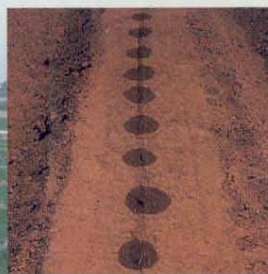


TÉCNICAS DE RIEGO



FUENTES YAGÜE / GARCÍA LEGASPI

TÉCNICAS DE RIEGO

SISTEMAS DE RIEGO EN LA AGRICULTURA

JOSÉ LUIS FUENTES YAGÜE
Dr. Ingeniero Agrónomo, España

GUILLERMO GARCÍA LEGASPI
Dr. en Ciencias Agrícolas
Profesor Investigador del Instituto Tecnológico Agropecuario de Coahuila.
Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA)
Subsecretaría de Educación e Investigación Tecnológicas (SEIT)
Secretaría de Educación Pública (SEP), México.

EDICIÓN REVISADA Y CORREGIDA



Mundi-Prensa México,
S.A. de C.V.

PUBLICACIONES DEL



SECRETARIA GENERAL TECNICA
CENTRO DE PUBLICACIONES

Grupo Mundi-Prensa

• **Mundi-Prensa México, S.A. de C.V.**

Río Pánuco 141, Col. Cuauhtémoc
06500 México, D.F.

Tels. 55 33 56 58 al 60 - Fax 55 14 67 99

E-mail: 101545.2361@compuserve.com

• **Mundi-Prensa Libros, S.A.**

Castelló 37-28001, Madrid

Tel. 914 36 37 00 - Fax 915 75 39 98

E-mail: libreria@mundiprensa.es

Internet: www.mundiprensa.com

• **Mundi-Prensa Barcelona**

• **Editorial Aedos, S.A.**

Consell de Cent 391 - 08009 Barcelona

Tel. 934 88 34 92 - Fax 934 87 76 59

E-mail: barcelona@mundiprensa.es

Título de la obra original:

TÉCNICAS DE RIEGO
SISTEMAS DE RIEGO EN LA AGRICULTURA

Primera edición 1999

Edición original publicada por:

MUNDI-PRENSA MÉXICO, S.A. DE C.V.

Propiedad de:

MUNDI-PRENSA MÉXICO, S.A. DE C.V.

Río Pánuco 141, Col. Cuauhtémoc

06500 México, D.F.

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción, total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

© **Mundi-Prensa México, S.A. de C.V., 1999**

ISBN 968-7462-17-5

Impreso en México

Printed in Mexico

CONTENIDO

PRIMERA PARTE

CAP. 1	RELACIONES SUELO-AGUA-PLANTA	3
	Características físicas del suelo que afectan a la retención del agua .	3
	Profundidad del suelo explorado por las raíces	6
	Formas de expresar el contenido de humedad del suelo	8
	Potencia del agua	11
	Retención del agua por el suelo	13
	Estados del agua del suelo	14
	Determinación indirecta de la capacidad de campo y del punto de marchitamiento	16
	Utilización del agua del suelo	17
	Factores que condicionan la capacidad de retención del agua dispo- nible	20
	Agua disponible para el cultivo	21
	Medición del agua del suelo	24
	Movimiento del agua en el suelo	28
	Medida de la velocidad de infiltración	30
	Circulación del agua a través de la planta	33
	Balace hídrico de la planta	35
	Períodos críticos de las plantas	35
	Intervenciones para aumentar la producción vegetal	36
CAP. 2.	NECESIDADES HÍDRIDAS DE LOS CULTIVOS	39
	La evapotranspiración	39
	Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos	40
	Método de Blaney-Criddle	41
	Método de la radiación	46
	Método de Penman	51
	Método del tanque evaporímetro clase A	55
	Coefficiente de cultivo	58

Contenido

	Corrección de la ETo y determinación del coeficiente de cultivo ...	62
	Ejemplo de cálculo de las necesidades de agua	63
CAP. 3.	LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	67
	La salinidad	68
	Evaluación de la salinidad del agua de riego	69
	Tratamiento de los problemas de salinidad	73
	Problemas de infiltración	79
	Evaluación de los problemas de infiltración	80
	Tratamiento de los problemas de infiltración	83
	Toxicidad y otros efectos	85
	Toxicidad	85
	Nutrientes en el agua de riego	88
	Riesgo de obstrucción en riego localizado	89
	Análisis de aguas	92
CAP. 4	PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	95
	Necesidades netas de riego	95
	Cálculo de la precipitación efectiva	96
	Probabilidades de lluvia	97
	Necesidades totales. Eficiencia de aplicación	99
	Dosis de riego e intervalo entre riegos	104
	Caudal necesario	107
	Métodos de programación de riegos	108
	Medición del estado hídrico de la planta	108
	Medición del estado hídrico del suelo	111
	Valoración del balance hídrico	113
	Los servicios de asesoramiento de riegos	115
	Repercusión de la dotación de riego en la producción. Aplicación a la programación del riego	116
CAP. 5	CONDUCTOS ABIERTOS	121
	Datos para el diseño de conducciones abiertas	122
	Fórmulas experimentales para conducciones abiertas	125
	Cálculo de conducciones abiertas	127
	Acequias de tierra	130
	Acequias de hormigón	132
	Aforo del caudal en conducciones abiertas	134
CAP. 6	TUBERÍAS	143
	Tuberías de plástico	143
	Tuberías de policloruro de vinilo (PVC)	144
	Tuberías de polietileno (PE)	147
	Tuberías de fibrocemento	148
	Tuberías de aluminio	149
	Pérdida de carga en tuberías a presión	150

Velocidad recomendable en el transporte	155
Cálculo de tuberías	157
Dispositivos auxiliares	160
Golpe de ariete	163
Aforo del caudal en tuberías a presión	164
Medidor venturi	164
Medidor volumétrico de hélices	166
CAP. 7. EQUIPOS DE BOMBEO	167
Alturas de elevación	167
Bombas hidráulicas. Clasificación	168
Bombas centrífugas. Constitución y clasificación	169
Altura de aspiración en bombas centrífugas	170
Características de la aspiración y de la impulsión	173
Curvas características	174
Elección de la bomba	179
Velocidad específica	181
Potencias requeridas para el bombeo	182
Motores eléctricos	185
Motores de combustión interna diesel	187
Acoplamiento de bombas	188
Defectos de funcionamiento en el equipo de bombeo	188

SEGUNDA PARTE

CAP. 8. RIEGO POR SUPERFICIE	193
Tipos de riego por superficie	194
Bases del riego por superficie	195
Técnicas de mejora del riego por superficie	198
Riego por surcos	200
Sección de los surcos	201
Separación de los surcos	202
Pendiente de los surcos	204
Longitud de los surcos	205
Caudal de riego	206
Ensayos para la determinación de caudales y longitudes de surco ..	207
Práctica del riego	210
Regulación del flujo de agua a los osurcos	211
Riego por escurrimiento	217
Pendiente de las fajas	218
Anchura de las fajas	218
Longitud de las fajas	219
Caudal	220
Ensayos para determinar el caudal	221
Riego por inundación	223
Tamaño de los compartimentos	225

Contenido

CAP. 9	RIEGO POR ASPERSIÓN	227
	Ventajas e inconvenientes del riego por aspersión	228
	Dispositivos de aspersión	229
	Características de funcionamiento	232
	Sistemas de riego por aspersión	235
	Disposición de las tuberías en los sistemas estacionarios	237
	Ejemplo de instalaciones de sistemas estacionarios	239
	Información previa para el diseño del sistema de riego	243
	Diseño agronómico	243
	Necesidades de agua de los cultivos	243
	Determinación de los parámetros de riego	246
	Diseño hidráulico. Cálculo de laterales y portallaterales	249
	Cálculo de laterales	250
	Cálculo de tuberías secundarias y principales	262
	Uniformidad de distribución	262
	Elección de la instalación de riego	264
	Sistemas mecanizados de riego por aspersión	268
	Situación actual del riego por aspersión mecanizado	277
CAP. 10.	RIEGO LOCALIZADO	279
	El riego localizado en las relaciones suelo-agua-planta	279
	Ventajas e inconvenientes del riego localizado	284
	Componentes de la instalación	284
	Obstrucciones	287
	Prefiltrado	288
	Filtrado	290
	Tratamiento químico del agua	297
	Emisores	304
	Goteros	307
	Tuberías emisoras	310
	Microaspersión	310
	Necesidades netas de riego	311
	Necesidades totales de riego	314
	Coefficiente de uniformidad	316
	Diseño agronómico	318
	Diseño hidráulico	325
	Velocidades recomendables	332
	Aparatos de control	333
	Automatización	334
CAP. 11.	FERTIRRIGACIÓN	343
	Ventajas de la fertirrigación	343
	Características de los fertilizantes utilizados en fertirrigación	344
	Comportamiento de los fertilizantes en el suelo	346
	Fertilizantes nitrogenados	347
	Fertilizantes fosfóricos	349
	Fertilizantes potásicos	351
	Fertilizantes complejos y mezcla de fertilizantes	352

Otros fertilizantes	353
La salinidad de fertirrigación	355
Equipos de fertirrigación	357
Quimigación	360
CAP. 12. ESTUDIO ECONÓMICO	363
El costo del riego	363
Viabilidad económica de una inversión	369
GLOSARIO	377
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	383
ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	387
ANEXO 2. MÉTODO DE HARGREAVES PARA EL CÁLCULO DE ET (CULTIVO)	389
ANEXO 3. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO	393
ANEXO 4. HIDRÁULICA APLICADA AL RIEGO	401
Régimen laminar y régimen turbulento	401
Número de Reynolds	403
Comportamiento hidroneumático de las tuberías	403
Pérdidas de carga por fricción en tuberías a presión	404
Pérdidas de carga en elementos singulares	406
Tuberías con salidas uniformemente espaciadas	407
Cálculo de conducciones en sistemas de riego a presión	408
Cálculo de tuberías laterales	409
Cálculo de tuberías terciarias o portalaterales	413
Cálculo de tuberías secundarias	416
Ecuación de continuidad	419
Ecuación de Bernoulli	419
Emisores de agua	425
Bombas hidráulicas	430
ANEXO 5. PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS	433
ANEXO 6. UNIDADES DE PRESIÓN Y CONVERSIÓN DE UNIDADES ...	455
EJERCICIOS SIN RESOLVER	459

PRIMERA PARTE

Necesidades hídricas de los cultivos

Calidad del agua de riego

Conducción y bombeo del agua

CAPÍTULO 1

RELACIONES SUELO-AGUA-PLANTA

Características físicas del suelo que afectan a la retención del agua

El suelo es un sistema complejo compuesto por partículas sólidas (minerales y orgánicas), agua con sustancias en disolución (*solución del suelo*) y aire. El aire y la solución del suelo ocupan los espacios o poros comprendidos en la matriz sólida.

Las principales características físicas del suelo que afectan a la retención del agua son: textura, estructura y porosidad.

Textura

La porción mineral del suelo está formada por partículas que, según su tamaño, se clasifican en: arena (de 2 a 0.05 mm), limo (de 0.05 a 0.002 mm) y arcilla (inferior a 0.002 mm).

La textura de un suelo se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla que contiene. Dependiendo de su textura, los suelos se clasifican en arenosos, limosos o arcillosos, según predomine cada uno de los distintos componentes. Un suelo es de textura franca cuando contiene una mezcla de arena, limo y arcilla en proporción equilibrada. El análisis granulométrico, que da los porcentajes en peso de arena, limo y arcilla, determina las distintas clases de textura, que vienen definidas en el triángulo de texturas de la figura 1-1.

El agua ocupa total o parcialmente los poros comprendidos entre las partículas sólidas. Esta agua es absorbida por las raíces de las plantas, por lo que debe ser periódicamente repuesta por la lluvia o mediante el riego. Por tanto, el suelo sirve de almacén o depósito de agua. La capacidad del suelo para almacenar agua es uno de los principales factores que influyen en la cantidad de agua de riego y la frecuencia de su aplicación.

4 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

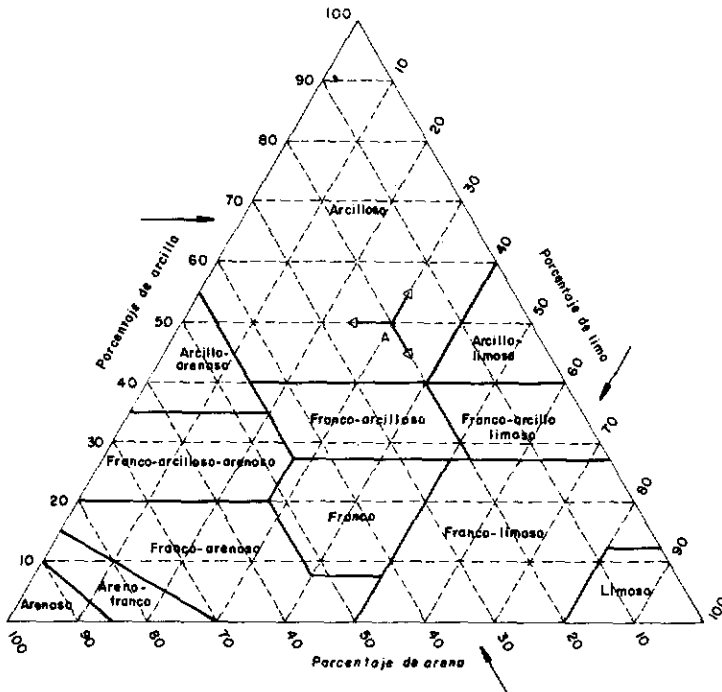


Fig. 1-1 Triángulo de texturas para determinar la clasificación de los suelos según su textura. El triángulo está dividido en 12 áreas, correspondientes a las distintas clases de textura según los porcentajes en peso de arcilla, limo y arena. La dirección de las flechas indica la forma de aplicar los porcentajes respectivos de arcilla, limo y arena. Así, por ejemplo, el punto A, que corresponde al área de suelo arcilloso, contiene el 50% de arcilla, el 30% de limo y el 20% de arena.

El aire ocupa el resto del espacio de los poros no ocupado por el agua. Según la humedad del suelo, el agua y el aire ocupan una mayor o menor proporción de los poros. Por lo general, los poros pequeños (microporos) están ocupados por agua, mientras que el aire ocupa la mayor parte del espacio de los poros grandes (macroporos), salvo que el suelo esté saturado de agua, en cuyo caso ésta ocupa todo el espacio poroso. Los poros de tamaño intermedio están ocupados por aire y agua en mayor o menor proporción, según las variaciones del contenido de humedad del suelo.

Los suelos de textura arcillosa tienen un gran número de microporos, mientras que los macroporos predominan en los suelos de textura arenosa. El agua drena por gravedad en los poros con diámetro superior a 30 micras. Los suelos arenosos drenan con facilidad, porque gran parte de sus poros tienen diámetro suficiente para permitir la salida del agua por gravedad. De ello se deduce que los suelos arenosos retienen menor cantidad de agua que los arcillosos.

Estructura

Se llama estructura de un suelo a la disposición de sus partículas para formar otras unidades de mayor tamaño, llamadas *agregados*. Los poros se presentan entre los agre-

gados y dentro de ellos, siendo de mayor tamaño los primeros, por lo que la cantidad de poros de mayor tamaño (y, por tanto, la permeabilidad del suelo al aire y al agua) viene condicionada, en gran medida, por la estructura.

Así como la textura se mantiene constante, la estructura puede variar con mucha facilidad, ya que las fuerzas que unen las partículas elementales dentro de los agregados son muy débiles.

La estructura se mejora mediante ciertas prácticas culturales y una buena ordenación de los cultivos. Entre las causas que degradan la estructura destacan: labores excesivas o inadecuadas, poco contenido de materia orgánica, compactación causada por el uso continuo de maquinaria agrícola pesada, el impacto de las gotas de lluvia, etc. Un alto contenido de calcio favorece la estabilidad de la estructura, mientras que un alto contenido de sodio determina su deterioro.

Porosidad

La porosidad de un suelo es la fracción de volumen del mismo no ocupado por materia sólida. Está condicionada por su textura y estructura.

La *densidad aparente (da)* se refiere a la densidad de un suelo tal como es, incluyendo el volumen ocupado por los poros. Es igual al peso de una muestra de suelo seco dividido por el volumen. En suelos minerales la densidad aparente varía dentro de los límites siguientes:

<i>Textura</i>	<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>
Arenoso	1.50 - 1.80
Franco-arenoso	1.40 - 1.60
Franco	1.30 - 1.50
Franco-arcilloso	1.30 - 1.40
Arcilloso	1.20 - 1.30

La *densidad real (dr)* se refiere a la densidad de las partículas sólidas, y es igual al peso de suelo seco dividido por el volumen ocupado por las partículas sólidas. En todos los suelos minerales la densidad real tiene un valor aproximado de 2.6 g/cm³.

La porosidad o volumen ocupado por los poros se expresa como porcentaje del volumen total de suelo mediante la fórmula:

$$\text{Porosidad} = \frac{dr - da}{dr} 100$$

La porosidad de los suelos varía normalmente del 40 al 50%.

6 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

Ejemplo

En una muestra de suelo tomada con un cilindro metálico se conocen los datos siguientes:

- Peso de la muestra de suelo seco: 81 g.
- Volumen del cilindro: 67 cm³.
- Densidad real de las partículas: 2.65 g/cm³.

Calcular la densidad aparente y la porosidad.

Solución:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen suelo}} = \frac{81}{67} = 1.20 \text{ g/cm}^3.$$

$$\text{Porosidad} = \frac{dr - da}{dr} 100 = \frac{2.65 - 1.20}{2.65} \times 100 = 54.72\%$$

Profundidad del suelo explorado por las raíces

La profundidad de las raíces está determinada por una serie de factores, tales como: características genéticas del cultivo, características del suelo (textura, estructura, presencia de capas impermeables, etc.), nivel de agua en el suelo, nutrientes, oxígeno, etc. Cuando la planta esté bien arraigada y existan buenas condiciones de cultivo, el rendimiento del mismo no queda afectado cuando se reduce por alguna causa el sistema radical.

La profundidad total del sistema radical es característica de cada especie, cuando el suelo es profundo y homogéneo, pero varía según diversos factores, tales como el nivel de humedad en el suelo en la primera fase del desarrollo, la proximidad a la capa freática, la existencia de horizontes calizos u otras capas duras o impermeables, etc.

En las plantas de raíces profundas la distribución del sistema radical es, aproximadamente, la siguiente: el 40%, en la primera cuarta parte de su profundidad total; el 30%, en la segunda cuarta parte; el 20%, en la tercera cuarta parte, y el 10% restante en la cuarta parte más profunda. El agua disponible para la planta se agota con más rapidez en las capas más superficiales que en las capas más profundas. Cuando se agota el agua disponible de las capas superficiales, la planta continúa absorbiendo agua de las capas más profundas, pero para ello necesita desarrollar un buen sistema radical a esa profundidad, con lo cual su rendimiento se reduce. Conviene, por tanto, reponer el agua perdida y utilizada en la zona superficial, que es donde mayor desarrollo tiene el sistema radical.

Por consiguiente, conviene considerar, no la profundidad total del sistema radical, sino la profundidad efectiva, que corresponde, aproximadamente, a un 80% de su profundidad total. Como norma general se pueden utilizar los valores de la tabla 1 con

Tabla 1: *Profundidad efectiva del sistema radical de algunos cultivos (en m)*

Aguacate	0.9 - 1.0
Alfalfa	0.9 - 1.2
Algodón	0.8 - 1.2
Almendro	0.9 - 1.2
Berenjena	0.5 - 0.6
Cacahuate	0.9 - 1.0
Café	0.9 - 1.2
Camote (Ipomoea batatas)	0.6 - 0.9
Caña de azúcar	1.0 - 1.1
Cebada	0.6 - 1.0
Cebolla	0.4 - 0.5
Chícharo	0.6 - 0.9
Ciruelo	0.9 - 1.0
Cítricos	0.9 - 1.0
Clavel	0.3 - 0.4
Durazno	0.9 - 1.0
Fresa	0.3 - 0.5
Frijol	0.5 - 0.8
Frutales de hoja caduca	1.0 - 1.2
Girasol	0.9 - 1.0
Lechuga	0.3 - 0.4
Leguminosas grano	0.5 - 1.0
Maíz grano	0.8 - 1.2
Maíz verde	0.8 - 1.2
Manzano	0.9 - 1.0
Melón	0.8 - 1.0
Nogal	1.1 - 1.2
Olivo	0.9 - 1.1
Palmera	0.8 - 0.9
Papa	0.4 - 0.8
Pepino	0.6 - 0.9
Peral	0.8 - 1.1
Pimiento	0.4 - 0.8
Piña	0.4 - 0.6
Plátano	0.9 - 1.2
Praderas	0.6 - 1.0
Remolacha azucarera	0.6 - 1.0
Soya	0.6 - 1.0
Sorgo para grano	0.8 - 0.9
Tabaco	0.5 - 0.9
Tomate	0.4 - 1.0
Trébol	0.7 - 0.9
Trigo	0.6 - 1.2
Vid	0.8 - 0.9
Zanahoria	0.4 - 0.5

8 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

el siguiente criterio: los valores más altos en suelos de textura gruesa; valores intermedios en suelos de textura media, y valores más bajos en suelos de textura fina. Todo ello se refiere a plantas ya desarrolladas. Para plantas en fase de desarrollo se tomará la profundidad correspondiente a la planta desarrollada multiplicando por el factor:

$$\frac{\text{Coeficiente de cultivo en la fase correspondiente}}{\text{Coeficiente de cultivo máximo}}$$

En cualquier caso, si existe una capa dura o impermeable en el perfil del suelo, la profundidad radical efectiva estará limitada por la profundidad a que se encuentra dicha capa.

Formas de expresar el contenido de humedad del suelo

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

1. *Humedad gravimétrica.* Es el porcentaje de agua que contiene el suelo con relación al peso de suelo seco. Se calcula con la fórmula:

$$Hg = \frac{Pa}{Ps} 100$$

Hg = Humedad gravimétrica, expresada en porcentaje.

Pa = Peso del agua.

Ps = Peso del suelo seco.

Se considera suelo seco cuando se somete a secado en estufa a 105 °C hasta peso constante.

El peso del agua se obtiene por la diferencia entre el peso del suelo húmedo menos el peso del suelo seco.

Ejemplo

Una muestra de suelo pesa 70 g y después de secado a estufa pesa 58 g. Expresar la humedad en porcentaje de suelo seco o humedad gravimétrica.

Solución:

Peso del suelo húmedo	70 g
Peso del suelo seco	58 g
	<hr/>
Peso del agua	12 g

$$Hg = \frac{Pa}{Ps} 100 = \frac{12}{58} 100 = 20.68\%$$

2. *Humedad volumétrica.* Es el porcentaje de agua que contiene el suelo con relación al volumen de suelo húmedo. Se calcula con la fórmula:

$$Hv = \frac{Va}{Vs} 100$$

Hv = Humedad volumétrica expresada en porcentaje.

Va = Volumen de agua.

Vs = Volumen de suelo húmedo.

Ejemplo

Calcular la humedad volumétrica de una muestra de suelo que tiene un volumen total de 740 cm³ y un peso de 1,080 g. El suelo seco pesa 960 g.

Solución:

Peso del suelo húmedo	1,080 g
Peso del suelo seco	960 g

Peso de agua=Volumen de agua* 120 g = 120 cm³

$$Hv = \frac{Va}{Vs} 100 = \frac{120}{740} 100 = 16.2\%$$

Es más racional utilizar la humedad gravimétrica que la humedad volumétrica, ya que el peso de un suelo seco permanece invariable, mientras que su volumen varía con la estructura.

Para pasar la expresión de la humedad de una a otra forma se utiliza la relación:

$$\frac{Hv}{Hg} = da$$

3. *Humedad expresada en altura de agua.* De un modo semejante a como se expresa el agua caída en una precipitación, la cantidad de agua del suelo se puede expresar en longitud de altura de agua.

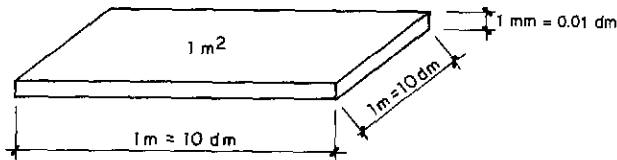
La relación de longitudes es la misma que la de volúmenes, ya que en ambos casos la superficie de la base es la misma. La expresión de la humedad en

*Considerando que la densidad del agua es 1 g/cm³.

10 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

longitud se suele presentar como fracción. Así, por ejemplo, la humedad volumétrica de 16.2% del ejemplo anterior significa que en un volumen de suelo con base la unidad y altura de un metro, el agua ocuparía una altura de 0.162 m. Por tanto, la humedad expresada en longitud sería: 0.162 m de agua por m de suelo.

Conocida la cantidad de agua expresada en mm de altura de agua, se puede conocer fácilmente la cantidad de agua, expresada en litros o en m^3 , contenida en la superficie unitaria (m^2 o ha, respectivamente).



Para una altura de 1 mm, el m^2 contiene un volumen:

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

En esas mismas condiciones una ha contiene un volumen:

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

Por consiguiente:

$$1 \text{ mm de altura de agua} = 1 \text{ litro}/m^2 = 10 m^3/ha$$

Ejemplo

Un suelo de 1 m de profundidad contiene una humedad gravimétrica del 15% en los 40 cm más superficiales y del 20% en los restantes 60 cm. Las densidades aparentes en estos horizontes son 1.2 y 1.3 tm/m^3 , respectivamente. Calcular la lámina de agua del perfil del suelo.

Solución:

$$H_v = H_g \times d_a$$

En los 40 cm más superficiales:

$$H_v = 15 \times 1.2 = 18\%$$

Hay 0.18 cm de agua en 1 cm de profundidad

$$0.18 \times 40 = 7.2 \text{ cm de agua}$$

En los restantes 60 cm:

$$H_v = 20 \times 1.3 = 26\%$$

Hay 0.26 cm de agua en 1 cm de profundidad

$$0.26 \times 60 = 15.6 \text{ cm de agua}$$

Lámina de agua total:

$$7.2 + 15.6 = 22.8 \text{ cm.}$$

También se puede hacer el cálculo con la fórmula:

$$La = \frac{Hg \times Pr \times da}{100}$$

La = Lámina de agua total o por estrato.

Pr = Profundidad de suelo a humedecer o de raíces.

Potencial del agua

Las moléculas de agua en estado líquido se encuentran en continuo movimiento, debido a fuerzas de atracción y repulsión mutuas, por cuyo motivo el agua se comporta como un poderoso disolvente, en donde las moléculas de otras sustancias pueden moverse y reaccionar químicamente. Esta movilidad de las moléculas del agua depende de su energía libre, es decir, de la fracción de su energía total que puede transformarse en trabajo.

