente por los ecosistemas, cada uno de ellos ha experimentado un enriquecimiento en su concentración en los últimos 100 años gracias a la actividad humana. Existen algunos gases de origen antropogénico, pertenecientes al grupo de los clorofluorocarbonos (CFC's), los cuales han sido producidos y liberados a la atmósfera desde la segunda mitad del siglo XX.

El ozono en la troposfera se forma por la oxidación fotoquímica del monóxido de carbono (CO), metano y algún otro compuesto orgánico volátil (VOC); esta reacción es catalizada por diferentes óxidos de nitrógeno (NO_x). Si bien el ozono es un componente esencial en la atmósfera (al nivel de la estratósfera es un filtro natural de rayos UV), a nivel de la troposfera, produce efectos negativos en la flora y fauna; desde antes de la era industrial, la concentración del O₃ en la troposfera se ha duplicado. Gracias a la presencia de los CFC's (compuestos sumamente volátiles, los cuales llegan rápidamente a la estratósfera), los cuales sufren reacciones de ionización gracias a la luz para producir radicales libres se ha destruido la capa natural de O₃ en la estratósfera, lo que provoca que la luz del Sol llegue a la tierra con más energía.

El aumento en la concentración en las trazas de estos gases en la troposfera ha tenido serias consecuencias, como la aparición del efecto invernadero. En un invernadero las radiaciones de longitud corta provenientes del Sol al pasar a través del vidrio son convertidas en radiaciones de mayor longitud de onda, lo que permite que esta radiación térmica se concentre y no escape del invernadero. La Tierra no está rodeada por una capa de vidrio pero sí por la troposfera; los gases naturales de la troposfera (CO_2 , CH_4 , N_2O , H_2O y O_3) reducen la longitud de onda de la radiación blanca (radiación que normalmente regresa al espacio); la cantidad de radiación que es regresada al espacio determina el balance térmico de la Tierra. Bajo condiciones normales, una temperatura de 15°C se mantiene cerca del nivel del suelo, sin la troposfera la temperatura sería de aproximadamente -18°C . El "natural efecto invernadero" al sumarse con el "efecto invernadero antropogénico" da por resultado el calentamiento global.

El aumento en la concentración de los gases de la troposfera puede ser atribuido a diferentes actividades climáticas incluyendo la combustión de combustibles fósiles, y la combustión de bosques y vegetación natural. Se estima que el consumo de energía (industrial y doméstica) de los países desarrollados contribuye en un 50% al "efecto invernadero antropogénico"; los CFC's contribuyen con un 20% y la combustión de bosques y vegetación natural con un 15%. El 15% restante es atribuido a la contribución de la agricultura; aunque en algunos países únicamente en esta práctica se llega a obtener un 80% de contribución al calentamiento global, de acuerdo a sus propias actividades (Tabla No.4).

La agricultura contribuye con CH_4 por la descomposición de los cultivos no cosechados, con N_2O por la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, con vapor de agua por evaporación en algunos métodos de irrigación superficial o con aspersores, y en una menor proporción con CO_2 por métodos indirectos que energía (como en el arado o en el bombeo).

PAIS	Producción de gases de efecto invernadero por agricultura (%)
Australia	17
Bélgica	7
Brasil	70-80
Canada	10
Francia	17
Alemania	6
India	40-80
Nueva Zelanda	71
Inglaterra	7
E. U. A.	8

De acuerdo a la tendencia en emisión de gases de invernadero, en el futuro un promedio en el aumento del calentamiento global está en un rango de 0.2-0.5 °C por década. Con modelos de predicción, se sabe que los efectos del calentamiento global serán más drásticos en las tierras cerca de los mares y en los polos.

La presencia de vapor de agua componente del efecto invernadero es de suma importancia por la modificación del ciclo del agua ya que el ascenso de temperatura, aumenta las cantidades de agua que se evapora, lo que aumenta también la intensidad de la lluvia. Esto provoca el cambio en la distribución de las zonas de lluvia y por ende cambio en las zonas destinadas para la agricultura.

3.4. METODOS DE IRRIGACION⁽¹⁰⁾

El relieve de la tierra empleada para campos agrícolas es modificado para obtener pendientes planas con el fin de proveer una aplicación uniforme de agua de irrigación en la superficie. El nivel apropiado de la tierra de sembradío es esencial para mayor

eficiencia en el agua de riego. El criterio para escoger el nivel apropiado de la tierra se ve influenciado por el tipo de tierra, la pendiente de esta, el clima, las semillas a sembrar y el método de irrigación. El nivel de tierra con una pendiente casi de cero únicamente se utiliza para el cultivo de arroz. El nivelar la tierra es un proceso exhaustivo y caro. Para remover 10 cm de capa de tierra en una hectárea, alrededor de 1,000 metros cúbicos de tierra tienen que ser removidos. Drásticas excavaciones de tierra no son adecuadas a menos de que el subsuelo sea potencialmente fértil, debido a esto la elección del método adecuado de irrigación depende en gran medida de las características de relieve de la tierra.

Existen diferentes métodos de irrigación los cuales pueden ser usados en tierras planas o con pendiente; dependiendo de la tierra, la disposición de agua y la cosecha; de acuerdo a estas características se dividen en 3 clasificaciones, Fig. 2.

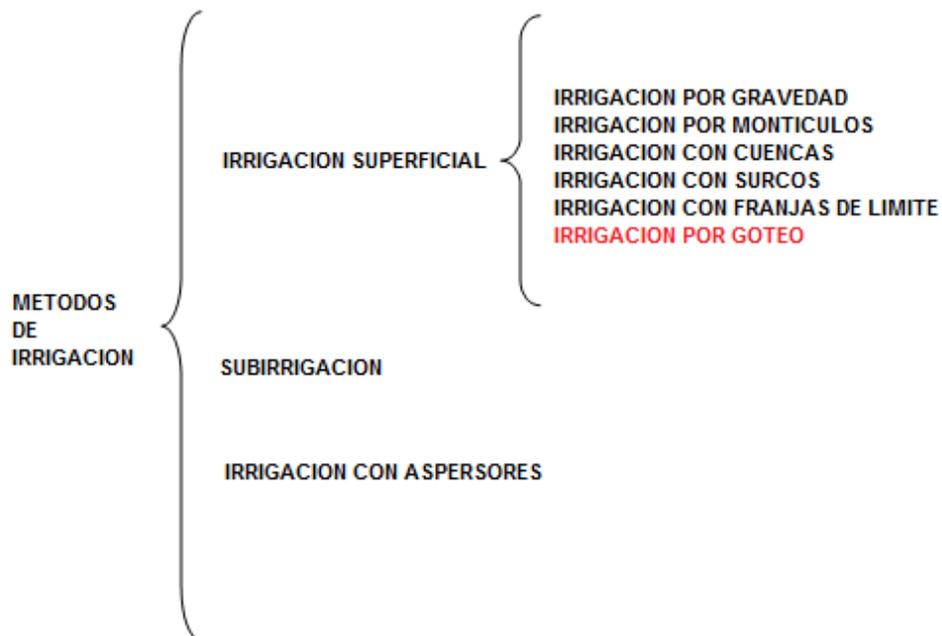


Fig. 2
Métodos de Irrigación

Los tres métodos generales de aplicación de agua de irrigación son:

- i. Irrigación superficial: En la cual el agua es aplicada a la superficie por desbordamiento o mediante surcos, mojando la superficie parcial o completamente.
- ii. Subirrigación: En la cual el agua es aplicada debajo del suelo.
- iii. Irrigación con aspersores: En la cual la superficie de la tierra es mojada mediante rociadores simulando la caída de lluvia.

3.4.1. IRRIGACION POR GRAVEDAD

Este método superficial (empleando generalmente estanques de agua) permite que el agua fluya continuamente hacia la superficie de la tierra mediante surcos o laderas. El agua es situada en el campo en un punto alto y fluye hacia los niveles bajos, difuminándose en este flujo debido a la infiltración hacia la tierra. La aplicación eficiente de agua empleando métodos superficiales va de un rango del 40 hasta el 80% dependiendo de las condiciones de la tierra y climáticas.

3.4.2. IRRIGACION CON MONTICULOS

Este método se basa en la rápida aplicación de agua de irrigación a terrenos pequeños y nivelados delimitados por montículos de tierra que sobresalen de la superficie, para propiciar una ligera inundación en este. Estos pequeños terrenos retienen el agua a una profundidad relativamente uniforme y su absorción es lenta. Este método es mejor adoptado para tierras con velocidad de filtración lentas y pendientes planas. El campo se divide en una serie de rectángulos pequeños o cuadrados rodeados por montículos de tierra, los cuales pueden retener agua dentro del perímetro que forman y comúnmente son conocidos como cuencas de tope. El tamaño de los terrenos para los cuales esta aplicación es práctica varían de 6×5 m a 1.5×1.5 m dependiendo de la tierra y la pendiente del campo. El cambio de pendiente no debe exceder de 3 cm de altura. La altura de los montículos es determinada por la profundidad del agua a

imponer. Grandes flujos de agua son necesarios para obtener altas eficiencias en esta técnica. Este método presenta varias desventajas. A menos que la superficie se encuentre nivelada, no se obtendrán buenos resultados.

3.4.3. IRRIGACION CON CUENCAS

Este método es comúnmente empleado para gran variedad de frutas, plantas, árboles y hortalizas. Las cuencas pueden ser rectangulares o circulares. El caso de árboles se hace una cuenca circular se por cada árbol. La tierra dentro del cuenca esta nivelada perfectamente. El agua es llevada directamente mediante canales de abastecimiento y se llenan a una altura de 10 a 15 cm. La Fig. 3⁽¹¹⁾ muestra esquemáticamente este método.

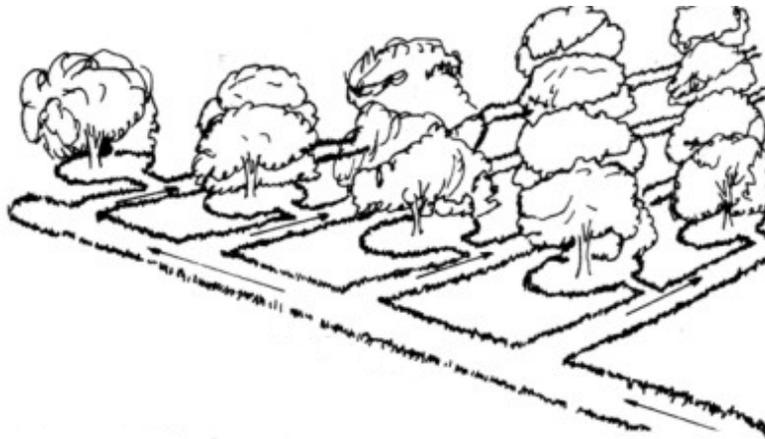


Fig. 3

Irrigación por cuencas

3.4.4. IRRIGACION CON SURCOS

El agua es aplicada mediante pequeños surcos entre dos líneas de siembra; el agua se infiltra y llega alrededor de la zona de raíces. Es el método más común para la siembra de maíz, algodón, azúcar de caña. Los surcos tienen pendientes uniformes. La altura del agua es de 2.5 cm. El agua dentro de los surcos entra en contacto con solo un medio hasta un quinto de la superficie total de tierra del terreno, lo que reduce las

pérdidas. Este método puede ser usado para diferentes flujos de agua procedentes de las fuentes de abastecimiento y por pendientes de tierra pronunciadas o no. Las características de los surcos de acuerdo al tamaño de gránulo de la tierra se muestran en la siguiente tabla (Tabla No. 5).

El espaciamiento de los surcos es determinado por la distancia que existe entre las líneas de siembra. Los surcos pueden ser fácilmente hechos con un arado con placa de triple molde. Las Fig. 4 y 5⁽¹¹⁾ muestran el espaciamiento entre los surcos y el tipo de arado empleado en esta técnica.

Tabla No. 5									
Longitudes sugeridas para los surcos y flujos de acuerdo al tamaño de gránulo, pendiente de la tierra y profundidad de la aplicación del agua.									
Pendiente (%)	Longitud del surco (m)								Flujo máximo (L/s)
	Arcilla				Arena				
0.05	300	400	400	400	60	90	150	190	12
0.1	340	440	470	500	90	120	190	220	6
0.2	370	470	530	620	120	190	250	300	3
0.3	400	500	620	800	150	220	280	400	2
0.5	400	500	560	750	120	190	250	300	1.2
1.0	280	400	500	600	90	150	220	250	0.6
1.5	250	340	430	500	80	120	190	220	0.4
2.0	220	270	340	400	60	90	150	190	0.3
Profundidad de la aplicación (mm)	75	150	225	300	50	75	100	125	

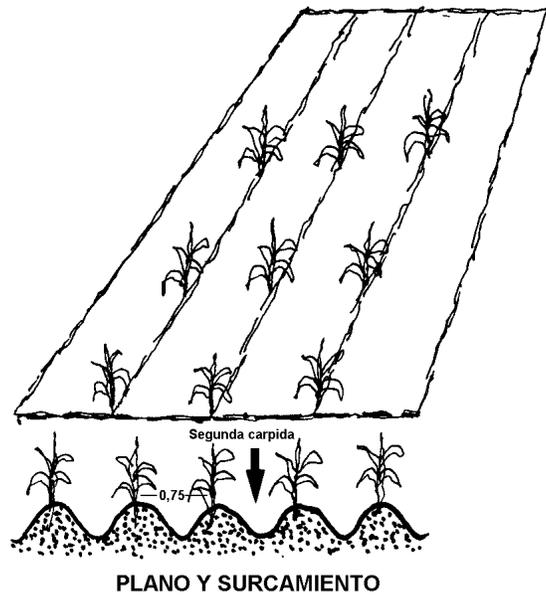


Fig. 4

Tipo de espaciamentos en la irrigación por surcos

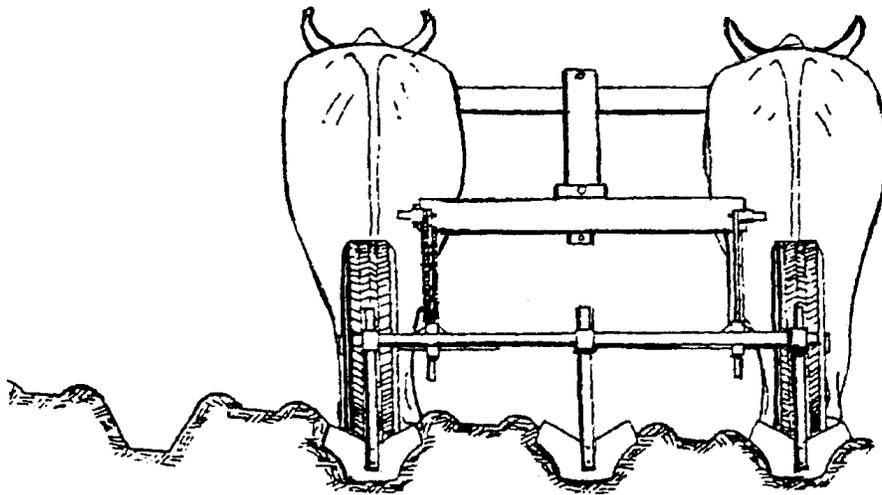


Fig. 5

Ejemplo de arado para lograr los surcos

3.4.5. IRRIGACION CON FRANJAS DE LIMITE

Es un método de irrigación superficial de desbordamiento de agua controlado. El campo es dividido en largas franjas estrechas, montículos de 15 cm de altura en la dirección de la irrigación y cada franja es irrigada por separado; que la tierra se encuentre nivelada es sumamente necesario para esta técnica. La pendiente de la tierra, el largo y ancho de las franjas límite para diferentes flujos de agua y diferentes texturas de tierra se muestra en la Tabla No. 6.

El tipo de cosechas que pueden emplear este método son trigo, cebada, forraje y pastos. La Fig. 6 muestra esquemáticamente este método.

Tabla No. 6				
Tamaño sugerido de las franjas límite y flujos para diferentes tipos y pendientes de tierra.				
Tipo de tierra	Pendiente (%)	Ancho (m)	Longitud (m)	Flujo por metro de ancho (L/s)
Arena	0.2-0.4	12-30	60-90	10-15
	0.4-0.6	9-12	60-90	8-10
	0.6-1.0	6-9	75	5-8
Arena de moldeo	0.2-0.4	12-30	90-250	5-7
	0.4-0.6	6-12	90-180	4-6
	0.6-1.0	6	90	2-4
Arcilla de moldeo	0.2-0.4	12-30	180-300	3-4
	0.4-0.6	6-12	90-180	2-3
	0.6-1.0	6	90	1-2
Arcilla	0.2-0.3	12-30	350	2-4

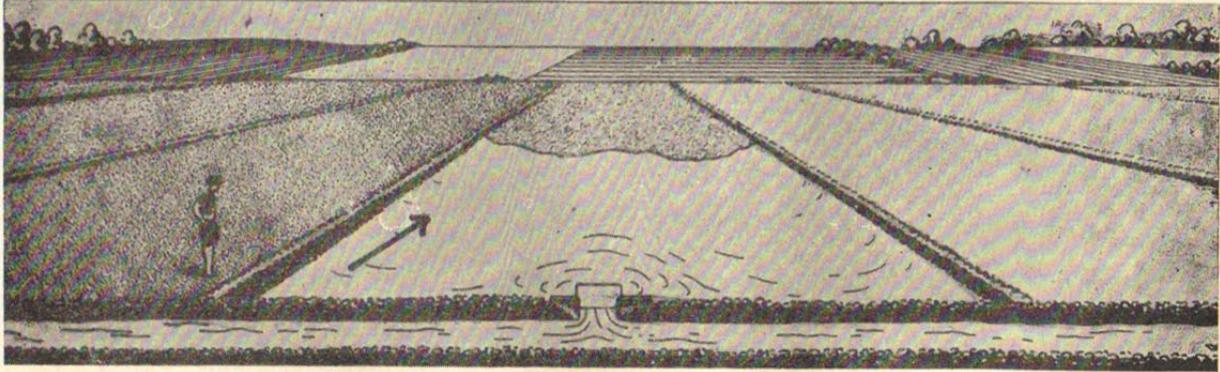


Fig. 6

Método de irrigación de franjas limite

3.4.6. SUBIRRIGACION

La subirrigación es el método de aplicación de agua por debajo de la superficie de la tierra, Fig. 7⁽¹²⁾. Es usualmente logrado mediante la creación de afluentes de agua artificiales mediante tuberías a profundidades predeterminadas, que pueden ir de 30 a 75 cm por debajo del nivel de la tierra. Una distribución uniforme de la humedad a diferentes profundidades de tierra es lograda.⁽¹²⁾ La eficiencia de este método varía del 30 al 80% dependiendo de las condiciones bajo las que se trabaje. Puede ser aplicado a tierras con alta o baja permeabilidad; aguas salinas no pueden ser usadas. Debido a que es un método caro en mantenimiento y operación no es frecuentemente utilizado.