El *potencial del agua o potencial hídrico* es una magnitud que expresa la energía libre del agua cuando ésta entra a formar parte de diversos sistemas, tales como suelo, planta, atmósfera, etc. Se mide en unidades de presión: pascal (Pa), megapascal (MPa), atmósfera (atm), kg/cm², o metros de columna de agua (mca). En la práctica se considera:

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 10 \text{ mca}$$

El potencial del agua viene determinado por: la presión a que está sometida, su actividad y la gravedad. Se mide con relación a un potencial de referencia, que vale cero y que corresponde al agua pura, libre, y a la presión atmosférica.

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

— *Efecto osmótico*, debido a la presencia de sustancias en disolución.

— *Efecto matricial*, debido a la interacción del agua con la matriz sólida del suelo.

Las sustancias disueltas reducen la energía libre del agua, ya que alrededor de cada partícula de soluto se forma una fina capa de moléculas de agua con menos movilidad. Cuanto mayor sea la concentración de solutos, menor será la energía libre del agua.

Cuando el agua se pone en contacto con una superficie sólida como son las partículas del suelo, se forma una fina capa de moléculas de agua más o menos adheridas a ella y, por tanto, se reduce la movilidad del agua y su energía libre.

12 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

Todos estos factores actúan independientemente, por lo que sus efectos se suman. El potencial hídrico, por tanto, se expresa de la siguiente forma:

$$\psi = \psi_p + \psi_o + \psi_m$$

- ψ = Potencial total
- ψ_p = Potencial de presión
- ψ_o = Potencial osmótico
- ψ_m = Potencial matricial

El potencial de presión es positivo para presiones superiores a la atmósfera y negativo para presiones inferiores.

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

El potencial matricial representa la *disminución de movilidad del agua* debido a interacciones con la matriz sólida del suelo. Tiene un valor nulo cuando no hay interacciones y negativo cuando las hay.

El agua se desplaza espontáneamente (sin aporte externo de energía) desde los sitios de mayor potencial hacia los sitios de menor potencial, siendo el flujo directamente proporcional a la diferencia de potencial, salvo que haya algún obstáculo en el camino. El movimiento del agua en el sistema suelo-planta, atmósfera viene condicionado, por tanto, por las diferencias de potencial existentes entre el suelo y la raíz de la planta (por donde se absorbe el agua), y entre la hoja de la planta (por donde se transpira el agua) y la atmósfera.

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

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

Es evidente que para que el agua circule desde los pelos absorbentes de la raíz hasta las superficies evaporantes de las hojas tiene que haber una diferencia de potencial entre ambas zonas de la planta.

En ocasiones, con el fin de evitar el empleo de valores negativos, se utiliza el concepto de *tensión*, que es la succión necesaria para liberar el agua del suelo. Su valor es igual al del potencial, pero con signo contrario. Desde el punto de vista de absorción

del agua por las plantas no se consideran las tensiones de gravedad y de presión. Se denomina *tensión del agua del suelo* a la suma de las tensiones matricial y osmótica.

Retención del agua por el suelo

La relación entre el contenido de humedad y la tensión matricial del agua de un suelo se expresa gráficamente mediante *la curva característica de retención de humedad*, que depende de la textura y de la estructura del suelo, ya que viene influida por el número y el tamaño de los poros. De la observación de la figura 1-2 A se deduce lo siguiente:

- A una misma tensión, el suelo retiene más agua cuando la textura es más fina.
- A medida que disminuye la tensión, los suelos arcillosos muestran un descenso más atenuado del contenido de humedad que los suelos arenosos, debido a que aquéllos presentan una distribución más regular del tamaño de los poros.

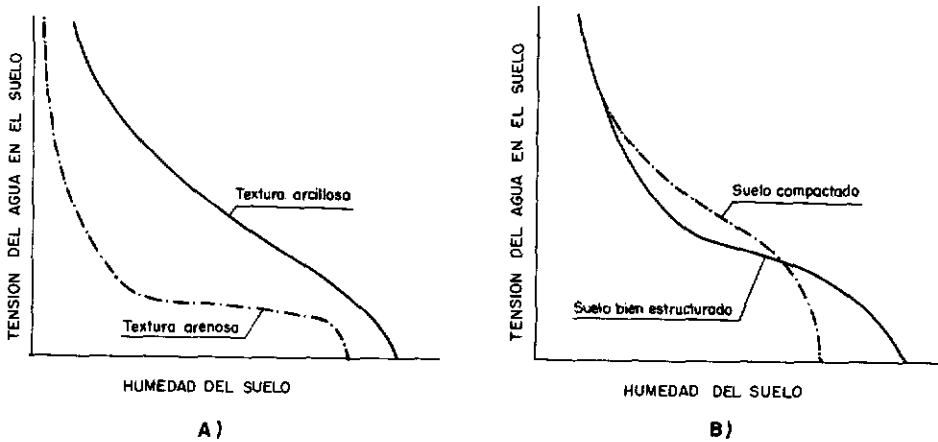


Fig. 1-2 A) Efecto de la textura sobre la retención del agua por el suelo. B) Efecto de la estructura sobre la retención del agua por el suelo.

De la figura 1-2 B se deduce:

- A tensiones bajas (suelo próximo a la saturación), los suelos con buena estructura contienen más agua que los suelos compactados, debido a la mayor porosidad de aquéllos.
- A valores más altos de la tensión, los suelos compactados pueden almacenar más agua que los suelos bien estructurados, debido a que con la compactación se reduce el tamaño de los poros grandes.

La figura 1-3 muestra que un mismo suelo presenta dos curvas características distintas: una para el humedecimiento y otra para el secado. Debido a este fenómeno, llamado *histéresis*, para una determinada tensión, el contenido de agua de un suelo es mayor cuando está secándose que cuando se está humedeciendo.

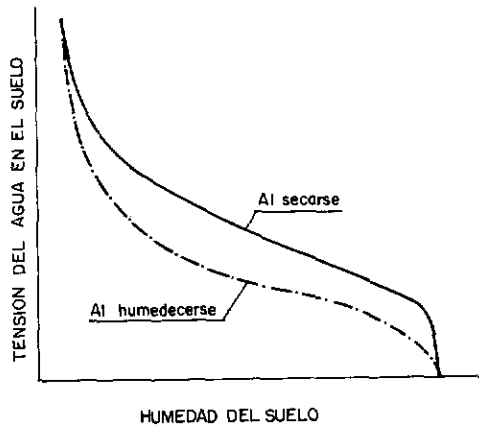


Fig. 1-3 Histeresis en la retención del agua por el suelo.

Estados del agua del suelo

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

Saturación

Un suelo está saturado cuando todos sus poros están ocupados por agua. Esta situación se presenta después de una lluvia copiosa o de un riego abundante, o cuando existe un estrato impermeable a poca profundidad. Cuando a un suelo saturado se le deja drenar, el agua sobrante pasa al subsuelo por la acción de la gravedad. El agua eliminada de esta forma, que no es retenida por el suelo, se llama *agua libre o gravitacional*.

Cuando el estado del suelo saturado se prolonga, las raíces de las plantas no acuáticas se mueren por falta de oxígeno.

Capacidad de campo

Partiendo de la situación anterior, cuando el suelo ya no pierde más agua por gravedad se dice que está a la *capacidad de campo*. En esta situación, el agua ocupa los poros pequeños y el aire ocupa una gran parte del espacio de los poros grandes.

Inmediatamente después de la saturación, el drenaje es muy rápido, pero después se hace más lento, pudiendo durar más o menos tiempo, según la *textura del suelo*. Se admite que el estado de capacidad de campo se alcanza en suelos bien drenados a los dos o tres días después de una lluvia copiosa, aunque esto no es cierto para todos los suelos, ya que en los arcillosos se alcanza con más lentitud que en los arenosos.

En cuanto a los valores de energía de retención del agua, la capacidad de campo se alcanza cuando la tensión matricial tiene un valor medio de 1/3 de atmósfera en suelo franco, pudiendo variar desde 0.1 atmósferas en suelo arenoso hasta 0.5 atmósferas en suelo arcilloso.

La capacidad de campo se determina mejor en los suelos de textura arenosa que en los de textura arcillosa, ya que en los primeros, con gran número de macroporos, el final del drenaje es más evidente. En cualquier caso, y debido a que se pueden presentar diferentes estratos en el perfil, es aconsejable determinar la capacidad de campo "in situ" en cada caso concreto, procediendo de la siguiente forma:

- Se prepara un cuadro de terreno de 1 m por lado, bordeado a su alrededor.
- Se riega el suelo hasta la saturación y a continuación se cubre la superficie con una lámina de plástico negro, para evitar la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. (Figura 1-4).
- Se deja pasar un día en suelos de textura arenosa, dos días en los de textura media y cuatro en los de textura arcillosa.
- Se toma una muestra de suelo y se determina el contenido de humedad.

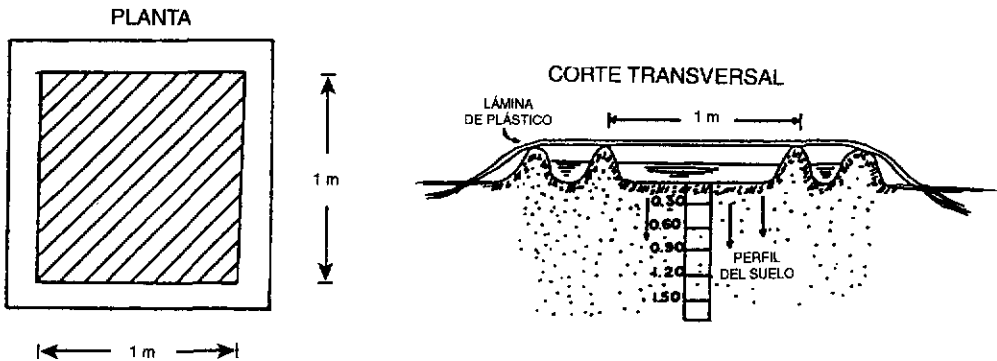


Fig. 1-4 Esquema en planta y corte transversal del terreno preparado para determinar capacidad de campo. (Fuente: Aguilera y Martínez).

En suelos de textura media la capacidad de campo se corresponde a la *humedad equivalente*, que se determina con una muestra de suelo saturado de 1 cm de espesor, a la que se le aplica una fuerza centrífuga de 1 kg (1,000 veces la fuerza de gravedad), durante 30 minutos.

La cantidad de agua que puede retener un suelo a la capacidad de campo depende, sobre todo, del tamaño de los macroporos, por cuyo motivo depende más de la textura que de la estructura.

El estado de capacidad de campo es la situación más favorable para el desarrollo de los cultivos, ya que tienen a su disposición una gran cantidad de agua retenida por el

suelo con una energía que es superada con facilidad por la succión de las raíces, a la vez que disponen de aire abundante para la respiración de las raíces.

Punto de marchitamiento

A partir de la capacidad de campo, el agua del suelo se va perdiendo progresivamente por evaporación y al ser absorbida por las plantas. Llega un momento en el que las plantas ya no pueden absorber toda el agua que necesitan y se marchitan irreversiblemente. Se dice entonces que el suelo ha alcanzado el punto de marchitamiento. Este estado marca el límite inferior de aprovechamiento del agua del suelo por las plantas.

Se considera que el punto de marchitamiento se alcanza cuando la tensión matricial tiene un valor de 15 atmósferas, aunque puede variar de 10 a 20 atmósferas, correspondiendo la cifra más baja a los suelos muy arenosos, y la más alta a los muy arcillosos. En suelos de textura media, el punto de marchitamiento se considera igual a 0.56 veces la humedad equivalente.

Al igual que en la capacidad de campo, el punto de marchitamiento depende más de la textura que de la estructura del suelo. Para un mismo contenido en humedad, la tenacidad con que es retenida el agua por el suelo es mayor en suelos de textura arcillosa que en los de textura arenosa, por lo que el agua resulta más accesible a las plantas en los segundos que en los primeros.

Aproximadamente la mitad del agua contenida en el suelo a capacidad de campo se encuentra tan fuertemente retenida que las plantas no pueden absorberla a la velocidad que requieren sus necesidades y por eso se marchitan. En días cálidos y secos ocurre, a veces, que las plantas se marchitan temporalmente, aunque el suelo tenga todavía una cantidad de agua por encima del límite que estamos considerando. En estos casos, las plantas se recuperan por la noche o cuando reciben un nuevo aporte de agua. Se considera que se ha alcanzado el punto de marchitamiento cuando la planta pierde su capacidad de recuperación, aunque se suministre agua en abundancia.

Determinación indirecta de la capacidad de campo y del punto de marchitamiento

La cantidad de agua retenida por un suelo en la capacidad de campo y en el punto de marchitamiento se miden en laboratorio o en el mismo terreno. A nivel laboratorio estos valores se pueden determinar mediante el uso de la olla de presión y la membrana de presión a las que se aplica aire a presión de 0.3 y 15 atmósferas, respectivamente, a muestras de suelo previamente saturadas. Después de 18 a 24 horas y cuando deja de escurrir agua se obtiene el contenido de humedad del suelo correspondiente a capacidad de campo y punto de marchitamiento. A falta de datos de análisis que den la humedad del suelo en estas fases, se pueden calcular estos valores, de un modo

aproximado, a partir de otros datos analíticos más fáciles de obtener, tales como la composición de la textura. Entre las fórmulas más utilizadas están las siguientes:

$$C_c = 0.48 A_c + 0.162 L + 0.023 A_r + 2.62 \text{ (Fórmula de Peele)}$$

C_c = Humedad a la capacidad de campo, expresada como humedad gravimétrica, en tanto por ciento.

A_c = Contenido de arcilla, expresado en %.

L = Contenido de limo, expresado en %.

A_r = Contenido de arena, expresado en %.

$$P_m = 0.302 A_c + 0.102 L + 0.0147 A_r \text{ (Fórmula de Briggs)}$$

P_m = Humedad en el punto de marchitamiento, expresada como humedad gravimétrica, en tanto por ciento.

A_c , L y A_r tienen el mismo significado que en la fórmula del cálculo de la humedad en la capacidad de campo.

Ejemplo

Calcular la humedad en la capacidad de campo y en el punto de marchitamiento de un suelo que tiene la siguiente textura:

35% de arcilla, 20% de limo y 45% de arena

Esta composición está expresada en humedad gravimétrica.

Solución:

$$\begin{aligned} C_c &= 0.48 A_c + 0.162 L + 0.023 A_r + 2.62 = \\ &= 0.48 \times 35 + 0.162 \times 20 + 0.023 \times 45 + 2.62 = 23.69\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_m &= 0.302 A_c + 0.102 L + 0.0147 A_r = \\ &= 0.302 \times 35 + 0.102 \times 20 + 0.0147 \times 45 = 13.27\% \end{aligned}$$

Utilización del agua del suelo

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

- *Agua gravitacional*. Es la porción de agua que sale libremente del suelo por la acción de la gravedad. Esta agua no puede ser utilizada por las plantas, porque pasa a una región del suelo no accesible a las raíces.
- *Agua disponible*. Es la porción de agua que puede ser absorbida por las raíces de las plantas con suficiente rapidez para compensar las pérdidas por transpiración.

18 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

El agua disponible es igual a la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento.

- *Agua no disponible*. Es la porción de agua retenida por el suelo con tanta fuerza que las plantas no pueden absorberla con suficiente rapidez para compensar las pérdidas por transpiración. Esta agua es la que permanece en el suelo a partir del punto de marchitamiento (figura 1-5).

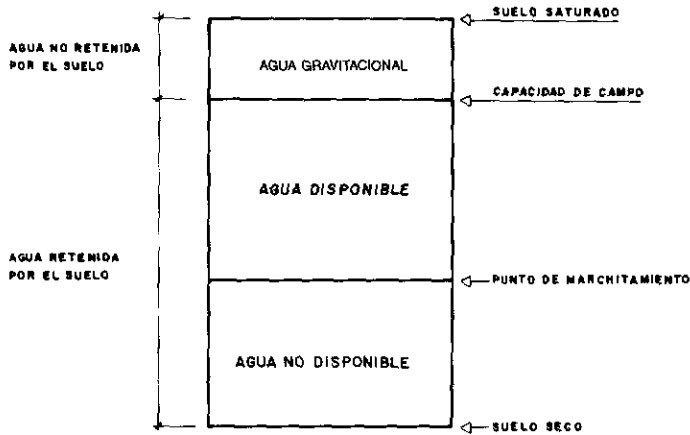


Fig. 1-5 Esquema de las fases del agua en el suelo y de su utilización por las plantas.

En la tabla 2 se indican algunas propiedades físicas del suelo y otras relativas a la retención de la humedad.

Ejemplo

Calcular el volumen de agua disponible en una ha de suelo en donde se han tomado los datos siguientes:

- Densidad aparente del suelo seco = 1.25 tm/m^3 .
- Profundidad del suelo = 0.50 m .
- Humedad a la capacidad de campo $Cc = 21.5\%$ de suelo seco.
- Humedad en el punto de marchitamiento $Pm = 12.2\%$ de suelo seco.

Solución:

$$\text{Peso de 1 ha de suelo} = 10,000 \text{ m}^2 \times 0.50 \text{ m} \times 1.25 \text{ tm/m}^3 = 6,250 \text{ tm}.$$

$$\text{Agua disponible} = Cc - Pm = 21.5 - 12.2 = 9.3\% \text{ de suelo seco:}$$

$$\text{Volumen de agua disponible} = \frac{6,250 \times 9.3}{100} = 581.2 \text{ tm} = 581.2 \text{ m}^3.$$

El aprovechamiento del agua por los cultivos es más efectivo cuando el contenido de agua en el suelo se mantiene cercano a la capacidad de campo. A medida que la planta absorbe agua del suelo, si no hay nuevas aportaciones, va disminuyendo progresivamente el contenido de agua disponible, hasta que llega un momento, antes de alcanzar

Tabla 2: *Propiedades físicas del suelo relacionadas con la retención de humedad.*

Textura	Porosidad %	Densidad aparente tm/m ³	Capacidad de campo % en peso	Punto de marchitamiento % en peso	Humedad disponible		
					% en peso	% en volumen	cm/m
Arenoso	38 (32-42)	1.65 (1.55-1.80)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	8 (7-10)
Franco- arenoso	43 (40-47)	1.50 (1.40-1.60)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	12 (9-15)
Franco	47 (43-49)	1.40 (1.35-1.50)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	17 (14-19)
Franco- arcilloso	49 (47-51)	1.35 (1.30-1.40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	19 (17-22)
Arcillo- arenoso	51 (49-53)	1.30 (1.25-1.35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	23 (18-23)
Arcilloso	53 (51-55)	1.25 (1.20-1.30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	23 (20-25)

el punto de marchitamiento, que le cuesta más esfuerzo absorber el agua, con lo cual disminuye su rendimiento.

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

El agua fácilmente disponible depende de los factores siguientes:

- *El cultivo*, Algunos cultivos necesitan que el suelo esté constantemente bastante húmedo, mientras que otros pueden agotar mucho más el agua total disponible sin que disminuyan sus rendimientos. Entre los primeros están aquellos cultivos que se aprovechan en forma fresca o carmosa, como hortalizas, forrajes, etc.; entre los segundos están aquellos otros cuya cosecha se aprovecha de forma seca, como los cereales para grano, semillas oleaginosas, algodón, etc.
- *El tipo de suelo*. Las plantas absorben el agua con más facilidad en los suelos de textura gruesa que en los suelos de textura fina. Los suelos salinos retienen, a veces, el agua con tanta fuerza que las plantas no la pueden tomar y se marchitan aunque el suelo esté próximo a la capacidad de campo.
- *La magnitud de la transpiración*. En igualdad de otras circunstancias, las plantas absorben el agua con menos facilidad a medida que aumenta la transpiración.

En términos generales, y a falta de otros datos, se puede considerar que el agua fácilmente disponible representa los 2/3 del agua disponible en caso de cultivos poco

sensibles y con una transpiración baja. En caso de cultivos sensibles y en condiciones de transpiración alta, el agua fácilmente disponible representa de 1/2 a 1/3 del agua disponible.

Factores que condicionan la capacidad de retención del agua disponible

La capacidad de retención del agua disponible es una de las características más importantes del suelo de cultivo, tanto para los cultivos de secano como para los de regadío. En los cultivos de secano esta característica determina el período de sequía más o menos largo que las plantas pueden tolerar en los suelos de regadío determina la cantidad y frecuencia de los riegos.

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

- *La textura.* Los suelos de textura fina retienen más cantidad de agua que los de textura gruesa, tanto en lo referente a la capacidad de campo como en el punto de marchitamiento. Ello se debe a que los suelos arenosos tienen una gran proporción de poros grandes, que están ocupados por mucho aire y poca agua, mientras que los suelos arcillosos tienen una gran proporción de poros pequeños, que almacenan más agua que aire. Sin embargo, en algunos suelos arcillosos el punto de marchitamiento está tan alto que retienen menos agua disponible que otros suelos con menor contenido de arcilla (figura 1-6).
- *La estructura.* Los suelos con buena estructura presentan una mayor capacidad de retención del agua disponible, sobre todo en los valores de tensión más pró-

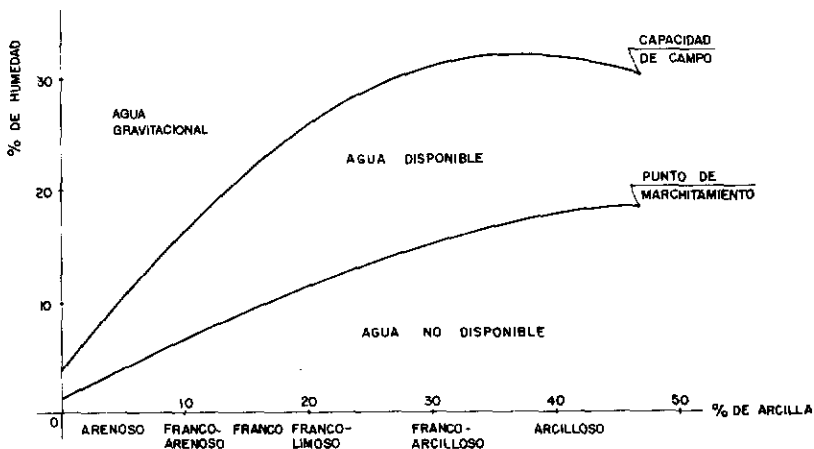


Fig. 1-6 Contenido de humedad en el suelo bajo diferentes formas, según el contenido de arcilla.

ximos a la capacidad de campo. En los valores más próximos al punto de marchitamiento, los suelos apelmazados pueden contener mayor cantidad de agua disponible, debido a que la compactación provoca el cambio de tamaño de muchos poros, que pasan de macroporos a microporos.

- *La materia orgánica.* La materia orgánica tiene una elevada porosidad, que le permite retener una considerable cantidad de agua. La influencia de la materia orgánica sobre la capacidad de retención del agua del suelo es mayor en los suelos arenosos que en los arcillosos; eso es debido a que, en los últimos, las partículas de materia orgánica están tan unidas a las finas partículas de arcilla que una misma película de agua puede envolver a ambas.
- *El espesor de suelo explorado por las raíces.* Un suelo profundo puede retener una gran parte de las necesidades de agua de una cosecha. Si ese suelo está a la capacidad de campo en el momento de la siembra, la cosecha requerirá una aportación suplementaria muy pequeña, mientras que necesitaría unas aportaciones importantes en el caso de suelos de poca profundidad.
- *La secuencia de capas en el perfil* puede tener una influencia notoria en la capacidad de retención de agua disponible. Una capa arcillosa situada debajo de otra capa de arena retrasa la penetración del agua de infiltración, que queda acumulada sobre la capa poco permeable durante más o menos tiempo. A veces, este retraso en la infiltración permite a las plantas absorber cantidades importantes de agua, especialmente cuando la acumulación coincide con períodos críticos.

Agua disponible para el cultivo

El *agua disponible (AD)* para las plantas es el agua comprendida entre la capacidad de campo (Cc) y el punto de marchitamiento (Pm):

$$AD = Cc - Pm$$

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

Reserva disponible = (Capacidad de campo—Punto de marchitamiento) × Profundidad de las raíces.

Se llama *reserva de agua fácilmente disponible* la cantidad de agua que pueden absorber las plantas sin hacer un esfuerzo excesivo y, por tanto, sin que haya una disminución del rendimiento. La reserva de agua fácilmente disponible es igual a la reserva del agua disponible multiplicada por un coeficiente llamado *fracción de abatimiento del agua disponible* (tabla 3).

Reserva fácilmente disponible = Reserva disponible × Fracción de abatimiento.

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

Tabla 3: *Fracción de abatimiento del agua disponible (f) para distintos cultivos*

Cultivo	f	Cultivo	f
Alfalfa	0.60	Limonero	0.25
Aguacate	0.30	Maíz grano	0.40
Apio	0.15	Melón cantaloup	0.20
Brécol	0.30	Naranja	0.35
Caña de azúcar	0.60	Papa	0.30
Cebolla	0.30	Platanera	0.30
Cebolla maduración	0.40	Prados	0.35
Coliflor	0.45	Remolacha	0.50
Fresa	0.10	Repollo	0.35
Frutales hoja caduca	0.40	Tabaco	0.25
Chícharo verde	0.25	Tomate	0.45
Frijol (judía)	0.50	Viñedo	0.55
Lechuga	0.35	Zanahoria	0.40

En esta tabla no se tienen en cuenta la salinidad ni la magnitud de la transpiración.

En la tabla 4 se exponen los niveles de abatimiento del agua del suelo expresados como tensión de humedad del suelo, tolerados por diversos cultivos, para los cuales se mantiene el máximo rendimiento. Se toman los valores inferiores en condiciones de transpiración baja y los valores superiores en condiciones de transpiración alta.

La reserva de agua fácilmente disponible se puede expresar en mm de altura de agua o en m³/ha.

Tabla 4: *Nivel de abatimiento del agua del suelo, expresado como tensión del agua en el suelo (en atmósferas) para obtener el máximo rendimiento (FAO).*

Alfalfa	0.8-1.5 (1)	Maíz	0.5-1.5 (1)
Algodón	1 -3	Melón	0.3-0.8
Arroz	Saturación o casi	Papa	0.3-0.7
Caña de azúcar	0.8-1.5 (1)	Pepino	1 -3
Cártamo	1 -2 (1)	Plátano	0.3-1.5
Cebolla	0.4-0.7	Remolacha azucarera	0.6-0.8
Cereales secundarios	0.4-1 (1)	Soya	0.5-1.5
Cítricos	0.5-1	Sorgo	0.6-1.3 (1)
Col	0.6-1	Tabaco temprano	0.3-0.8
Flores y plantas de adorno	0.1-0.5	Tabaco tardío	0.8-2.5
Fresas	0.2-0.5	Tomate	0.5-1.5
Frutas caedizas	0.6-1	Trébol	0.3-0.6
Gramíneas	0.4-1	Trigo	0.8-1.5
Chícharo	0.3-0.8	Trigo (maduración)	3 -4
Frijol (judía)	0.6-1 (1)	Vid	0.4-1
Lechuga	0.4-0.6	Zanahoria	0.5-0.7

(1) Se toman valores superiores a los indicados durante la fase de maduración.

Ejemplo

Calcular la reserva de agua fácilmente disponible en un suelo de donde se han tomado los datos siguientes:

- Capacidad de campo $Cc = 0.27$ cm de altura de agua por cm de profundidad.
- Punto de marchitamiento $Pm = 0.11$ cm de altura de agua por cm de profundidad.
- Profundidad del suelo = 70 cm.
- Fracción de abatimiento del agua disponible $f = 0.7$.

Solución:

Agua disponible = $Cc - Pm = 0.27 - 0.11 = 0.16$ cm de altura de agua por cm de profundidad.

En una profundidad de 70 cm habrá una reserva de agua disponible de:

$$0.16 \times 70 = 11.2 \text{ cm}$$

Reserva de agua fácilmente disponible:

$$11.2 \times 0.7 = 7.84 \text{ cm} = 78.4 \text{ mm de altura de agua}$$

Teniendo en cuenta que:

$$1 \text{ mm de altura de agua} = 1 \text{ litro/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Reserva de agua fácilmente disponible:

$$78.4 \text{ mm} = 78.4 \text{ litros/m}^2 = 784 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Ejemplo

Calcular la reserva de agua fácilmente disponible con los datos siguientes:

- Densidad aparente del suelo $da = 1.25$ toneladas por m^3 de suelo seco.
- Profundidad del suelo = 0.50 m.
- Humedad en la capacidad de campo $Cc = 21.5\%$ en peso de suelo seco.
- Humedad en el punto de marchitamiento $Pm = 12.2\%$ en peso de suelo seco.
- Fracción de abatimiento del agua disponible $f = 0.6$.

Solución:

Volumen de 1 ha de suelo:

$$\text{Volumen} = \text{Superficie} \times \text{Profundidad} = 10,000 \times 0.50 = 5,000 \text{ m}^3$$

Peso de 1 ha de suelo seco:

$$\text{Peso} = \text{Volumen} \times da = 5,000 \times 1.25 = 6,250 \text{ toneladas}$$

Reserva de agua disponible = $Cc - Pm = 21.5 - 12.2 = 9.3\%$ del suelo seco en una profundidad de 0.50 m.

Reserva de agua fácilmente disponible = Reserva de agua disponible $\times f = 9.3 \times 0.6 = 5.58\%$ del suelo seco en una profundidad de 0.50 m.

24 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

El 5.58% del peso de suelo seco contenido en 1 ha es:

$$\frac{6,250 \times 5.58}{100} = 348.75 \text{ toneladas de agua} = 348.75 \text{ m}^3$$

Reserva fácilmente disponible = 348.75 m³ por ha.

Medición del agua del suelo

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

Medición directa del contenido de humedad

El contenido de humedad se puede expresar en forma gravimétrica o volumétrica. Para expresarlo en forma gravimétrica se pesa una muestra de suelo en estado húmedo y, después, en estado seco, haciendo el secado en estufa a 105° C hasta peso constante. Posteriormente se procede como ya se indicó con anterioridad al considerar las formas de expresar el contenido de humedad del suelo. Para la determinación volumétrica se deben tomar las muestras con recipientes de volumen determinado.

Medición indirecta del contenido de humedad

El método consiste en medir alguna propiedad relacionada con la humedad, pasando después de aquélla a ésta mediante alguna curva o tabla de calibración.

- *Dispersión de neutrones*. El procedimiento se basa en emitir neutrones rápidos (mediante un aparato llamado *sonda de neutrones*), que al chocar con los núcleos de hidrógeno desvían su trayectoria. Algunos de los neutrones desviados alcanzan a un detector situado en la misma sonda (figura 1-7). La probabilidad de que los neutrones desviados alcancen la sonda es proporcional a la cantidad de hidrógeno presente en el suelo. Dado que el agua es la principal fuente de hidrógeno en el suelo, se puede tomar como medida de la humedad del suelo la frecuencia con que los neutrones alcanzan al receptor, leyéndose el porcentaje de humedad en una tabla de conversión o en una curva de calibración (figura 1-8).
- *Reflectometría de dominio de tiempo (TDR)*. Este procedimiento consiste en medir la constante dieléctrica del suelo (que varía con el contenido de agua) mediante el tiempo de recorrido de un pulso electromagnético, que se introduce en el suelo a través de unas varillas de acero que sirven de guía a las ondas. La medición de la humedad se hace directamente, ya que no se precisa calibración para distintos tipos de suelo.

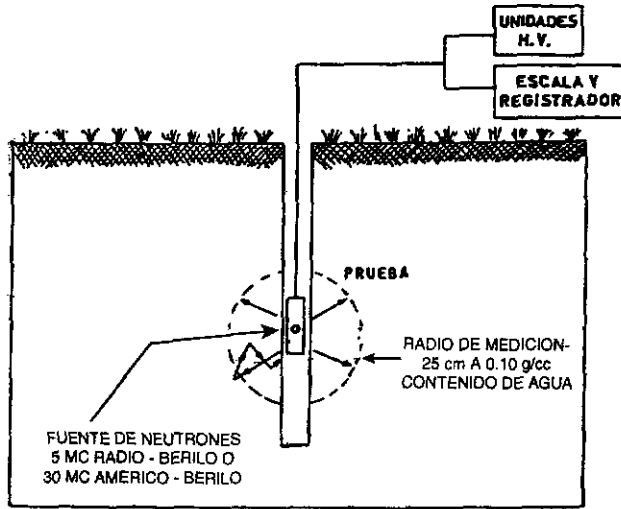


Fig. 1-7 Características de la sonda de neutrones. (Fuente: Gavande, S. A.).

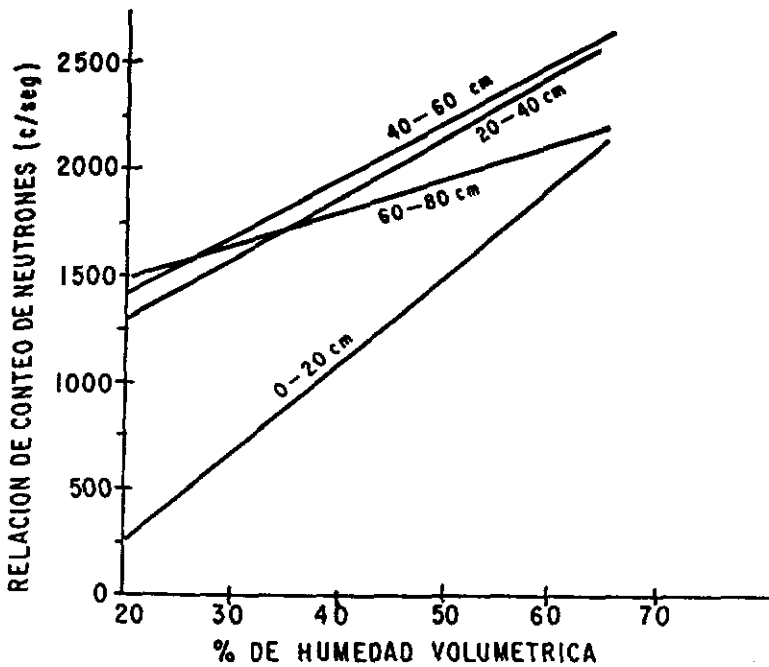


Fig. 1-8 Curva de calibración para la sonda de neutrones para diferentes profundidades en un suelo franco. (Fuente: Gavande, S. A.).

Medición directa del potencial hídrico

Mediante diversos instrumentos se mide algún componente del potencial o la suma de varios de ellos. El instrumento más utilizado es el *tensiómetro*, que mide el potencial

matricial del suelo. Consta de un tubo cerrado lleno de agua; un extremo termina en una cápsula de cerámica porosa y en el otro extremo lleva un manómetro o medidor de vacío.

Cuando el suelo se seca succiona agua del tubo a través de la cápsula de cerámica, creando en éste un vacío parcial que es detectado por el manómetro. Cuanto más seco esté el suelo, mayor cantidad de agua succiona del tubo, creándose un vacío mayor, lo que significa que aumenta la lectura del manómetro. Por tanto, la lectura del manómetro será tanto más elevada cuanto más seco esté el suelo. Si en estas condiciones de sequedad el suelo recibe agua, se verifica el proceso contrario, es decir, que el tubo succiona agua del suelo y el manómetro indica una lectura más baja.

Los tensiómetros tienen longitudes de 30, 60 y 90 cm; se gradúan en centibares, (cb), con escala de 0 a 100. El rango de utilización es de 0 a 80 centibares, pues para valores más altos entra aire en la cápsula y la lectura deja de ser significativa. Estas lecturas son indirectamente proporcionales al contenido de humedad; las lecturas bajas indican un suelo con mucha humedad, mientras que las lecturas altas indican poca humedad.

La lectura del tensiómetro es una indicación del esfuerzo de succión que realizan las plantas para absorber el agua del suelo sin tener en cuenta la salinidad, por cuyo motivo hay que calibrarlo para cada tipo de suelo.

El tensiómetro se instala en el suelo de tal forma que la cápsula de porcelana porosa esté en contacto íntimo con el suelo explorado por el sistema radical. Para ello se abre un agujero con ayuda de una barrena del mismo grosor que el tubo; a continuación se introduce el tubo y se aprieta y se humedece el suelo de alrededor.

La profundidad del agujero debe ser igual a la que deba ir la cápsula, pues de otra forma quedan huecos que se llenan de aire o de agua y dan lugar a lecturas falsas. Igual ocurre cuando el agujero es excesivamente ancho y no hay contacto íntimo entre la cápsula y el suelo.

En cultivos cuya zona activa de raíces es inferior a 40 cm se instala un solo tensiómetro por estación. En cultivos con raíces activas a mayor profundidad conviene instalar dos tensiómetros de distinta longitud, con el fin de conocer la evolución de la humedad a distintas profundidades.

Los tensiómetros deben colocarse en la zona superficial del suelo, que es la sometida a mayor evaporación. Para que funcione correctamente hay que ponerlo a punto antes de su utilización, para lo cual se siguen las instrucciones del fabricante. Estas incluyen llenar de agua y sacar el aire mediante una bomba manual de vacío.

La interpretación de las lecturas del tensiómetro varía con el tipo de suelo y de cultivo. De un modo general se pueden dar las normas siguientes:

- Lecturas de 0 a 10 centibares. Indican suelo saturado. Estas lecturas se dan en los días siguientes al riego o a una lluvia copiosa.
- Lecturas de 10 a 20 centibares. El suelo está a la capacidad de campo. En este intervalo se interrumpe el riego que no sea por goteo, para evitar el desperdicio

de agua y la pérdida de elementos nutritivos. Este intervalo es el que debe mantenerse en riego por goteo.

- Lectura de 30 a 60 centibares. Intervalo para iniciar el riego. La mayoría de las plantas cuyo sistema radical está contenido en los primeros 50 cm de suelo no sufren hasta que las lecturas llegan al intervalo de 40 a 50. En riego por goteo esta humedad es escasa.
- Lecturas superiores a 70 centibares. En la mayoría de los suelos y cultivos la lectura de 70 centibares indica que las plantas no disponen de todo el agua necesaria para un crecimiento máximo.

Las tensiones del agua disponible son más bajas en los suelos arenosos que en los arcillosos. Como los tensiómetros no sirven para lecturas de valores altos, de ahí que estos aparatos sean más útiles en suelos arenosos que en los arcillosos.

El mantenimiento de los tensiómetros colocados consiste en rellenarlos de agua periódicamente, para que el nivel de agua en el tubo permanezca por encima del punto de intersección del manómetro. El mejor momento para el rellenado es después de regar, cuando la lectura es baja. Después de añadir el agua se utiliza la bomba de vacío para retirar las burbujas de aire. Cuando el tensiómetro necesita ser rellenado con mucha frecuencia suele ser debido a pérdidas por la junta del tapón o a que el suelo no está convenientemente apretado alrededor de aparato.

Medición indirecta del potencial hídrico

Los instrumentos más utilizados son los bloques de resistencia eléctrica y los sensores de salinidad.

- *Bloques de resistencia eléctrica.* Están basados en lo siguiente: si se coloca en el suelo un bloque de material poroso (yeso, fibra de vidrio) se establece un movimiento de agua entre el suelo y el bloque, que cesa cuando el potencial de ambos se iguala. El potencial del agua del bloque está relacionado, por tanto, con el contenido de humedad del suelo.

Los bloques de resistencia eléctrica miden el potencial matricial del suelo, pero no directamente, sino mediante un parámetro relacionado con él, como es la resistencia al paso de la corriente eléctrica. Cuando el suelo pierde humedad, el agua pasa del bloque al suelo, disminuyendo la resistencia eléctrica de aquél.

La resistencia eléctrica del bloque depende de su contenido en agua, pero depende también de otros factores, tales como: salinidad, temperatura y dimensionado del bloque. El efecto de la salinidad se amortigua construyendo los bloques de yeso, con lo cual, al estar la solución del bloque saturada de sulfato de calcio, las variaciones de salinidad en la solución del suelo no provocan variaciones apreciables en la solución interior del bloque, salvo que el suelo contenga una cantidad considerable de sales.

Los bloques, que llevan en su interior unos electrodos, se instalan en el suelo a la profundidad deseada. Para efectos de riego conviene instalarlos poco después

de la siembra del cultivo, para que las raíces crezcan alrededor de ellos y se asegure el contacto entre los bloques y el suelo. En cada punto donde se quiere medir la humedad se colocan dos bloques: uno superficial (de 20 a 30 cm) y otro a mayor profundidad (de 30 a 60 cm).

Los distintos modelos de bloques responden de diferente forma a los cambios de humedad del suelo, por cuyo motivo cada fabricante debe suministrar los datos necesarios para la calibración del aparato.

- *Sensores de salinidad.* Estos aparatos miden el potencial osmótico del agua del suelo. Este potencial, como la conductividad eléctrica de la solución del suelo, depende del contenido de sales. Dado que ambos parámetros —potencial osmótico y conductividad eléctrica— están relacionados, se puede medir indirectamente el primero a partir del segundo.

Los sensores de salinidad constan de unos bloques de cerámica porosa, que se colocan en el terreno para que la solución del suelo pase a través de los poros de la cerámica. En su interior hay unos electrodos que miden la resistencia eléctrica y, a través de ella, la conductividad eléctrica. Para la calibración se emplean soluciones de conductividad eléctrica y temperatura conocidas.

Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo empieza con su entrada en el perfil mismo, continúa con su almacenamiento en la zona explorada por las raíces y termina con su salida de esta zona mediante los siguientes procesos:

- Paso del agua a zonas más profundas.
- Evaporación en la superficie del suelo, hasta donde el agua asciende por capilaridad.
- Absorción por la planta.

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

Infiltración

La infiltración es el movimiento de agua desde la superficie del suelo hacia abajo, que tiene lugar después de una lluvia o de un riego. La facultad de un suelo para permitir el paso del agua a través de su perfil recibe el nombre de *permeabilidad*, que depende del número de poros, así como de su tamaño y de su continuidad. Un gran número de poros y unos poros grandes y continuos favorecen la permeabilidad.

Cuando se aplica agua a toda la superficie del suelo, el flujo tiene lugar en dirección vertical; pero cuando se aplica sólo a una parte de la superficie, el flujo tiene lugar en direcciones vertical y horizontal.

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

El régimen de circulación del agua en el suelo puede ser:

- *Flujo no saturado*. Cuando la intensidad de aplicación de agua al suelo es menor que la velocidad de infiltración, el agua se va desplazando a través de los poros, aumentando la profundidad de mojado pero sin ocuparlos totalmente. El movimiento del agua viene condicionado por las potenciales matricial y gravitacional.
- *Flujo saturado*. Si la intensidad de aplicación es mayor que la velocidad de infiltración se forma, en primer lugar, una lámina de agua sobre la superficie, y a medida que penetra en el perfil va ocupando la totalidad de los poros. El movimiento del agua viene condicionado por los potenciales gravitacional y de presión.

Cuando el suelo está seco, la velocidad de infiltración es alta; pero a medida que las arcillas se expanden y taponan parcialmente los poros, la velocidad de la infiltración disminuye gradualmente hasta llegar a un punto en que se mantiene prácticamente constante (figura 1-9 A). Este valor constante se llama *velocidad de infiltración básica*, que depende, fundamentalmente, de la textura del suelo. De un modo general, los valores de la velocidad de infiltración básica o tasa de infiltración son los siguientes:

Arcilloso	< 5	mm/hora
Franco-arcilloso	5-10	»
Franco	10-20	»
Franco-arenoso	20-30	»
Arenoso	> 30	»

Cuando no se tienen datos de ensayos de campo, la velocidad de infiltración básica es la que determina los sistemas de riego, así como el diseño del mismo en cuanto al tamaño de la unidad operativa de riego y los caudales a utilizar.

La *infiltración acumulada* es la cantidad de agua que pasa a través de la superficie del suelo en un tiempo determinado. Se mide en mm (figura 1-9 B).

Redistribución

La redistribución consiste en que el movimiento del agua dentro del perfil del suelo continúa después de haber cesado la aportación de la misma a la superficie. Este mo-

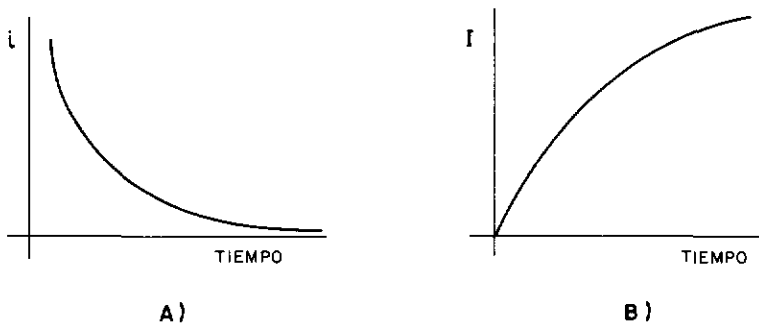


Fig. 1-9 A) Curva de la velocidad de infiltración (i) en función del tiempo. La rama horizontal de la curva corresponde a la velocidad de infiltración básica. B) Curva de la infiltración acumulada (I) en función del tiempo.

vimiento viene en función de las diferencias de potencial hídrico y cesa cuando estas diferencias se anulan. Cuando existe una capa freática en el suelo, el potencial del agua en la superficie es, por lo general, menor que en la capa freática, por lo que se produce un ascenso capilar cuya altura depende del tamaño de los poros. En suelos de textura fina, esta altura puede alcanzar cifras considerables (hasta 2.5-3 metros), si bien la velocidad de recuperación de estas cotas es tan lenta que no llega a compensar las pérdidas por evaporación.

En la parte inferior del perfil, si el potencial gravitacional es mayor que el matricial, el agua dreña hacia capas inferiores.

Medida de la velocidad de infiltración

Los procedimientos más usuales para medir en el campo la velocidad de infiltración son: el cilindro infiltrómetro y el surco infiltrómetro.

Método del cilindro infiltrómetro

Este método consiste en verter agua en un tubo cilíndrico colocado sobre el terreno y medir en tiempos sucesivos la disminución de la altura del agua vertida en el cilindro. El agua penetra en profundidad en el área de terreno correspondiente a la base del cilindro, pero también se extiende lateralmente, lo que origina un resultado erróneo por exceso. Para evitar este inconveniente se dispone otro tubo cilíndrico de mayor diámetro concéntrico con el anterior, y se vierte agua también en el espacio comprendido entre los dos cilindros. De este modo, el agua de los dos recipientes penetra en el suelo al mismo tiempo, evitándose la infiltración lateral del agua vertida en el cilindro interior, con lo cual el vaciado de este cilindro indica la velocidad de infiltración con más exactitud.

Este método se utiliza en suelos en los que se establecen sistemas de riego por fajas, compartimentos cerrados o melgas, aspersión y goteo.

El cilindro central, de acero, debe tener un diámetro de, al menos, 30 cm y una longitud superior a los 30 cm. Es recomendable que el acero tenga un espesor de 5 mm y vaya provisto de un borde con filo, con el fin de clavarlo con facilidad en el terreno sin deteriorar la estructura del suelo. El cilindro periférico tendrá una longitud de 20-25 cm y un diámetro de, al menos, 30 cm mayor que el del cilindro interior. La lectura de la altura del agua se hace mediante una regla graduada o con un tornillo micrométrico. (fig. 1-10).

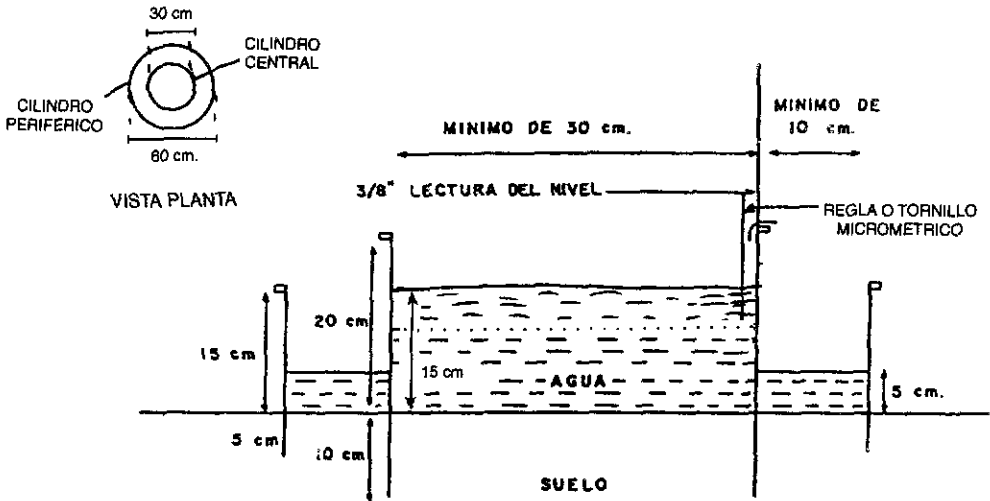


Fig. 1-10 Colocación del cilindro infiltrómetro usado para medir la infiltración del suelo. (Fuente: Aguilera y Martínez).

El proceso de la medición se hace de la siguiente forma:

- Se coloca el cilindro de menor diámetro en el lugar elegido y se introduce en el suelo mediante golpes de martillo hasta que haya penetrado 15-20 cm. Se evitará en todo momento que el cilindro quede inclinado, con el fin de evitar que se alteren las condiciones físicas del suelo.
- El cilindro de mayor diámetro se coloca concéntrico con el anterior y se introduce a menor profundidad que este último.
- Se llena de agua el espacio comprendido entre ambos cilindros hasta una altura de 5-10 cm y se mantiene esa altura de agua durante todo el proceso.
- Inmediatamente después se llena de agua el cilindro interior hasta una altura de 15-20 cm. Rápidamente se marca este nivel, que ha de servir de referencia a las lecturas posteriores, y se anota el momento de la observación.
- Se realizan mediciones de la altura de agua del cilindro interior a intervalos periódicos de 15 minutos, anotando los valores observados. Si se quiere tener una información más completa se pueden hacer mediciones a los 5, 10, 20, 30, 45, 60 y 120 minutos y luego cada hora, hasta completar un tiempo de 3-4 horas

o, en todo caso, hasta llegar a la permeabilidad estabilizada, que se alcanzará antes en suelos arenosos que en los arcillosos.

- Cuando el agua baja hasta una altura de unos 6 cm se rellena el cilindro central hasta el nivel inicial.

Con los datos obtenidos se calcula la cantidad de agua infiltrada durante un determinado tiempo y se elaboran los gráficos correspondientes. Para mayor seguridad en los resultados conviene hacer las mediciones con 3 equipos y sacar la media de las mismas.

Método del surco infiltrómetro

Este método consiste en medir los caudales de entrada y salida del agua que escurre a lo largo de un surco. La diferencia entre ambos es la cantidad de agua infiltrada durante un determinado período. Se utiliza este método en suelos en donde se haya de regar por surcos.

El proceso a seguir es el siguiente:

- En el terreno que se pretende regar se trazan 3 surcos de 30-40 m de largo, con la misma separación que hayan de tener los de cultivo. Se selecciona el surco del centro para hacer la determinación de la infiltración.
- Para hacer la medición del caudal, si no se dispone de aforadores Parshall, se cavan unos pozos en los extremos del surco central, en donde se colocan unos baldes para medir los caudales de entrada y salida.
- Se deja correr agua por los 3 surcos al mismo tiempo, con el fin de que la infiltración en el surco central se produzca de forma análoga a como se ha de producir en el riego. Se mantiene constante el caudal de entrada.
- Se anota la hora de entrada del agua en el surco y la hora en que llega al final del surco.
- Se dejan pasar unos minutos después de que el agua haya llegado al final del surco, con el fin de que el caudal se regularice, y, a continuación, se efectúa su medición a la entrada y a la salida del surco.
- Se continúan las mediciones de caudal con diversos intervalos de tiempo a lo largo de, al menos, 2 horas, hasta que el caudal de salida se haga constante.

Con los datos obtenidos se calcula la cantidad de agua infiltrada durante un tiempo determinado, lo que permite calcular la velocidad de infiltración a lo largo del tiempo, mediante la fórmula:

$$I = \frac{Q_1 - Q_2}{b \times L} \times 360$$

I = Velocidad de infiltración, en cm/hora.

Q_1 = Caudal de entrada, en l/seg.

Q_2 = Caudal de salida, en l/seg.

L = Longitud que separa dos medidores, en m.

b = Separación entre surcos, en m.

Circulación del agua a través de la planta

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

Transpiración

La transpiración es el paso del agua en estado de vapor desde la planta hacia la atmósfera a través de los *estomas*, que son unos orificios situados en la epidermis de las hojas, aunque también ocurre, en pequeña cantidad, a través de la cutícula de otras células epidérmicas. Cuando los estomas se cierran, la transpiración cuticular es la única que se produce.

La intensidad de la transpiración viene condicionada por una serie de factores, unos dependientes de la atmósfera y otros de la planta. Los primeros son los siguientes:

- *La humedad relativa del aire.* A menor humedad relativa corresponde un menor potencial del agua en la atmósfera, lo que favorece la transpiración.
- *La temperatura del aire.* Para una misma cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera, la humedad relativa disminuye al aumentar la temperatura. Por consiguiente, un aumento de la temperatura favorece la transpiración. Por otra parte, la mayor temperatura, al estimular la fotosíntesis, favorece la apertura de los estomas; sin embargo, temperaturas superiores a 30 °C estimulan la respiración, provocando el cierre de los estomas.
- *La velocidad del viento.* Alrededor de la superficie de la hoja se forma una delgada capa de aire con una gran cantidad de vapor procedente de la transpiración. Cuando el aire está en movimiento se renueva esa capa, anulando el efecto amortiguador de la transpiración. La mayor velocidad del viento favorece, por tanto, la intensidad de la transpiración.
- *La luz solar.* La luz activa la fotosíntesis, lo que estimula la apertura de los estomas. En ausencia de luz (de noche) no se produce transpiración.