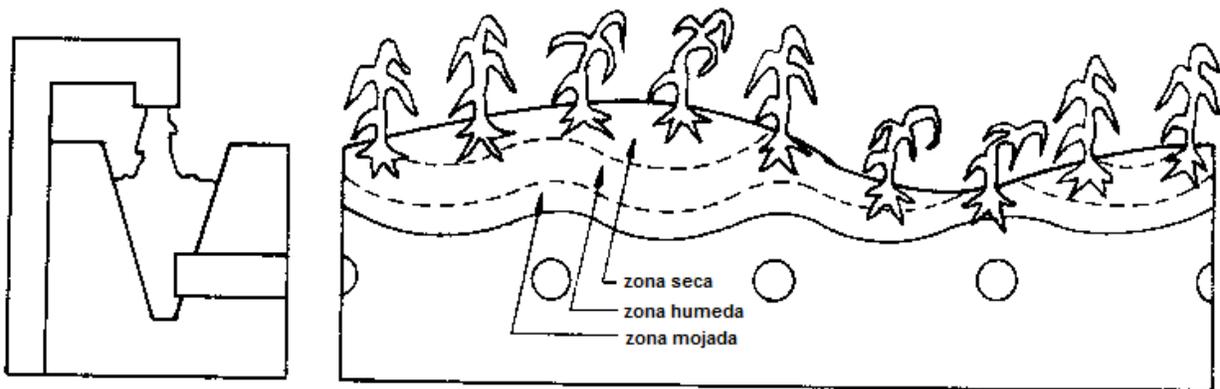


Fig. 7

Subirrigación

3.4.7. IRRIGACION CON ASPERSORES

En esta técnica, el agua es aplicada simulando lluvia. El agua es esparcida al aire mediante rociadores localizados en la tubería que conduce agua presurizada, lo que le permite al agua caer a la tierra. Este tipo de líneas de irrigación se caracterizan porque son ligeras en cuanto a su peso. Existen dos principales tipos de aspersores:

- a) Aspersores de cabeza rotatoria (Fig. 8⁽¹¹⁾): Se caracterizan porque la cabeza de riego gira alrededor de un eje mojando los cultivos aledaños; puede ser manualmente movida a lo largo del área a irrigar, gracias a tuberías flexibles (mangueras).
- b) Aspersores en tuberías altas: También con cabezas giratorias; este tipo de líneas de irrigación se caracterizan porque son ligeras en cuanto a su peso.

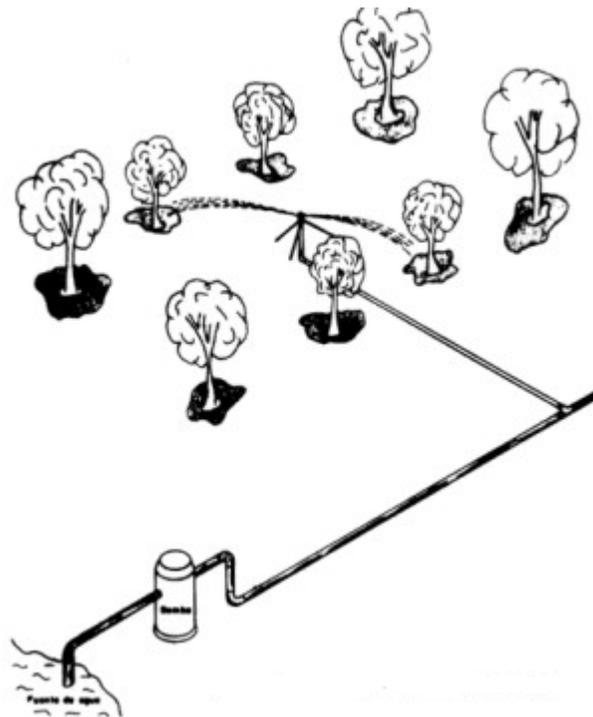


Fig. 8

Aspersores de cabeza rotatoria

3.5. PRINCIPIOS GENERALES DE LA IRRIGACION POR GOTEO

Muchas compañías comerciales y agencias gubernamentales han invertido grandes sumas de dinero y tiempo en promover los avances alcanzados en la irrigación por goteo. Sin embargo, como es el caso de cualquier tecnología nueva, la irrigación por goteo ha tenido poco apoyo en su concepción y manejo. Investigaciones exhaustivas por todo el mundo han resuelto muchos de los problemas primarios y la velocidad de aceptación de esta tecnología se ha incrementado. Los usuarios de estas técnicas deben reconocer que presenta ventajas y desventajas. Para maximizar la eficiencia, el sistema debe ser hecho para tierras y agua específicas, y estas condiciones deben ser previamente estudiadas para alcanzar resultados exitosos. Estos estudios previos incluyen el adecuado diseño, instalación, mantenimiento y operación. Las ventajas y desventajas serán discutidas a continuación:⁽²⁾

3.5.1. VENTAJAS

Con el fin de mostrar las ventajas y el potencial de este método, es necesaria su comparación con los métodos tradicionales de irrigación. En los métodos tradicionales de irrigación el agua es aplicada relativamente en intervalos largos, por lo que la evaporación y transpiración en hojas y raíces es un problema frecuente que concluye en el déficit de agua en la tierra.⁽¹⁾ Los siguientes cuatro criterios son la base de la comparación entre la irrigación por goteo y las demás técnicas, mostrando claramente las ventajas alcanzadas por el método que aquí se estudia:

- Incremento en la eficiencia del agua empleada: La eficiencia del agua utilizada se define como la relación del total de materia seca o porción de cosecha producida por unidad de agua consumida. Significantes mejoras en la producción han sido documentadas en la irrigación por goteo sin incrementos importantes en el uso de agua.⁽²⁾
- Mejoras en la cantidad y la calidad de las cosechas: Con la irrigación por goteo, el contenido de agua en la tierra en la zona de raíces de la planta permanece esencialmente constante porque el agua es aplicada lentamente y

frecuentemente a velocidades predeterminadas. Estas características eliminan las fluctuaciones en el contenido de agua en la tierra comúnmente presentadas en la irrigación por gravedad o con rociadores, lo que contribuye a lo que se conoce como estrés vegetal. La explicación de las mejoras en el crecimiento de la plantas, cantidad de producción y calidad de la cosecha están probablemente relacionadas con la distribución del agua a lo largo de la hilera de siembra, lo cual puede reducir el estrés vegetal causado por la variación en la textura y capacidad de absorción de agua en tierras heterogéneas.⁽²⁾

- Reducción en la pérdida de agua: Acuerdos generalizados conllevan a que los requerimientos de agua para la irrigación pueden ser menores con la irrigación por goteo que con los métodos tradicionales. Los ahorros, por supuesto, dependen de la cosecha, topografía, tierra y condiciones ambientales. Las razones primordiales de esto son la disminución en la superficie de evaporación, reducción en la pérdida de agua en tierras adyacentes a la cosecha, etcétera.⁽²⁾
- Reducción en la filtración profunda: La irrigación por goteo o microirrigación ofrece la oportunidad de disminuir pérdidas de agua debido al filtrado profundo.⁽²⁾

Aspectos característicos se resumirán a continuación.

3.5.1.1. APLICACIÓN CONTROLADA DE AGUA

El alto grado de la aplicación controlada de agua es la principal ventaja que la irrigación por goteo ofrece. El sistema está conformado por un alto número de fuentes de agua por unidad de área con una alta uniformidad de descarga. La irrigación por goteo es usualmente aplicada con un sistema estacionario, lo que asegura la frecuente y localizada aplicación de agua y predetermina las cantidades de ésta a velocidades constantes. La hora del día elegida para la aplicación de agua mediante irrigación por goteo no está limitada a la velocidad del viento como es el caso de la irrigación con

aspersores, donde la uniformidad se pierde. Sin embargo, la distribución de agua alrededor de cada emisor no es uniforme.⁽¹⁾

3.5.1.2. ALTO POTENCIAL DE AGUA EN LA TIERRA AL NIVEL DE RAICES

La irrigación debe suministrar agua a una velocidad suficiente para satisfacer la demanda de agua que la cosecha necesita y la que se evapora, para mantener alto el potencial osmótico de las células de las plantas.⁽⁸⁾ La irrigación por goteo alcanza este objetivo debido a que a la altura de la zona de raíces se presenta un exceso de sales proveniente del agua circundante⁽¹⁾, Fig. 9⁽¹¹⁾.

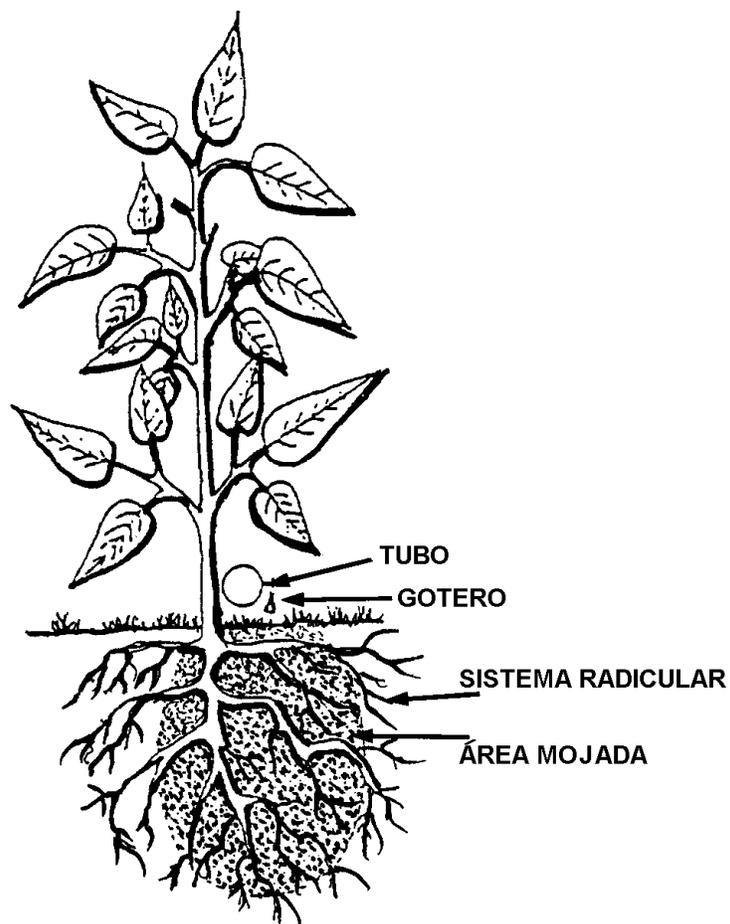


Fig. 9

Irrigación por goteo

En los seres vivos, la membrana celular es permeable al agua. El agua se mueve lentamente en dos direcciones, hacia adentro o hacia afuera de la célula haciendo un gradiente de concentración (ósmosis). Las células de las plantas previenen hincharse en la presencia de soluciones con bajo contenido de sales; debido a que tiene paredes celulares rígidas por lo que pueden tolerar diferencias osmóticas a través de su membrana plasmática. Esta rigidez es importante en el desarrollo de las plantas y su rigidez mecánica.⁽¹³⁾

3.5.1.3. MOJADO PARCIAL DE LA TIERRA

Mediante la irrigación por goteo solo una parte de la superficie de la tierra se humedece, por lo que se disminuye la pérdida de agua por evaporación directa en la superficie de la tierra, lo que representa quizá la mayor ventaja en esta técnica. Para estimar la cantidad de agua perdida existen modelos basados en un balance de materia y energía en los cuales se establecen etapas de secado, dependiendo de las condiciones atmosféricas y características de la conductividad hidráulica de la tierra, entre otras.⁽¹⁾ La mayoría de las expresiones son correlaciones empíricas que pueden ser resueltas empleando modelos probabilísticos.⁽¹⁴⁾

3.5.1.4. FOLLAJE SECO

El follaje seco retarda la incubación y desarrollo de muchas plagas en las plantas. Por lo tanto, una menor aplicación de pesticidas y fungicidas se obtiene bajo la técnica de irrigación por goteo. Una ventaja adicional es que con los métodos clásicos de irrigación se presentan daños en las hojas debido a las sales del agua.⁽¹⁾

3.5.1.5. UTILIZACION DE AGUA DE BAJA CALIDAD

Muchos experimentos se han realizado variando el método de irrigación y la salinidad del agua. En estos se obtuvieron que una alta salinidad en el agua puede ser usada en la irrigación por goteo a diferencia de otros métodos, en los cuales la reducción de la producción fue notoria. La utilización de agua salinas puede ser atribuido al hecho de que en esta técnica los intervalos de descarga de agua son largos, con lo que continúa la dilución de estas sales.⁽²⁾

3.5.1.6. BENEFICIOS ECONÓMICOS Y ENERGÉTICOS

Los costos energéticos del bombeo de agua en la irrigación se ven disminuidos con esta técnica porque las presiones de operación son menores que con otras técnicas. Sin embargo, la mayor conservación de energía debería proceder en la reducción en la cantidad de agua bombeada. Los sistemas de microirrigación pueden ahorrar energía en comparación con los sistemas de irrigación por gravedad solo cuando la eficiencia de la primera sea significativamente incrementada.⁽¹⁾

3.5.1.7. APLICACIÓN DE FERTILIZANTES, HERBICIDAS Y PESTICIDAS

Mediante la microirrigación se puede maximizar la flexibilidad de horario en la aplicación de fertilizantes y pesticidas. La aplicación continua de agua de riego enriquecida con nutrientes en solución parece ser benéfica en muchas tierras de cultivo. Además de fertilizantes, herbicidas, insecticidas, fungicidas; se puede enriquecer el agua con reguladores de crecimiento y dióxido de para la mejora de los productos agrícolas obtenidos.⁽²⁾

En este tipo de irrigación, para evitar incrustaciones que lleguen a tapar las tuberías o los emisores se evita el uso de químicos de baja solubilidad, los fertilizantes más comúnmente usados son los que en su composición contienen compuestos de nitrógeno y potasio.⁽¹⁾

3.5.1.8. USO DE AGUA TRATADA⁽¹⁵⁾

La mayoría de los proyectos para tratar agua que se desarrollan a nivel mundial son para reutilizarla en la agricultura. En zonas áridas, esta práctica es de vital importancia para impulsar actividades agrícolas, además de proveer numerosos beneficios adicionales como incrementar la producción de cosechas y disminuir problemas de salud.

Los factores de calidad que determinan la viabilidad del agua tratada son básicamente su contenido patógeno, salinidad, dureza, toxicidad, trazas de elementos pesados y nutrientes adicionales.

Cualquier método de irrigación puede utilizar agua tratada, pero de todos el que provee el nivel más alto de viabilidad es la irrigación por goteo. Desde el punto de vista de la calidad del agua, este método tiene la ventaja de permitir el uso de agua reciclada con altos niveles de DBO, debido a que la zona de raíces no se encuentra saturada, lo que permite la aeración.

La Tabla No. 7 presenta una guía que puede ser empleada para evaluar el uso de una determinada agua en la irrigación por goteo.

Tabla No. 7				
Calidad del agua				
Características	Unidades	Grado de restricción para el uso		
		Ninguno	Moderado	Severo
Sólidos suspendidos	mg/L	<50	50-100	100
pH		<7.0	7.0-8.0	8.0
Sólidos disueltos	mg/L	<500	500-2,000	2,000
Magnesio	mg/L	<0.1	0.1-1.5	1.5
Fierro	mg/L	<0.1	0.1-1.5	1.5
Colonias de bacterias	#/mL	<10,000	10,000-50,000	50,000

La presencia de patógenos microbianos en el agua representa un mayor riesgo para los campesinos, evitar estos riesgos depende de las prácticas de cultivo.

3.5.2. DESVENTAJAS⁽¹⁾

Los problemas más comunes con los que se encara esta técnica son a nivel económico y mecánico. La aparición de incrustaciones a lo largo de la tubería que atascan los emisores aumentan los costos de operación. Los diámetros de los orificios en los emisores son de 0.5-1 mm por lo que generalmente son vulnerables a atascamientos por la penetración de raíces, sales, colonias de microorganismos, formación de precipitados químicos y a la presencia de otras impurezas. Para disminuir este problema el agua es previamente filtrada para eliminar la mayor cantidad de sólidos

suspendidos. Así como mantenimiento frecuente de las líneas de riego; además de limitar la zona de crecimiento de raíces.

3.6. COMPONENTES DE SISTEMAS DE RIEGO⁽¹⁾

Muchos avances significativos se han hecho en el diseño de componentes para el sistema de irrigación por goteo. Los componentes básicos incluyen bombas, inyectores de fertilizante, filtros, líneas de distribución, emisores y otros componentes de monitores.⁽²⁾ A continuación estos serán citados más detalladamente.

3.6.1. EMISORES

Un emisor es un dispositivo para disipar la presión y para descargar agua a una velocidad constante en muchos puntos a lo largo de una línea de riego. Es el componente principal del sistema de irrigación por goteo y es el que determina las características de la técnica. Existen diferentes tipos de emisores en el mercado, cada uno con propiedades específicas, y pueden ser clasificados de acuerdo al siguiente criterio:

- a. Velocidad de flujo: Los emisores tienen determinados diseños para ofrecer velocidades de flujo específicas. La velocidad de flujo es afectada por la presión de operación, la temperatura y las incrustaciones.
- b. Disipación de la presión: La presión de operación de los emisores es del rango de 0.1-0.2 MPa. Esta presión de operación es disipada en el interior del emisor y a lo largo de la línea de riego hasta alcanzar la presión atmosférica en los orificios de descarga. Mientras más pequeño sea el diámetro de descarga menor será la velocidad de flujo y mayor el peligro de atascamiento.

3.6.2. TUBERÍAS

Son los tubos en los cuales los emisores están montados, integrados o insertados. Generalmente fabricados de polietileno (aunque tubos de PVC pueden ser también empleados) porque ofrecen flexibilidad, no son corrosivos, y presentan resistencia a la

radiación solar, a las fluctuaciones de temperatura y fácil manipulación. Estas tuberías tienen diámetros internos de 12-32mm, y espesores de pared que soportan presiones de 4-6 bar, dependiendo de las necesidades.

3.6.3. LINEAS DE ABSTECIMIENTO

Las líneas de abastecimiento generalmente están enterradas y son las que alimentan de agua a las tuberías. Generalmente están construidas de plástico rígido como PE o PVC para minimizar la corrosión y las incrustaciones.

3.6.4. FILTROS

Los filtros son esenciales para evitar incrustaciones que estaquen emisores o tuberías. El tipo de filtración necesaria depende de la calidad del agua y del tipo de emisor, ya que cada filtro es efectivo para determinados tamaños y tipos de sólidos suspendidos, para los flujos de agua, y tienen capacidades específicas de recolección de sedimentos. Algunos de los filtros más comunes son:

- I. Separadores centrífugos (Vortex o hidrociclones): Efectivos para filtración de arena y otros materiales de alta densidad presentes en el agua de riego. Se introduce agua tangencialmente en la parte superior del cono, creando así un movimiento circular que resulta en una fuerza centrífuga que lanza las pesadas partículas suspendidas contra las paredes; estas partículas son recolectadas en un tanque en la parte inferior del cono.