La capacidad de los estomas para abrirse o cerrarse depende del contenido hídrico de las células oclusivas: con alto contenido hídrico, el estoma se abre, y con bajo contenido hídrico, el estoma se cierra (fig. 1-11). Naturalmente, el contenido hídrico de estas células viene relacionado con el contenido hídrico general de la planta, que, a su vez, depende del contenido hídrico del suelo. Cuando la absorción de agua es inferior a la pérdida en la transpiración, el estoma se cierra y cesa la transpiración.

La captación del bióxido de carbono atmosférico necesario para la fotosíntesis se realiza, igual que la transpiración, a través de los estomas, por lo que se puede considerar

a éstos como reguladores del equilibrio entre las funciones fisiológicas de la fotosíntesis y la eliminación de agua.

La transpiración contribuye a regular la temperatura de la hoja, ya que la evaporación del agua consume una gran cantidad de energía procedente de la energía solar absorbida. Si no se consumiera por este procedimiento el exceso de energía solar absorbida por las hojas, la temperatura de éstas podría exceder los límites compatibles de actuación de los enzimas.

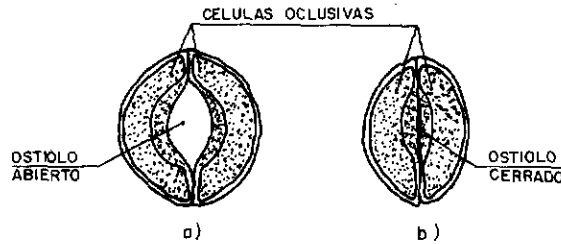


Fig. 1-11 Apertura y cierre de un estoma (en sección). a) Cuando las células oclusivas tienen mucha agua adquieren una forma que permite la apertura del ostiolo. b) Cuando las células oclusivas tienen poca agua, el ostiolo se cierra.

La transpiración es también la causante de la diferencia de potencial entre la raíz y la hoja, lo que permite distribuir por toda la planta el agua y las sales minerales disueltas en ella.

La absorción

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

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

Por lo general, el mayor esfuerzo que han de vencer las plantas es el potencial matricial; sin embargo, los suelos salinos crean, a veces, un potencial osmótico tan bajo que las plantas no absorben el agua y se marchitan aunque el suelo esté a la capacidad de campo.

Cuando la raíz extrae agua del suelo, el potencial del agua baja en la zona que ha perdido agua, lo cual provoca un desplazamiento del agua de las zonas adyacentes. Estos desplazamientos de agua por capilaridad son importantes para unas distancias de unos pocos milímetros. Desde luego que también se producen desplazamientos a mayor distancia, pero no con suficiente rapidez como para cubrir las necesidades de absorción de las plantas en las fases de mayor crecimiento. En este caso, el crecimiento de las raíces hacia el agua es más efectivo que el movimiento capilar del agua hacia las raíces.

El agua aprovechada por la planta es el agua disponible comprendida en la profundidad de suelo explorado por las raíces. El desarrollo del sistema radical depende de la

especie cultivada y de las características del suelo. Los suelos de textura gruesa permiten mayor profundidad que los de textura fina.

Balance hídrico de la planta

El balance hídrico de la planta es el resultado de las aportaciones y de las pérdidas. En ocasiones puede ocurrir que las aportaciones por absorción superen a las pérdidas por transpiración, sobre todo cuando ésta no se produce (de noche), en cuyo caso el exceso de agua se elimina por las hojas en forma de gotas líquidas, a través de unas estructuras llamadas *hidatodos*, mediante un proceso llamado *gutación*.

Es más frecuente que las pérdidas superen a las aportaciones, en cuyo caso se produce un déficit hídrico, cuyos efectos negativos dependen de su intensidad y duración y del estado fenológico de la planta.

Un déficit de pequeña intensidad o de escasa duración tiene poca repercusión y la planta se repone cuando se recupera la situación normal. Es el caso, por ejemplo, del déficit que experimentan muchas plantas durante las horas de máxima insolación de un día caluroso. Cuando el déficit hídrico es importante en duración o en intensidad, las hojas adquieren una consistencia flácida y la planta empieza a marchitarse, con el consiguiente efecto negativo sobre el rendimiento del cultivo, tanto en cantidad como en calidad.

En determinadas etapas de la vida de la planta, como es el caso de la floración, el efecto es particularmente negativo, en cuya etapa cesa o disminuye significativamente el crecimiento de las raíces, lo que reduce las posibilidades de absorción de agua. Un déficit intenso o prolongado reduce considerablemente o hace fracasar la polinización o la fecundación.

El trasplante y la plantación de estacas y esquejes son situaciones con riesgo de déficit hídrico: en el primer caso, porque se destruye una parte del sistema radical, y en el segundo, porque no hay raíces. Se reducen las pérdidas de agua con los siguientes procedimientos:

- Eliminar algunas hojas.
- Aumentar la humedad relativa del aire mediante riegos de tipo niebla, lo que reduce el potencial hídrico de la atmósfera.
- Ejecutar estas operaciones en épocas del año o momentos del día con mayor humedad atmosférica.

Períodos críticos de las plantas

La mayoría de las plantas tienen períodos críticos durante los cuales las necesidades de agua son más acuciantes, de tal modo que si no absorben la cantidad precisa la producción se resiente notablemente.

En la mayoría de los cultivos, los períodos críticos suelen coincidir con períodos de rápido crecimiento, la floración y la formación de frutos y semillas.

Se indican a continuación los períodos críticos de algunos cultivos:

- Trigo: durante las dos semanas que preceden y siguen a la floración.
- Maíz: desde la floración hasta la aparición de las barbas.
- Leguminosas para grano: durante la floración y formación de las vainas.
- Papa: desde la floración hasta tres semanas antes de cosechar.
- Alfalfa: inmediatamente después del corte. Para la producción de semilla: desde el comienzo de la floración.
- Remolacha azucarera: desde tres semanas después del brote hasta la cosecha.
- Algodón: desde la primera floración hasta la formación de las semillas.
- Frijol: durante la floración y el llenado de las vainas.
- Chícharo: durante la floración y la formación de la cosecha.
- Arroz: durante la floración y el desarrollo del fruto.
- Sorgo: durante la floración y la formación del fruto.
- Soya: durante la floración y la formación del fruto.
- Girasol: durante la floración y la formación de la cosecha.
- Caña de azúcar: durante el período de rebrote y alargamiento de los tallos.
- Tabaco: durante el período de rápido crecimiento.
- Pimiento: durante todo el tiempo, especialmente desde comienzo de la floración.
- Tomate: en la formación de la flor y durante el crecimiento rápido del fruto.
- Cebolla: durante el crecimiento rápido del bulbo.
- Fresa: desde el desarrollo del fruto hasta la maduración.
- Cacahuete: durante la floración y la formación de la cosecha.
- Plátano: en todo tiempo, particularmente durante la primera parte del período vegetativo, la floración y la fructificación.
- Cítricos: durante la floración y la fructificación.
- Olivo: inmediatamente antes de la floración y de la formación del fruto.
- Vid: durante el alargamiento de los brotes y la floración.

Intervenciones para aumentar la producción vegetal

Mediante la fotosíntesis, las plantas transforman el agua y el bióxido de carbono en materia orgánica. El bióxido de carbono del aire es absorbido por la planta a través de los estomas, por lo que el cierre total o parcial de éstos elimina la fotosíntesis y, en consecuencia, la producción de materia orgánica. Por consiguiente, la producción vegetal depende directamente de la intensidad de la transpiración, que está regulada por la mayor o menor apertura de estomas.

El cierre total o parcial de los estomas se produce cuando la demanda evaporativa del aire (E) es muy superior a las posibilidades de transpiración de la planta (T). La demanda evaporativa del aire se incrementa bajo ciertas situaciones atmosféricas (tem-

peratura elevada, humedad relativa baja, viento seco y cálido), mientras que la transpiración se reduce ante ciertas situaciones del suelo y de la planta (reducida humedad en el suelo, plagas y enfermedades de las plantas, etc.).

La máxima producción vegetal se logra cuando las demandas de evaporación se igualan a las posibilidades de transpiración, o sea, cuando la relación T/E es igual a la unidad. El agricultor ha de procurar mantener esa relación lo más próxima posible a la unidad, de la forma siguiente:

1. *Aumento de la transpiración.* Para ello se actúa sobre:
 - *La planta.* Procurar un buen desarrollo foliar y radical mediante intervenciones tales como: eliminación de malas hierbas, control de plagas y enfermedades, laboreo, etc.
 - *El suelo.* Aportar agua al suelo (mediante el riego) y aumentar la capacidad de retención del agua en el suelo (mediante laboreo).
2. *Disminución de la demanda evaporativa.* En alguna medida se pueden modificar las condiciones atmosféricas que provocan una gran demanda evaporativa, como es el caso del riego, que crea un microclima en donde disminuye la temperatura y aumenta la humedad relativa del aire.

CAPÍTULO 2

NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

La evapotranspiración

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

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

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

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

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

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

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

Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos

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

Otros métodos empíricos evalúan la evapotranspiración a partir de datos climáticos y de otra clase. Entre ellos destacan los cuatro métodos estudiados por Doorenbos y Pruitt en la publicación de FAO *Las necesidades de agua de los cultivos: métodos de Blaney-Criddle, de la radiación, de Penman y de tanque evaporímetro.*

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

$$ET(\text{cultivo}) = ET_o \times K_c$$

$ET(\text{cultivo})$ = Evapotranspiración de un cultivo determinado, expresado en mm por día.

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm por día.

K_c = Coeficiente de cultivo, variable con el propio cultivo y con su período vegetativo.

ET_o se define como la tasa de evapotranspiración de un cultivo extenso y uniforme de gramíneas, de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y no está escaso de agua.

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

El cálculo de ET_o se hace en la misma zona de riego (método del tanque evaporímetro) o mediante fórmulas que relacionan ciertos datos climáticos (métodos de Blaney-Criddle, de la radiación y de Penman).

Los métodos de Blaney-Criddle, de la radiación y de Penman se utilizan, generalmente, como métodos de predicción, mientras que el método del tanque evaporímetro mide la evaporación real ocurrida en dicho tanque que se relaciona con la evapotranspiración real), aunque también se puede utilizar como método de predicción.

Método de Blaney-Criddle

Este método se aplica para períodos de un mes. Se parte de la fórmula:

$$f = p(0.46 t + 8.13)$$

f = Factor de Blaney-Criddle, expresado en mm de agua diarios. Tiene el mismo valor para todos los días del mes considerado.

t = Temperatura media mensual, expresada en °C

$$t = \frac{T \text{ máxima media} + T \text{ mínima media}}{2}$$

p = Tanto por uno de horas diurnas del mes respecto de las totales (tabla 1).

Los efectos del clima sobre los cultivos no quedan definidos únicamente por la temperatura y la duración del día, que son las dos únicas variables relacionadas con el factor f . Las necesidades de agua de un cultivo varían considerablemente en climas que tienen la misma temperatura y latitud, pero con variación de otros datos, tales como la humedad, la insolación y el viento.

Las relaciones entre el factor f y la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o se indica gráficamente en la figura 2-1, en donde se han considerado tres niveles de humedad, insolación y viento. Hay que tener en cuenta que:

- En lo relativo a humedad se considera la humedad relativa mínima (HR mínima) durante las horas diurnas, que suele darse normalmente entre las 2 y las 4 de la tarde.
- En lo relativo a insolación se considera la relación n/N entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de insolación fuerte. En la tabla 2 se indican los valores de N correspondientes a distintos meses y latitudes. Los valores de n se obtienen mediante heliógrafo situado en la zona de estudio.
- En lo relativo al viento se consideran los vientos diurnos a una altura del suelo de 2 m.

Dado que f se expresa en mm diarios, la ET_o viene también expresada en mm diarios. ET_o representa el valor medio diario para el período de un mes.

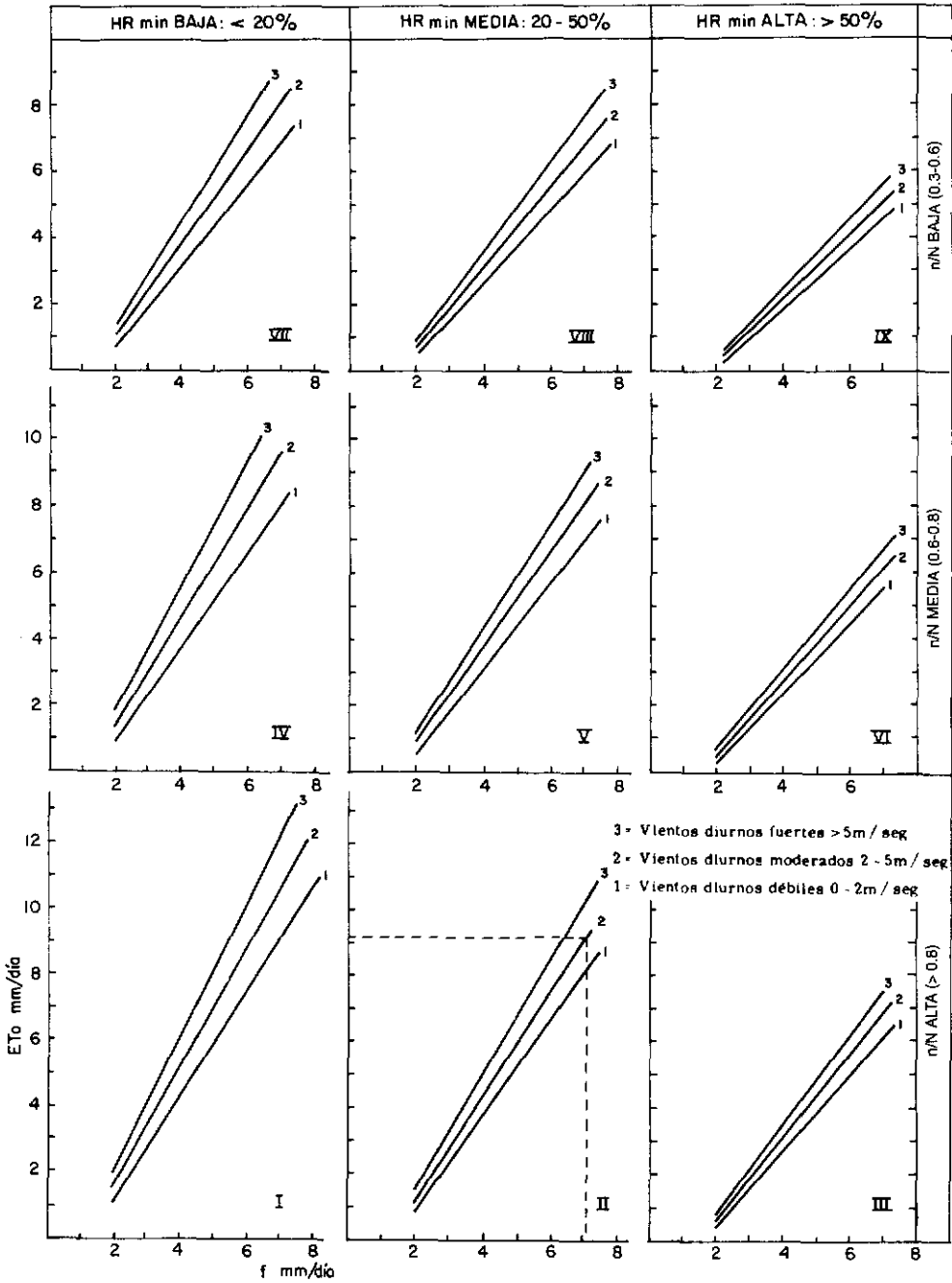


Fig. 2-1 Predicción de la ETo (eje de ordenadas) a partir del factor f de Blaney-Criddle (eje de abscisas), para diferentes condiciones de humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diurnos (FAO).

44 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

Ejemplo

Calcular la *ET_o* media diaria del mes de junio por el método de Blaney-Criddle con los datos siguientes:

— Temperaturas del mes de junio:

<i>Día</i>	<i>Temperatura máxima (en °C)</i>	<i>Temperatura mínima (en °C)</i>	<i>Día</i>	<i>Temperatura máxima (en °C)</i>	<i>Temperatura mínima (en °C)</i>
1	31.2	21.6	16	32.9	22.7
2	31.7	21.4	17	33.6	23.1
3	31.2	21.3	18	33.4	23.4
4	30.9	21.1	19	33.6	23.6
5	31.4	21.6	20	33.5	23.5
6	32.3	21.9	21	33.9	23.7
7	32.7	22.1	22	34.2	23.2
8	33.2	22.5	23	34.3	22.9
9	33.4	22.6	24	34.2	22.8
10	33.6	22.7	25	34.1	23.1
11	33.1	23.2	26	33.8	22.7
12	32.9	23.1	27	33.6	22.5
13	32.6	22.8	28	33.5	22.3
14	32.5	22.7	29	33.6	22.1
15	32.4	22.5	30	33.4	22.5

— Latitud: 40° Norte.

— Humedad relativa mínima: 30 %

— Insolación fuerte: 12.5 horas diarias de media.

— Viento: moderado.

Solución:

1. Cálculo del factor $f = p (0.46 t + 8.13)$

a) Cálculo de t

Suma de las temperaturas máximas 990.7
 Suma de las temperaturas mínimas 677.2

$$T \text{ máxima media} = \frac{\text{Suma de las temperaturas máximas}}{\text{Número de días}} =$$

$$= \frac{990.7}{30} = 33.02$$

$$T \text{ mínima media} = \frac{\text{Suma de las temperaturas mínimas}}{\text{Número de días}} =$$

$$= \frac{677.2}{30} = 22.84$$

$$T \text{ media del mes} = \frac{T \text{ máxima media} + T \text{ mínima media}}{2} =$$

$$= \frac{33.02 + 22.84}{2} = 27.93$$

b) Cálculo de p

En la tabla 1, para el mes de junio y 40° Norte

$$p = 0.34$$

Sustituyendo valores

$$f = p(0.46 t + 8.13) = 0.34(0.46 \times 27.93 + 8.13) = 7.12 \text{ mm}$$

2. Cálculo de ET_o

a) Humedad relativa mínima = 30 %

Valoración: media.

b) En la tabla 2, para el mes de junio y 40° Norte, se obtiene $N=15$ horas.

$$\frac{n}{N} = \frac{12.5}{15} = 0.83$$

Valoración: alta.

c) Viento moderado.

Entrando con estos datos en la figura 2-1, recuadro II y recta 2, se obtiene:

Para

$$f = 7.12 \text{ (eje X)} \quad ; \quad ET_o = 9.2 \text{ (eje Y)}$$

$$ET_o = 9.12 \text{ mm/día}$$

Observaciones al método

- El método de Blaney-Criddle se aplica solamente cuando los únicos datos concretos de que se dispone son los de temperaturas. Los datos de humedad, insolación y viento son datos estimados.
- No se debe emplear en regiones ecuatoriales, en zonas de gran altitud, en islas pequeñas ni en aquellos climas en donde hay una gran variación de horas de insolación durante los meses de transición (primavera y otoño).

Método de la radiación

Este método se aplica para períodos de un mes o 10 días. Se parte de la fórmula:

$$ET_o = W \cdot R_s \cdot c$$

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm/día. Tiene el mismo valor para todos los días del período considerado (30 ó 10 días).

R_s = Radiación solar que llega a la superficie de la tierra, expresada en equivalente de evaporación en mm/día.

W = Factor de ponderación, que depende de la temperatura y de la altitud.

c = Factor de ajuste, que depende de valores estimados de la humedad y del viento.

1. Cálculo de R_s

La radiación R_s que llega a la superficie de la tierra es una fracción de la radiación extraterrestre R_a . La radiación R_s se mide directamente en centros especializados, pero cuando no se dispone de estos datos en la zona considerada (que es el caso más frecuente) se calcula mediante la fórmula:

$$R_s = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_a$$

n/N = Relación entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de insolación fuerte. Los valores de N se indican en la tabla 2. Los valores de n se obtienen mediante heliógrafo situado en la zona que se estudia.

R_a = Radiación extraterrestre que se recibe antes de llegar a atmósfera. En la tabla 3 se indican los valores de R_a correspondientes a distintos meses y latitudes. La radiación se mide en calorías por cm^2 y minuto, pero conviene expresarla en equivalente de evaporación de agua en mm/día.

2. Cálculo de W

En la tabla 4 se calcula el índice de ponderación en función de la altitud de la zona y de la temperatura media (en °C) del período considerado:

$$T \text{ media} = \frac{T \text{ máxima media} + T \text{ mínima media}}{2}$$

3. Cálculo de ET_o

La relación entre $W \cdot R_s$ y ET_o se indica en la figura 2-2, en donde se han considerado 4 niveles de humedad relativa media (HR media) y 4 niveles de vientos diurnos

$$HR \text{ media} = \frac{HR \text{ máxima} + HR \text{ mínima}}{2}$$

Como $W \cdot R_s$ (indicado en el eje X) viene expresado en mm/día, ET_o (indicado en el eje Y) viene también expresado en mm/día.

Ejemplo

Calcular la ET_o media diaria del mes de junio, por el método de la radiación, con los datos siguientes:

- Temperatura media del mes de junio: 28 °C.
- Latitud: 40° Norte.
- Altitud: 500 m.
- Humedad relativa máxima: 40 %.
- Humedad relativa mínima: 30 %.
- Insolación fuerte media: 12,5 horas diarias.
- Viento moderado.

Solución:

1. Cálculo de $R_s = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_a$

$n = 12.5$ horas.

$N = 15$ horas (tabla 2, mes de junio a 40° Norte).

$$\frac{n}{N} = \frac{12.5}{15} = 0.83$$

$R_a = 17.3$ mm/día (tabla 3, mes de junio a 40° Norte).

Sustituyendo valores en la fórmula

$$R_s = (0.25 + 0.50 \times 0.83) 17.3 = 11.4 \text{ mm/día}$$

2. Cálculo de W

Para una altitud de 500 m y una temperatura media del mes de junio de 28 °C, en la tabla 4 se obtiene $W = 0.78$

$$W \cdot R_s = 0.78 \times 11.4 = 8.89 \text{ mm/día}$$

3. Cálculo de ET_o

$$HR \text{ media} = \frac{HR \text{ máxima} + HR \text{ mínima}}{2} = \frac{40 + 30}{2} = 35 \%$$

Viento moderado.

Entrando con estos datos en la figura 2-2, recuadro 1 y recta 2 se obtiene:

Tabla 3: Radiación extraterrestre Ra expresada en equivalente de evaporación de agua en mm/día

Hemisferio Norte												Hemisferio Sur												
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Lat.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48°	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46°	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44°	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42°	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40°	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38°	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36°	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.4	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34°	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32°	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30°	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28°	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26°	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24°	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22°	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20°	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18°	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16°	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14°	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12°	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10°	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8°	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.9	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6°	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4°	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2°	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0°	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Tabla 4: Valores del factor de ponderación W para los efectos de la radiación sobre la ET_0 , a diferentes temperaturas y altitudes

Temperatura °C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Altitud (m)																				
0	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.68	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85
500	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86
1,000	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87
2,000	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
3,000	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.88	0.89
4,000	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.76	0.78	0.79	0.81	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89	0.90	0.90

50 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

Para

$$W \cdot R_s = 8.89 \quad ; \quad ETo = 9.6$$

$$ETo = 9.6 \text{ mm/día}$$

Observaciones al método

— El método de la radiación se aplica cuando se dispone de datos concretos de temperatura y radiación. La radiación se mide en centros especializados, pero cuando no se dispone de este dato se puede calcular mediante tablas.

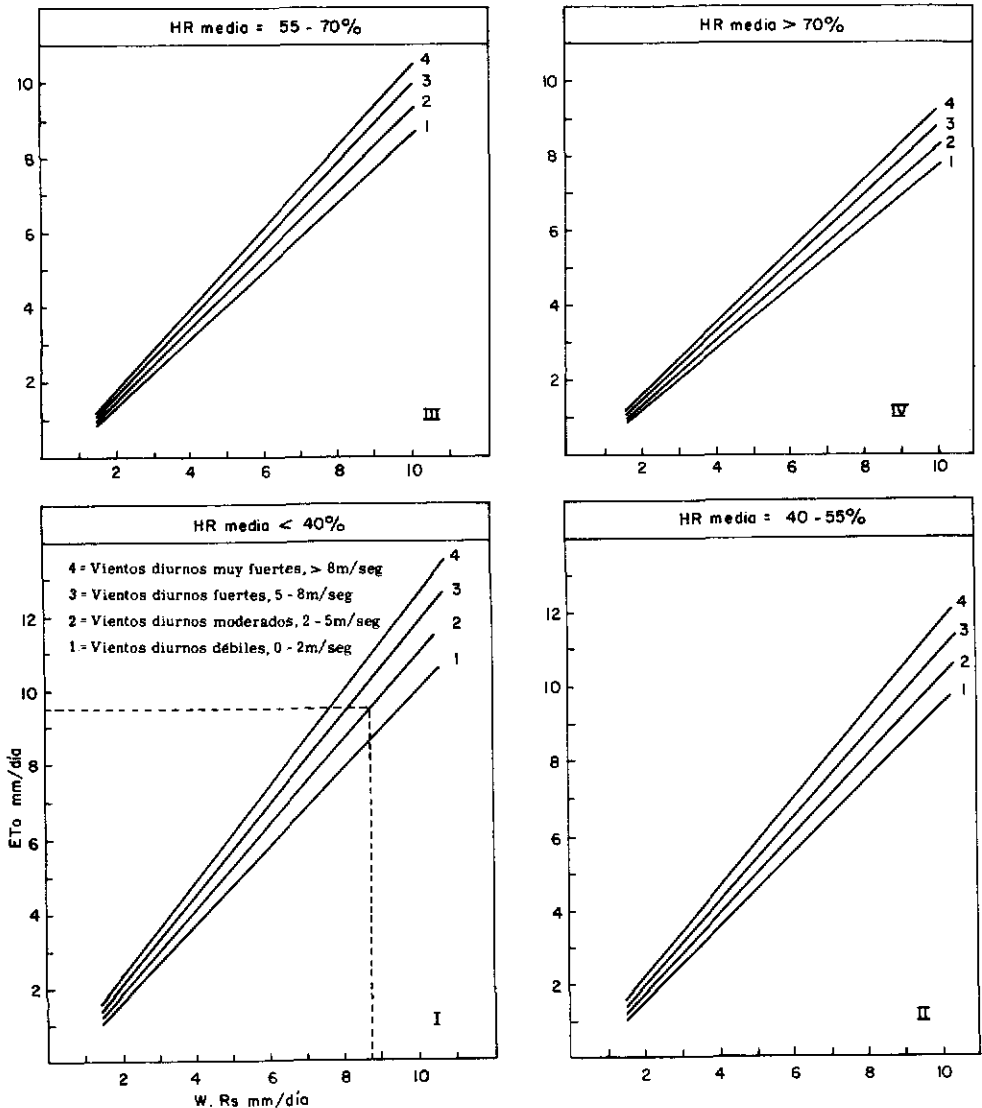


Fig. 2-2 Relación para obtener la ETo (eje de ordenadas) a partir de valores calculados de $W \cdot R_s$ (eje de abscisas) y un conocimiento general de la humedad relativa media y de los vientos diurnos (FAO).