- II. Filtros de grava: Efectivos para la separación de materiales de baja densidad en el agua de riego, como algas y otros materiales orgánicos. Es esencial para la filtración de agua procedente de reservorios naturales de agua como canales y ríos. Estos filtros están conformados por una fina capa de grava (1.5-4 mm de diámetro) libre de carbonato de calcio localizada al fondo de un tanque cilíndrico con un diámetro de 20 a 200 cm, dependiendo de la capacidad del sistema de riego, el agua es introducida por la parte superior del tanque y se hace pasar por la grava.

- III. Filtros de pantalla: Son siempre instalados en la parte final del proceso de filtración; son cilindros forrados de tela y son manufacturados en diferentes tamaños de poro por pulgada.

3.6.5. SISTEMAS DE FERTILIZACION

Los sistemas de fertilización usados para la adición de químicos (nutrientes, herbicidas o pesticidas) al agua de irrigación son considerados como una parte integral del sistema de irrigación por goteo. Sin embargo, la fertilización no es un proceso libre de riesgos. Los químicos adicionados al agua pueden ser tóxicos para los humanos o para los animales. Consecuentemente, los responsables del sistema de riego deben prevenir que esta agua enriquecida no sea directamente para consumo humano. Diferentes métodos de fertilización están disponibles en el mercado como los siguientes:

- i. Venturi: Un venturi en la línea de riego incrementa la velocidad de flujo, lo que causa una presión diferencial, la cual es suficiente para succionar solución de fertilizante de un reservorio externo abierto hacia el agua de riego.
- ii. Tanque de fertilizante: Este método utiliza un tanque en el cual se coloca la solución de fertilizante. El tanque está conectado a la línea principal de abastecimiento mediante un "by-pass", por lo que parte del flujo de agua de irrigación fluye hacia el tanque diluyendo la solución. La concentración de fertilizante en el tanque decrece gradualmente, hasta que es agua de riego. Este método presenta el problema de que la mayoría de los nutrientes son aplicados al principio del ciclo de irrigación y no puede ser automatizado. Una variación de este método utiliza un diafragma de hule como membrana de separación.
- iii. Sistema de inyección: En este método una bomba es utilizada para inyectar solución de fertilizante a la línea de irrigación; la solución normalmente es bombeada de un reservorio no presurizado. La limitante de este método es la

corriente eléctrica de alimentación de la bomba, por lo que generalmente es usado en invernaderos y no en campo abierto.

3.6.6. SISTEMAS DE AUTOMATIZACION

La irrigación por goteo permite un alto grado de automatización en los sistemas de alto diseño ingenieril. La aplicación de agua tiene un alto grado de uniformidad entre los emisores, por lo que es posible aplicar agua de acuerdo a la demanda de cada cultivo y a la salinidad tanto de la tierra como del agua; del mismo modo la demanda de fertilizante puede ser también ajustada. La automatización es empleada para controlar las válvulas principales del sistema con el fin de determinar la cantidad exacta de agua irrigada. Existen dos sistemas de control disponibles, el primero basado en los tiempos de aplicación y otro en los flujos de agua. Los dispositivos de control de tiempo trabajan a flujo constante (un volumen constante de agua pasa por la válvula).

3.7. TIPOS DE SISTEMAS DE IRRIGACION POR GOTEO⁽²⁾

Los sistemas de irrigación por goteo son usualmente definidos en términos del método de instalación, descarga del emisor, grado de humedad en la superficie de la tierra y modo de operación. Los cuatro tipos básicos de irrigación por goteo son:

3.7.1. IRRIGACION POR GOTEO SUPERFICIAL

La irrigación por goteo superficial emplea emisores y tuberías instalados en la superficie de la tierra o instalados por encima de esta, en los arbustos o árboles. De todos los tipos de irrigación por goteo es el más ampliamente usado. Las velocidades de descarga son menores de 12 L/h en cada emisor.

3.7.2. IRRIGACION POR GOTEO SUB-SUPERFICIAL

El agua es aplicada lentamente por debajo de la superficie de la tierra a través de emisores enterrados, no debe ser confundido con la subirrigación donde la zona mojada se encuentra muy por debajo de la zona de raíces.

3.7.3. IRRIGACION POR GOTEO DE BURBUJA

El agua es aplicada a la superficie de la tierra por medio de chorros de agua o bebederos a través de un punto de descarga abierto. La velocidad de descarga es mayor a 12 L/h y menor a 250 L/h. Debido a que la velocidad de descarga excede por mucho la velocidad de infiltración de la tierra son necesarias cuencas para controlar al agua.

3.7.4. IRRIGACION POR GOTEO CON MICROASPERSORES

Se utilizan pequeños aspersores a nivel del suelo para la aplicación de agua. El aire es el instrumento de distribución de agua. Los microaspersores empleados tienen velocidades de descarga menores a 175 L/h por microaspersor y se emplean para la irrigación de árboles y cultivos espaciados. La Fig. 10⁽¹¹⁾ muestra los componentes y los diferentes tipos de sistemas de irrigación por goteo:

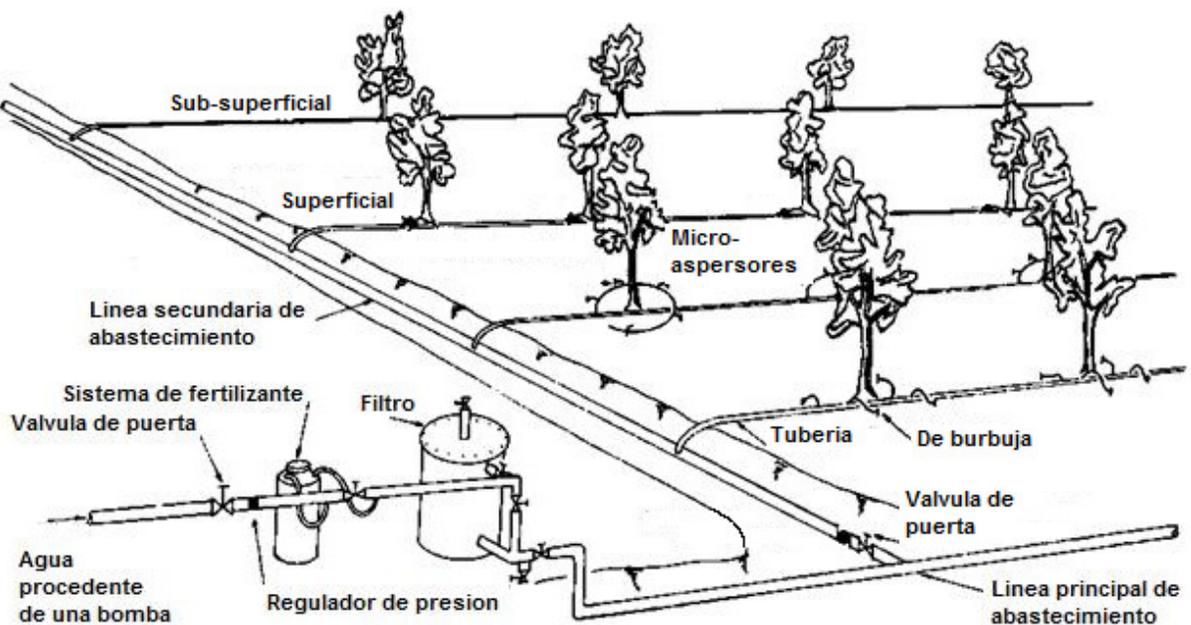


Fig. 10

Componentes y sistemas de irrigación por goteo

3.8. AGUACATE

3.8.1.1. ORIGEN

El aguacate (*Persea Americana*) proviene de una especie de árbol polimórfico, que tiene sus orígenes geográficos en regiones centrales y al este de México, Guatemala y en toda la costa del Pacífico en Centroamérica, Fig. 11. Evidencias arqueológicas indican que la cosecha de esta laurácea en México se ha llevado a cabo por más de 10,000 años. Restos de semillas encontrados en cuevas cercanas al valle de Teotihuacan y en el estado de Puebla, indican que por el aumento en el tamaño de las semillas, desde tiempos pasados se han hecho mejoras en las técnicas de producción para obtener este fruto con mejores cualidades.⁽¹⁶⁾



Fig. 11

Regiones del origen del aguacate

En el año 1519, a la llegada de Hernán Cortes a territorio mexicano y a la par de muchos de los eventos históricos que se desprenden de la conquista de la Nueva España, el mundo conoció el aguacate. En América, el aguacate se llevo de México a Perú y California, de ahí las numerosas variedades de este fruto.⁽¹⁷⁾

3.8.1.2. MERCADO Y PRODUCCION MUNDIAL

La producción mundial de aguacate se ha triplicada en un periodo de 35 años. México, en comparación con otros países de Centroamérica y con E. U. A., según estadísticas de la FAO (Tabla No.8), tiene una producción mundial enorme gracias a las altas demandas de exportación.⁽¹⁶⁾ México es el líder mundial en producción de aguacate seguido por E. U. A., República Dominicana, Brasil, Indonesia e Israel.⁽¹⁸⁾

Tabla No. 8								
Producción de aguacate por país ('000 toneladas)								
País	Año 1961	Año 1966	Año 1971	Año 1976	Año 1981	Año 1986	Año 1991	Año 1996
Costa Rica	10.6	13.3	18.0	25.5	28.0	21.9	23.0	24.0
República Dominicana	106.2	115.2	123.3	131.5	134.0	132.7	141.6	155.0
El Salvador	16.4	20.8	24.5	29.0	32.0	35.0	39.0	41.5
Guatemala	12.2	16.4	19.0	20.0	22.4	25.1	29.0	24.3
Honduras	3.6	4.2	3.7	4.8	5.8	6.7	2.5	0.8
E. U. A.	51.3	55.7	78.2	128.5	165.8	274.9	167.8	173.0
México	108.1	169.5	236.8	280.4	460.9	627.9	780.4	837.8
Producción mundial	697.9	869.0	1075.3	1269.9	1532.5	1949.6	2125.4	2303.4

3.8.1.3. CARACTERISTICAS GENERALES

El aguacate es el fruto de un árbol, con una altura aproximada de 4.5 a 13.6 m, con dos o más periodos en el año; puede florecer en invierno o en primavera, y el periodo de florecimiento puede tener una duración de hasta 6 meses. Se distinguen tres tipos de

aguacates basado en sus centros de origen: mexicano (*Persea Americana var. drymifolia*), guatemalteco (*Persea Americana var. guatemalensis*) y de las Indias Occidentales o Antillano (*Persea Americana var. americana*). Difieren en numerosos rasgos como son la tolerancia al frío, tolerancia a la salinidad, tamaño de fruto, espesor de la piel, contenido de aceite y sabor. Los árboles del tipo las Indias Occidentales (*Persea Americana var. americana*), se producen bien en climas tropicales, los otros dos florecen en los Trópicos, para regiones con temperaturas en invierno en un rango de -5.5 °C a -3.5 °C, únicamente la variación mexicana sobrevive. ⁽¹⁸⁾ Estos árboles crecen en un amplio rango de tipos de tierra, que posean un buen sistema de drenaje, pero crece con mayor facilidad en tierras con un pH de 4.5 a 5.5. ⁽¹⁸⁾ Las características del aguacate varían de acuerdo a las variantes de este fruto. La Tabla No. 9 muestra estas características:⁽¹⁹⁾

Tabla No. 9			
Características de los principales cultivares de aguacates en los subtrópicos			
Cultivar	Raza	Hábito de crecimiento	Características del fruto
Bacon	Mexicano-Guatemalteco	Alto y erecto	Ovoide, verde y piel lisa y fina.
Zutano	Mexicano-Guatemalteco	Alto y erecto	Periforme, verde y de piel lisa y fina.
Fuerte	Mexicano-Guatemalteco	Ancho y extendido	Periforme, verde, de piel lisa y grosos moderado.
Pinkerton	Mexicano-Guatemalteco	Moderadamente extendido	Periforme, verde, de piel averrugada y grosor moderado.
Hass	Mexicano-Guatemalteco-Antillano	Moderadamente extendido	Ovoide, negro, de piel averrugada y grosos moderado.
Reed	Guatemalteco-Antillano	Erecto (menos alto que el Bacon y Zutano)	Ovoide a redondo, piel lisa y gruesa

3.8.1.4. COMPOSICION DEL FRUTO Y USOS

El estatus del aguacate en la comida varía de acuerdo a la región en la que se consume, es un fruto de elevado precio, para países en donde no se cosecha es considerado una importación de semi-lujo.⁽¹⁶⁾

En cuanto a factores nutricionales se refiere contiene 8 vitaminas y 5 minerales esenciales; tiene alto contenido en vitamina A, ácido fólico, vitamina C, Hierro, vitamina E y magnesio. También contiene potasio, riboflavina, piridoxina, tiamina y niacina.⁽¹⁷⁾ El contenido en nutrientes depende del método de cultivo (riqueza de la tierra y del agua de riego).⁽¹⁸⁾

3.8.1.5. EXIGENCIAS DEL AGUACATE⁽²⁰⁾

3.8.1.5.1. CLIMA

Debido a que el aguacate tiene sus orígenes en las regiones cálidas de Centro América y México, se le considera una planta tropical y subtropical.

Entre los rasgos climáticos que inciden en el desarrollo de la planta deben tenerse en cuenta, entre otros, la temperatura, la humedad ambiental, las precipitaciones, la luminosidad y los vientos. Todos estos factores no actúan aisladamente sino que se condicionan mutuamente, constituyendo una unidad climatológica donde algunos de los elementos pueden actuar como limitante.

La temperatura es un factor muy importante para el cultivo. Debido a su origen, el aguacate es sensible a bajas temperaturas, dependiendo su resistencia de las variedades e híbridos. En años cálidos hay, en general, una buena producción; en cambio, en años irregularmente frescos ésta puede ser nula.

Las principales zonas productoras en México se pueden clasificar en dos grupos climatológicos: una zona de altura (Uruapan, Atlixco, Tenancingo, etc.), donde la temperatura media anual es de 17-18 °C, y una zona subtropical (Morelos, Culiacán, Chiapas, Veracruz, etc.), con temperaturas medias anuales de 24 a 26 °C,

constituyendo el llamado trópico de altura mexicano, con pocas variaciones de temperatura.

La temperatura junto con otros factores, determina el grado de evaporatranspiración (la suma de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta), la cual es medida diariamente en los sistemas de riego por goteo para el cálculo general de la dosis de agua. Es necesario que las precipitaciones estén bien distribuidas durante el año.

La altura sobre el nivel del mar es un dato importante en la clasificación de las razas (mexicana: 1500-2000 msnm, guatemalteca: 500-1000 msnm y antillana: 0-500 msnm), pues determina o condiciona la temperatura del lugar. Según la altura en que se implantará el huerto se seleccionarán las variedades que responden a su origen racial.

La luminosidad es otro factor de importancia que garantiza la calidad del fruto. Las ramas demasiado sombreadas no producirán y actuarán parasitariamente en el árbol, de allí la necesidad de controlar la densidad de los árboles y eliminar las ramas sobrantes mediante podas. Por otro lado, la corteza del aguacate es sensible a la intensidad luminosa produciéndose quemaduras características en ramas y frutos, por lo que no se debe dejar la zona de injerto expuesta al sol de medio día.

La humedad relativa ambiental también influye en la calidad del fruto y en la salinidad de la parte aérea del árbol. Humedades altas inducen a la proliferación de las enfermedades en hojas, tallos y frutos (antracnosis, cánceres, etc.). Se considera una humedad ambiental óptima aquella que no supere el 60%.

Los vientos se determinan según su incidencia como desecantes o fríos, que pueden trastornar la floración y fructificación, trayendo problemas de roturas de ramas y de plantas jóvenes. Se detectan los vientos dominantes y se planifica con base en esto la distribución del lote y las posibles protecciones con los cortavientos, vivos o de construcción.

Los distintos factores climatológicos descritos son las condiciones generales y deben verificarse para la zona donde se implantará el cultivo pues es allí donde realmente se evalúa. Además de las generalidades, el microclima de esa microrregión, es decir las posibles variaciones del lugar específico debidas al relieve, protecciones naturales, vegetación, etc.

3.8.1.5.2. SUELO

La textura del suelo y proporción de arcilla determinan sus principales características físicas. Los mejores suelos para aguacate son los de textura media y profundos, como los arcillo-arenosos. Los suelos muy pesados (mayor proporción de arcilla) tienen una gran capacidad de campo (retención de agua) y se encharcan periódicamente; sin una buena cantidad de materia orgánica (3 a 5%) esto provoca problemas de aireación y drenaje del agua. Los suelos muy livianos (mayor proporción de arena) tiene muy baja capacidad de campo, se pierde mucha agua por percolación y la aireación puede resultar excesiva.

Los suelos medios y profundos, en cambio, garantizan el desarrollo radicular del aguacate; cuánto más profundo el suelo, mejor será éste desarrollo, siendo necesario evitar los de los subsuelos rocosos y muy arcillosos.

3.8.1.5.3. HUMEDAD

El aguacate es muy sensible al exceso de humedad en el suelo debido a que su sistema reticular posee pocos pelos absorbentes y realiza la absorción de agua y nutrientes principalmente por las puntas de las ramificaciones radiculares. El exceso de agua provoca una rápida asfixia radicular y favorece la proliferación de hongos, como la *Phytophthora cinnamomi*.

3.8.1.5.4. SALINIDAD

Las principales sales solubles del suelo son los sulfatos, cloruros, carbonatos, bicarbonatos y nitratos. Cuando se aumenta la concentración de esta solución por encima de un límite óptimo, comienzan los efectos salinos (físicos y químicos). Una

forma de medir la salinidad de la solución es a partir de la conductividad eléctrica de un extracto a 25 °C, que se expresa en mS/cm.

Los suelos por debajo de 2 mS/cm se consideran normales. El aguacate es un cultivo muy sensible a la salinidad, se desarrolla normalmente con concentraciones menores de 3 mS/cm, pasando este nivel comienzan los efectos tóxicos de los cloruros de sodio y magnesio, produciendo quemaduras en las plantas y bordes de las hojas, y defoliaciones intensas.

En la implantación del huerto, respecto a la salinidad, se tiene en cuenta:

- Realizar un análisis de la solución del suelo, ésta debe tener menos de 3 mS/cm de salinidad.
- En caso de salinidad superior a la recomendable, se aplicarán fuertes riegos para un adecuado lavado de sales.
- En caso de suelos salinos emplear la raza antillana (más resistente a estas condiciones).
- No utilizar abonos a base de cloruros, como el de cloruro de potasio.

3.8.1.5.5. pH DEL SUELO

El rango de acidez óptimo para el desarrollo de la planta de aguacate es el comprendido entre un pH de 5.5 y 6.5. Esta baja acidez posibilita una buena absorción de los principales nutrientes. Se cultiva a veces en suelos con un pH 8 (alcalino, que indica la presencia de caliza), pero se producen severas clorosis (producción deficiente de clorofila), pues por encima de un pH 7 disminuye la absorción de hierro. En suelos muy ácidos (por debajo de un pH 5.5) comienzan los efectos tóxicos del aluminio.

Los suelos alcalinos pueden corregirse con prácticas acidificantes como la incorporación de sulfatos o azufre. Los suelos demasiado ácidos, se pueden encalar, haciendo elevar su pH a un óptimo deseado, aplicando caliza.

3.8.1.5.6. AGUA

Para producción de aguacate, el agua de riego debe reunir algunas características importantes para su implementación en lo que respecta al contenido total de sólidos disueltos y al contenido de sodio, cloruros y boro.

- Total de sólidos disueltos: menor de 850 ppm.
- Sodio: menos de 3 meq/L.
- Cloruros: menos de 107 ppm.
- Boro: menos de 0.7 ppm.

La cantidad de agua necesaria es variable según el estado de la planta (joven o adulta), el clima (grado de evapotranspiración) y el estado de desarrollo (reposo, crecimiento, floración, fructificación), además del sistema utilizado (con el riego por goteo se llega a ahorrar hasta un 40% de agua respecto a otras técnicas).

3.8.1.6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA COSECHA DE AGUACATE POR MEDIO DE LA IRRIGACION POR GOTEO⁽²⁰⁾

Uno de los primeros experimentos de irrigación por goteo llevados a cabo en cultivos de aguacate, se realizó en el condado de San Diego (E. U. A.). Durante este experimento se comparó la irrigación por goteo y la irrigación por aspersion en un huerto comercial ligeramente inclinado. Se utilizó un aspersor por árbol con aplicación de agua semanal o tres emisores (con descarga de 4 L/h) por árbol con aplicación diaria de agua. La aplicación de agua fue regulada mediante tensiómetros que determinaban la humedad de la tierra a 30 y 60 cm de profundidad. Del sistema de goteo se obtuvieron actuaciones satisfactorias en cuanto a la inclinación del huerto, utilizando apreciablemente menos agua en los años siguientes. El crecimiento de los árboles fue similar por los dos métodos. Sin embargo, la cantidad de frutos producida por árbol fue ligeramente mayor en los árboles en los cuales se utilizó aspersion, probablemente porque la tierra estaba mas húmeda.⁽¹⁾ El riego por goteo es un sistema muy apropiado para el cultivo del aguacate y actualmente está bastante difundido en

Israel, California y Europa. A continuación se sintetizaran las ventajas y los problemas a resolver empleando la irrigación por goteo en cultivos de aguacate:

- Ventajas

1. Economización de agua: La bomba central, el sistema de tubos y los goteros conducen y localizan el riego alrededor de la planta. Los goteos mantienen permanentemente un nivel de humedad, el bulbo de humedad, reduciendo al mínimo las pérdidas de evaporación (Fig. 12). Este riego localizado en la base de la planta reduce la superficie total de riego. En las plantaciones jóvenes se llega a regar el 10% de la superficie, y en cultivos adultos de aguacate se llega a un mínimo de 30 hasta 60% de la superficie total del huerto. El volumen del suelo mojado depende del tipo del mismo, de las condiciones ambientales (grados de evapotranspiración), del tiempo de riego y del número de goteros (por árbol y por hectárea). Los riegos pueden ser diarios, cada 3 días o semanales y el goteo evita un exceso de agua alrededor del árbol, evitando problemas de asfixia.

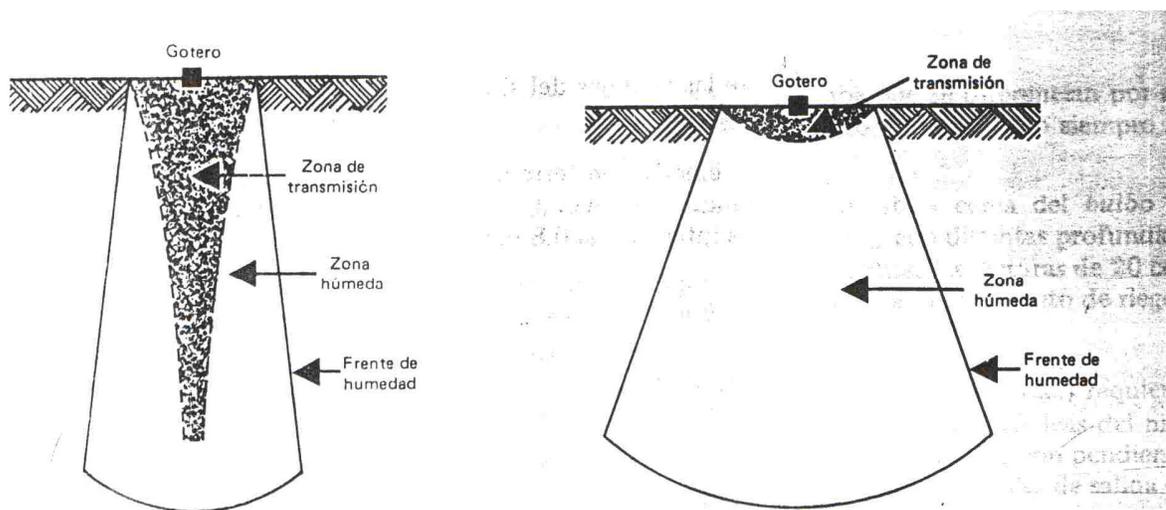


Fig. 12

Distribución de la humedad en distintos suelos a mediante irrigación por goteo.

2. Utilización de aguas salinas: El riego por goteo no permite el ascenso capilar de las sales; además, por controlar la evaporación, no se aumenta la concentración de éstas (Por ejemplo, si se produce mucha evaporación, es decir, pérdida de agua de la solución del suelo, la cantidad de sales aumenta proporcionalmente, de allí que manteniendo una humedad adecuada se puede controlar esta concentración.); utilizando aguas salinas la acumulación se efectúa lentamente por lo que se hacen lavados con grandes volúmenes de agua cada 6 ó 12 meses.
3. Fertilización por riego: El equipo de riego por goteo tiene adicionalmente un tanque de fertilización y un inyector que mezcla el agua de riego con los nutrientes que deben ser distribuidos localizadamente en la base de la planta; la uniformidad conseguida es alta y es posible dosificar correctamente, según las necesidades reales del aguacate. El ahorro de fertilizante es muy importante, principalmente el nitrógeno (urea o nitrato de amonio) que se aplica en pequeñas dosis disminuyendo las pérdidas por drenaje. La localización y dosificación oportunas aumentan la eficiencia del fertilizante utilizado. En California, donde el periodo de riego es de 8 meses (de marzo a noviembre), las cantidades de nitrógeno que se aplican con este sistema son (Tabla No. 10):

Edad del árbol (años)	Nitrógeno puro (g/árbol/año)	Urea (g/árbol/año)
1	45	15
2	90	25
3	150	40
4	225	65
5	450	125
Más de 5	680	185

A modo de ejemplo, en una densidad de 180 árboles/ha, con plantas de 4 años, se aplicarán por mes unos 11,700 gramos de urea (180 árboles por 65g), en este caso se añade esta cantidad de abono los meses en el tanque de fertilizantes del quipo; se recomienda reducir el tiempo de riego y luego inyectar el nitrógeno en cada aplicación.

4. Incremento de la producción de aguacate: La producción con el riego por goteo es notoriamente incrementada en cantidad y calidad, debido a la eficiencia del uso del agua y la fertilización, y a la anulación de periodos críticos para el cultivo. Los árboles de aguacate se presentan más vigorosos, el tamaño de los frutos es mayor, así como el porcentaje de aceite, lo que puede adelantar el inicio de la cosecha. Estos resultados obtenidos experimentalmente y en forma comercial en Israel y California son indicadores importantes de la potencialidad de este sistema de riego, actualmente extendido en muchas especies hortícolas y frutícolas.

- Desventajas

Este sistema, como cualquier técnica agrícola, también presenta problemas, los cuales tienen su solución, debiéndose evaluar en cada caso comparativamente con todas las alternativas posibles. Entre estas posibles desventajas se citan:

1. Alto costo inicial: Las inversiones iniciales son variables de acuerdo al tipo de cultivo, extensión, objetivos de producción, etc. Los equipos deben ser de buena calidad para que soporten las condiciones ambientales (las tuberías y goteros están en la superficie) y el comportamiento eficiente del campo. Se requiere una vigilancia constante para detectar las posibles irregularidades y lograr un mantenimiento adecuado del equipo.
2. Problemas técnicos: Un buen equipo debe garantizar un mínimo de obturación de goteros por taponamientos de origen orgánico (algas, bacterias, etc.), minerales (arcillas, arena, cieno, depósitos químicos) y

óxidos de hierro (desprendimiento de las cañerías principales, etc.). Este problema se soluciona con la limpieza adecuada de los goteros mediante presión (para los taponamientos orgánicos) y con ácidos fuertes (2% de clorhídrico en taponamientos de origen químico, con depósitos de carbonato de calcio, de fertilizantes insolubles, etc.). Es importante utilizar fertilizantes solubles para evitar los depósitos y obturaciones en tuberías y goteros (generalmente los problemas provienen de abonos fosfóricos poco solubles y de nitrato cálcico). Para el funcionamiento del sistema se empleará un buen equipo de filtración de agua, filtros de arena y cieno, filtros en las salidas principales de la red de tubos, filtros individuales, etc. A veces en los depósitos de agua pueden proliferar las algas, éstas pueden ser controladas químicamente con sulfato de cobre: 1 ppm; cloro: 2.5 ppm; simazine: 1 ppm. Cuando se utilizan aguas demasiado turbias se recomienda instalaciones de decantación.

4. METODOLOGÍA²⁷

4.1. TIPOS DE PROBLEMAS EN HIDRÁULICA DE DUCTOS A PRESIÓN

Los problemas en la hidráulica de tuberías simples se pueden clasificar de acuerdo con la variable desconocida en el problema. Las variables involucradas en estos problemas son las siguientes:

- **Variables relacionadas con la tubería en sí:** Diámetro de la tubería (d), longitud de la tubería (l) y rugosidad absoluta de la tubería (k_s).
- **Variables relacionadas con el fluido:** Densidad del fluido (ρ) y viscosidad dinámica del fluido (μ).
- **Variables relacionadas con el esquema del sistema:** Coeficientes de pérdidas menores de todos los accesorios necesarios, incluyendo válvulas (Σk_m).
- **Variables relacionadas con la energía impulsora del fluido:** altura entre el embalse de entrada y la salida (H) o potencia de la bomba (P).
- **Otras variables:** Aceleración de la gravedad (g) y caudal o velocidad media en la tubería (Q ó v)

Las variables que pueden ser desconocidas son el caudal, la potencia de la bomba que es necesario instalar para mover un determinado caudal, la rugosidad absoluta de la tubería o el diámetro de la tubería. Teniendo en cuenta la variable desconocida, los tipos de problemas son: comprobación de diseño, cálculo de la potencia requerida, diseño en sí de la tubería y la calibración de la tubería, los cuales se describen a continuación.

4.1.1. COMPROBACIÓN DE DISEÑO

En este tipo de problemas la tubería existe, lo cual implica que se conocen la longitud, su diámetro y su rugosidad absoluta (se conoce el material), al igual que todos los accesorios y sus coeficientes de pérdidas menores. Además, se conoce la energía

impulsora, ya sea una altura gravitacional o una bomba, y las propiedades del fluido (densidad y viscosidad dinámica).

La incógnita es el caudal que pasa por la tubería. Este problema es típico en el diseño de distribución de agua potable o redes de riego, en las cuales se hace un pre-dimensionamiento de los diámetros para luego comprobar si se cumplen o no las restricciones hidráulicas de caudal y presión en los nodos.

$$\begin{array}{ll} \textit{Variables conocidas} & \textit{Incógnita} \\ d, k_s, H \text{ (ó } P), \Sigma k_m, \rho, \mu, g, l & Q \text{ (ó } v) \end{array}$$

4.1.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA

Para estos problemas se conocen el caudal demandado, la tubería (tanto la longitud como el diámetro, la rugosidad absoluta, los coeficientes de pérdida menores de los accesorios) y las propiedades del fluido (densidad y viscosidad dinámica). Se tiene que calcular la potencia necesaria (bomba o diferencia de nivel) para mover dicho caudal a través de la tubería).

Este tipo de problemas se presenta cuando se requiere utilizar una tubería existente para mover un cierto caudal demandado y se desea conocer la bomba que debe ser colocada o la diferencia de nivel entre la entrada y la salida de la tubería.

$$\begin{array}{ll} \textit{Variables conocidas} & \textit{Incógnita} \\ d, k_s, Q \text{ (ó } v), \Sigma k_m, \rho, \mu, g, l & H \text{ (ó } P) \end{array}$$

4.1.3. DISEÑO DE LA TUBERÍA

En este caso se conoce el caudal demandado, la potencia disponible (bomba o diferencia de nivel generada por un embalse o tanque), algunas de las características de la tubería (longitud y accesorios necesarios con sus correspondientes coeficientes de pérdidas menores) y las propiedades del fluido (densidad y viscosidad dinámica). Se conoce el diámetro necesario para permitir el paso del caudal demandado. Este

diámetro usualmente debe escogerse dentro de aquellos en que se fabrique la tubería para un determinado material. Para el diseño, sin embargo, deben utilizarse los diámetros internos de las tuberías.

Por lo general, en cuanto al material de la tubería, se tienen tres o cuatro alternativas, lo cual implica que se conoce la rugosidad absoluta de la tubería pero que es necesario hacer tantos diseños como diferentes materiales se encuentren disponibles en el sitio del proyecto con el fin de escoger la mejor alternativa. El diseño de tuberías simples o de sistemas de tuberías se deben hacer tantas veces como materiales haya disponibles, utilizando para cada uno de ellos los diámetros comerciales en que se fabriquen.

<i>Variables conocidas</i>	<i>Incógnita</i>
$k_s, Q \text{ (ó } v), \Sigma k_m, \rho, \mu, g, l, H \text{ (ó } P)$	d

4.1.4. CALIBRACIÓN DE LA TUBERÍA

En este caso se conocen el caudal demandado, la caída en la altura piezométrica que ocurre entre la entrada y la salida de la tubería (usualmente medida de campo), algunas de las características de la tubería (longitud, diámetro y accesorios con sus correspondientes coeficientes de pérdidas menores) y las propiedades del fluido (densidad y viscosidad dinámica). Se desconoce la rugosidad absoluta de la tubería que produce esa caída en la presión piezométrica para el caudal medido.

En campo el caudal se mide usualmente a través de caudalímetros acústicos y la caída de presión por medio de transductores de presión. Cuanto más exactas sean estas mediciones, mejor será la precisión en el cálculo de la rugosidad absoluta de la tubería.

4.1.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA

En este caso todas las características de la tubería son conocidas, al igual que las del fluido. Se conoce el caudal demandado y se pregunta por la potencia requerida, ya sea

de origen gravitacional o mecánico; es decir por una diferencia topográfica de nivel o mediante el uso de una bomba.

Sin embargo para poder resolver el problema de la potencia requerida es necesario utilizar un método numérico con el fin de averiguar el valor del factor de fricción f de Darcy en la ecuación no explícita de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (1)$$

A fin de resolver la ecuación anterior para f existen muchos métodos numéricos, de los cuales se explican dos a continuación:

4.1.6. MÉTODO DE LA ITERACIÓN DE UN PUNTO

Este método es matemáticamente muy sencillo pero para resolver la ecuación de Colebrook-White requiere alrededor de diez iteraciones para converger. Para que este método pueda aplicarse, la función no explícita debe ser de la siguiente forma:

$$x = g(x) \quad (2)$$

El algoritmo se desarrolla de tal manera que el valor arrojado por la función $g(x)$ en la iteración i se utilice como argumento x en la iteración $i+1$. Si la aproximación inicial es suficientemente cercana a la raíz α , entonces el método será convergente si α es una raíz simple. Para el método de iteración de un punto, esto es cierto aun si la raíz no es simple, pero la convergencia es más lenta en ese caso. Sin embargo, en general no es posible demostrar que una función de iteración de punto converge a una raíz múltiple aun si las condiciones iniciales están arbitrariamente cerca de la raíz. Afortunadamente, para el caso de la ecuación de Colebrook-White, la raíz siempre es única.

En el caso de la ecuación de Colebrook-White, el método converge en 8 ó 10 aproximaciones y es muy sensible al valor inicial de f que se suponga (semilla). En el

diagrama de flujo mostrado a continuación (Fig. 13) se esquematiza el proceso seguido por el método de iteración de un punto.

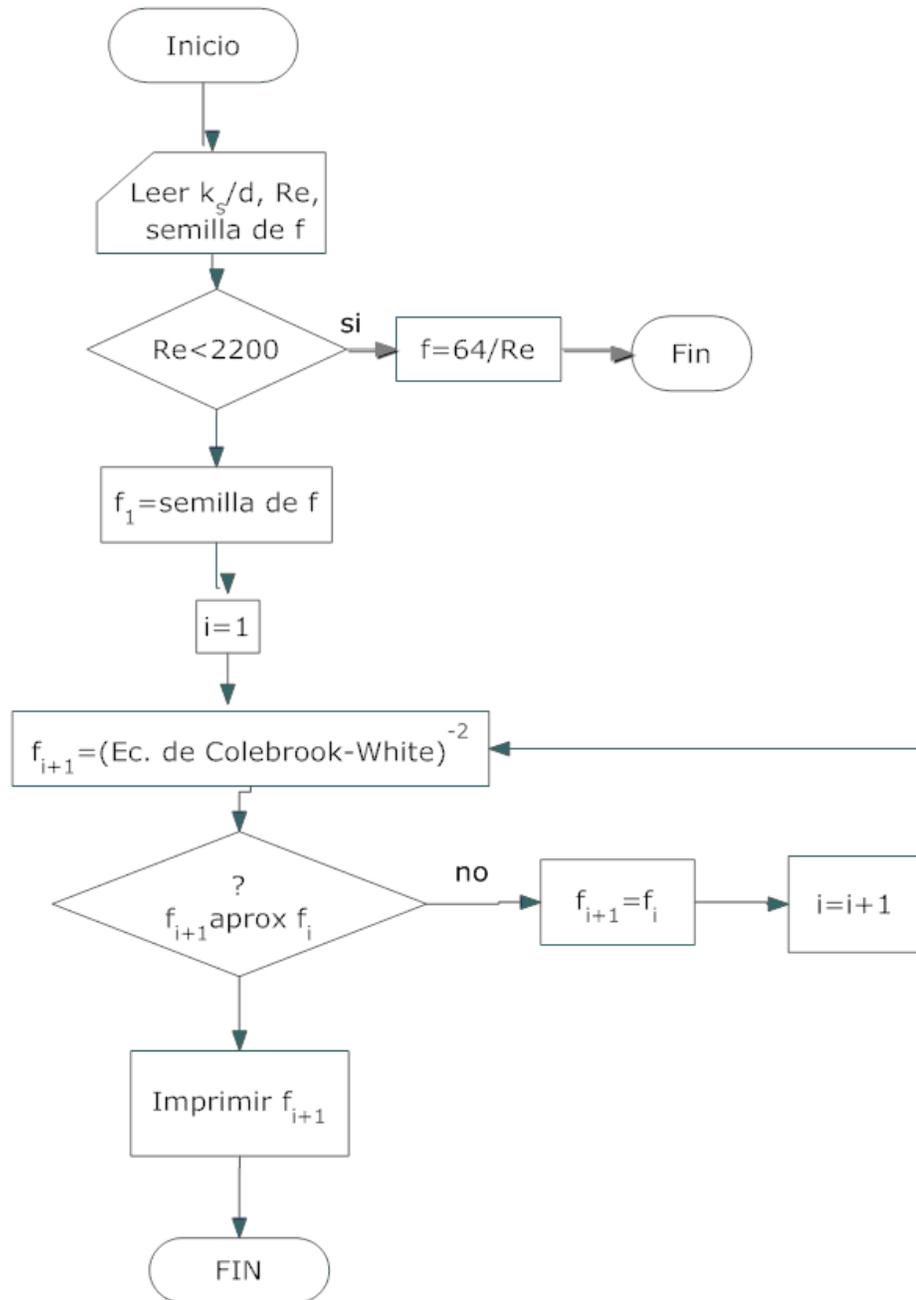


Fig. 13

Cálculo del factor de fricción por el método de iteración de un punto

4.1.7. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Este método es una aceleración del anterior, hecho que lo hace más conveniente cuando se requiere hacer una gran cantidad de cálculos de factores de fricción. Este caso es típico, por ejemplo, en la calibración de redes de distribución de agua potable. Por lo general se requieren sólo tres iteraciones para que el método converja, siendo útil cuando se desea reducir el tiempo de ejecución de un programa. Sin embargo, la libertad de la función $g(x)$ no es absoluta; debe cumplir las siguientes condiciones especiales para que exista convergencia:

- La primera es que exista un intervalo $I=(a, b)$, de modo que para todo x perteneciente a I , la función $g(x)$ esté definida y pertenezca a I , lo cual significa que $g(x)$ se aplica así misma. En el caso de la ecuación de Colebrook-White, para que la función no estuviera definida se necesitaría que el logaritmo no estuviera definido, caso imposible, ya que todos los términos dentro de la función logaritmo son positivos.
- La segunda condición es que la función de iteración $g(x)$ sea continua en I . Nuevamente la función logaritmo cumple este requisito.
- La tercera es que $g(x)$ sea diferenciable en I y que la pendiente de $g(x)$ sea siempre menor que 1 mayor de -1. La función mencionada es, en efecto, diferenciable y su pendiente es siempre mayor que -1, llegando a valores extremos ($Re=2000$, $k_s/d=0.00001$) a ser -0.0289. Para números de Reynolds grandes la pendiente de $g(x)$ tiende a cero, lo cual es menor que 1.