- Los datos de la humedad y del viento son datos estimados.
- Los resultados del método de radiación son más fiables que los obtenidos por el método de Blaney-Criddle. En zonas ecuatoriales, islas pequeñas y zonas de gran altitud el método de radiación es más seguro que el de Blaney-Criddle.

Método de Penman

Este método se utiliza en zonas donde se disponga de datos medidos sobre temperatura, radiación, humedad y viento. Es el más exacto de los que utilizan fórmulas empíricas para predecir las necesidades hídricas de los cultivos, pero exige cálculos laboriosos. Se aplica la fórmula siguiente:

$$ET_o = c[W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (ea - ed)]$$

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm/día.

ea = Presión de saturación del vapor de agua, expresada en milibares (tabla 5).

ed = Presión real del vapor de agua, expresada en milibares.

$$ed = \frac{ea \cdot HR}{100}$$

(HR = Humedad relativa media, en porcentaje)

$$f(u) = 0.27 \left(1 + \frac{u}{100} \right)$$

(u es la velocidad del viento expresada en km/día, a 2 m de altura).

R_n = Radiación neta total, expresada en equivalente de evaporación en mm/día.

$$R_n = 0.75R_s - R_{nl}$$

$$R_s = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_a$$

R_s , R_a , n y N son los mismos conceptos indicados en el método de radiación (tablas 2 y 3).

R_{nl} = Radiación neta de onda larga, expresada en equivalente de evaporación en mm/día.

$$R_{nl} = f(T) \cdot f(ed) \cdot f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (\text{tablas 6, 7 y 8})$$

W = Factor de ponderación (tabla 4).

c = Factor de ajuste (tabla 9).

Tabla 5: Presión de saturación del vapor (ea) en mbar, en función de la temperatura media del aire (T) en °C

Temperatura °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ea mbar	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.7	9.3	10.0	10.7	11.5	12.3	13.1	14.0	15.0	16.1	17.0	18.2	19.4	20.6	22.0
Temperatura °C	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
ea mbar	23.4	24.9	26.4	28.1	29.8	31.7	33.6	35.7	37.8	40.1	42.4	44.9	47.6	50.3	53.2	56.2	59.4	62.8	66.3	69.9

Tabla 6: Efecto de la temperatura f(T) sobre la radiación de onda larga (Rnl)

Temperatura °C	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
f(T) = $\delta Tk'$	11.0	11.4	11.7	12.0	12.4	12.7	13.1	13.5	13.8	14.2	14.6	15.0	15.4	15.9	16.3	16.7	17.2	17.7	18.1

Tabla 7: Efecto de la presión real del vapor de agua f(ed) sobre la radiación de onda larga (Rnl)

ed mbar	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
f(ed) = $0.34 - 0.044 \sqrt{ed}$	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06

Tabla 8: Efecto de la relación entre el número real y el máximo de horas de fuerte insolación f(n/N), sobre la radiación de onda larga (Rnl)

n/N	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0
f(n/N) = $0.1 + 0.9n/N$	0.10	0.15	0.19	0.24	0.28	0.33	0.37	0.42	0.46	0.51	0.55	0.60	0.64	0.69	0.73	0.78	0.82	0.87	0.91	0.96	1.0

Tabla 9: Factor de ajuste (c) en la ecuación de Penman modificada

Rs mm/día	HR máx = 30%				HR máx = 60%				HR máx = 90%			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
<i>U día miseg</i>												
<i>U día/U noche = 4.0</i>												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.79	0.84	0.92	0.97	0.92	1.00	1.11	1.19	0.99	1.10	1.27	1.32
6	0.68	0.77	0.87	0.93	0.85	0.96	1.11	1.19	0.94	1.10	1.26	1.33
9	0.55	0.65	0.78	0.90	0.76	0.88	1.02	1.14	0.88	1.01	1.06	1.27
<i>U día/U noche = 3.0</i>												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.76	0.81	0.88	0.94	0.87	0.96	1.06	1.12	0.94	1.04	1.18	1.28
6	0.61	0.68	0.81	0.88	0.77	0.88	1.02	1.10	0.86	1.01	1.15	1.22
9	0.46	0.56	0.72	0.82	0.67	0.79	0.88	1.05	0.78	0.92	1.06	1.18
<i>U día/U noche = 2.0</i>												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.69	0.76	0.85	0.92	0.83	0.91	0.99	1.05	0.89	0.98	1.10	1.14
6	0.53	0.61	0.74	0.84	0.70	0.80	0.94	1.02	0.79	0.92	1.05	1.12
9	0.37	0.48	0.65	0.76	0.59	0.70	0.84	0.95	0.71	0.81	0.96	1.06
<i>U día/U noche = 1.0</i>												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.64	0.71	0.82	0.89	0.78	0.86	0.94	0.99	0.85	0.92	1.01	1.05
6	0.43	0.53	0.68	0.79	0.62	0.70	0.84	0.93	0.72	0.82	0.95	1.00
9	0.27	0.41	0.59	0.70	0.50	0.60	0.75	0.87	0.62	0.72	0.87	0.96

Ejemplo

Calcular la *ET_o* media diaria en el mes de junio, por el método de Penman, con los datos siguientes:

- Temperatura media del mes: 28 °C.
- Latitud: 40° N.
- Altitud: 500 m.
- Insolación fuerte media durante el mes: 12,5 horas diarias.
- Humedad relativa mínima: 30 %.
- Humedad relativa máxima: 40 %.
- Velocidad del viento: 3 m/seg = 259 km/día.
- Relación velocidad viento día/velocidad viento noche: 1,5.

Solución:

$$HR = \frac{HR \text{ máx} + HR \text{ mín}}{2} = \frac{40 + 30}{2} = 35$$

$$ea = 37,8 \text{ mbar (tabla 5)}$$

$$ed = \frac{ea \cdot HR}{100} = \frac{37,8 \times 35}{100} = 13,2 \text{ mbar}$$

$$ea - ed = 37,8 - 13,2 = 24,6 \text{ mbar}$$

$$f(u) = 0,27 \left(1 + \frac{u}{100} \right) = 0,27 \left(1 + \frac{259}{100} \right) = 0,96$$

$$Ra = 17,3 \text{ mm/día (tabla 3)}$$

$$N = 15 \text{ horas/día (tabla 2)}$$

$$Rs = \left(0,25 + 0,5 \frac{n}{N} \right) Ra = \left(0,25 + 0,5 \frac{12,5}{15} \right) 17,3 = 11,4 \text{ mm/día}$$

$$Rnl = f(T) \cdot f(ed) \cdot f \left(\frac{n}{N} \right) = 16,3 \times 0,18 \times 0,85 = 2,5 \text{ mm/día}$$

(tablas 6, 7 y 8)

$$Rn = 0,75Rs - Rnl = 0,75 \times 11,4 - 2,5 = 6 \text{ mm/día}$$

$$W = 0,78 \text{ (tabla 4)}$$

$$c = 0,94 \text{ (tabla 9)}$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula:

$$\begin{aligned} ET_o &= c [W \cdot Rn + (1 - W) \cdot f(u)(ea - ed)] = \\ &= 0,94 [0,78 \times 6 + (1 - 0,78) \times 0,96 \times 24,6] = 9,2 \text{ mm/día} \end{aligned}$$

Método del tanque evaporímetro clase A

Los efectos combinados de la radiación, la temperatura, la humedad y el viento influyen sobre la cantidad de agua evaporada en una superficie de agua libre. Estos mismos elementos climáticos influyen también, de un modo análogo, sobre la evapotranspiración del cultivo. El método del tanque evaporímetro se basa en relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}), mediante la siguiente fórmula:

$$E_{To} = K_p \times E_p$$

E_{To} = Evapotranspiración del cultivo de referencia, expresada en mm por día.

K_p = Coeficiente del tanque, que depende del tipo de tanque, del clima y del medio que circunda al tanque.

E_p = Evaporación del tanque, expresada en mm por día. Representa el valor medio diario del período considerado.

El tanque más utilizado es el de clase A, que es de hierro galvanizado, de forma circular, con un diámetro de 124 cm y una profundidad de 25.5 cm. Se coloca sobre una plataforma de madera a 15 cm de altura sobre el suelo.

El tanque evaporímetro se instala en un medio abierto, en un sitio donde no haya a su alrededor cultivos que tengan más de 1 m de altura en un radio de 50 m. A su alrededor habrá suelo desnudo o hierba verde cortada frecuentemente.

El nivel del agua en el tanque no debe aproximarse ni alejarse mucho del borde. Cuando el nivel sube hasta 5 cm del borde o baja hasta 7.5 cm del mismo (como consecuencia de una lluvia o de la evaporación, respectivamente), se quita o se añade agua.

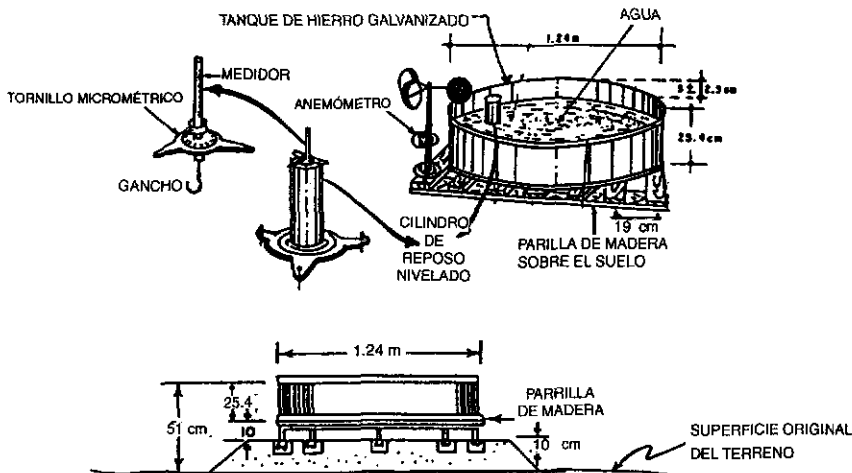


Fig. 2-3 Características del tanque evaporímetro clase A.

La lectura de la altura de agua en el tanque se hace todos los días a la misma hora mediante un tornillo micrométrico situado en un depósito. La lectura ha de hacerse de forma meticulosa, para evitar errores.

El coeficiente K_p varía con el clima de la región, el tipo de tanque y la colocación del mismo (situado sobre una cubierta verde o sobre barbecho). En la figura 2-4 se muestran las condiciones que puede tener el tanque. En la tabla 10 se indican los valores de K_p en distintas condiciones.

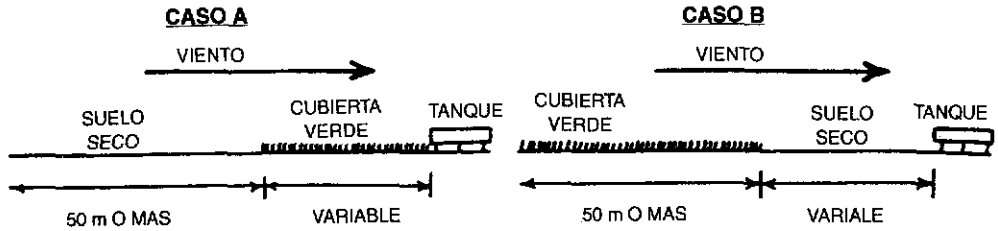


Fig. 2-4 Condiciones a considerar para seleccionar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase A.

Tabla 10: Coeficiente K_p , en el caso de un tanque de la clase A, para diferentes cubiertas y niveles de humedad relativa media y vientos durante las 24 horas (FAO)

Tanque clase A	Caso A Rodeado de cubierta verde baja			Caso B Rodeado de suelo seco				
	Baja <40	Media 40-70	Alta >70	Baja <40	Media 40-70	Alta >70		
	Distancia a barlovento de la cubierta verde (en m)			Distancia a barlovento del suelo seco (en m)				
Vientos km/día								
Débiles <175	0	0.55	0.65	0.75	0	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.7	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1,000	0.75	0.85	0.85	1,000	0.5	0.6	0.7
Moderados 175-425	0	0.5	0.6	0.65	0	0.65	0.75	0.8
	10	0.6	0.7	0.75	10	0.55	0.65	0.7
	100	0.65	0.75	0.8	100	0.5	0.6	0.65
	1,000	0.7	0.8	0.8	1,000	0.45	0.55	0.6
Fuertes 425-700	0	0.45	0.5	0.60	0	0.6	0.65	0.7
	10	0.55	0.6	0.65	10	0.5	0.55	0.65
	100	0.6	0.65	0.7	100	0.45	0.5	0.6
	1,000	0.65	0.7	0.75	1,000	0.4	0.45	0.55
Muy fuertes >700	0	0.4	0.45	0.5	0	0.5	0.6	0.65
	10	0.45	0.55	0.6	10	0.45	0.5	0.55
	100	0.5	0.6	0.65	100	0.4	0.45	0.5
	1,000	0.55	0.6	0.65	1,000	0.35	0.4	0.45

Ejemplo

Mediante un tanque evaporímetro clase A determinar ET_o durante el mes de junio con los datos siguientes:

- Tanque rodeado de 10 m de hierba verde baja.
- Humedad relativa media: 50%.
- Viento moderado.
- En el cuadro siguiente se indican las lecturas diarias de altura de agua del tanque, la cantidad de lluvia caída diariamente y las cantidades de agua añadidas o sustraídas al tanque.

Día	Altura de agua. mm	Lluvia mm	E_p mm	Día	Altura de agua. mm	Lluvia mm	E_p mm
1	205	—	6	16	183.3/205	—	6.9
2	199	—	5.2	17	198.1	—	7.1
3	193.8	—	5.4	18	191	—	7
4	188.4	—	5.5	19	184/205	—	6.8
5	182.9/205	—	5.4	20	198.2	—	6.7
6	199.6	—	5.8	21	191.5	—	6.5
7	193.8	—	5.4	22	185	—	4.9
8	188.4	—	5.8	23	180.1/205	—	4.8
9	182.6/205	—	5.7	24	200.2	—	5.1
10	199.3	—	6.1	25	195.1	—	5.6
11	193.2	—	6.2	26	189.5	—	6.1
12	187	—	6.4	27	183.4/205	—	6.9
13	180.6	21	6.	28	198.1	—	7.1
14	195.6	—	6.1	29	191	—	7
15	189.5	—	6.2	30	184/205	—	7.2
				1-7	197.8		

Se ha añadido agua hasta una altura de 205 mm los días 5,9,16,19,23,27 y 30.

Solución:

Se aplica la fórmula $ET_o = E_p \times K_p$.

$$E_p = \frac{\text{Suma de } E_p \text{ diaria durante el mes}}{\text{Número de días del mes}} = \frac{182.9}{30} = 6.1 \text{ mm/día}$$

La tabla 10 da $K_p = 0.7$

Sustituyendo valores en la fórmula

$$ET_o = E_p \times K_p = 6.1 \times 0.7 = 4.27 \text{ mm/día}$$

Observaciones al método

El tanque evaporímetro integra los efectos de la temperatura, viento, insolación y humedad en la evaporación del agua en el tanque. Estos mismos efectos son los que determinan el consumo de agua de un cultivo localizado en esa misma zona, por lo que este método es de gran utilidad para establecer un programa de riego en una zona determinada.

Este método permite conocer en cada momento las necesidades de riego, aunque pueden cometerse graves errores entre la *ET₀* calculada y las necesidades reales si la instalación del tanque es inadecuada. Para evitarlo se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando el tanque se coloca rodeado de cultivos altos (por ejemplo, maíz) hay que aumentar los coeficientes de la tabla 10 hasta un 30% en caso de clima seco y ventoso, y un 5-10% en condiciones húmedas y de buen tiempo.
- Los coeficientes de la tabla 10 se refieren a tanques que se pintan todos los años de aluminio o de blanco. El material del tanque y la turbidez del agua repercuten muy poco en los datos.
- En el tanque clase A hay que mantener el nivel del agua entre 50 y 75 mm por debajo del borde. Los errores en los resultados pueden llegar hasta el 15% cuando el nivel del agua queda 100 mm por debajo del nivel aceptado.
- Hay que evitar que los pájaros beban agua del tanque. Para ello se puede poner al lado del tanque otro recipiente lleno hasta el borde, para que los pájaros beban de éste con más facilidad.

Coefficiente de cultivo

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

- *Primera etapa: etapa inicial* o de establecimiento del cultivo. Abarca desde la siembra o plantación hasta que el cultivo queda plenamente establecido: cubre o sombrea un 10% de la superficie del suelo, suponiendo que los rayos del sol incidan perpendicularmente.
- *Segunda etapa: etapa de desarrollo del cultivo* o de rápido desarrollo de cultivo. Abarca desde el final de la etapa anterior hasta que el cultivo cubre o sombrea de forma efectiva la superficie del suelo (no menos del 70-80% de ésta).
- *Tercera etapa: etapa de mediados del período* o de máxima evapotranspiración. Abarca desde final de la etapa anterior hasta la iniciación de la maduración del cultivo, que se manifiesta por el envejecimiento del follaje.

Tabla 11: *Duración aproximada de las etapas en el ciclo vegetativo de cultivos anuales (C. Brouwer y M. Heibloem)*

Cultivo	Total (días)	Primera etapa (días)	Segunda etapa (días)	Tercera etapa (días)	Cuarta etapa (días)
Algodón	180-195	30-30	50-50	55-65	45-50
Avena	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Berenjena	130-140	30-30	40-40	40-45	20-25
Cacahuate	130-140	25-30	35-40	45-45	25-25
Calabaza	95-120	20-25	30-35	30-35	15-25
Cebada	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Cebolla verde	70-95	25-25	30-40	10-20	5-10
Cebolla seca	150-210	15-20	25-35	70-110	40-45
Col	120-140	20-25	25-30	60-65	15-20
Chícharo	90-100	15-20	25-30	35-35	15-15
Espinaca	60-100	20-20	20-30	15-40	5-10
Girasol	125-130	20-25	35-35	45-45	25-25
Frijol (judía) verde	75-90	15-20	25-30	25-30	10-10
Frijol (judía) seca	95-110	15-20	25-30	35-40	20-20
Lechuga	75-140	20-35	30-50	15-45	10-10
Lenteja	150-170	20-25	30-35	60-70	40-40
Lino	180-195	30-30	50-50	55-65	45-50
Mafz dulce	80-110	20-20	25-30	25-50	10-10
Maíz grano	125-180	20-30	35-50	40-60	30-40
Melón	120-160	25-30	35-45	40-65	20-20
Mijo	105-140	15-20	25-30	40-55	25-35
Papa	105-145	25-30	30-35	30-50	20-30
Pepino	105-130	20-25	30-35	40-50	15-20
Pequeñas semillas	150-165	20-25	30-35	60-65	40-40
Pimiento	120-210	25-30	35-40	40-110	20-30
Rábano	35-40	5-10	10-10	15-15	5-5
Remolacha azucarera	160-230	25-45	35-65	60-80	40-40
Soya	135-150	20-20	30-30	60-70	25-30
Sorgo	120-130	20-20	30-35	40-45	30-30
Tomate	135-180	30-35	40-45	40-70	25-30
Trigo	120-150	15-15	25-30	50-65	30-40
Zanahoria	100-150	20-25	30-35	30-70	20-20

— *Cuarta etapa: etapa final* o de maduración y cosecha. Abarca desde el final de la etapa anterior (que se manifiesta por una marcada disminución en el consumo de agua) hasta la maduración del cultivo o su cosecha.

En la tabla 11 se indica la duración aproximada de las etapas del período vegetativo de algunos cultivos. Las cifras de esta tabla se refieren a cultivos sembrados directamente sobre el terreno de asiento. En los cultivos que se trasplantan se considera como etapa inicial el período comprendido desde la siembra hasta el trasplante.

La duración del período vegetativo depende de varios factores, tales como la variedad cultivada, el clima, la estación, etc. El mismo cultivo se desarrolla más de prisa cuando se cultiva en un clima cálido o durante la estación calurosa que cuando se cultiva en un clima frío o durante la estación fría.

Tabla 12: *Coefficientes de cultivo (Kc) de cultivos anuales (C. Brouwer y M. Heibloem)*

Cultivo	Primera etapa	Segunda etapa	Tercera etapa	Cuarta etapa
Algodón	0.45	0.75	1.15	0.75
Avena	0.35	0.75	1.15	0.45
Berenjena	0.45	0.75	1.15	0.80
Cacahuate	0.45	0.75	1.05	0.70
Calabaza	0.45	0.70	0.90	0.75
Cebada	0.35	0.75	1.15	0.45
Cebolla verde	0.50	0.70	1.00	1.00
Cebolla seca	0.50	0.75	1.05	0.85
Col	0.45	0.75	1.05	0.90
Chícharo fresco	0.45	0.80	1.15	1.05
Espinaca	0.45	0.60	1.00	0.90
Girasol	0.35	0.75	1.15	0.55
Frijol (judía) verde	0.35	0.70	1.10	0.90
Frijol (judía) seca	0.35	0.70	1.10	0.30
Lechuga	0.45	0.60	1.00	0.90
Lenteja	0.45	0.75	1.10	0.50
Lino	0.45	0.75	1.15	0.75
Maíz dulce	0.40	0.80	1.15	1.00
Maíz grano	0.40	0.80	1.15	0.70
Melón	0.45	0.75	1.00	0.75
Mijo	0.35	0.70	1.10	0.65
Papa	0.45	0.75	1.15	0.85
Pepino	0.45	0.70	0.90	0.75
Pequeñas semillas	0.35	0.75	1.10	0.65
Pimiento fresco	0.35	0.70	1.05	0.90
Rábano	0.45	0.60	0.90	0.90
Remolacha azucarera	0.45	0.80	1.15	0.80
Soya	0.35	0.75	1.10	0.60
Sorgo	0.35	0.75	1.10	0.65
Tabaco	0.35	0.75	1.10	0.90
Tomate	0.45	0.75	1.15	0.80
Trigo	0.35	0.75	1.15	0.45
Zanahoria	0.45	0.75	1.05	0.90

El coeficiente K_c depende también del clima, especialmente de la humedad relativa y de la velocidad del viento. Los valores indicados en la tabla se reducen en 0.05 cuando la humedad relativa es alta (superior al 80%) y la velocidad del viento inferior a 2 m/seg. Asimismo, los valores de la tabla se aumentan en 0.05 cuando la humedad relativa es baja (inferior al 50%) y la velocidad del viento supera los 5 m/seg.

En las tablas 12 y 13 se indican los coeficientes de cultivo para varios cultivos en las diferentes etapas de su período vegetativo.

Los valores que se dan en la tabla 13 corresponden a la duración máxima y mínima: en la mayoría de los casos la duración será intermedia entre ambos valores.

En los cultivos leñosos de hoja caduca se diferencian las siguientes etapas:

Tabla 13: *Coefficientes de cultivo (Kc) de otros cultivos*

En algunos cultivos no se aprecia una diferencia clara en las fases de su período de crecimiento. Se indica el coeficiente de cultivo de los cultivos más significativos pertenecientes a este grupo:

Alfalfa:	Durante todo el período de crecimiento: 0.9.
Trébol:	Durante todo el período de crecimiento: 1.
Pastos:	Durante todo el período de crecimiento: 1.
Cítricos:	Cultivo sin hierba: 0.70.
Cítricos:	Cultivo con hierba: 0.90.
Arroz:	Durante todo el cultivo: 1.1.
Plátano:	En el primer mes siguiente a la plantación: 0.7. En los meses siguientes se aumenta progresivamente hasta llegar a 1.1 en el séptimo mes. A partir del octavo mes se mantiene el valor de 1.1.
Caña de azúcar:	Al principio del cultivo 0.5. Se aumenta progresivamente hasta llegar al valor 1 en la mitad del período de cultivo. Después se va disminuyendo progresivamente hasta llegar al valor 0.6 al final del cultivo.
Vid:	Al aparecer las hojas: 0.5. Se aumenta progresivamente hasta llegar a 1 en la mitad del período de cultivo. Después se va disminuyendo progresivamente hasta llegar al valor 0.3 al final del cultivo.
Olivo:	Durante todo el período: 0.55.

Arboles frutales de hoja caduca:

Durazno, chabacano, peral, ciruelo, almendro:

	<u>Principio</u>	<u>Mitad</u>	<u>Final</u>
Sin cubierta vegetal	0.55	0.90	0.65
Con cubierta vegetal	0.85	1.15	0.85

Manzano, cerezo, nogal:

	<u>Principio</u>	<u>Mitad</u>	<u>Final</u>
Sin cubierta vegetal	0.55	1	0.70
Con cubierta vegetal	0.85	1.20	0.85

- *Etapa de crecimiento rápido.* Abarca desde la brotación hasta que las hojas alcanzan su máximo tamaño y disminuye el crecimiento vegetativo.
- *Etapa media.* Abarca desde el final de la etapa anterior hasta que la transpiración empieza a decrecer.
- *Etapa final.* Abarca desde el final de la etapa anterior hasta que cesa la transpiración o se produce la caída de la hoja.

En el anexo n.º 2 se calcula ET (cultivo) por el método de Hargreaves.

En el anexo n.º 3 se determina el coeficiente de cultivo en las distintas etapas, según el método de FAO.

Ejemplo

Determinar los coeficientes de cultivo en cada una de las cuatro etapas de un cultivo de maíz, cuya duración del período vegetativo es de 150 días. El cultivo se ha sembrado el día primero de junio.

	Duración días	Fecha	Coefficiente de cultivo K_c
Primera etapa	25	De 1 junio a 25 junio	0.40
Segunda etapa	40	De 26 junio a 4 agosto	0.80
Tercera etapa	50	De 5 agosto a 23 septiembre	1.15
Cuarta etapa	35	De 24 septiembre a 28 octubre	0.70

Corrección de la ET_o y determinación del coeficiente de cultivo

Los métodos de cálculo de ET_o sólo son válidos para aquellas condiciones climáticas donde el método se desarrolló inicialmente. Por eso, antes de emplear cualquier método resulta fundamental realizar una calibración previa del método en cuestión, para lo cual se comparan los valores calculados de ET_o con los valores medidos con lisímetro en la propia zona donde se vaya a utilizar.

En el cálculo de la ET_o por medio de fórmulas empíricas se utilizan valores medios climáticos (temperatura, humedad, viento, etc.), por lo que el valor obtenido se puede considerar como valor medio, lo que significa que en la mitad de los años, aproximadamente, la ET_o obtenida es inferior a la verdadera y, por tanto, insuficiente. Esto se corrige multiplicando ET_o por un coeficiente mayor a la unidad, que depende del clima. No es necesario aplicar este coeficiente cuando la ET_o se calcula a partir de datos anuales, año por año, y se selecciona aquel que presenta una determinada probabilidad de no ser superada.