Teniendo en cuenta las anteriores condiciones, el método de Newton-Raphson para la ecuación:

$$x = g(x) \quad (3)$$

Por consiguiente:

$$g(x) - x = 0 \quad (4)$$

El valor de la aproximación a la raíz de la ecuación en la iteración $i+1$ se calcula con base en la aproximación de la iteración i de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$x_{i+1} = x_i \frac{g(x_i) - x_i}{g'(x_i) - 1} \quad (5)$$

Donde $g'(x)$ es la derivada de la función. Para el caso de la ecuación de Colebrook-White la variable x es el inverso de la raíz cuadrada del factor de fricción de Darcy:

$$x = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (6)$$

Por consiguiente:

$$g(x) = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51x_i}{\text{Re}} \right) \quad (7)$$

La derivada de esta función es:

$$g'(x) = -\frac{2}{\text{Ln}10} \left(\frac{\frac{2.51}{\text{Re}}}{\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51x_i}{\text{Re}}} \right) \quad (8)$$

El siguiente diagrama (Fig. 14) corresponde al método Newton-Raphson. La mayor velocidad de convergencia, ventaja de este método, no siempre se justifica debido a que su proceso de programación es más complejo, especialmente si se tiene en cuenta que cada día es mayor la velocidad de cálculo de las computadoras.

Una vez que se pueda calcular el factor de fricción de Darcy f en la ecuación de Colebrook-White, el cálculo de la potencia requerida en una tubería simple es bastante sencillo. En la Fig. 15 se esquematiza dicho procedimiento de cálculo.

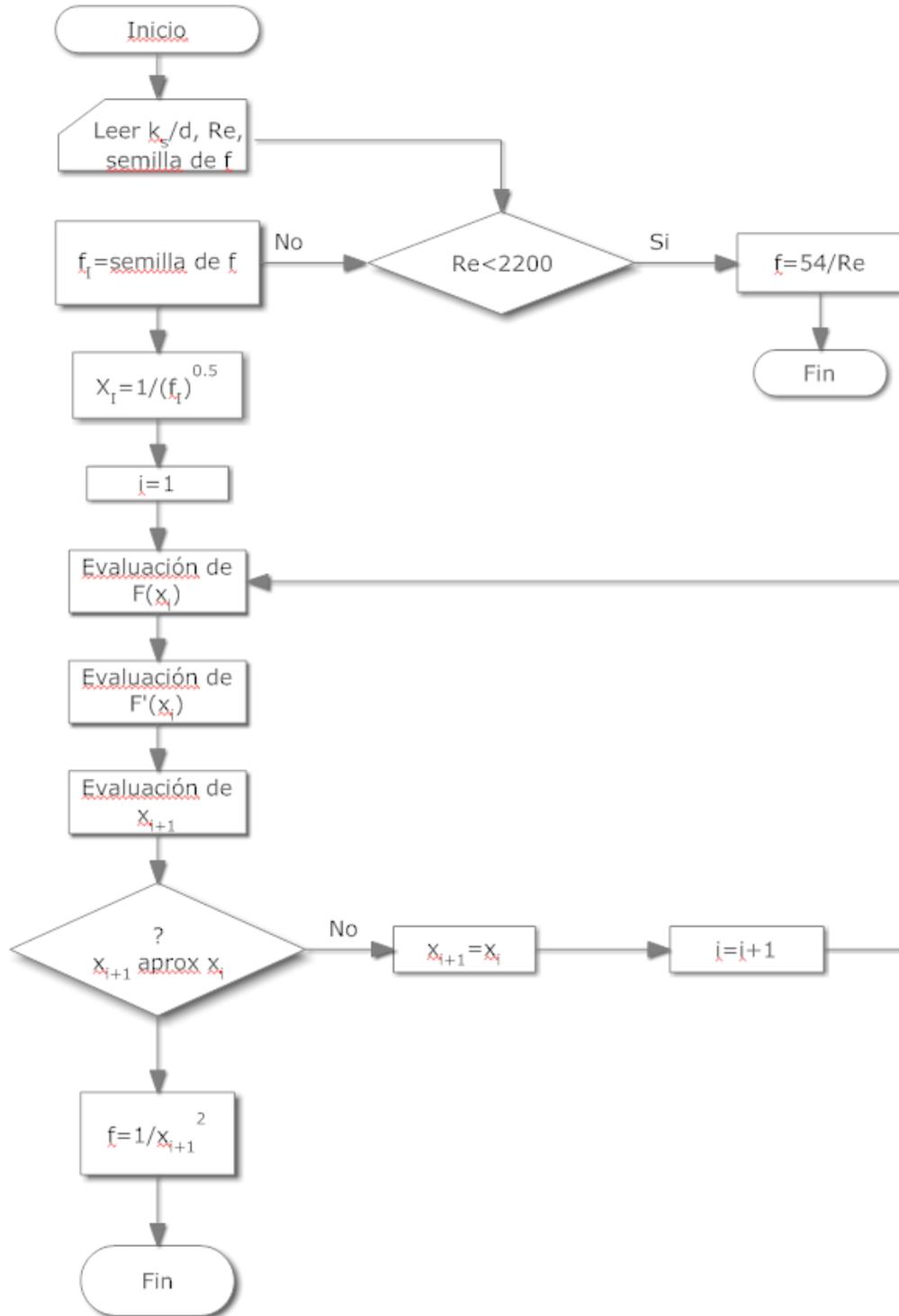
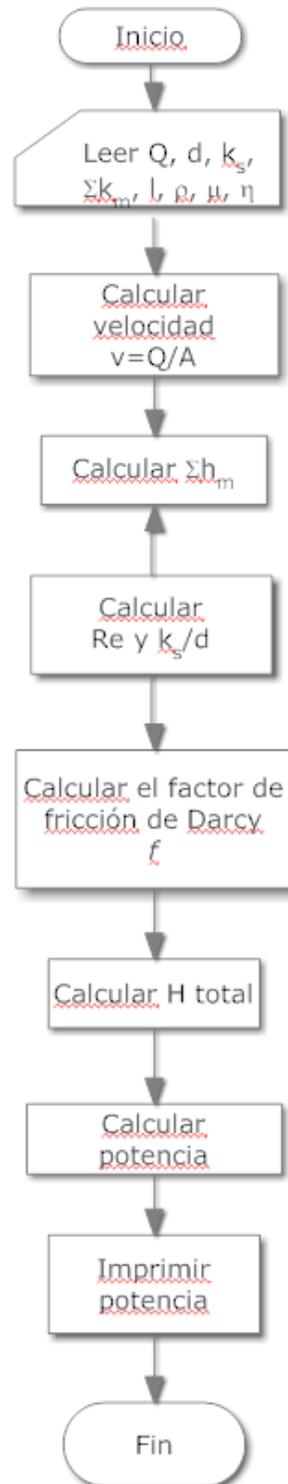


Fig. 14

Cálculo del factor de fricción por el método de Newton-Raphson.

**Fig. 15**

Cálculo de la potencia en tuberías simples.

Siguiendo el diagrama de flujo para el cálculo de la potencia requerida en tuberías simples mostrado en la Fig. 15, es necesario calcular el área transversal de la tubería, la velocidad media del flujo, el cálculo por pérdidas de fricción menores, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. A continuación se muestran las ecuaciones empleadas para estos propósitos.

Área transversal de la tubería (empleando el diámetro interno real de esta y no el nominal):

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (9)$$

Cálculo de la velocidad media (a partir del caudal que se requiere mover y el área transversal):

$$v = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Cálculo de las pérdidas de fricción menores, debido a accesorios y codos. Esta información se muestra en la Tabla No. 11.

$$\sum h_m = \left(\sum k_m \right) \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

Cálculo del número de Reynolds, considerando la viscosidad del fluido:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (12)$$

Cálculo de la rugosidad relativa, a partir de la rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías. Esta información se muestra en la Tabla No. 12-13.

$$\frac{k_s}{d} \quad (13)$$

El cálculo del factor de fricción de Darcy f se lleva a cabo con los algoritmos de iteración de un punto o de Newton-Raphson. Una vez calculado este factor, se procede al cálculo de las pérdidas por fricción utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach. Se procede con el cálculo de la altura total que debe ser producida por la bomba y la potencia de la bomba. La potencia real de la bomba debe ser mayor a la obtenida debido a que la eficiencia de este proceso es, a lo sumo, de un 80%.

Cálculo de las pérdidas por fricción utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

Cálculo de la altura total que debe ser producida por la bomba:

$$H = z_2 + h_f + \sum h_m \quad (15)$$

Cálculo de la potencia de la bomba:

$$Pot = \rho Q g H \quad (16)$$

En el momento de calcular la potencia requerida para un bombeo, es necesario tener en cuenta no solo la altura topográfica que es necesario vencer sino las pérdidas de energía causadas por la fricción y las pérdidas menores, así como la energía remanente al final del sistema. El cálculo de potencia se utiliza en ciertos tipos de cálculos en sistemas complejos de tuberías, así en estos no existan bombeos; es decir, este tipo de metodología se emplea para resolver problemas operativos en redes de distribución de agua, en redes contra incendios y en redes de riego.

El cálculo de potencia necesariamente hace uso de la ecuación de Colebrook-White con el fin de calcular el factor de fricción de Darcy. Este cálculo requiere algún método numérico que resuelva esta ecuación no explícita para dicho factor. Con las herramientas de tecnología de información y de cálculo que existen hoy en día, dicho cálculo es realmente sencillo.

4.2. ESPECIFICACIONES PARA LOS ACCESORIOS EN LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS

4.2.1. RUGOSIDAD ABSOLUTA

Para los cálculos presentados en esta tesis, el material de la tubería a utilizarse es de PVC.

Tabla No. 11	
Rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías	
Material	k_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC, PE	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero blindado	0.9-9.0

4.2.2. COEFICIENTES PARA PÉRDIDAS EN ACCESORIOS Y CODOS

Por lo general, el valor del coeficiente de pérdidas menores (K) es un valor empírico, deducido de pruebas en laboratorio. Sin embargo, algunos de los accesorios típicos de tuberías pueden ser analizados utilizando las ecuaciones de conservación de energía y conservación de momentum, con el fin de deducir sus coeficientes.

Las siguientes tablas muestran un resumen de coeficientes de pérdidas menores para accesorios de uso frecuente en sistemas de tuberías, los cuales deben utilizarse en todos los algoritmos de diseño presentados.

Tabla No. 12	
Coeficientes para pérdidas en accesorios	
Accesorio	K
Válvula de globo, completamente abierta	10.0
Válvula en ángulo, completamente abierta	5.0
Válvula de cheque, completamente abierta	2.5
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.2
Válvula de compuerta, con $\frac{3}{4}$ de apertura	1.00-1.15
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{2}$ de apertura	5.6
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{4}$ de apertura	24.0
Codo de radio corto ($r/d \pm 5.61$)	0.9

Codo de radio mediano	0.75-0.80
Codo de gran radio ($r/d \pm 5 \text{ a } 1.5$)	0.6
Codo de 45°	0.40-0.42
Retorno (curva en U)	2.2
T en sentido recto	0.3
T a través de la salida lateral	1.8
Unión	0.3
Y de 45°, en sentido recto	0.3
Y de 45°, salida lateral	0.8
Entrada recta a tope	0.5
Entrada con boca acampanada	0.1
Entrada con tubo reentrante	0.9
Salida	1.0

Tabla No. 13												
Valores de K para diferentes accesorios (Diámetro nominal en mm)												
	10	15	25	30	50	75	100	125	150	200- 250	300- 400	450- 600
Válvula de compuerta abierta	0.22	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10

Válvula de globo abierta	9.2	8.5	7.8	7.1	6.5	6.1	5.8	5.4	5.1	4.8	4.4	4.1
Codo estándar	0.80	0.75	0.69	0.63	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45	0.42	0.39	0.36
Semi codo estándar	0.43	0.40	0.37	0.34	0.30	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19
T en sentido recto	0.54	0.50	0.46	0.42	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24
T en sentido lateral	1.62	1.50	1.38	1.26	1.14	1.08	1.02	0.96	0.90	0.84	0.78	0.72

Para calcular la altura equivalente de la pérdida en accesorios se utiliza la siguiente ecuación

$$h_v = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (17)$$

Donde:

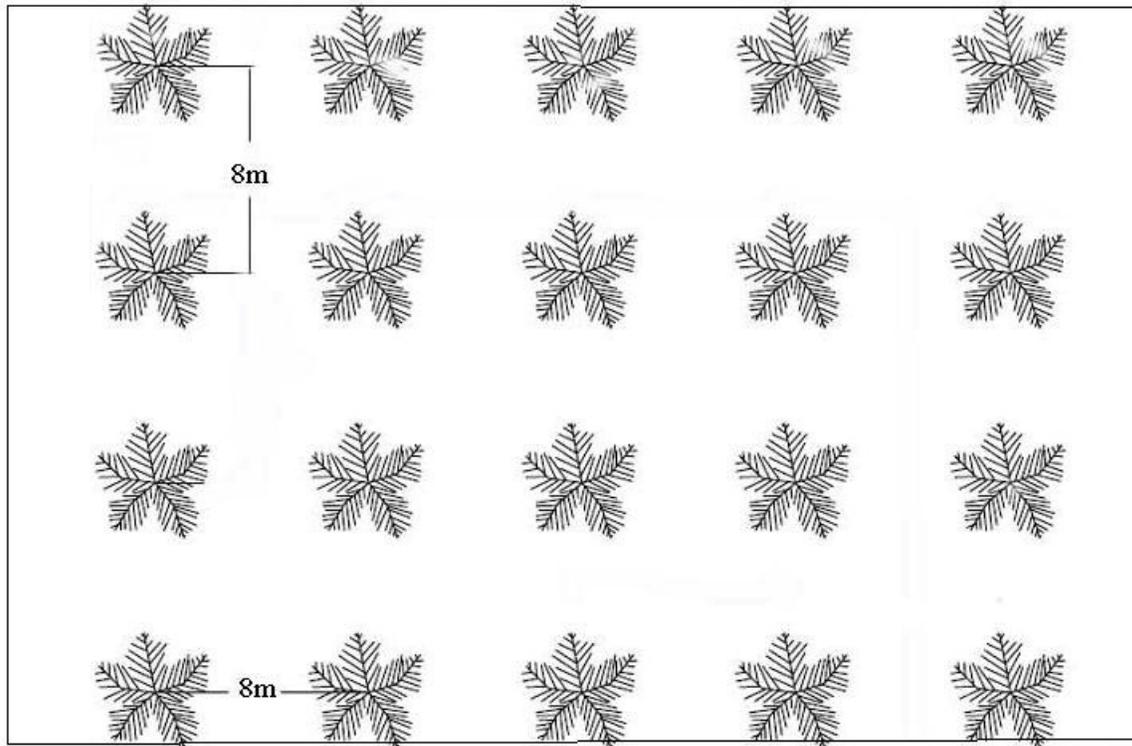
h_v = pérdida de carga localizada; V = velocidad media del agua, y K es el valor calculado en la tabla No. 13

4.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA HIDRÁULICO PARA LA HUERTA AGUACATERA ²¹

4.3.1. PARCELA

Se debe determinar cual será la superficie de la huerta tipo. Es necesario establecer una relación de largo y ancho, que permita desarrollar el sistema. El sistema de riego que se plantea debe de ser útil para el pequeño productor, por lo que se propone que el área de la parcela sea de 1000 m². Este es un tamaño pequeño, pensando justamente en el pequeño productor. El 38% de la superficie plantada en la región aguacatera de Michoacán corresponde a lotes de menos de 5 hectáreas.

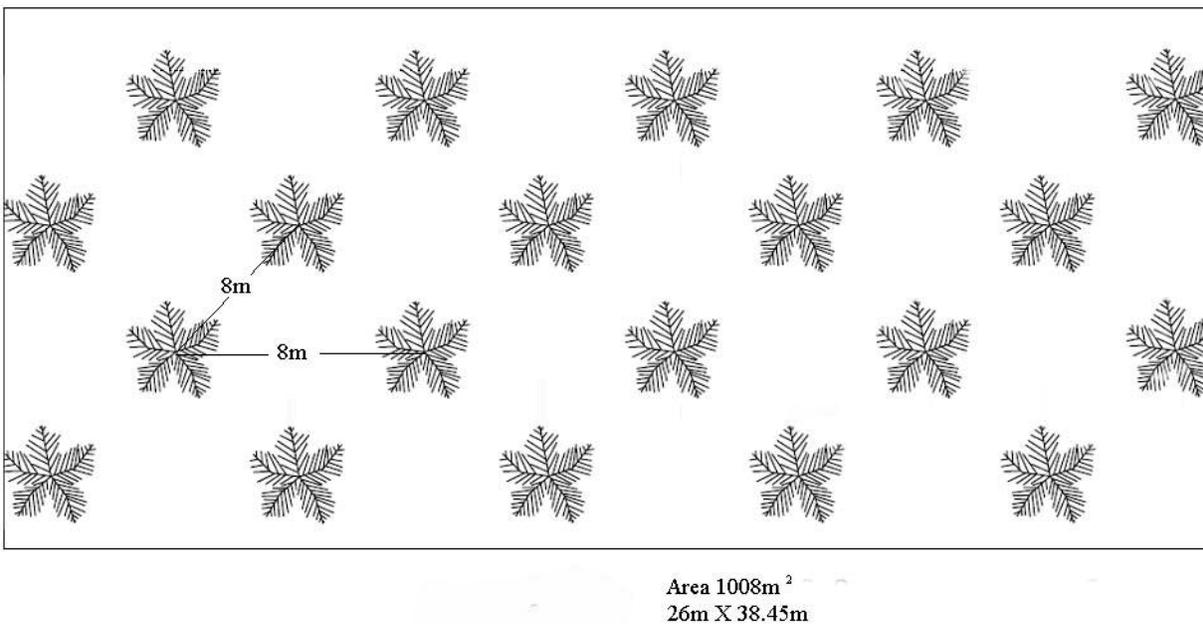
Para una superficie de 1000 m² se puede pensar en distintos arreglos buscando lograr un área que permita desarrollar el sistema y que pueda asemejarse a una parcela cualquiera. Si se considera que el ancho de la parcela sea de un metro como mínimo tenemos entonces que la longitud máxima sería de 1000 m. Por otro lado el mayor ancho posible se tiene cuando este es igual al largo, 31.6 m. Con una separación entre cada árbol adulto de 8 m (este espaciamiento es adecuado para la variedad de aguacate considerada, y utilizando esquemas a marco real y en tresbolillo se tiene que el número de árboles a plantar es aproximadamente de 20. Con un ancho de 26 m y una longitud de 38.46 m se pueden plantar 20 árboles adultos en marco real, tal como se muestra en la Fig. 16. Por otro lado, en la Fig. 17 se muestra, que para un acomodo de la huerta en tresbolillo, también se pueden plantar 20 árboles. El acomodo en tresbolillo permite en general plantar un mayor número de árboles que el marco real. Según las dimensiones del terreno se pueden plantar poco más de 10% adicionales. El marco real es recomendado para plantaciones con pendientes menores al 5%. Mientras que el acomodo en tresbolillo es sugerido para terrenos con pendientes de entre 5 y 15%. El sistema será contemplado para una plantación en marco real.



Area 1008m^2
 $26\text{m} \times 38.45\text{m}$

Fig. 16

Acomodo en marco real.

**Fig. 17**

Acomodo en tresbolillo.

4.3.2. VARIEDAD AGUACATERA

La productividad sostenida de la variedad Hass, así como sus características en relación a la facilidad de ser transportado hacen que sea la variedad de mayor producción y consumo en el territorio nacional. Así mismo, la calidad de su pulpa es muy buena, y los árboles son relativamente pequeños, lo que permite una densidad en población, que aumenta el rendimiento de la plantación. Por eso se considera para efectos de este estudio la variedad Hass.

El espaciamiento entre los árboles de aguacate varía de país a país y también según la región. Las distancias entre estos oscilan entre los 7 y los 10 metros. En México es común un espaciamiento de 8 m, ya sea en marco real o en tresbolillo.

4.3.3. REGIÓN

En el estado de Michoacán se encuentra una región aguacatera de gran importancia. La superficie de cultivo del aguacate michoacano representa más del 80 % de la superficie nacional. Desde 1981 el cultivo de aguacate en la región se ha incrementado enormemente. Pasando de un 32.4% a un 84.6% de la producción nacional para 1998. Esta región aguacatera comprende 21 municipios, entre los cuales se encuentran Tecámbaro, San Juan Nuevo, Tancintaro, Zitcuaro y Uruapan. Las características climáticas son realmente favorables en toda esta región, por lo que se ha escogido justamente esta región como la adecuada para la ubicación de nuestra plantación tipo. En particular, para este estudio se contempla la el municipio de Uruapan, pero se busca que sea aplicable de igual manera en toda la región aguacatera michoacana. En la Fig. 18 se muestran las principales regiones aguacateras del estado de Michoacán.

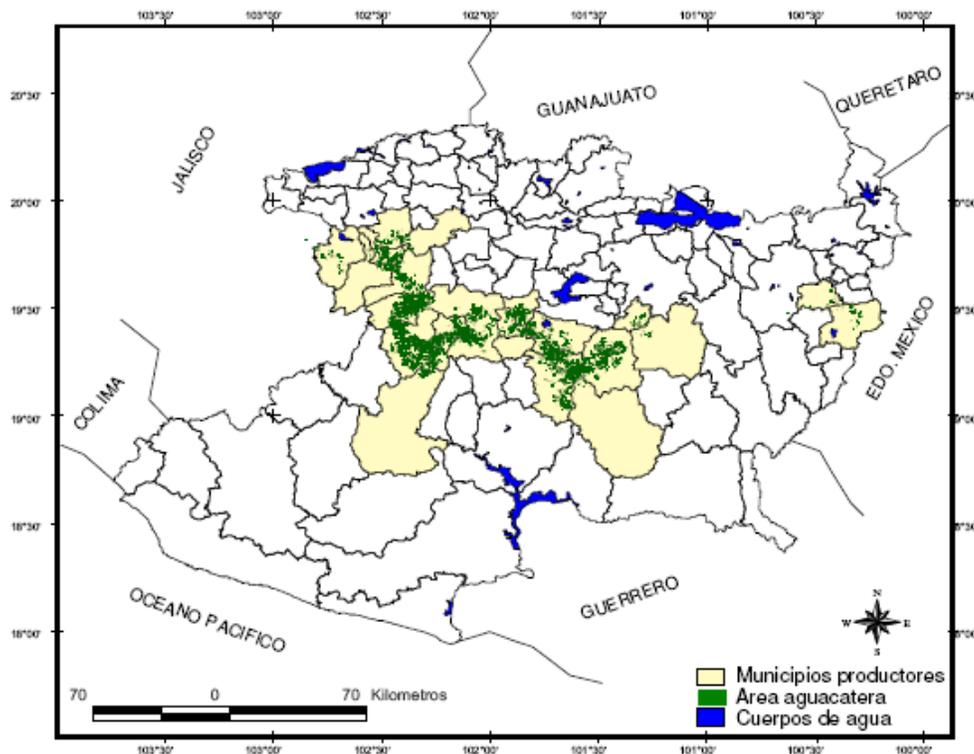


Fig. 18

Regiones aguacateras de Michoacán.

4.3.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS Y DE SUELO

Las condiciones agroambientales prevalentes en la región productora de Michoacán son propicias para el desarrollo favorable del árbol y la obtención del fruto a lo largo del año.

Con respecto a la altitud, el 77% de la región aguacatera se encuentra en buenas condiciones y el solamente el 23% en condiciones marginales. En cuanto a temperatura los datos son muy similares con un 76% en condiciones adecuadas por un 24% marginal. A continuación se presenta la Tabla No. 14, se muestran las características requeridas para el cultivo del aguacate.

Tabla No. 14			
Requerimientos buenos y marginales del desarrollo del aguacate			
Variable	Marginal mínimo	Óptimas	Marginal máxima
Altitud (msnm)	<1200	1600-2200	2200-2400
Temperatura (°C)	4-10	20-25	28-31
Periodo libre de heladas (no. de días)	---	Más de 360	---
Lluvia (mm)	---	600 más riego	---
Evaporación (mm)	650	1168	1600
Humedad relativa (%)	50	57-63	---
Tipo de suelo	---	Andosol y	---

		lluvioso	
Pendiente (%)	2	---	15

La Tabla No. 15, se analizan estas específicamente para la región aguacatera de Michoacán.

Tabla No. 15		
<i>Situación de la superficie aguacatera de Michoacán por condiciones óptimas y marginales para el desarrollo del aguacate</i>		
Variable	Óptima%	Marginal %
Altitud	77	23
Temperatura máxima	76	24
Temperatura mínima	60	40
Lluvia	100	
Humedad relativa	100	---
Tipo de suelo	86	14
Pendiente	88	12
Periodo libre de heladas	9% en condiciones de máximo riego	

Los suelos para el cultivo del aguacate en Michoacán son comúnmente de origen volcánico. Estos confieren propiedades hidráulicas de entre 50 y 20 mm/h de conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. Esta propiedad protege al sistema de enfermedades de la raíz ya que permite el desalojo de los excedentes de agua de la temporada de lluvias de Junio a Octubre. Así mismo favorece la rápida desecación del suelo y la pérdida de nutrimentos fuera de la superficie radical.

Es de suma importancia el manejo del agua en el cultivo del aguacate en Michoacán. Según la disponibilidad de esta puede variar la producción de fruta entre 6 y 12 toneladas por hectárea. Los requerimientos de agua del aguacate varían según la altitud de la plantación. La mayor parte de la superficie de cultivo de la región aguacatera se encuentra en condiciones óptimas, lo que reduce la cantidad de agua que se requiere para cada árbol.

4.3.5. REQUERIMIENTOS DE AGUA²²

Para la región de Uruapan, Michoacán, según la APROAM (Asociación Agrícola Local de Productores de Aguacate de Uruapan, Michoacán) las necesidades de agua por día por árbol de aguacate son de 3.2 mm (de lámina de agua). Dicha asociación proporciona la siguiente información (Tabla No. 16), en la que se muestran los requerimientos en litros de agua por semana según el tipo de riego.

Tabla No. 16				
<i>Volúmenes de riego en litros por árbol por semana de acuerdo con la edad de la plantación.</i>				
Edad (meses)	Goteo	Micro aspersión	Aspersión	Manguera
< 6	21	100	46	50
6-36	30	50	65	75
>36	60	35	170	200

La evaporación en Michoacán según el Sistema Meteorológico Nacional es de 1332 mm, información condensada en la Tabla No. 17²³.

Tabla No. 17
Evaporación total normal 1971-2000

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
93.4	104.4	153.8	165.1	159.6	109.3	96.6	96.1	87.0	94.4	87.3	85.1	1332.4

El riego en la región se utiliza para suplementar el agua de lluvia. Primordialmente en los meses de Enero a Junio en la época de estiaje. Se recomienda que se suplemente con 560 mm cada año, para satisfacer los requerimientos de agua del aguacatero. Esto es para árboles adultos en plena producción.

Los sistemas de riego por goteo pueden ayudar a limitar la evaporación debido a la mayor penetración del agua, sobre todo en cultivos en los que la cobertura (sombra) no es total. Sin embargo, existen muchas variantes en la instalación de un sistema de riego, por lo cual no es posible establecer un valor exacto. Debido a esto, los datos de evaporación no serán tomados en cuenta para los cálculos en este sistema de riego.

El sistema propuesto deberá tener la capacidad de proporcionar el agua requerida para una huerta con árboles adultos con más de 36 meses de edad.

4.3.6. EMISORES

Los emisores o goteros se clasifican de diversas maneras. A continuación se presenta un resumen de estos:

Según su instalación en la tubería:

- Interlinea: Estos emisores se instalan cortando la tubería e insertando el emisor directamente en la misma. Estos emisores están disponibles para distintos

diámetros de tubería e inclusive pueden ser encontrados previamente instalados en tramos de tubos.

- Intercalación (pinchados). Este tipo de emisor es instalado en la tubería en un orificio realizado con un sacabocados. También están disponibles para distintos diámetros de tubería.
- Integrados: Estos emisores son implantados en la tubería durante la instalación. Tienen distintos espaciamientos y caudales. Los emisores integrados van termo soldados en el interior de la tubería. Es común que estos emisores vengan en distintos diámetros a los convencionales de las tuberías, por lo que comúnmente requieren adaptadores de conexión especiales.

Según su comportamiento hidráulico

- Estándar (normales): Estos emisores permiten un mayor flujo de agua al aumentar el caudal. Pueden ser de conducto largo, orificio o laberinto.
- Conducto largo: Existen distintos emisores de este estilo, el tipo mas común es el de microtubo. Éste consta de un tubo de polietileno de diámetro pequeño (0.6mm a 2mm) y longitud variable. Son emisores de alta sensibilidad a las variaciones de temperatura; y a variaciones de presión, entre otros inconvenientes. Sin embargo, son muy populares debido a que su costo es bajo.
- Laberinto: En estos emisores el agua es forzada a viajar por numerosos conductos, que hacen que el régimen de flujo de agua sea turbulento. Debido a su diseño son poco sensibles a variaciones en la temperatura, presión y obturaciones.

- Helicoidales; Estos son emisores compactos en los que el agua sigue una trayectoria helicoidal. Al igual que en los emisores tipo laberinto esto limita la sensibilidad a las variaciones comunes.
- Orificio: El origen de la irrigación por goteo es por medio de pequeños orificios en la tubería misma. Este sistema no permite regular adecuadamente el caudal de irrigación. Existen emisores en los que se utiliza ese mismo principio donde el agua sale a través de un orificio en un emisor de polipropileno (comúnmente). Sin embargo presenta los mismos inconvenientes que los encontradas cuando la tubería es perforada directamente.
- Vortex o inestable (Fig. 19): Estos emisores parten de un emisor tipo orificio, pero el agua después entra en una cámara de forma tangencial, dando lugar a la formación de un vórtice.



Fig. 19

Emisor tipo vortex.

- Turbulentos o autocompensantes (Fig. 20): En estos emisores el caudal permanece relativamente constante sin importar que varíe la presión de entrada. Estos emisores son recomendados en sistemas con variaciones

topográficas considerables o con grandes caídas de presión. Los emisores cuentan con un intervalo de compensación, que es un rango de presiones en los cuales pueden operar.



Fig. 20

Emisor tipo autocompensante.

- Autolimpiantes: Existen dos tipos de emisores autolimpiantes unos trabajan al iniciarse el sistema, y dejan de trabajar (limpiar) al alcanzarse la presión de operación. Los otros trabajan continuamente, permitiendo la expulsión de partículas relativamente grandes del sistema.

Para el diseño del sistema de riego para nuestra huerta es recomendable que el diseño permita variantes en las pendientes del terreno, dimensiones del lote, arreglo de la huerta, etc. Para permitir esta flexibilidad en el diseño es importante que los emisores puedan operar a distintas presiones y temperaturas sin modificar significativamente el caudal. Por lo que se consideraran emisores tipo vortex o turbulentos. Esto permite que la huerta tipo se adapte a posibles cambios de pendiente entre otras ventajas. Si el huerto tiene variaciones de elevación de un metro o menos y la estructura es similar a la del diseño tipo se podrán utilizar emisores helicoidales para reducir el costo de instalación.

Existen goteros autocompensantes de 2, 4 y 8 litros por hora. Buscando que la instalación del sistema sea sencilla, se emplearan emisores de 4 l/h que son los más comunes.

El número de goteros por árbol se determina de acuerdo con la siguiente formula:

$$N = \frac{\textit{Superficie.real.de.riego.por.árbol}}{\textit{Superficie.regada.por.un.gotero}} \quad (18)$$

La superficie real de riego por árbol es el porcentaje de la superficie de las raíces de este que debe ser regada. En el 50% de la superficie que ocupan las raíces la concentración de estas es de 3 a 4 veces superior al resto de la misma. La superficie real de riego por árbol depende del tipo de cultivo. Para el caso de cultivos de marco amplio, entre los cuales se encuentra el aguacate, un valor de 25 al 35% es adecuado ⁽²⁴⁾. Si utilizamos un valor intermedio en este rango, la superficie de riego real queda entonces como:

$$\textit{Superficie.real.de.riego.por.árbol} = \textit{Superficie.de.cada.árbol}(0.30) \quad (19)$$

La superficie de cada árbol para nuestra plantación es de 64 m².

De aquí tenemos que

$$\textit{Superficie.real.de.riego.por.árbol} = 64(0.30) = 19.2\text{m}^2 \quad (20)$$

La superficie regada por un gotero se refiere al área que es mojada por cada gotero. Para determinarla es necesario considerar el tipo de suelo (Tabla No. 18), la capacidad de campo, así como la velocidad de infiltración. Es preferible realizar pruebas en el terreno para verificar la superficie mojada por el gotero.