Cuando no se dispone de datos fiables sobre el coeficiente de cultivo, éste se puede calcular de la siguiente forma:

Partiendo de la fórmula general

$$ET \text{ (cultivo)} = ET_o \times K_c$$

Por otra parte, según el tanque evaporímetro, se obtiene:

$$ET_o = E_p \times K_p$$

Sustituyendo estos valores en la primera fórmula:

$$ET \text{ (cultivo)} = E_p \times K_p \times K_c$$

ET (cultivo) es conocido, puesto que se mide en el lisímetro. Ep también es conocido, puesto que se mide en el tanque. Por consiguiente, se conoce el producto $Kp \times Kc$.

$$Kp \times Kc = \frac{ET \text{ (cultivo)}}{Ep} = K$$

Kp también es conocido, según la tabla 10. De donde se deduce:

$$Kc = \frac{K}{Kp}$$

El coeficiente de cultivo se ha establecido con el criterio de que la planta tenga a su disposición la cantidad de agua necesaria para satisfacer al máximo sus necesidades hídricas, lo que sólo puede ser racional cuando hay agua abundantemente disponible y a bajo precio con respecto al valor del producto obtenido. Cuando esto no ocurre es preciso introducir un elemento más en el sistema: *el óptimo económico del riego*.

Las necesidades máximas (referentes a la evapotranspiración potencial o máxima) vienen dados por la fórmula:

$$ET \text{ (cultivo)} = ETo \times Kc$$

Estas necesidades máximas se pueden reducir sensiblemente, sin detrimento apreciable de la producción, conociendo la respuesta del cultivo al agua en cada una de las fases de su período vegetativo. Esta respuesta se expresa mediante unos coeficientes obtenidos con experiencias de riego deficitario. En el capítulo «Programación del riego» se desarrollará ampliamente este concepto.

Ejemplo de cálculo de necesidades de agua

Calcular la evapotranspiración de un cultivo de maíz según la fórmula de Blaney-Criddle. Se dan los datos siguientes:

- Fecha de siembra: 15 de junio.
- Duración del período vegetativo en la localidad donde se cultiva: 130 días.
- Situación: 40° de latitud Norte.
- Las temperaturas máximas y mínimas, expresadas en grados centígrados, en la localidad de cultivo son las siguientes:

Mes	T mínima media	T máxima media	Mes	T mínima media	T máxima media
Enero	7.2	17.5	Julio	23.2	35.4
Febrero	9.8	18.3	Agosto	22.3	35.6
Marzo	12.7	20.8	Septiembre	18.1	30.2
Abril	15.2	22.6	Octubre	13.6	25.7
Mayo	18.1	27.3	Noviembre	11.2	20.1
Junio	21.6	33.2	Diciembre	8.1	18.6

a) Cálculo de ET_o

Partiendo de la fórmula de Blaney-Criddle.

$$f = p(0.46t + 8.13)$$

p se obtiene mediante la tabla 1.

t es la temperatura media mensual, que se obtiene mediante la fórmula:

$$t = \frac{T \text{ máxima media} + T \text{ mínima media}}{2}$$

El cultivo tiene un período vegetativo de 130 días. Se siembra el día 15 de junio y termina su ciclo el día 22 de octubre.

Se calculan los valores de t y de p correspondientes a los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre.

Mes	T mínima media	T máxima media	t	p
Junio	21.6	33.2	27.4	0.34
Julio	23.2	35.4	29.3	0.33
Agosto	22.3	35.6	28.9	0.31
Septiembre	18.1	30.2	24.1	0.28
Octubre	13.6	25.7	19.6	0.25

No se dispone de datos, ni siquiera estimativos, de insolación, humedad y viento. Por tanto, $f = ET_o$.

Al sustituir los valores de p y t en la fórmula de Blaney-Criddle se obtienen los valores de ET_o correspondientes a los meses del período vegetativo.

$$ET_o \text{ (junio)} = 0.34(0.46 \times 27.4 + 8.13) = 7.04 \text{ mm/día}$$

$$ET_o \text{ (julio)} = 0.33(0.46 \times 29.3 + 8.13) = 7.12 \text{ mm/día}$$

$$ET_o \text{ (agosto)} = 0.31(0.46 \times 28.9 + 8.13) = 6.64 \text{ mm/día}$$

$$ET_o \text{ (septiembre)} = 0.28(0.46 \times 24.1 + 8.13) = 5.37 \text{ mm/día}$$

$$ET_o \text{ (octubre)} = 0.25(0.46 \times 19.6 + 8.13) = 4.28 \text{ mm/día}$$

b) Determinación de K_c

Se hace uso de las tablas 11 y 12.

	<i>Duración días</i>	<i>Fecha</i>	<i>Kc</i>
Primera etapa	20	De 15 de junio a 4 de julio	0.40
Segunda etapa	35	De 5 de julio a 8 de agosto	0.80
Tercera etapa	45	De 9 de agosto a 22 de septiembre	1.15
Cuarta etapa	30	De 23 de septiembre a 22 de octubre	0.70

c) *Cálculo de ET (cultivo)*

Se sustituyen los valores ya calculados de *ETo* y *Kc* en la fórmula:

$$ET \text{ (cultivo)} = ETo \times Kc$$

<i>Fecha</i>	<i>Duración días</i>	<i>ETo mm/día</i>	<i>Kc</i>	<i>Et (cultivo) mm/día</i>
De 15-6 a 30-6	16	7.04	0.40	2.8
De 1-7 a 4-7	4	7.12	0.40	2.8
De 5-7 a 31-7	27	7.12	0.80	5.7
De 1-8 a 8-8	8	6.64	0.80	5.3
De 9-8 a 31-8	23	6.64	1.15	7.6
De 1-9 a 22-9	22	5.37	1.15	6.2
De 23-9 a 30-9	8	5.37	0.70	3.7
De 1-10 a 22-10	23	4.28	0.70	3

d) *Cálculo de las necesidades de agua durante todo el período vegetativo*

<i>Fecha</i>	<i>Duración días</i>	<i>Necesidades diarias mm</i>	<i>Necesidades por período mm</i>	<i>Necesidades por mes mm</i>
De 15-6 a 30-6	16	2.8	44.8	Junio 44.8
De 1-7 a 4-7	4	2.8	11.2	
De 5-7 a 31-7	27	5.7	153.9	Julio 165.1
De 1-8 a 8-8	8	5.3	42.4	
De 9-8 a 31-8	23	7.6	174.8	Agosto 217.2
De 1-9 a 22-9	22	6.2	136.4	
De 23-9 a 30-9	8	3.7	29.6	Septiembre 166
De 1-10 a 22-10	22	3	66	Octubre 66
				Total 659.1

66 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

Como se observa en los cuadros anteriores, las necesidades diarias, *ET* (cultivo), no son las mismas para todos los días de los meses de julio, agosto y septiembre. En la práctica conviene que estas necesidades diarias sean las mismas para todos los días del mes. Para ello se aplica la fórmula siguiente:

$$\text{Necesidades diarias} = \frac{\text{Necesidades mensuales}}{\text{Número de días del mes}}$$

$$\text{Necesidades diarias durante junio} = 2.8 \text{ mm}$$

$$\text{Necesidades diarias durante julio} = \frac{165.1}{31} = 5.3 \text{ mm}$$

$$\text{Necesidades diarias durante agosto} = \frac{217.2}{31} = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Necesidades diarias durante septiembre} = \frac{166}{30} = 5.5 \text{ mm}$$

$$\text{Necesidades diarias durante octubre} = 3 \text{ mm}$$

CAPÍTULO 3

LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

Los suelos contienen sales solubles que provienen de la descomposición de las rocas de donde se originan y de las incorporadas con el agua de riego y con las aguas provenientes del subsuelo. Sólo vamos a considerar los problemas originados por las sales contenidas en el agua de riego.

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

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

Se han establecido diversos índices de clasificación del agua en función de su aptitud para ser utilizada en el riego. Estos índices se basan en su composición química, considerando de alguna manera otros factores —tales como: suelo, cultivo, cantidad de agua aplicada, etc.— y suponiendo unas condiciones de uso medias. En todos ellos se valora el riesgo potencial que conlleva la evolución del agua en el suelo. Con la evapotranspiración disminuye la humedad del suelo, pero la cantidad de sales continúa siendo prácticamente la misma, con lo cual la concentración salina puede alcanzar valores elevados. Por otra parte, al concentrarse las sales, algunas de ellas pueden sobrepasar el límite de solubilidad y precipitan, con lo que se altera la proporción inicial de sales disueltas. Esto ocurre, por ejemplo, con algunas sales de calcio poco solubles, lo que origina un aumento de la proporción de sodio.

Fácilmente se comprende la dificultad de establecer unos índices de clasificación del agua de riego, ya que su composición resultante en el suelo es la que determina la posibilidad de existencia de situaciones negativas para el cultivo. No es extraño, por tanto, que estos índices hayan evolucionado, sobre todo los que evalúan la infiltración, intentando mejorar la predicción en la evolución de las interacciones agua-suelo-planta. Las experiencias y datos adquiridos durante los últimos años en regiones áridas y semiáridas permiten revisar y actualizar estos índices, para poder identificar y evaluar mejor los problemas relacionados con la calidad del agua, dando mayor énfasis a los efectos producidos a largo plazo.

LA SALINIDAD

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

Cuando existen sales en la solución del suelo aumentan las fuerzas de retención, debido a la afinidad de las sales por el agua, con lo cual las plantas tienen que hacer un esfuerzo suplementario para absorber el agua. Este efecto acumulativo trae como consecuencia que la disponibilidad de agua para el cultivo disminuya a medida que aumenta la salinidad de la solución del suelo.

La salinidad de la solución del suelo es difícil de medir, por lo que se expresa normalmente por la salinidad de su extracto de saturación, que se obtiene de la forma siguiente: a una muestra de suelo se añade agua destilada hasta la saturación, se extrae la totalidad de esa agua mediante succión, se mide la conductividad a la temperatura ambiente y se corrige esa medición para pasarla a la que corresponde a 25 °C.

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

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

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

A la vez que se mantiene alta la disponibilidad de agua, es preciso lixiviar las sales acumuladas en la zona radical antes de que su concentración resulte peligrosa para el cultivo, para lo cual habrá que aplicar una mayor cantidad de agua que las exigencias de evapotranspiración. Esta cantidad de agua requerida para arrastrar las sales acumuladas en la zona radical depende de la calidad del agua aplicada y de la tolerancia de los distintos cultivos a la salinidad.

Con aguas muy salinas se requiere mayor cantidad de agua para la lixiviación, con lo que aumenta el riesgo de elevar el nivel freático en aquellas zonas que lo tienen a poca profundidad. Las sales acumuladas en la capa freática ascienden por capilaridad hacia la zona radical, aumentando la salinidad de esta zona. En estos casos resulta imprescindible un adecuado sistema de drenaje para controlar el nivel freático y, en consecuencia, la salinidad de la zona radical.

Evaluación de la salinidad del agua de riego

Los datos a considerar en los análisis de agua son la composición y concentración de sales disueltas.

Composición de las sales disueltas

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

<i>Cationes</i>	<i>Aniones</i>
Calcio (Ca ²⁺)	Cloruro (Cl ⁻)
Magnesio (Mg ²⁺)	Sulfato (SO ₄ ²⁻)
Sodio (Na ⁺)	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)
Potasio (K ⁺)	Carbonato (CO ₃ ²⁻)

El contenido de cada ion se mide en miligramos (mg) o en miliequivalentes (meq) por litro. (El meq es igual al peso atómico, molecular o iónico, expresado en mg, dividido por la valencia).

Equivalencia entre meq y mg

<i>Iones</i>	<i>mg contenidos en un meq</i>	<i>meq contenidos en un mg</i>
Ca ²⁺ (calcio)	20	0.0500
Mg ²⁺ (magnesio)	12.2	0.0819
Na ⁺ (sodio)	23	0.0434
K ⁺ (potasio)	39.1	0.0256
Cl ⁻ (cloruro)	35.5	0.0282
SO ₄ ²⁻ (sulfato)	48	0.0208
HCO ₃ ⁻ (bicarbonato)	61	0.0164
CO ₃ ²⁻ (carbonato)	30	0.0333

En el análisis de una muestra de agua, el contenido total de aniones ha de coincidir, aproximadamente, con el contenido total de cationes. Se admite un error de un 5 % por exceso o por defecto.

Concentración de sales

El conjunto de sales disueltas recibe el nombre de *extracto seco*. Para medir la concentración de estas sales se emplean dos procedimientos:

- Medición del contenido de sales*. Se evapora en una estufa una muestra de agua, se pesa el residuo sólido y se expresa el resultado en g/litro o en mg/litro igual a partes por millón (ppm).
- Medición de la conductividad eléctrica*. La conductividad de una disolución es proporcional al contenido de sales disueltas e ionizadas contenidas en esa disolución. Las sales que interesan en el agua de riego son muy solubles e ionizables. Por consiguiente, se puede conocer indirectamente el contenido salino de una disolución midiendo la cantidad de corriente que pasa a su través.

La conductividad eléctrica varía con la temperatura, por lo que para normalizar medidas se ha convenido expresarla a la temperatura de 25 °C. En la tabla 1 se indican las variaciones de la conductividad con la temperatura.

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

milimho = mmho = milésima de mho
micromho = millonésima de mho

Tabla 1: *Variación de la conductividad eléctrica con la temperatura*

$CE_{25} = CE_t \times ft$					
°C	<i>f</i>	°C	<i>f</i>	°C	<i>f</i>
3.0	1.709	22.0	1.064	29.0	0.925
4.0	1.660	22.2	1.060	29.2	0.921
5.0	1.613	22.4	1.055	29.4	0.918
6.0	1.569	22.6	1.051	29.6	0.914
7.0	1.528	22.8	1.047	29.8	0.911
8.0	1.488	23.0	1.043	30.0	0.907
9.0	1.448	23.2	1.038	30.2	0.904
10.0	1.411	23.4	1.034	30.4	0.901
11.0	1.375	23.6	1.029	30.6	0.897
12.0	1.341	23.8	1.025	30.8	0.894
13.0	1.309	24.0	1.020	31.0	0.890
14.0	1.277	24.2	1.016	31.2	0.887
15.0	1.247	24.4	1.012	31.4	0.884
16.0	1.208	24.6	1.008	31.6	0.880
17.0	1.189	24.8	1.004	31.8	0.877
18.0	1.163	25.0	1.000	32.0	0.873
18.2	1.157	25.2	0.996	32.2	0.870
18.4	1.152	25.4	0.992	32.4	0.867
18.6	1.147	25.6	0.998	32.6	0.864
18.8	1.142	25.8	0.983	32.8	0.861
19.0	1.136	26.0	0.979	33.0	0.858
19.2	1.131	26.2	0.975	34.0	0.843
19.4	1.127	26.4	0.971	35.0	0.829
19.6	1.122	26.6	0.967	36.0	0.815
19.8	1.117	26.8	0.964	37.0	0.801
20.0	1.112	27.0	0.960	38.0	0.788
20.2	1.107	27.2	0.956	39.0	0.775
20.4	1.102	27.4	0.953	40.0	0.763
20.6	1.097	27.6	0.950	41.0	0.750
20.8	1.092	27.8	0.947	42.0	0.739
21.0	1.087	28.0	0.943	43.0	0.727
21.2	1.082	28.2	0.940	44.0	0.716
21.4	1.078	28.4	0.936	45.0	0.705
21.6	1.073	28.6	0.932	46.0	0.694
21.8	1.068	28.8	0.929	47.0	0.683

La conductividad a 25 °C se obtiene multiplicando la conductividad a la temperatura dada (CE_t) por el factor de corrección correspondiente (ft).

En la actualidad la conductividad se suele expresar en deciSiemens/m (dS/m) y en microSiemens/cm (microS/cm), según el sistema internacional.

$$dS/m = mmho/cm; \text{microS/cm} = \text{micromho/cm}$$

El contenido de sales totales (ST) y la conductividad eléctrica (CE) están relacionadas mediante la ecuación:

$$ST = 0.64 CE$$

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

CE = Conductividad eléctrica, expresada en dS/m.

La presión osmótica y la conductividad eléctrica se relacionan mediante la ecuación:

$$Po = 0.36 CE$$

Po = Presión osmótica, expresada en atmósferas.

CE = Conductividad eléctrica, expresada en dS/m.

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

Directrices para evaluar los problemas de salinidad debidos a la calidad del agua de riego.

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

Estas directrices se han elaborado a partir de los siguientes supuestos básicos:

- El clima es árido o semiárido, con precipitaciones bajas.
- El drenaje es bueno y no hay un nivel freático alto.
- Todas las sales acumuladas en la zona radical provienen del agua de riego.
- Se supone que el agua extraída por la planta en su zona radical procede: el 40 %, de la cuarta parte más superficial; el 30 % de la segunda cuarta parte; el 20 %, de la siguiente; y el 10 % restante, de la más profunda.
- Los requerimientos de lixiviación se estiman del 15 al 20% del agua aplicada.
- En la zona radical, el promedio de salinidad de la solución del suelo cuando éste está a la capacidad de campo es, aproximadamente, el triple de la salinidad del agua de riego y el doble de la salinidad del extracto de saturación.
 - CE del agua del suelo = 3 CE del agua de riego.
 - CE del agua del suelo = 2 CE del extracto de saturación.
 - CE del extracto de saturación = 1.5 CE del agua de riego.
- Se considera que estos valores reflejan los cambios de salinidad ocurridos con el uso del agua a largo plazo.
- Se supone que se aporta suficiente cantidad de agua a los cultivos y que éstos se riegan por superficie o por aspersión de baja frecuencia, con una extracción del 50% o más del agua disponible.

Cuando las condiciones de uso son muy distintas a los supuestos anteriores es posible que las directrices requieran un ajuste. Por ejemplo, en riegos de alta frecuencia (por aspersión y goteo) las directrices resultan bastante restrictivas.

No presentan problemas las aguas correspondientes a valores sin ninguna restricción. En el caso de restricción ligera a moderada se requiere un cuidado progresivamente mayor con respecto al manejo del agua y de los cultivos, con el fin de que no disminuya el rendimiento de éstos. En el caso de restricción severa pueden aparecer problemas graves si no se hace un manejo muy eficiente.

Tratamiento de los problemas de salinidad

Los tratamientos para solucionar los problemas de salinidad causados a largo plazo por el agua de riego son: lixiviación, drenaje y cambio de cultivo por otro más tolerante a la salinidad. La lixiviación debería hacerse siempre, aún con aguas de buena calidad, salvo en caso de precipitaciones abundantes durante alguna época del año. El drenaje se practica cuando existen problemas de ascensión del nivel freático. El cambio de cultivo por otro más tolerante se hace cuando las prácticas anteriores no son suficientes.

Para solucionar los problemas de salinidad a corto plazo se utilizan ciertas prácticas, tales como: programación del riego para evitar la formación de costra superficial, emplazamiento de las semillas para evitar zonas del suelo de mayor salinidad, una fertilización adecuada, etc.

Lixiviación

Para evitar la acumulación de sales en la zona radical hasta límites peligrosos es necesario que la cantidad de sales desplazada por la lixiviación sea, al menos, igual a la aportada con el agua de riego. *El requerimiento de lixiviación o lavado o fracción de lavado* es la fracción de agua de riego que debe atravesar la zona radical para desplazar las sales que se acumulan en dicha zona. Se expresa en tanto por uno. Así, por ejemplo, un requerimiento de lixiviación de 0.15 significa que el 85% del agua de riego corresponde a la evapotranspiración, y el 15% restante, a la lixiviación.

El requerimiento de lixiviación depende de la salinidad del agua de riego y de la tolerada por el cultivo. Con los supuestos básicos que venimos considerando, este requerimiento viene dado por las siguientes expresiones:

— En riegos por gravedad y aspersión de baja frecuencia:

$$RL = \frac{CEa}{5CEe - CEa}$$

— En riegos por goteo y aspersión de alta frecuencia:

$$RL = \frac{CEa}{2 \text{ máx } CEe}$$

RL = Requerimiento de lavado, expresado en tanto por uno.

CEa = Conductividad eléctrica del agua de riego, expresada en dS/m.

CEe = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, para la cual el descenso de producción es un porcentaje que se impone como objetivo a conseguir. Se expresa en dS/m.

$máx\ CEe$ = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, para la cual el descenso de producción es del 100%. Se expresa en dS/m.

Hay que tener en cuenta la eficiencia del lavado, que puede variar desde el 100 % en suelos arenosos, hasta el 30 % en suelos arcillosos de fácil dilatación. Por consiguiente:

$$RL\ real = \frac{RL\ neto}{Eficiencia\ de\ lavado}$$

Ejemplo

Calcular el requerimiento de lavado real de un cultivo de algodón para que no haya descenso en la producción. El suelo es arcilloso con una eficiencia de lavado de 0.35. La conductividad eléctrica del agua de riego es de 1.5 dS/m y la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo para que no haya descenso en la producción es de 7.7 dS/m.

Solución:

$$RL\ neta = \frac{CEa}{5\ CEe - CEa} = \frac{1.5}{5 \times 7.7 - 1.5} = 0.04$$

$$RL\ real = \frac{0.04}{0.35} = 0.11$$

La tolerancia a la salinidad varía de unos cultivos a otros. Los más tolerantes tienen mejor capacidad de adaptación osmótica, que les permite absorber mayor cantidad de agua en condiciones de alta salinidad. En la tabla 2 se muestra el grado de tolerancia de los cultivos (expresado en % de reducción de su rendimiento) en función de la conductividad eléctrica del extracto de saturación.

En cultivos sensibles regados con aguas salinas se requiere una gran cantidad de agua para satisfacer el requerimiento de lixiviación. En el supuesto de que éste sobrepasara la cifra de 0.30 resultaría más conveniente seleccionar otro cultivo más tolerante.

Al evaluar el requerimiento de lixiviación hay que tener en cuenta si la pérdida de agua por percolación profunda es suficiente para satisfacer ese requerimiento.

La lluvia es muy eficaz para lixiviar las sales, debido a su escasísima salinidad y a la uniformidad de su distribución. Su efecto depende de la cantidad, intensidad y momento en que se produce: si la lluvia permite rebasar la capacidad de campo, las sales serán arrastradas fuera de la zona radical; si no se rebasa la capacidad de campo, las sales son desplazadas de la capa superior a otras más bajas de la zona radical.

Tabla 2: Tolerancia de los cultivos a la salinidad en relación con la disminución de su rendimiento (FAO)

Disminución del rendimiento	0 %	10 %	25 %	50 %	100 %
<i>Cultivos extensivos</i>	Conductividad eléctrica del extracto de saturación (dS/m)				
Algodón	7.7	9.6	13	17	27
Arroz	3.3	3.8	5.1	7.2	11
Cacahuete	3.2	3.5	4.1	4.9	6.6
Caña de azúcar	1.7	3.4	5.9	10.	19
Cártamo	5.3	6.2	7.6	9.9	14.5
Cebada	8	10	13	18	28
Habas	1.6	2.6	4.2	6.8	12
Maíz	1.7	2.5	3.8	5.9	10
Remolacha azucarera	7	8.7	11	15	24
Soya	5.5	5.5	6.3	7.5	10
Sorgo	6.8	7.4	8.4	9.9	13
Trigo	6	7.4	9.5	13	20
<i>Cultivos hortícolas</i>					
Apio	1.8	3.4	5.8	9.9	18
Boniato	1.5	2.4	3.8	6	10.5
Brécol	2.8	3.9	5.5	8.2	14
Calabaza	4.1	5.8	7.4	10	15
Col	1.8	2.8	4.4	7	12
Cebolla	1.2	1.8	2.8	4.3	7.4
Espinaca	2	3.3	5.3	8.6	15
Frijol (judía)	1	1.5	2.3	3.6	6.3
Lechuga	1.3	2.1	3.2	5.1	9
Maíz dulce	1.7	2.5	3.8	5.9	10
Melón	2.2	3.6	5.7	9.1	16
Nabo	0.9	2	3.7	6.5	12
Papa	1.7	2.5	3.8	5.9	10
Pepino	2.5	3.3	4.4	6.3	10
Pimiento	1.5	2.2	3.3	5.1	8.6
Rábano	1.2	2	3.1	5	8.9
Remolacha	4	5.1	6.8	9.6	15
Tomate	2.5	3.5	5	7.6	13
Zanahoria	1	1.7	2.8	4.6	8.1
<i>Frutales</i>					
Aguacate	1.3	1.8	2.5	3.7	6
Chabacano	1.6	2	2.6	3.7	5.8
Almendro	1.5	2	2.8	4.1	6.8
Ciruelo	1.5	2.1	2.9	4.3	7.1
Frambueso	1	1.4	2.1	3.2	5.5
Fresa	1	1.3	1.8	2.5	4

Tabla 2: Tolerancia de los cultivos a la salinidad en relación con la disminución de su rendimiento (FAO)- (Continuación)

Disminución del rendimiento	0 %	10 %	25 %	50 %	00 %
Granado	2,7	3,8	5,5	8,4	14
Higuera	2,7	3,8	5,5	8,4	14
Limonero	1,7	2,3	3,3	4,8	8
Manzano	1,7	2,3	3,3	4,8	8
Durazno	1,7	2,2	2,9	4,1	6,5
Naranja	1,7	2,4	3,3	4,8	8
Nogal	1,7	2,3	3,3	4,8	8
Olivo	2,7	3,8	5,5	8,4	14
Palmera datilera	4	6,8	11	18	32
Peral	1,7	2,3	3,3	4,8	8
Toronja (<i>citrus máxima</i>)	1,8	2,4	3,4	4,9	8
Vid	1,5	2,5	4,1	6,7	12
Zarzamora	1,5	2	2,6	3,8	6
<i>Cultivos forrajeros</i>					
Alfalfa	2	3,4	5,4	8,8	16
Ballico	5,6	6,9	8,9	12	19
Bersim	1,5	3,2	5,9	10	19
Cebada forrajera	6	7,4	9,5	13	20
Máiz forrajero	1,8	3,2	5,2	8,6	15
Sorgo del Sudán	2,8	5,1	8,6	14	26
<i>Trifolium</i> spp (trébol híbrido, ladino, rojo, fresa)	1,5	2,3	3,6	5,7	9,8
Trigo forrajero	7,5	9	11	15	22
Veza	3	3,9	5,3	7,6	12

La relación entre la salinidad del extracto de saturación y la del agua de riego es: $C_{Ee} = 1.5 C_{Ea}$, lo cual supone una fracción de lixiviación de 0.15-0.20 y un patrón normal de extracción del agua por la planta.