Tabla No. 18		
<i>Cantidad de agua que retienen los diferentes tipos de suelo</i>		
Suelos	Porcentaje de agua retenida	Permeabilidad máxima mm/h
Arenosos	4.1-5.8	19
Arenosos francos	5.8-9.1	12.7
Franco-arenosos	6.6-11.6	10.9
Franco	8.3-16.6	8.9
Franco-limosos	10-15	7.6
Franco-arcillosos	10.8-17.5	6.4
Arcillo-limosos	11.6-20.8	5
Arcillosos	11.6-20	3.8

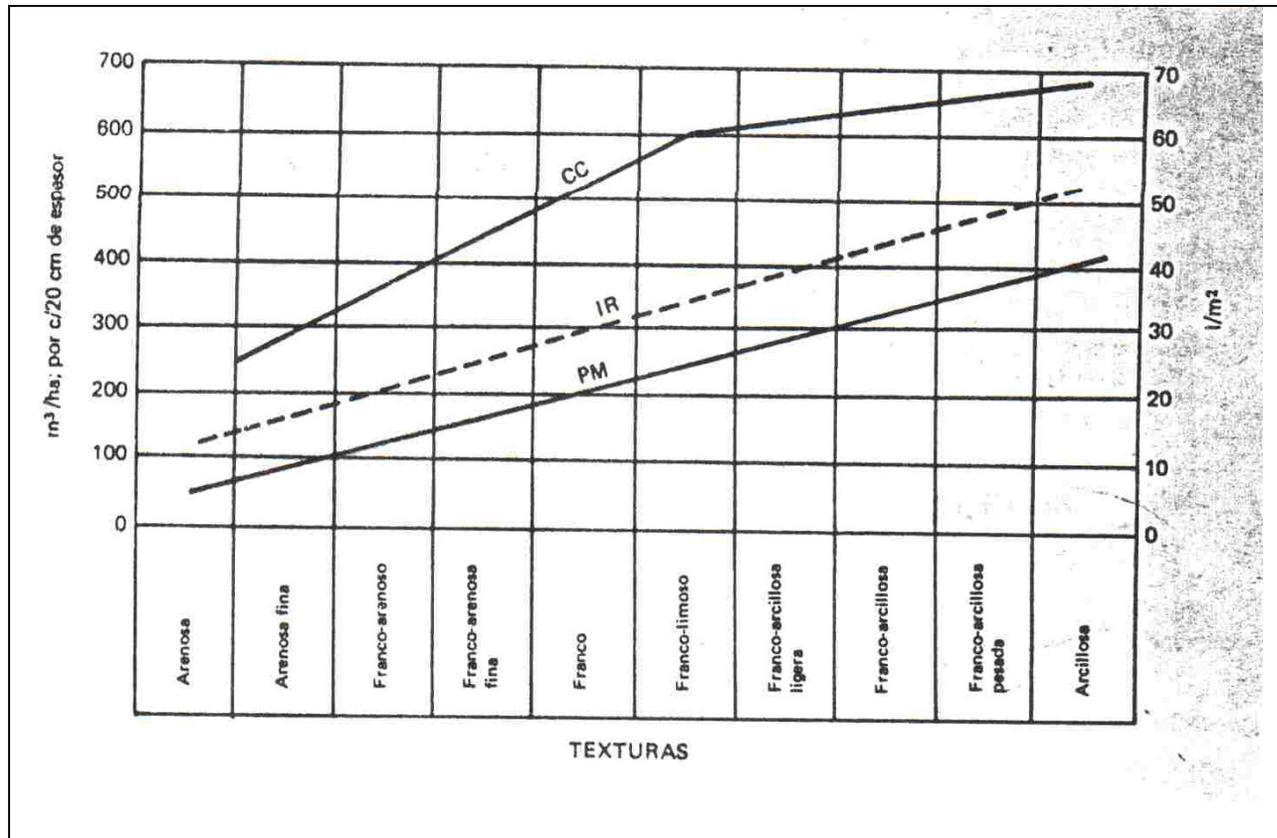
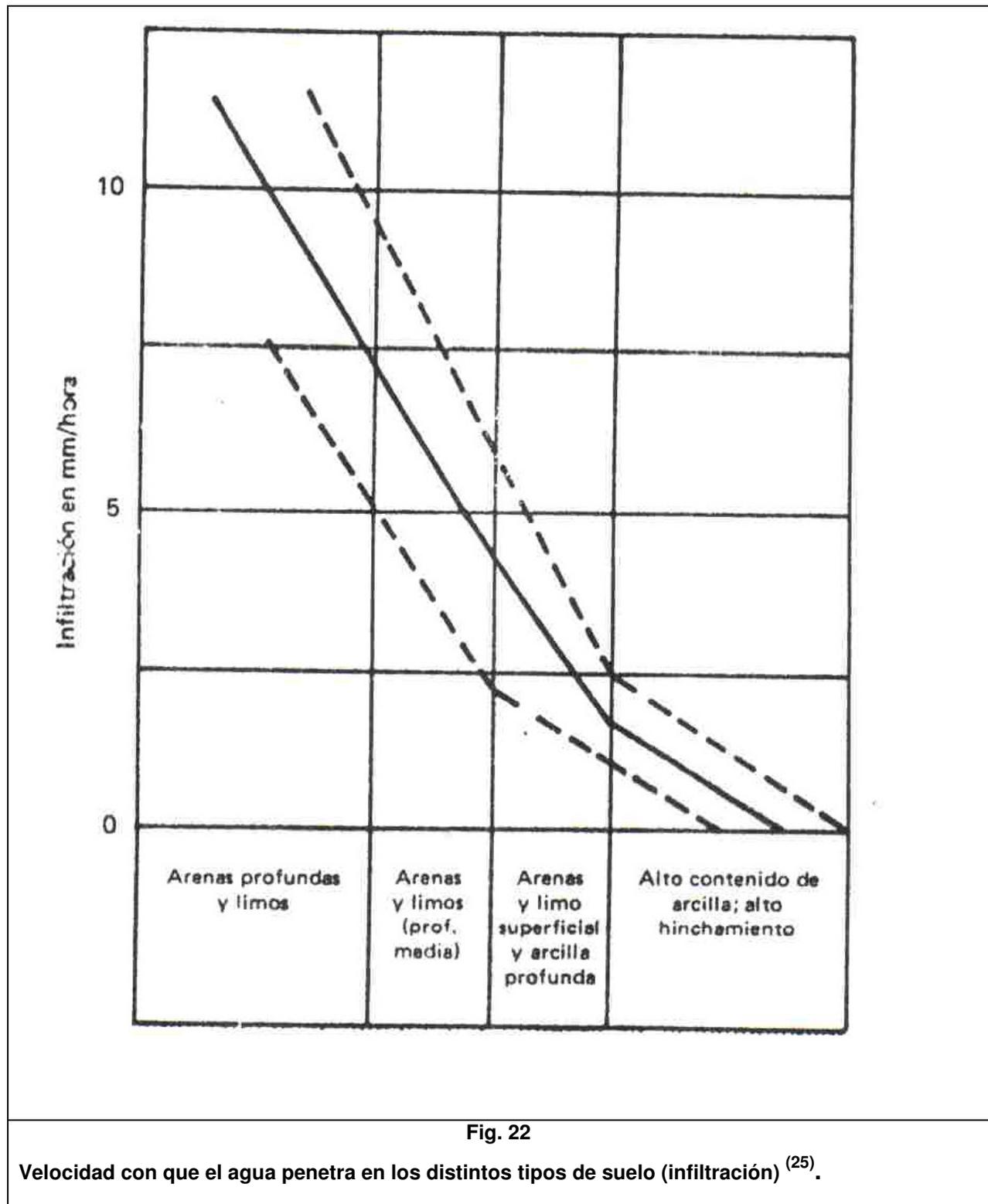


Fig. 21

Volumen de agua que contiene cada tipo de suelo cuando se halla a la capacidad de campo y en el punto de marchitez ⁽²⁵⁾.



Al ser la textura un valor que puede variar según las condiciones particulares de la parcela es recomendable utilizar una textura media podemos considerar la velocidad de infiltración como 2.5mm de agua/h, según los datos de la figura 17.

Dado que las raíces del árbol de aguacate son superficiales los datos de la **tabla No. 16** ⁽²⁶⁾ para una textura media y un suelo en capas, vemos que el diámetro mojado por nuestro gotero puede ser 1.7m.

Textura - profundidad de raíces		Homogéneo	Estratificado	En capas
Ligera	0.8 m	0.5	0.8	1.1
Media		1	1.25	1.7
Pesada		1.1	1.7	2.0
Ligera	1.7 m	0.8	1.5	2.0
Media		1.25	2.25	3.0
Pesada		1.7	2.25	2.5

Como sabemos el área de un círculo se puede calcular de acuerdo a la ecuación (9)

Dado que el diámetro es 1.7m tenemos que:

$$A = \frac{\Pi 1.7^2}{4} = 2.3 \text{ mm}^2$$

Esta área es la superficie mojada por un gotero. Con este dato podemos determinar el número de goteros por árbol.

$$NG = \frac{\text{Superficie real de riego por árbol}}{\text{Superficie regada por un gotero}} \quad (21)$$

El flujo de agua por árbol es determinado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_A = NG \cdot Q_E \quad (22)$$

Donde Q_E es el flujo de cada gotero y NG es el número de goteros por árbol

Y el gasto de agua del sistema se calcula con este valor y el número de árboles en la huerta (Ar) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_S = Ar \cdot Q_A \quad (23)$$

5. RESULTADOS

5.1. CÁLCULO DEL GASTO

El gasto de agua del sistema se determina utilizando las ecuaciones 21, 22 y 23. En la tabla 20 se muestran el gasto del sistema, así como el número de goteros por árbol.

Tabla No. 20		
GASTO TOTAL DEL SISTEMA		
Q_s	0.0002	m^3/s
NG	9	plantas

5.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA

5.2.1. CÁLCULO DEL NUMERO DE REYNOLDS

El cálculo de potencia de bomba necesariamente hace uso de la ecuación de Colebrook-White con el fin de calcular el factor de fricción de Darcy. Este cálculo requiere algún método numérico que resuelva esta ecuación no explícita de dicho factor. Con las herramientas de tecnología de información y de cálculo que existen hoy en día, dicho cálculo es realmente sencillo. Para fines de la resolución de este problema de diseño se desarrolló una hoja electrónica en Excel, en la cual se usa el método de Newton-Raphson. Es importante tener en cuenta que en el momento de programar este procedimiento debe existir una homogeneidad dimensional; en este caso se utilizó el sistema internacional.

Este problema de diseño es un problema en el cual se necesita calcular la potencia de bombeo requerida, ya que se conoce el caudal demandado (de acuerdo a los estudios de tipo de suelo, clima, etc.), la tubería y las propiedades del flujo. La Tabla No. 21 muestra las propiedades de flujo.

Tabla No. 21			
DATOS DEL AGUA (@20 °C)			
Densidad	ρ	998.2	kg/m^3
Viscosidad dinámica	η	1.01E-03	$Pa*s$
Viscosidad cinemática	$\nu = \eta/\rho$	1.01E-06	m^2/s

Las características de la tubería se muestran en la Tabla No. 22 y en la Tabla No. 23. Para todos los cálculos se utilizó el diámetro interno real de la tubería y no el nominal.

Tabla No. 22 CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS			
diámetro interno real de la tubería (no nominal)	D	0.0254	m
Área transversal de la tubería	A	0.00050671	m ²
Caudal de agua a remover	Q	0.0002	m ³ /s
Velocidad media del flujo de agua	V	0.39470505	m/s
Número de Reynolds	Re	9.96E+03	

Tabla No. 23 DATOS DE LA TUBERÍA			
Longitud de la tubería	d	100	m
Rugosidad absoluta de la tubería (PVC)	Ks	1.50E-06	m
Rugosidad relativa	Ks/d	1.5E-08	

5.2.2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN ACCESORIOS

En el momento de calcular la potencia requerida para un bombeo, es necesario tener en cuenta no solo la altura topográfica que es necesario vencer sino las pérdidas de energía causadas por la fricción y las pérdidas menores, así como la energía remanente al final del sistema. La Tabla No. 24 muestra las pérdidas menores por accesorio y de acuerdo al número de estos.

Tabla NO. 24 PÉRDIDAS POR ACCESORIOS (Km)					
Accesorio	No. de accesorios	Km	ΣKm	h _v	
Válvula de compuerta, completamente abierta	1	0.2	0.2	0.00158809	m
Codo de 90°	5	0.96	4.8	0.03811427	m
T en sentido recto	13	0.3	3.9	0.03096784	m
Unión	10	0.3	3	0.02382142	m
Goteros	20		0	0	m

Salida	1	1	1	0.00794047	m
Filtro	1	0.7032	0.7032	0.00558374	m
Válvula de globo	1	5.4	5.4	0.04287855	m
T en sentido lateral	1	0.96	0.96	0.00762285	m
	hv	hv		0.15851725	m

5.2.3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

El valor de la semilla f para el factor de fricción fue de 0.001, y a pesar de que este valor estaba bastante lejos del valor real obtenido ($f=0.082$), mostrados en la Tabla No. 25, el método convergió muy rápidamente.

Tabla No. 25 CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN	
f (semilla)	0.001
Tolerancia del error	1.00E-06
Factor de fricción (f)	0.04807479

Para la resolución de este problema de diseño, la Tabla No. 26 muestra a detalle el proceso de convergencia en el cálculo del factor de fricción mediante el método Newton-Raphson. Para la convergencia de dicho método numérico fue necesario realizar 10 iteraciones, con el fin de asegurar que el error de la función tuviera un valor de 1×10^{-6} , que fue el límite de la tolerancia establecida. Es necesario precisar, que cuando se hagan cambios en el caudal o en la rugosidad absoluta del material, el proceso de convergencia cambia, en cuanto a lo referente al número de iteraciones requerido.

Tabla No. 26 NEWTON-RAPHSON					
X	F(X)	F'(X)	X_{i+1}	ERROR	f
31.6227766	1.19696835	-0.02746718	2.01033854	29.61243807	0.24743527
2.01033854	5.98388811	-0.43205759	4.78505208	-2.774713542	0.043674371
4.78505208	4.47742107	-0.18152071	4.52468338	0.260368693	0.048845393
4.52468338	4.5746149	-0.19196611	4.56657343	-0.041890045	0.047953367
4.56657343	4.55860591	-0.19020518	4.55987919	0.006694242	0.048094269
4.55987919	4.56115434	-0.19048441	4.56095031	-0.001071123	0.048071682
4.56095031	4.56074633	-0.19043968	4.56077896	0.000171353	0.048075294
4.56077896	4.56081159	-0.19044683	4.56080637	-2.74131E-05	0.048074716
4.56080637	4.56080115	-0.19044569	4.56080199	4.38553E-06	0.048074809
4.56080199	4.56080282	-0.19044587	4.56080269	-7.01594E-07	0.048074794

Una vez calculado el factor de fricción f , se procedió con el cálculo de las pérdidas por fricción utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach (Tabla No. 27):

Tabla No. 27 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN		
hf	1.50289997	m

5.2.4. CÁLCULO DE LA CARGA DE LA BOMBA

Se calculo la altura total de la carga de bomba que debe ser producida por la bomba (Tabla No. 28). Como el sistema es abierto es necesario considerar la posible diferencia de alturas en la entrada y salida de la tubería. La altura Z2 se determinó con una longitud de parcela de 40 metros y una pendiente de 5%.

Tabla No. 28 CÁLCULO DE LA CARGA DE LA BOMBA		
Z2	2	m
H	3.66142	m

5.2.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA

La potencia que efectivamente debe transmitir la bomba al flujo se muestra en la Tabla No. 29.

Tabla No. 29 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA		
Pot	7.1707	W

La potencia real que la bomba debe tener debe ser mayor aproximadamente un 20%, considerando otro tipo de pérdidas por fricción (Tabla No. 30).

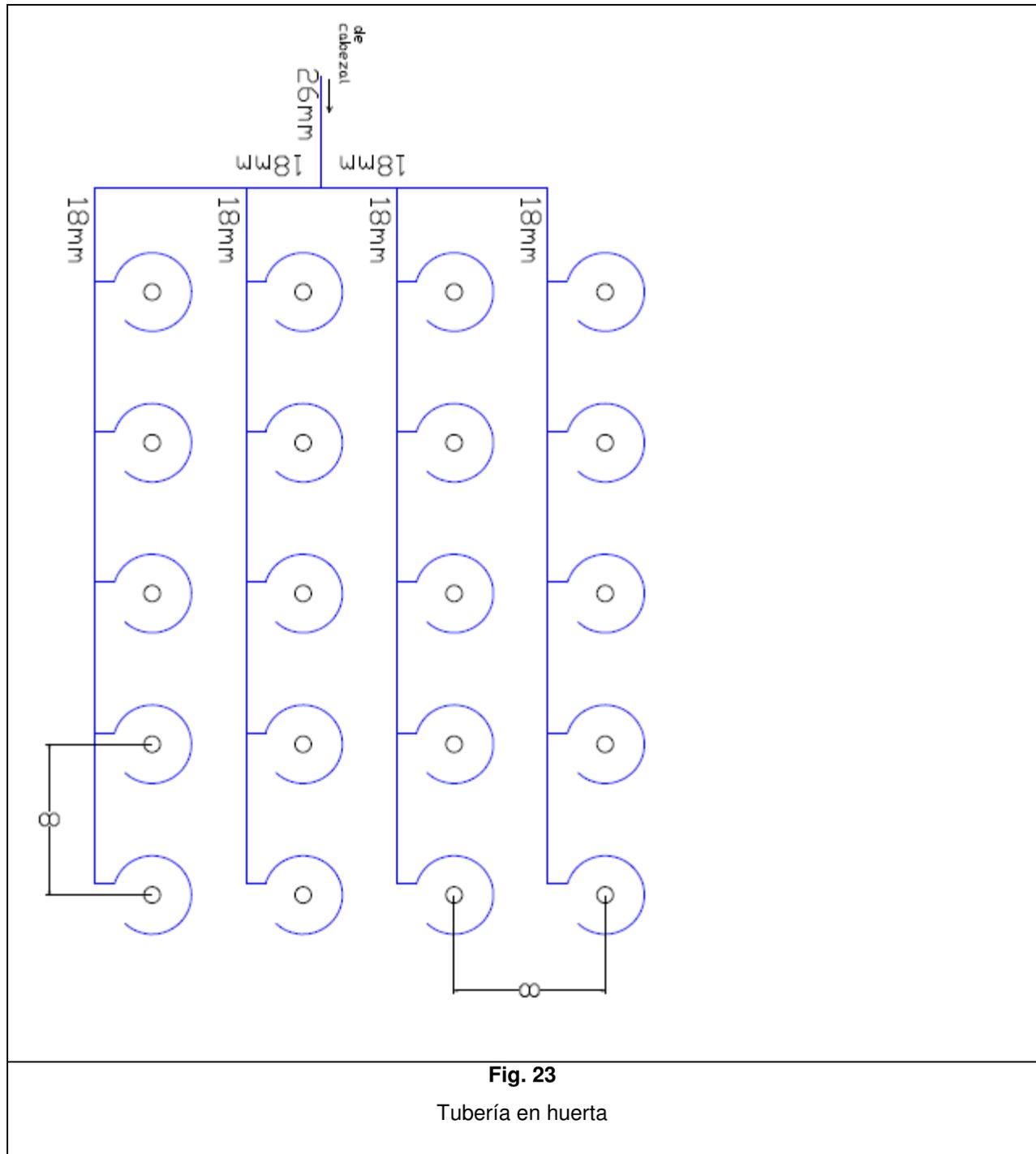
Tabla No. 30 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA (+20%)		
Pot	8.6049	W
Pot	≈0.25	HP

La selección de la bomba se realiza con los datos de carga en la tabla No. 28 y el gasto total del sistema (tabla No. 20). La selección de la bomba debe de ser verificada por el proveedor. Se estima que una bomba de un cuarto de caballo de fuerza (tabla No. 30) debe ser adecuada para el sistema tipo propuesto. Como referencia se muestra la potencia de la bomba como 0.25 caballos de fuerza.

5.3. SISTEMA DE RIEGO

5.3.1. TUBERÍA

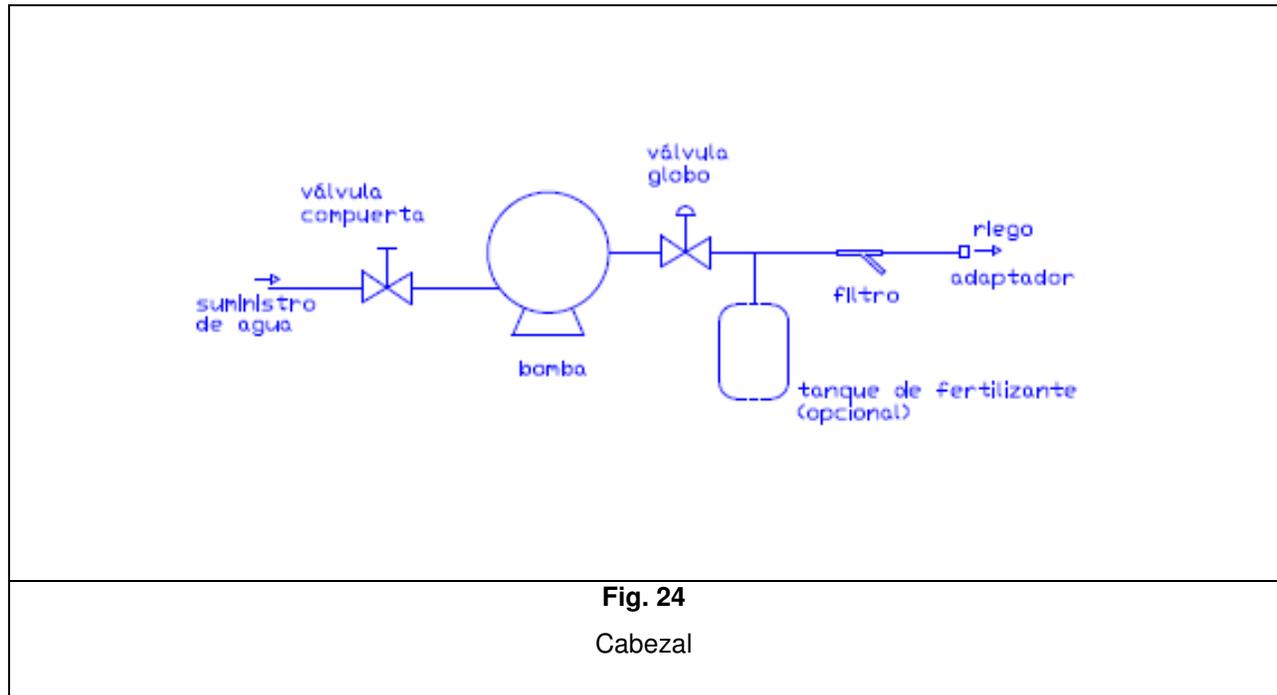
El esquema de distribución de la tubería se representa en la figura 23. Se puede apreciar en la figura que el sistema permite flexibilidad. Si se separan en dos el número de árboles de la huerta, ambas pueden ser alimentadas conservando el diámetro nominal de tubería.