La tolerancia a la salinidad expresada en esta tabla abarca desde el estado final de planta tierna hasta la madurez. En las etapas de germinación y desarrollo inicial de planta tierna las tolerancias pueden ser inferiores. Por lo general una salinidad del extracto de saturación superior a 4 dS/m (en aquellas plantas con valores superiores a esa cifra) inhibe o retarda la germinación y el crecimiento inicial. En estos casos un riego de presiembra rebaja la salinidad y retrasa la formación de costra superficial, lo que facilita la germinación y la emergencia.

Las variedades comerciales pequeñas o semienanas suelen ser menos tolerantes.

En climas o estaciones cálidos y secos, las mismas plantas son menos tolerantes que en climas y meses fríos. En general, el clima afecta más a los cultivos sensibles.

Es preferible programar la lixiviación durante los períodos de menor consumo de agua por los cultivos, y si ello no fuera posible, retrasarla para después de la temporada de cultivo. En regiones donde llueve en invierno, si se prevé que las lluvias no serán suficientes, se recomienda regar hasta la capacidad de campo, para que cuando éstas se produzcan suministren el agua adicional requerida para arrastrar las sales.

La lixiviación por aspersión requiere menos agua y más tiempo que cuando se hace por inundación continua.

Drenaje

Cuando el nivel freático está a una profundidad inferior a los dos metros, el agua de la capa subterránea asciende por capilaridad a medida que el agua del suelo va disminuyendo debido a la evapotranspiración. Si el agua subterránea contiene sales, éstas se van acumulando en la zona radical con mayor o menor rapidez, según la concentración de sales en el agua, la profundidad de la capa freática y el manejo que se haga del riego. Para controlar la salinidad en este caso se requiere, además de la lixiviación, un sistema de drenaje eficiente que estabilice el nivel freático a una profundidad adecuada.

La salinidad del agua de drenaje se puede medir directamente mediante la medición de la CE a una muestra de agua freática, la cual se puede obtener al hacer una barrenación en el perfil del suelo hasta alcanzar el nivel freático.

La salinidad del agua de drenaje se calcula también mediante la siguiente expresión:

$$CE \text{ agua drenaje} = \frac{CE \text{ agua riego}}{\text{Fracción de lixiviación}}$$

Ejemplo

Determinar la salinidad del agua de drenaje sabiendo que el agua de riego tiene una conductividad de 1.1 dS/m y que la fracción de lixiviación es de 0.15

Solución:

$$CE \text{ agua drenaje} = \frac{CEa}{FL} = \frac{1.1}{0.15} = 7.3 \text{ dS/m}$$

Tratamientos a corto plazo

Para controlar los efectos de la salinidad a corto plazo existen ciertas prácticas de manejo que permiten obtener un efecto positivo en la germinación y en el desarrollo inicial de las plantas, lo que repercute en el rendimiento del cultivo.

A medida que el agua del suelo se evapora, las sales de la zona radical son arrastradas por capilaridad hasta los primeros centímetros más superficiales del suelo, en donde se acumulan, con el consiguiente efecto negativo en la germinación y desarrollo de las plantas tiernas. Las lluvias de invierno arrastrarán esas sales a las capas más bajas de la zona radical, evitando problemas de germinación.

En el riego por surcos el agua no ocupa toda la superficie del suelo. Una parte de esa agua se desplaza por capilaridad hacia el centro del bordo, no mojado inicialmente, arrastrando consigo a las sales, que se acumulan en dicha zona (Fig. 3-1). Si las semillas se colocan a una hilera en el centro del bordo, estarán precisamente en la zona de mayor salinidad, lo que acarreará problemas de germinación, sobre todo en plantas sensibles o con aguas cuya conductividad excede a 1 dS/m. Es preferible hacer la siembra (a una o dos filas), bien en la parte alta del bordo, cuando es ancho, o en los lomos del mismo, a una altura en donde las plantas no sean afectadas por el agua de los surcos.

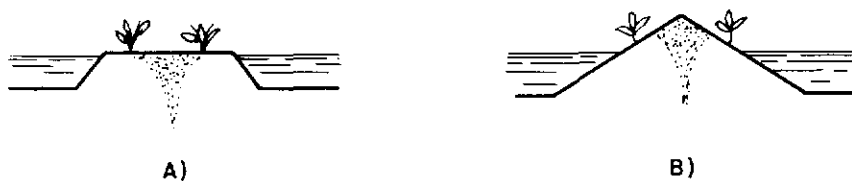


Fig. 3-1 Siembra de las plantas a doble fila cuando hay salinidad excesiva. A) En bordos anchos. B) En bordos estrechos. (La zona de mayor acumulación de sales se señala con punteado.)

En los riegos por inundación o por aspersion el agua se distribuye uniformemente por toda la superficie del suelo, arrastrando las sales a la parte inferior de la zona radical. La cantidad de sales acumuladas en esta zona depende de la fracción de lixiviación.

En cultivos hortícolas regados por surcos es una práctica común el riego por aspersion al principio del cultivo, con el fin de reducir la salinidad en la zona superficial del suelo y fomentar un buen desarrollo inicial del cultivo.

En el riego por goteo las sales se concentran hacia la periferia del bulbo húmedo formado en los emisores, y muy especialmente en la zona superficial de esa periferia (Fig. 10-3). El control de la salinidad a corto plazo se logra por sí solo con la alta frecuencia de la aplicación del agua, que arrastra las sales hacia la periferia del bulbo, lo que permite regar con aguas más salinas que en otros sistemas de riego.

En el caso de cultivos anuales regados por goteo, la concentración de sales en determinadas zonas del suelo puede afectar a las siembras siguientes, si antes no se han lixiviado las sales. Cuando el régimen anual de lluvias no permite hacer un lavado natural de sales, se puede hacer un riego complementario, por aspersion o por inundación, fuera de la época de cultivo.

Las sales se van acumulando progresivamente en la periferia del bulbo húmedo, sobre todo en caso de cultivos perennes. Cuando empieza a llover, las sales acumuladas en las zonas más superficiales se desplazan hacia la zona del bulbo ocupada por las raíces, con el consiguiente peligro para el cultivo. Para evitar este inconveniente conviene no detener el riego durante la lluvia o ponerlo en funcionamiento inmediatamente después de terminar aquélla, con el fin de arrastrar de nuevo las sales hacia la periferia del bulbo o, mejor aún, suministrar suficiente cantidad de agua para arrastrar las sales por debajo de las raíces.

Se puede hacer un control efectivo de la salinidad programando el riego de forma que haya mayor disponibilidad de agua para las plantas, lo que obliga a una mayor frecuencia de riego. Estos riegos frecuentes, que proporcionan menor cantidad de agua en cada aplicación, exigen un mayor control para evitar pérdidas de agua. El riego por goteo, que es en sí mismo un riego de alta frecuencia de aplicación, permite un control eficiente del agua aplicada. El riego por aspersión bien diseñado también permite un control eficiente del agua. En el riego por superficie es más fácil aplicar una lámina de agua grande que una pequeña, por lo que puede ser menos eficiente si no se hace un control adecuado.

En caso de plantas sensibles a la salinidad no se aconseja la aplicación localizada de los fertilizantes junto a las semillas, ya que puede provocar una reducción de la germinación. Es mejor aplicar los fertilizantes repartidos uniformemente por toda la superficie, una parte antes de la siembra, y el resto, después de la emergencia de las semillas.

PROBLEMAS DE INFILTRACION

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

La velocidad de infiltración viene determinada por las características físicas y químicas del suelo. Aquí nos referimos únicamente a los problemas de infiltración causados en la química del suelo y provocados por el agua de riego, en donde intervienen, tanto el contenido de sales como la proporción relativa del sodio con respecto al calcio y magnesio. Una concentración alta de sales aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una concentración baja de sales o una proporción alta de sodio con respecto al calcio y magnesio disminuye esa velocidad. Los iones de calcio y de magnesio son favorables para una buena estabilidad estructural del suelo, mientras el ión de sodio es desfavorable.

Cuando se riega con agua de mala calidad se acumula el sodio en los primeros centímetros del suelo, provocando la dispersión de los agregados en partículas más pequeñas, que obstruyen los poros del suelo. También se produce este efecto con un contenido bajo de calcio. En algunos casos las aguas con bajo contenido de sales disuelven las sales solubles del suelo, incluyendo al calcio, lo que provoca el mismo problema derivado de la escasez de calcio.

Evaluación de los problemas de infiltración

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

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

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

Para la clasificación del agua con respecto a los problemas de infiltración se han propuesto diversas normas. La FAO en la última edición de «La calidad del agua en la agricultura» propone las siguientes directrices de la Universidad de California (EEUU), en función de la conductividad eléctrica y del RAS del agua de riego.

Directrices para evaluar los problemas de infiltración

		<i>Restricción de uso</i>		
		<i>Ninguna</i>	<i>Ligera a moderada</i>	<i>Severa</i>
RAS = 0 - 3	y CE > 0.7		0.7 - 0.2	< 0.2
= 3 - 6	> 1.2		1.2 - 0.3	< 0.3
= 6 - 12	> 1.9		1.9 - 0.5	< 0.5
= 12 - 20	> 2.9		2.9 - 1.3	< 1.3
= 20 - 40	> 5.0		5.0 - 2.9	< 2.9

Estas directrices se han elaborado con los supuestos descritos anteriormente en las directrices para evaluar los problemas de salinidad.

La fig. 3-2 muestra la reducción de la infiltración en función de la salinidad y del RAS.

Se observa que para un determinado valor del RAS, la velocidad de infiltración disminuye a medida que disminuye la salinidad. Las aguas con conductividad inferior a 0.2 dS/m (aguas corrosivas) causan siempre problemas de infiltración. El agua de lluvia, que tiene muy poca salinidad, ocasiona con frecuencia problemas de escurrimiento.

El índice RAS considera los problemas de infiltración como resultado de un contenido excesivo de sodio en el suelo con respecto al calcio y magnesio, pero no tiene en cuenta la variación del contenido del calcio, que puede aumentar (por disolución de minerales de calcio) o disminuir (por precipitación, generalmente en forma de carbonato cálcico). La disolución del calcio se favorece con el aumento del contenido de agua y con la

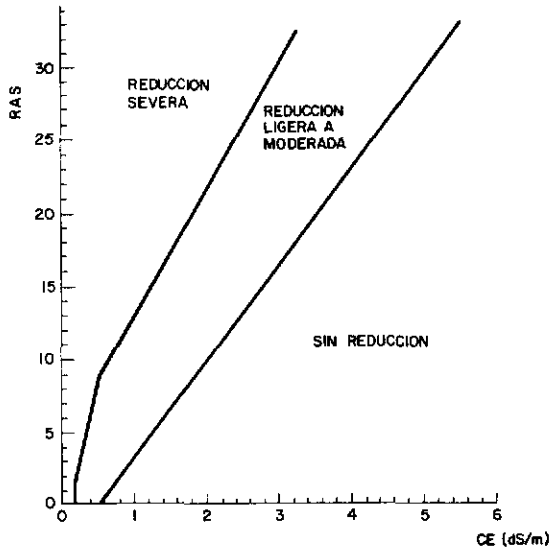


Fig. 3-2 Reducción relativa de la infiltración, en función de la salinidad y del RAS del agua de riego.

presencia de dióxido de carbono disuelto en el agua, mientras que la precipitación se produce con la presencia de calcio abundante junto con carbonatos, bicarbonatos y sulfatos.

Después de regar, el contenido de calcio disuelto en el agua puede modificarse, (por dilución o por precipitación), mientras que la cantidad de sodio soluble permanece constante, ya que su solubilidad o precipitación no son afectados por factores externos. En cambio, su concentración sí que puede variar, aumentando (por efecto de la extracción del agua por la planta) o disminuyendo (por efecto de aumentar la cantidad de agua).

El índice RAS no tiene en cuenta las modificaciones del contenido de calcio ocurridas después del riego, por lo que se ha propuesto un RAS corregido que considera el equilibrio esperado después del riego, teniendo en consideración los efectos del dióxido de carbono, del bicarbonato y de la salinidad. Este RAS corregido presupone la existencia en el suelo de minerales de calcio y la ausencia de precipitaciones de magnesio.

El RAS corregido viene definido por la siguiente expresión:

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

El valor de Ca^{2+} (tabla 3) representa la concentración final de calcio que permanece en la solución del suelo, teniendo en cuenta la conductividad del agua aplicada, el contenido de bicarbonato en relación a su propio contenido de calcio y la presión parcial del dióxido de carbono ejercida en los primeros milímetros del suelo.

Tabla 3: Concentración de calcio (Ca^{2+}) en el agua del suelo, contenida en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con agua de una determinada CE y un determinado valor de HCO_3^-/Ca^{2+} (FAO)

HCO_3^- (meq/l)	CE del agua aplicada (dS/m)											
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
0.10	8.31	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	7.57	7.91
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.10	2.23	2.33
1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.54	1.63	1.70
2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.30	1.37	1.42	1.51	1.58
2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.40	1.47
3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99
5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37
30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28

Los valores del RAS de las directrices citadas anteriormente deben sustituirse por los valores del RAS corregido.

En la mayoría de las aguas el valor del RAS corregido = RAS ± 10 % de su valor.

No se recomienda la utilización del RAS ajustado (propuesto por FAO en 1976), pues se ha comprobado que sobrevalora la peligrosidad del sodio. Tampoco se utilizan ya las normas Riverside (USDA 1954), que han estado vigentes durante muchos años, pues sobrevaloran la salinidad y asignan un riesgo de sodicidad creciente a medida que se incrementa la salinidad.

Ejemplo

Evaluar la infiltración con una muestra de agua cuyo análisis ha dado los siguientes resultados:

Conductividad eléctrica a 25 °C:	1.1 dS/m.
Calcio:	3.1 meq/l.
Magnesio:	1.8 meq/l.
Sodio:	5.8 meq/l.
Bicarbonato:	4.2 meq/l.

Solución:

$$\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+}} = \frac{4.2}{3.1} = 1.35$$

Según la tabla 3 la concentración de Ca^{2+} es de 1.72 meq/l.

$$\text{RAS corregido} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} = \frac{5.8}{\sqrt{\frac{1.72 + 1.8}{2}}} = 4.39$$

Según las directrices propuestas, la restricción de uso es de ligera a moderada.

Tratamiento de los problemas de infiltración

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

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

Mejoradores químicos

Los problemas de infiltración originados por la mala calidad del agua de riego son debidos a un elevado RAS o a un bajo contenido de sales en el agua. Los mejoradores químicos aplicados al agua de riego o al suelo tratan de aumentar el contenido de calcio, con lo cual se rebaja el RAS y se aumenta la salinidad. Estos mejoradores químicos actúan proporcionando el calcio directamente o provocando la disolución de la caliza contenida en el suelo. Por razones económicas, en el primer caso se utiliza el yeso, y en el segundo, el ácido sulfúrico y el azufre.

Los mejoradores químicos aplicados al agua de riego son más eficaces cuando ésta tiene poca conductividad (inferior a 0.2 dS/m) o un RAS alto con salinidad de baja a moderada (CE aproximadamente igual a 1 dS/m). Los mejoradores químicos al suelo se utilizan en agua de RAS elevado y salinidad superior a 1 dS/m.

El yeso es el mejorador químico más utilizado, tanto para el agua como para el suelo. La disolución del calcio contenida en el yeso se facilita cuanto más baja sea la salinidad del agua y cuanto mayor sea el grado de finura de las partículas de yeso. Normalmente se utilizan cantidades de yeso que proporcionan de 1 a 4 meq/litro de calcio.

El aporte de calcio puede hacerse colocando roca de yeso en los canales de riego, pero este procedimiento tiene el inconveniente de que la disolución del calcio es bastante lenta, dependiendo del caudal, de la velocidad del agua y, por supuesto, de la salinidad del agua.

Ejemplo

Un determinado cultivo se riega con un agua cuya conductividad es de 0.2 dS/m y una dosis de 4,000 m³/ha. Para mejorar la infiltración se desea aumentar en 2 meq/litro el contenido de calcio. Calcular la cantidad de yeso que es preciso añadir al agua de riego sabiendo que la pureza del mismo es de 70 %.

Solución:

$$2 \text{ meq de Ca/litro} = 40 \text{ mg de Ca/litro} = 40 \text{ g de Ca/m}^3$$

En la dosis de riego se necesitan:

$$4,000 \times 40 = 160,000 \text{ g} = 160 \text{ kg de Ca}$$

Peso molecular del yeso ($\text{SO}_4 \text{ Ca} + 2 \text{ H}_2\text{O}$) = 172

Peso molecular del Ca = 40

$$\frac{172}{40} = \frac{x}{160}$$

$$x = 688 \text{ kg de yeso puro}$$

$$\frac{688}{0.7} = 982.8 \text{ kg de yeso con 70\% de pureza}$$

El problema de infiltración causado por la mala calidad del agua radica en la capa superficial del suelo, por lo que resulta eficaz la incorporación del yeso en esa capa. El agua arrastra con facilidad el calcio incorporado en el yeso, con lo cual reaparece el problema, que se soluciona con aplicaciones ligeras y frecuentes.

Cuando se trate de recuperar suelos sódicos se aplica una gran cantidad de yeso de una sola vez.

El ácido sulfúrico se aplica al suelo o al agua de riego. Su finalidad es liberar el calcio contenido en la caliza del suelo. Cuando se aplica al agua actúa también reduciendo la concentración de bicarbonato contenido en esa agua. Debido a la rapidez de su acción, este mejorador es bastante eficaz para mejorar la infiltración.

El azufre se utiliza como mejorador del suelo, pero no del agua, ya que su reacción es lenta, pues requiere ser oxidado por bacterias para formar ácido sulfúrico o sulfuros, los cuales reaccionan con la caliza para liberar el calcio. El calcio que se va liberando en la superficie es lavado con los riegos, por lo que este mejorador no resulta eficaz para solucionar los problemas de infiltración.

En cuanto a la eficacia para proporcionar calcio hay que tener en cuenta que 100 kg de yeso equivalen a 61 kg de ácido sulfúrico y a 19 kg de azufre, referido a materiales puros.

Manejo del riego

Ciertas prácticas en el manejo del riego atenúan los problemas de infiltración. Entre las más aconsejables citamos las siguientes:

- El riego frecuente a dosis bajas es muy eficaz en suelos que inicialmente tienen una buena infiltración, pero que disminuye con rapidez debido a la calidad del agua de riego.
- Un riego de presiembra puede ser eficaz, en algunos cultivos, para llenar la zona radical a la capacidad de campo en suelos de infiltración lenta, ya que entonces no hay riesgo de dañar al cultivo con problemas de encharcamiento.
- El cambio del sistema por gravedad a riegos por aspersión o por goteo permite un mejor manejo del riego, según las características de la infiltración. El riego por aspersión se adapta mejor a suelos de textura ligera, y la intensidad de aplicación varía de 3 a 6 mm/hora. El riego por goteo se adapta mejor a suelos arcillosos, y la intensidad de aplicación suele variar de 2 a 4 litros/hora.

TOXICIDAD Y OTROS EFECTOS

Toxicidad

Algunos iones absorbidos por las plantas en excesiva cantidad producen efectos tóxicos. Estos iones se acumulan en las zonas de transpiración más intensa, por lo

- Una mayor intensidad de aplicación del agua (si el suelo lo permite) disminuye el tiempo de humedecimiento del follaje.
- En el riego de frutales, los aspersores colocados debajo de la copa de los árboles reducen el volumen de follaje mojado.

En el riego por aspersión pueden presentarse depósitos de sales de color rojizo (sales de hierro) o blanco (bicarbonatos o yeso) en las hojas, flores y frutos, que aunque no son tóxicas disminuyen su valor comercial. Las prácticas que tienden a reducir la evaporación pueden eliminar o reducir el problema. En el caso de plantas ornamentales se puede aplicar un mejorador ácido al agua para paliar el efecto de los bicarbonatos.

Prácticamente todas las aguas contienen oligoelementos en pequeñas concentraciones. Por lo general no se hacen análisis para su determinación, salvo en el caso de aguas residuales, que pueden causar problemas de toxicidad. Las concentraciones máximas permisibles son las siguientes:

<i>Oligoelementos</i>	<i>Concentración (mg/l)</i>
Arsénico —	0.10
Cobre —	0.20
Hierro —	5
Manganeso —	0.20
Molibdeno —	0.01
Zinc —	2

Nutrientes en el agua de riego

La mayor parte del nitrógeno contenido en el agua de riego se encuentra habitualmente bajo la forma de nitrato, que es asimilado directamente por las plantas. La concentración de nitrógeno en forma de amonio rara vez supera 1 mg/litro, salvo en el caso de que el agua de riego contenga aguas residuales o fertilizantes amoniacales.

En la tabla 4 se indican las normas para evaluar los problemas que pueden derivarse de un exceso de nitrógeno en el agua de riego. Por encima de 5 mg/litro los cultivos sensibles pueden verse afectados, y cuando la concentración sobrepasa 30 mg/litro se presentan problemas graves en estos cultivos. En cultivos no sensibles, incluso concentraciones superiores a 30 mg/litro pueden ser interesantes en cuanto se refiere al ahorro de fertilizantes nitrogenados. En cualquier caso hay que tener en cuenta el contenido de nitrógeno del agua de riego para programar la fertilización.

En ocasiones, los contenidos de fósforo (en forma de fosfato) y de potasio son importantes para tener en cuenta en el programa de fertilización.

Ejemplo

La concentración del ion de potasio en un agua de riego es 0.15 meq/l. Supon endo que se dan anualmente 6 riegos de 800 m³ por hectárea, calcular la cantidad de potasio que se incorpora al suelo durante un año. ¿A cuántos kg de cloruro de potasio (KCl) equivale esa aportación de potasio? Se supone que la eficiencia de riego es 0.8. Se sabe también que la riqueza del cloruro de potasio es el 50% de K₂O.

Solución:

Concentración de potasio.

$$0.15 \text{ meq/l} = 0.15 \times 0.0391 = 0.005865 \text{ g/l}$$

En un riego de 800 m³ se aprovechan:

$$800 \times 0.8 = 640 \text{ m}^3 = 640,000 \text{ l/ha}$$

Aportación de potasio en un riego:

$$0.005865 \times 640,000 = 3,753 \text{ g} = 3.753 \text{ kg}$$

En seis riegos se aportan:

$$3.753 \times 6 = 22.5 \text{ kg de potasio}$$

En un abono potásico, para pasar de la riqueza expresada en K₂ a riqueza en K₂O hay que multiplicar por 1.2:

$$22.5 \text{ kg de K}_2 = 22.5 \times 1.2 = 27 \text{ kg de K}_2\text{O}$$

Como el cloruro de potasio (KCl) tiene una riqueza del 50 % de K₂O:

$$27 \text{ kg de K}_2\text{O} = 27 \times 2 = 54 \text{ kg de KCl}$$

Riesgo de obstrucciones en riego localizado

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

En la tabla 6 se incluye una escala de valores orientativos para identificar situaciones problemáticas. Las situaciones sin problema se refieren a aquellas donde hay una solución factible desde el punto de vista económico. En las situaciones de problema creciente se precisa hacer ensayos para determinar el costo de posibles soluciones.

En lo referente al manganeso se presentan problemas de toxicidad a concentraciones menores de las precisas para que haya problema grave de obstrucción.

Tabla 6: *Riesgo de obstrucción en riego localizado (FAO)*

<i>Obstrucción</i>	<i>Unidades</i>	<i>Sin problema</i>	<i>Problema creciente</i>	<i>Problema grave</i>
Física				
Sólidos en suspensión	mg/l	< 50	50 - 100	> 100
Química				
pH		< 7.0	7.0 - 8.0	> 8.0
Sólidos solubles	mg/l	< 500	500 - 2,000	> 2,000
Manganeso	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
Hierro	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
Acido sulfhídrico	mg/l	< 0.5	0.5 - 2.0	> 2.0
Biológica				
Poblaciones bacterianas	Máx núm./ml	< 10,000	10,000 - 50,000	> 50,000

Las partículas sólidas en suspensión se eliminan mediante sedimentación y filtración. Los precipitados químicos, que se producen por exceso de carbonatos o sulfatos de calcio o de magnesio y por la oxidación del hierro, se ven favorecidos por altas temperaturas y valores altos del pH.

El riesgo de precipitación del calcio puede ser valorado mediante el *índice de saturación de Langelier (IL)*, según el cual el carbonato cálcico precipita cuando alcanza su límite de saturación en presencia de bicarbonato. Viene definido por la fórmula:

$$IL = \text{pH real} - \text{pHc}$$

El pHc es un valor teórico calculado del pH del agua de riego en contacto con calcio y en equilibrio con el CO₂ del suelo. Se calcula usando la tabla 7.

$$\text{pHc} = X + Y + Z$$

X es función de la concentración de Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺.

Y es función de la concentración de Ca²⁺ + Mg²⁺.

Z es función de la concentración de CO₃²⁻ + HCO₃⁻.

El riesgo de obstrucción, según el índice de Langelier, es el siguiente:

<i>IL</i>	<i>Riesgo</i>
Negativo	Ninguno
0	Pequeño
0 - 0.5	Medio
0.5 - 1	Alto
Mayor de 1	Muy alto

Ejemplo

Calcular el índice de Langelier de un agua de riego cuyo análisis ha dado el siguiente contenido de iones en meq/l:

pH: 7.5
 Calcio: 8.7
 Magnesio: 22.8
 Sodio: 10.3
 Carbonato: 0.1
 Bicarbonato: 4.5

Tabla 7: Cálculo de pHc

<i>Suma de concentraciones meq/l</i>			
$Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$	X		
$Ca^{2+} + Mg^{2+}$		Y	
$CO_3^{2-} + HCO_3^-$			Z
0.05	2.0	4.6	4.3
0.10	2.0	4.3	4.0
0.15	2.0	4.1	3.8
0.20	2.0	4.0	3.7
0.25	2.0	3.9	3.6
0.30	2.0	3.8	3.5
0.40	2.0	3.7	3.4
0.50	2.1	3.6	3.3
0.75	2.1	3.4	3.1
1.00	2.1	3.3	3.0
1.25	2.1	3.2	2.9
1.5	2.1	3.1	2.8
2.0	2.2	3.0	2.7
2.5	2.2	2.9	2.6
3.0	2.2	2.8	2.5
4.0	2.2	2.7	2.4
5.0	2.2	2.6	2.3
6.0	2.2	2.5	2.2
8.0	2.3	2.4	2.1
10.0	2.3	2.3	2.0
12.5	2.3	2.2	1.9
15.0	2.3	2.1	1.8
20.0	2.4	2.0	1.7
30.0	2.4	1.8	1.5
50.0	2.5	1.6	1.3
80.0	2.5	1.4	1.1

Solución:

Concentración de $Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ = 41.8$.

Concentración de $Ca^{2+} + Mg^{2+} = 31.5$.

Concentración de $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- = 4.6$.

Según la tabla 7: $X = 2.5$, $Y = 1.8$, $Z = 2.6$.

$\text{pHc} = X + Y + Z = 6.9$

$IL = \text{pH} - \text{pHc} = 7.5 - 6.9 = 0.6$

Riesgo de obstrucción: Alto.