5.3.2. CABEZAL

El cabezal del sistema cuenta con una bomba, un filtro, y válvulas. Este se muestra en la figura 24. No se contempló la fertilización del huerto a través del sistema de riego, pero se muestra la ubicación del tanque en el cabezal como referencia. El cabezal se

puede realizar con tubería rígida tipo PVC. La tubería flexible de polietileno puede ser colocada después del filtro con un adaptador.



Debido a que el gasto y la presión del sistema son relativamente bajos, es posible que el agricultor cuente con alimentación de agua a presión suficiente para el sistema sin la necesidad de una bomba. En dado caso el cabezal se alimenta directamente de la tubería según la figura 25.

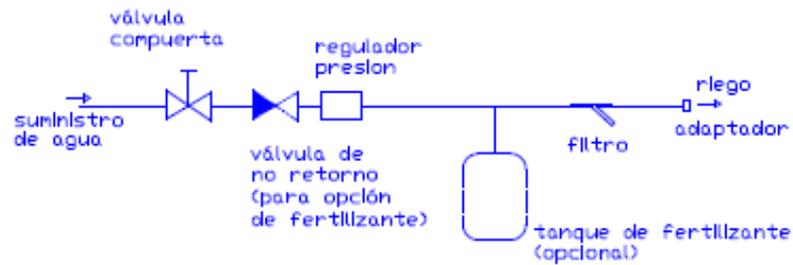
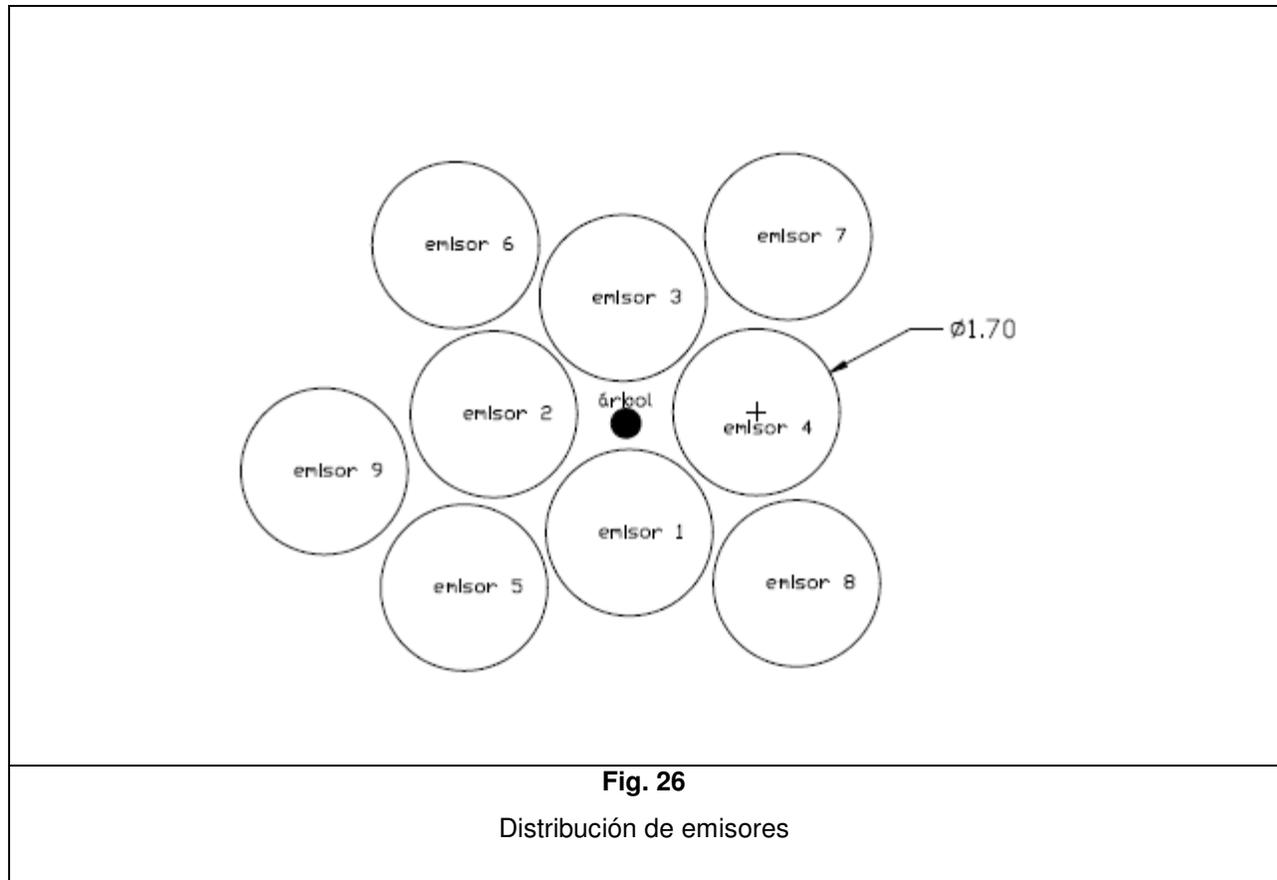


Fig. 25

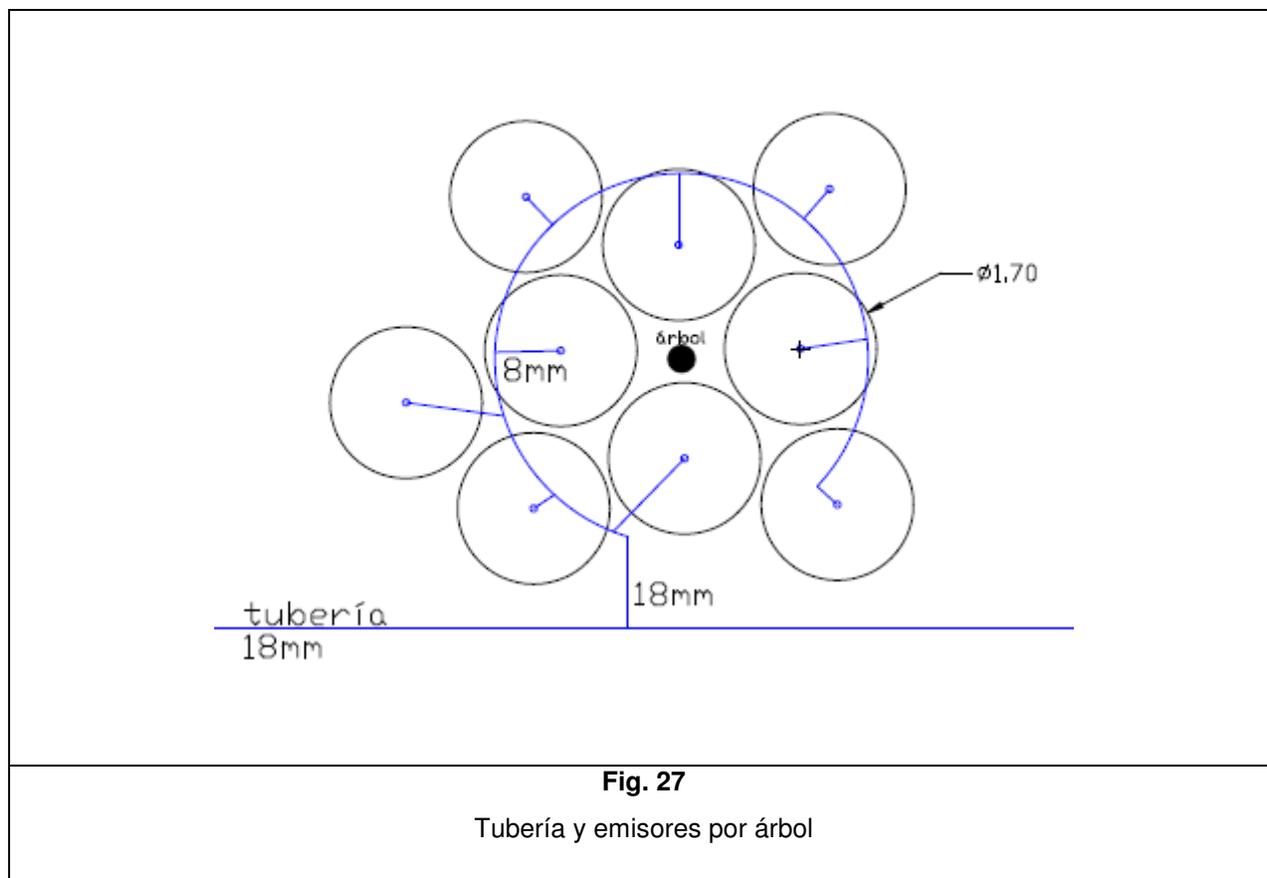
Cabezal (alternativa sin bomba)

5.3.3. EMISORES

El diámetro mojado por cada gotero se determinó según la tabla No. 19 como 1.7m. La figura 26 representa la distribución de los emisores alrededor del tronco del árbol. Es importante permitir el espacio suficiente entre goteros, para así evitar que se empalmen las superficies mojadas. La distancia mínima entre dos goteros debe ser justamente 1.70m. El diámetro de la tubería del cabezal se recomienda sea determinado por la bomba. Es probable que esta cuente con conexiones de 25mm.



La tubería se distribuye alrededor de cada árbol. De esta se puede alimentar cada emisor con tubo de 8m. Si la compra de tubo PE-18 en rollo resulta más económica que comprar tubería en dos tamaños (PE-08 y PE-18) se puede alimentar los emisores con esta. La distribución de la tubería tipo y la alimentación de los emisores se muestran en la figura 27.



5.3.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA

El sistema propuesto es para una huerta tipo, contemplando que se pueda adaptar a condiciones similares. Por ende no es posible determinar con exactitud las cantidades de los elementos del sistema. Pero si se puede dar un estimado de los materiales básicos requeridos para su instalación. La tabla No. 31 muestra un listado de elementos así como una cantidad estimada como referencia. Es importante que el agricultor realice un esquema de su propia huerta y que verifique las cantidades necesarias para su caso particular.

Tabla No. 31		
Elementos del sistema		
Descripción	Especificaciones	Cantidad
Bomba	0.25 caballos de fuerza 0.0002 m ³ /s, 23.5m	1
Emisor (Gotero)	Tipo autocompensante de 4 l/h	180
Tubería	Flexible de polietileno PE-08 (8mm)	≈360m
Tubería	Flexible de polietileno PE-18 (18mm)	≈400m
Tubería	Flexible de polietileno PE-28 (28mm)	≈50m
Te pr	18mm	≈180
Te pr	26 X 18 X 18	1
Filtro de malla o disco	150 mesh	1
Válvula de compuerta	Para tubería rígida	1
Válvula de globo	Para tubería rígida	1
Adaptador	De tubería rígida a tubería flexible	1

6. CONCLUSIONES

6.1. IRRIGACIÓN POR GOTEO

Como se trató en este trabajo la mayor parte del uso de agua dulce en el mundo es con fines de irrigación. Sin importar el costo, el uso de métodos que permitan el ahorro de agua siempre tendrá beneficios para la sociedad y el planeta. Si logramos adaptar distintas técnicas y mecanismos que nos permitan el mayor aprovechamiento de los recursos estamos contribuyendo a la conservación de los mismos.

Aun así no podemos dejar de contemplar el aspecto económico en la decisión de aplicar uno u otro método de riego. La innovación es impulsora del desarrollo. Sin embargo no podemos innovar sin importar el costo. A lo largo de los últimos años la industria de productos de irrigación se ha diversificado y ha hecho que la tubería y los accesorios requeridos por un sistema de goteo sean realmente accesibles. El costo inicial del sistema que ha sido el problema principal en la implementación de este método ha disminuido considerablemente.

La implementación de un sistema de irrigación por goteo es una buena opción, en específico para una huerta aguacatera en la región de Michoacán. Los sistemas de irrigación por goteo son cada vez mas populares en la zona. Esto permite no solo que los costos bajen, sino también hace que el agricultor encuentre los productos necesarios sin necesidad de grandes desplazamientos. El ahorro de energía, y sobre todo de agua, representa una gran mejoría sobre otras opciones disponibles.

El problema que representa la inversión inicial, puede ser aliviado mediante apoyos agrícolas. Existen programas gubernamentales de apoyo al productor que implementa sistemas como la irrigación por goteo. Es importante buscar en los organismos locales y federales para obtener la ayuda necesaria para el establecimiento del sistema de riego.

El costo y el valor del agua son dos cosas diferentes. Con el paso del tiempo el costo va indudablemente a elevarse, haciendo el ahorro del líquido aun más conveniente.

6.2. IMPLEMENTACIÓN

Al no ser desarrollado específicamente para una huerta el sistema presenta inherentemente ciertas limitaciones. En el presente trabajo se plantea una huerta tipo, buscando que esta pueda ser adaptada a distintas condiciones.

Las condiciones físicas como el área, la distribución, la pendiente del terreno y el número total de árboles determinaran la implementación exitosa de este sistema en particular. Aun cuando se intento tener cierta flexibilidad en el diseño existen limitantes desafortunadamente. Sin embargo con algo de trabajo y una accesoría adecuada, este trabajo puede ser de utilidad al agricultor que cuente con una huerta similar, pero con algunas condiciones ligeramente distintas a las propuestas.

Es importante que el agricultor busque identificar las características específicas de su huerta. Para así poder adaptar el sistema exitosamente. Condiciones como la superficie de mojado por gotero pueden ser verificadas sencillamente en el campo. Donde sea posible verificar las características específicas de la huerta deberán hacerse las pruebas necesarias. De este modo será posible utilizar valores reales para el proyecto específico.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Dasberg S. y D. Or. 1999. ***Applied Agriculture: Drip Irrigation***. Springer. Alemania. pp. 1-76.
2. Lamm F. R. et al. (Eds.). 2007. ***Developments in Agricultural Engineering 13. Microirrigation for Crop Production: Design, Operation and Management***. ELSEVIER. E. U. A. pp. 1-26.
3. Clark N. ***Irrigation Pipes***. E. U. A. US Pat. No. 146572. 1874/01/20.
4. Blass L. ***Method of and means for the irrigation for land***. E. U. A. US Pat. No. 2752201. 1956/06/26.
5. Martínez-Saldaña T. y J. Palerm-Viqueira (Eds.). 1998. ***Antología sobre pequeño riego***. México: Colegio de Posgraduados, Instituto de Socioeconomía Estadística e Informática. pp. xiii+427.
6. Irrigation Association. <http://www.irrigation.org>
7. Nebel, B. J. y R. T. Wright. 2000. ***Environmental Science: Seventh Edition***. Prentice Hall. E. U. A. pp. 210-216.
8. Bojórquez Tapia, L.A., Ezcurra, E., Mazari-Hiriart, M., Díaz, S., Gómez, P., Alcanzar, G. y Melgarejo, D. 2000. ***Basin of Mexico: A History of Watershed Mismanagement. Conference on Land Stewardship in the 21st Century: The contribution of watershed management***. Tucson, Arizona: 129-137.
9. Ehlers W. y M. Goss. 2003. ***Water Dynamics in Plant Production***. CABI Publishing. Inglaterra. pp. 184-187.

10. Sankara Reddi, G. H. 1976. **Management of irrigation water**. Hyderabad: Andhra Pradesh Agricultural University. Technical bulletin No. 3. India. pp. 41-51.
11. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. <http://www.fao.org>.
12. Evans, R. Skaggs, W. y R. E. Sneed. 1996. **Economics of Controlled Drainage and Subirrigation Systems**. North Carolina Cooperative Extension Service. Publication Number AG 397.
13. Alberts B. et al. 2000. **Molecular Biology of the Cell. Fourth Edition**. Garland Science. E. U. A. pp. 629, 1120-1121.
14. Molina J. M. Gurovich L. A. y E. Varas. 2005. **A probabilistic model to assess surface irrigation water resources**. Ciencia e Investigación Agraria (Cien. Inv. Agr.). 32(1). pp. 24-33.
15. Lazarova V. y A. Bahri. (Eds.). 2005. **Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes and Turf Grass**. CRC Press. E. U. A. pp. 6-11, 120-121.
16. Whiley A. W. et al. (Eds.). 2002. **The Avocado: Botany, Production and Uses**. CABI Publishing. Inglaterra. pp. 1-12.
17. California Avocado Advisory Board. **The Avocado Bravo**.
18. McMahon M. J. Kofranek A. M. y V. E. Rubatzky. 2002. **Hartmann's Plant Science: Growth, Development and Utilization of Cultivated Plants. Third Edition**. Prentice Hall. E. U. A. pp. 503-505.
19. Galán Saucó, Víctor. 1988. Los frutos tropicales en los subtrópicos. 1. Aguacate, mango, litchi y loughan. Ediciones Mundi-Prensa. México. pp. 25-53.

20. Rodríguez Suppo, F. 1982. ***El aguacate***. Agt Editor. México. pp. 127.
21. C.J. Anguiano¹, J.J. Alcántar¹, B.R. Toledo¹, L. M. Tapia¹ y J. A. Vidales-Fernández¹. **Caractrizacion Edafoclimatica del area Productora de Aguacate de Michoacan, Mexico**. Actas VI Congreso Mundial del Aguacate 2007, Viña Del Mar, Chile. 12-16 Nov 2007. ISBN No 978-956-17-0413-8
22. www.aproam.com
23. <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/mich/NORMAL16165.TXT>
24. Principios de Riego por goteo. Ministro de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Ordenamiento Forestal Cuencas y Riego División de Riego y Drenaje. Gestión y Tecnología de Riego.
25. Saldarriaga, Juan G. Hidráulica de Tuberías. McGraw-Hill, 1998
26. Francisco Tapia Contreras, et al. Comisión Nacional de Riego. Departamento de Proyectos. Conceptos sobre diseño y manejo de riego presurizado. 1999