ANÁLISIS DE AGUAS

Los análisis de laboratorio requeridos para utilizar las directrices técnicas, así como valores normales de estos análisis en aguas de riego, vienen especificados en la tabla 8.

Tabla 8: *Valores normales de análisis de aguas de riego (FAO)*

<i>Salinidad</i>		
Conductividad eléctrica	0 - 3	dS/m
Total de sólidos en solución	0 - 2,000	mg/l
Calcio	0 - 20	meq/l
Magnesio	0 - 5	meq/l
Sodio	0 - 40	meq/l
Carbonatos	0 - 0.1	meq/l
Bicarbonatos	0 - 10	meq/l
Cloruro	0 - 30	meq/l
Sulfatos	0 - 20	meq/l
<i>Nutrientes</i>		
Nitrógeno (nitrato)	0 - 10	mg/l
Nitrógeno (amonio)	0 - 5	mg/l
Fósforo (fosfato)	0 - 2	mg/l
Potasio	0 - 2	mg/l
<i>Varios</i>		
Boro	0 - 2	mg/l
pH	6 - 8.5	
RAS	0 - 15	

Nitrógeno (nitrato) es la cantidad de nitrógeno contenido en forma de nitrato. Igualmente nitrógeno (amonio) y fósforo (fosfato) son las cantidades de nitrógeno y fósforo contenidos, respectivamente, en los iones amonio y fosfato.

En aguas para riego localizado deben hacerse, además de los anteriores, los siguientes análisis:

— En aguas superficiales: sólidos en suspensión.

- En aguas que contienen aguas residuales: demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, materia orgánica y microorganismos.
- En aguas subterráneas, sobre todo cuando la salinidad es superior a 1 dS/m: hierro, oxígeno disuelto, ácido sulfhídrico, ferrobacterias y bacterias reductoras de sulfato.

Los análisis requieren tomar una muestra representativa del agua a analizar, para lo cual se seguirán las normas siguientes:

- El recipiente deberá de ser de vidrio o de plástico, con una capacidad de litro a litro y medio, y se limpiará escrupulosamente con agua objeto de la muestra.
- En pozos dotados con bomba de extracción se dejará correr el agua durante algún tiempo, antes de proceder a la toma.
- En ríos y embalses se recogen varias tomas en diferentes puntos representativos y se mezclan en una sola muestra. En el supuesto de recoger una sola toma se hará en el centro de la corriente del río.
- Tomar la muestra momentos antes de ser llevada al laboratorio, ya que los resultados de los análisis serán tanto mejores cuanto menor sea el intervalo de tiempo transcurrido entre la recogida de la muestra y el análisis. Será preferible que este intervalo no exceda de 24 horas.
- A ser posible, antes de tomar la muestra, ponerse en contacto con el laboratorio, para informarse.
- Cerrar el envase y etiquetarlo, para su perfecta identificación.

CAPÍTULO 4

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La programación del riego tiene por finalidad el ahorro de agua y de energía sin reducir la producción, tratando de dar una respuesta a las siguientes preguntas:

- Cuándo se debe regar.
- Cuánta cantidad de agua se debe aplicar en cada riego.
- Cuánto tiempo se debe aplicar el agua en cada riego.

Para contestar a las dos primeras preguntas hay que tener en cuenta las necesidades de agua del cultivo y las características del suelo en cuanto a su capacidad para retener el agua. Para contestar a la tercera pregunta hay que tener en cuenta la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

Necesidades netas de riego

Las *necesidades netas de riego* (N_n) vienen definidas por las siguientes variables:

- Las necesidades de agua del cultivo ET (cultivo).
- Aportaciones de la precipitación efectiva Pe .
- Aporte capilar desde una capa freática próxima a las raíces.
- Variación en el almacenamiento de agua en el suelo.

$$N_n = ET \text{ (cultivo)} - Pe - \text{Aporte capilar} - \text{Variación de almacenamiento.}$$

Del total de agua de precipitación que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se infiltra y se incorpora a la zona radical, otra parte percola en profundidad fuera del alcance de las raíces, otra parte se pierde por escorrentía superficial y otra parte queda interceptada por la vegetación, desde donde se evapora posteriormente. Se llama

precipitación efectiva a la proporción de agua retenida en la capa radical con relación a la cantidad de lluvia caída. Su magnitud depende:

- De las características del terreno: condiciones físicas, grado de humedad, pendiente, cobertura de cultivo, etc.
- De las características de la precipitación: altura de agua caída, intensidad, duración y frecuencia.

Salvo en casos muy particulares no se tienen en cuenta el aporte capilar desde la capa freática ni la variación en el almacenamiento de agua en el suelo. En riego localizado tampoco se considera la lluvia efectiva, debido a la gran frecuencia en la aplicación del agua.

Ejemplo

Calcular las necesidades netas del riego en el cultivo de tomate de una determinada región, en donde se dan los siguientes datos, expresados en mm de altura de agua.

	<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Total</i>
<i>ET</i> (cultivo)	70	120	180	230	170	770
<i>Pe</i>	26	71	39	2	14	152

Solución:

$$N_n = ET \text{ (cultivo)} - P_e$$

<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>
70 - 26 = 44	120 - 71 = 49	180 - 39 = 141
<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Total</i>
230 - 2 = 228	170 - 14 = 156	770 - 152 = 618

Cálculo de la precipitación efectiva

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

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

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

$$P_e = 0.8P - 25$$

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

$$P_e = 0.6P - 10$$

Ejemplo

Durante los meses de mayo y junio han caído, respectivamente, 42 y 80 mm de lluvia. La lluvia efectiva en esos meses será:

En mayo: $Pe = 0.6P - 10 = 0.6 \times 42 - 10 = 15.2$ mm.

En junio: $Pe = 0.8P - 25 = 0.8 \times 80 - 25 = 39$ mm.

2. *En función de la precipitación mensual en suelos de pendiente ligera.*

Tabla 1: Precipitación efectiva (en mm) para zonas áridas en función de la precipitación mensual, en suelos de pendiente ligera (3 a 8 %) (E. Torres)

Lámina precipitada	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		1.00	1.98	2.96	3.92	4.88	5.82	6.76	7.68	8.60
10	9.50	10.40	11.28	12.16	13.02	13.88	14.72	15.56	16.38	17.20
20	18.00	18.80	19.58	20.36	21.12	21.88	22.60	23.15	23.69	24.22
30	24.74	25.25	25.74	26.23	26.71	27.19	27.66	28.11	28.56	29.01
40	29.44	29.86	30.28	30.69	31.09	31.51	31.89	32.25	32.66	33.04
50	33.40	33.77	34.12	34.47	34.82	35.16	35.49	35.82	36.14	36.16
60	36.78	37.08	37.39	37.69	37.99	38.27	38.56	38.81	39.41	39.39
70	39.65	39.92	40.17	40.43	40.67	40.92	41.16	41.39	41.63	41.86
80	42.08	42.31	42.52	42.73	42.95	43.15	43.34	43.55	43.74	43.94
90	44.12	44.30	44.49	44.66	44.83	45.00	45.17	45.33	45.49	45.65
100	45.80									

Como se observa en la tabla, la precipitación efectiva va disminuyendo progresivamente a medida que aumenta la precipitación mensual, debido a unas mayores pérdidas por escurrimiento.

3. *En función de la precipitación mensual (P) y del número de precipitaciones habidas durante el mes (n)*

$$Pe = 0.8 P - 12.5 n$$

Probabilidades de lluvia

Cuando se toman los datos de precipitación media de una serie de años ocurre que en la mitad de esos años no se alcanza la cifra de dicha precipitación media. Si se requiere una precisión mayor que la obtenida con la precipitación media se calcula la probabilidad de lluvia esperada, procediendo del modo siguiente:

- Se establecen los valores de precipitación (mensual o anual) obtenidos en una estación meteorológica durante varios años de registro.
- Se ordena en orden decreciente, dando a cada valor el número de orden correspondiente.

La precipitación esperada para el mes de julio con un 75 % de probabilidad es de 34.75 mm, lo que significa que 3 de cada 4 años se tendrán precipitaciones iguales o mayores que 34.75 mm.

Ejemplo

Para cultivos de temporada se acostumbra a tomar la precipitación efectiva correspondiente a la precipitación con un 50 % de probabilidad de ocurrencia. Supongamos el caso anterior de precipitaciones del mes de julio durante el período 1961-1980.

Para calcular la precipitación efectiva se procede de la forma siguiente:

— Se ordenan las precipitaciones en orden decreciente, dando a cada valor el número de orden correspondiente (véase ejemplo anterior).

— Se aplica la fórmula $P = \frac{100M}{N + 1}$ para una probabilidad $P = 50$

$$50 = \frac{100M}{20 + 1}$$

$$M = \frac{50 \times 21}{100} = 10.5$$

A un número de orden $M = 11$ corresponde una precipitación mensual de 60 mm.

— Se calcula la precipitación efectiva a partir de la precipitación mensual. Por ejemplo, en la tabla 1, a una precipitación mensual de 60 mm corresponde una precipitación efectiva de 36.7 mm.

Necesidades totales. Eficiencia de aplicación

Sin considerar las pérdidas habidas en los canales y acequias de conducción y distribución del agua hacia la parcela de riego, las pérdidas ocurridas en la propia parcela se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Por evaporación en el suelo, que ya se tiene en cuenta al evaluar las necesidades de evapotranspiración.
- Por escurrimiento superficial y percolación profunda.
- Por lavado o lixiviación. Se da en aquellas circunstancias en que se precisa añadir un exceso de agua para arrastrar las sales sobrantes fuera del alcance de las raíces.
- Por evaporación directa desde el chorro de agua en los sistemas que pulverizan el agua.
- Por deficiente distribución del agua. Esta pérdida se produce cuando en las zonas menos regadas se quiere aportar la cantidad de agua necesaria para cubrir las necesidades de las plantas, con lo cual en las zonas más regadas se aporta un exceso.

Se define como *eficiencia de aplicación del agua* en un sistema de riego a la proporción entre la cantidad de agua almacenada en la zona del sistema radical (disponible para la planta) y la cantidad de agua aplicada por el sistema de riego.

$$Ea = \frac{Nn}{Nt} \quad \text{De donde } Nt = \frac{Nn}{Ea}$$

Ea = Eficiencia de aplicación.

Nn = Necesidades netas.

Nt = Necesidades totales o volumen de agua aplicada.

Teniendo en cuenta las clases de pérdida habidas en la parcela:

$$Ea = Rt \times FL \times Fr \times CU$$

Rt = Relación de transpiración.

FL = Factor de lavado.

Fr = Factor de rociado.

CU = Coeficiente de uniformidad del sistema de riego.

Relación de transpiración (Rt)

Es la proporción entre la cantidad de agua evapotranspirada y la cantidad de agua puesta a disposición de la planta. La diferencia entre esas cantidades se debe a las pérdidas por escurrimiento superficial y por percolación profunda.

En riego por aspersión se produce escurrimiento, sobre todo, cuando la cantidad de agua aplicada sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo. El escurrimiento se incrementa cuando aumenta la pendiente del terreno. En caso de riego localizado y en riego por aspersión con pendiente inferior al 5 % no se considera el escurrimiento, por lo que la relación de transpiración depende exclusivamente de la percolación.

En la tabla 2 se dan unos valores aproximados de la relación de transpiración debida a la percolación (*Rp*) en terrenos con pendiente inferior al 5%.

Tabla 2: *Relación de transpiración debida a la percolación (Rp) en terrenos con pendiente inferior al 5 %*

Profundidad de las raíces (m)	Textura del suelo			
	Muy arenosa	Arenosa	Media	Fina
< 0,75	0.90	0.90	0.95	1
0.75 – 1,50	0.90	0.95	1	1
> 1,50	0.95	1	1	1

En clima húmedo estos valores se reducen en un 10%.

En general, con un buen manejo del riego a presión las pérdidas por percolación no deben sobrepasar del 10 %, por lo que la relación de percolación será superior al 90 %.

Factor de lavado (FL)

El arrastre del exceso de sales presentes en el suelo se hace aplicando agua en exceso mediante el riego. La fracción de agua de riego que debe atravesar la zona radical para arrastrar el exceso de sales es el requerimiento de lavado (*RL*), cuya cantidad viene en función de la salinidad del agua de riego y de la tolerancia de los cultivos a la salinidad (véase capítulo anterior).

El factor de lavado será:

$$FL = 1 - RL$$

FL = Factor de lavado, en tanto por uno.

RL = Requerimiento de lavado, en tanto por uno.

Factor de rociado (Fr)

Cuando el agua se aplica por pulverización (aspersores, difusores, etc.) se producen unas pérdidas por evaporación directa desde el agua del chorro y desde el agua que moja la parte aérea de las plantas.

La fracción de agua perdida por evaporación directa viene en función de factores climáticos y del grado de pulverización del chorro. En condiciones normales estas pérdidas varían entre el 1 y el 6 %. En condiciones severas (temperatura alta, baja humedad relativa, tamaño de gota muy pequeño, alta velocidad del viento) las pérdidas pueden ser bastante más elevadas.

$$Fr = 1 - Pr$$

Fr = Factor de rociado, en tanto por uno.

Pr = Pérdidas por evaporación directa, en tanto por uno.

Coficiente de uniformidad (CU)

La uniformidad de riego se refiere a la distribución más o menos uniforme del agua infiltrada, y se expresa mediante un valor porcentual. Cuando este valor es 100 significa que en toda la superficie de riego se infiltra la misma cantidad de agua, cosa que nunca ocurre en la práctica.

La falta de uniformidad en la distribución del agua origina un aumento de la cantidad del agua aplicada, con el fin de que las plantas que reciban menos cantidad tengan lo suficiente para cubrir sus necesidades, con lo cual habrá otras plantas que reciban con exceso.

En riego por superficie se suele utilizar el siguiente coeficiente de uniformidad de distribución (*UD*).

$$UD = \frac{\text{Lámina media infiltrada en el 25 \% del área menos regada}}{\text{Lámina media infiltrada en toda la parcela}}$$

La lámina media infiltrada en el 25 % del área menos regada se calcula como la media del 25 % de los valores más bajos de la lámina de agua infiltrada, teniendo en cuenta que cada valor corresponde a una misma superficie.

En riego por aspersión se utiliza preferentemente el siguiente coeficiente de uniformidad (*CU*) propuesto por Christiansen:

$$CU = 1 - \frac{\sum |d|}{M \times n}$$

$\sum |d|$ = Suma de los valores absolutos de las desviaciones en los puntos de control, con respecto a la media de la lámina infiltrada.

M = Valor medio de la lámina infiltrada en los puntos de control.

n = Número de puntos de control.

En riego localizado de alta frecuencia se adopta el siguiente coeficiente de uniformidad para una subunidad de riego.

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a}$$

q_a = Caudal medio de todos los emisores.

q_{25} = Caudal medio de todos los emisores que constituyen el 25 % de más bajo caudal.

Este coeficiente de uniformidad es más estricto que el de Christiansen, ya que se tiene en mayor consideración las plantas que reciben menos agua. Es válido para sistemas de riego en funcionamiento, pero obviamente no sirve para diseñar un sistema de riego, en donde el coeficiente de uniformidad es un dato, mientras que la incógnita es alguna variable relacionada con dicho coeficiente.

La falta de uniformidad en los emisores se debe, fundamentalmente, al proceso de fabricación de los mismos y a que la presión no es la misma en todos ellos. Considerando el efecto de la falta de uniformidad en la fabricación de los emisores y las variaciones de presión, se define el siguiente coeficiente de uniformidad.

$$CU = \left(1 - \frac{1.27 CV}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_m}{q_a}$$

CV = Coeficiente de variación de fabricación del emisor, en tanto por uno.

e = Número de emisores por planta.

q_m = Caudal del emisor de mínimo caudal (de presión mínima), en litros/hora.

q_a = Caudal medio de todos los emisores, en litros/hora.

El coeficiente de uniformidad debe ser más exigente en riego localizado que en riego por aspersión, ya que en este último caso el agua moja toda la superficie regada y puede redistribuirse, mientras que en riego localizado los emisores de menor caudal afectan con más intensidad al reparto del agua.

Resumiendo:

En condiciones normales de riego la eficiencia de aplicación (Ea) depende: de la percolación (Rp), de las exigencias de lavado (FL) y de la uniformidad de la distribución (CU). Rp y FL no se toman simultáneamente, sino que se toma sólo la de menor eficiencia, o sea, aquella que produce mayor pérdida de agua.

Si $Rp < FL$, la cantidad de agua perdida por percolación es mayor que la correspondiente a las exigencias de lavado, en cuyo caso:

$$Ea = Rp \times CU$$

Si $FL < Rp$, las exigencias de lavado son mayores que las pérdidas por percolación, en cuyo caso:

$$Ea = FL \times CU$$

o lo que es igual:

$$Ea = (1 - RL) \times CU$$

Las necesidades totales serían, respectivamente:

$$Nt = \frac{Nn}{Rp \times CU} \quad ; \quad Nt = \frac{Nn}{(1-RL) \times CU}$$

Ejemplo

Un cultivo de maíz se riega por aspersión cada 7 días utilizando agua cuya salinidad es de 1,1 dS/m. La demanda de agua es de 6.5 mm/día y la relación de percolación es del 75 %. Deseamos que el rendimiento de la cosecha no se vea afectada por la salinidad. ¿Cuánta cantidad de agua adicional se precisa añadir para lixiviación? No se tienen en consideración la precipitación, el escurrimiento, ni la evaporación directa desde el agua del chorro. Coeficiente de uniformidad = 0.85. Se considera el 100 % de eficiencia de lavado.

Solución:

Necesidades netas:

$$Nn = ET \text{ (cultivo)} - Pe$$

$$ETt \text{ (cultivo)} = 7 \times 6,5 = 45.5 \text{ mm} = 455 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$Nn = 455 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Relación de percolación: $Rp = 0.75$

Requerimientos de lixiviación:

$$RL = \frac{CEa}{5CEe - CEa} = \frac{1.1}{5 \times 1.7 - 1.1} = 0.15$$

$$CEe = 1.7 \text{ dS/m, según tabla 2 del capítulo 3}$$

Factor de lavado:

$$FL = 1 - .15 = 0.85$$

Se cumple que $Rp < FL$

No es necesario añadir agua para lixiviación.

Necesidades totales:

$$Nt = \frac{Nn}{Rp \times CU} = \frac{455}{0.75 \times 0.85} = 713.72 \text{ m}^3/\text{ha}$$

De un modo general, las eficiencias de los diferentes sistemas de riego vienen indicados en la Tabla 3.

Tabla 3: Eficiencia de aplicación del agua para diferentes sistemas de riego

<i>Riego por superficie:</i>	
Riego por surcos	0.50-0.70
Riego por fajas	0.60-0.75
Riego por inundación	0.60-0.80
Riego por inundación permanente	0.30-0.40
<i>Riego por aspersión</i>	0.65-0.85
<i>Riego por goteo</i>	0.75-0.90

Se ha considerado que los sistemas de riego a presión (aspersión y goteo), más tecnificados, tenían una eficiencia mayor que el riego por superficie. Sin embargo, hay que considerar que el manejo del sistema influye decisivamente en la eficiencia, de tal modo que un sistema poco tecnificado pero bien manejado resulta más eficiente que otro más tecnificado pero mal manejado.

Dosis de riego e intervalo entre riegos

La *dosis de riego* es la cantidad de agua que se aplica en cada riego por cada unidad de superficie. Cabe diferenciar entre *dosis neta (Dn)* y *dosis bruta o total (Dt)*. La dosis neta corresponde a la reserva fácilmente disponible, y viene dada por la fórmula:

$$Dn = 100 \times H \times Da \times (Cc - Pm) \times f$$

D_n = Dosis neta expresada en m^3/ha .

H = Profundidad de las raíces, en m.

D_a = Densidad aparente del suelo.

C_c = Capacidad de campo, expresado en porcentaje en peso de suelo seco.

P_m = Punto de marchitamiento, expresado en porcentaje en peso de suelo seco.

f = Fracción de abatimiento del agua disponible, expresado en tanto por uno.

Cuando C_c y P_m vienen expresados en porcentaje del volumen de suelo, la fórmula sería:

$$D_n = 100 \times H \times (C_c - P_m) \times f$$

Cuando C_c y P_m vienen expresados en mm de altura de agua, la fórmula sería:

$$D_n = H \times (C_c - P_m) \times f$$

D_n = Dosis neta expresada en mm.

C_c = Capacidad de campo, expresado en mm/cm.

P_m = Punto de marchitamiento, expresado en mm/cm.

H = Profundidad de las raíces, en cm.

f = Fracción de abatimiento del agua disponible, expresada en tanto por uno.

Si la proporción de suelo mojado es r , la dosis neta $D'n$ sería:

$$D'n = D_n \times r$$

r está expresado en tanto por uno

La dosis total es:

$$D_t = \frac{D_n}{E_a}$$

Siendo E_a la eficiencia de aplicación.

Se debe regar cuando las extracciones de las plantas agoten la reserva fácilmente disponible. Por consiguiente, el intervalo (i) en días será:

$$i = \frac{\text{Reserva fácilmente disponible}}{\text{Necesidades netas diarias}} = \frac{D_n}{N_n \text{ diarias}} = \frac{D_n}{E_t (\text{cultivo}) - P_e}$$

Naturalmente, la D_n y las N_n diarias se han de expresar en las mismas unidades (m^3/ha o mm de altura de agua).

Ejemplo

Un suelo de densidad aparente 1.4 y 0.90 m de profundidad tiene una capacidad de campo del 24 % con relación al suelo seco y un punto de marchitamiento del 8 % con relación al suelo seco. Calcular el intervalo entre dos riegos consecutivos, sabiendo que la evapotranspiración consume diariamente 8 mm de altura de agua y que la fracción de abatimiento del agua disponible es de 0.3. No se tiene en cuenta la precipitación.

Solución:

Volumen 1 ha de suelo:

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= \text{Superficie} \times \text{Profundidad} = 10,000 \times 0.9 = 9,000 \text{ m}^3 \\ \text{Densidad aparente} &= 1.4 \text{ kg/l} = 1.4 \text{ toneladas/m}^3 \text{ de suelo seco} \end{aligned}$$

Peso de 1 ha de suelo seco:

$$\begin{aligned} \text{Peso} &= \text{Volumen} \times \text{Densidad aparente} = 9,000 \times 1.4 = 12,600 \text{ toneladas} \\ \text{Reserva de agua disponible} &= Cc - Pm = 24 - 8 = 16 \% \text{ del suelo seco} \\ \text{Reserva fácilmente disponible} &= \text{Reserva disponible} \times f = 16 \times 0.3 = \\ &= 4.8 \% \text{ del suelo seco} \end{aligned}$$

El 4.8 % del peso de suelo contenido en 1 ha es:

$$\frac{12,600 \times 4.8}{100} = 604.8 \text{ toneladas de agua} = 604.8 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

604.8 m³/ha equivalen a 60.48 mm de altura de agua.

$$\text{Intervalo} = \frac{\text{Reserva fácilmente disponible}}{\text{ET (cultivo) diario}} = \frac{60.48}{8} = 7.5 \text{ días}$$

Los riegos se darán cada 8 días.

Ejemplo

La reserva de agua disponible en un suelo es 85 mm, la evapotranspiración diaria del cultivo es 9 mm y la fracción de abatimiento para ese cultivo es 0.6. Al principio del tercer día después de efectuar un riego se produce una lluvia efectiva de 22 mm. ¿Qué día se dará el próximo riego?

Solución:

$$\text{Reserva fácilmente disponible} = 85 \times 0.6 = 51 \text{ mm}$$

Núm. de orden al día después del riego	Reserva al principio del día	ET (cultivo) diaria	Reserva al final del día
1	51	9	51 - 9 = 42
2	42	9	42 - 9 = 33
3	33 + 22 = 55 - 4 = 51	9	51 - 9 = 42
4	42	9	42 - 9 = 33
5	33	9	33 - 9 = 24
6	24	9	24 - 9 = 15
7	15	9	15 - 9 = 6
8	6	9	6 - 9 = -3

Al principio del día tercero habrá una reserva fácilmente disponible de:

$$33 + 22 = 55 \text{ mm}$$

La máxima cantidad de agua que puede retener el suelo es 51 mm. Por tanto, se perderán por infiltración profunda:

$$55 - 51 = 4 \text{ mm}$$

En el día octavo la reserva es de 6 mm. Habrá que regar en ese día.

Caudal necesario

El caudal de agua necesaria viene dado por la expresión:

$$Q = 10 \frac{S \times Dt}{ir \times T}$$

Q = Caudal necesario, en m³/hora.

S = Superficie regada, en ha.

Dt = Dosis total, en mm de altura de agua.

ir = Número de días empleados en regar, dentro del intervalo de riego.

T = Tiempo de riego, en horas/día.

Ejemplo

Calcular el intervalo entre dos riegos consecutivos y el caudal de agua necesaria cuando se dan las siguientes características:

Cc = 3.2 mm de altura de agua por cm de profundidad de suelo.

Pm = 1.2 mm de altura de agua por cm de profundidad de suelo.

H = 60 cm.

f = 0.45.

Pe = 0.

ET (cultivo) diario = 10 mm.

Ea = 0.8.

S = 25 ha.

T = 16 horas/día.

Durante el intervalo de riego se deja de regar 1 día.

Solución:

Agua disponible = $Cc - Pm = 3.2 - 1.2 = 2$ mm de altura de agua por cm de profundidad.

En una profundidad de 60 cm habrá una reserva de agua disponible de:

$$2 \times 60 = 120 \text{ mm de altura de agua}$$

Reserva fácilmente disponible = $120 \times 0.45 = 54$ mm de altura de agua

$$\begin{aligned} \text{Intervalo} &= \frac{\text{Reserva fácilmente disponible}}{ET \text{ (cultivo) diario}} = \\ &= \frac{Dn}{ET \text{ (cultivo)}} = \frac{54}{10} = 5.4 \text{ días} \end{aligned}$$

El intervalo se ajusta a un número entero de días, por ejemplo 6 días. En este caso las dosis de riego ajustadas serán:

$$Dn \text{ ajust.} = ET \text{ (cultivo)} \times \text{Intervalo} = 10 \times 6 = 60 \text{ mm}$$

$$Dt \text{ ajust.} = \frac{60}{0.8} = 75 \text{ mm.}$$

El número de días empleados en regar, dentro del intervalo, será $6 - 1 = 5$.

Caudal necesario:

$$Q = 10 \times \frac{S \times Dt}{ir \times T} = 10 \times \frac{25 \times 75}{5 \times 16} = 234.3 \text{ m}^3/\text{hora}$$

Métodos de programación de riegos

Los métodos de programación de riegos se dividen en tres grupos:

- Métodos basados en medir el estado hídrico de la planta, en forma directa (cámara de tensión xilemática) o en forma indirecta (termómetro de infrarrojo).
- Métodos basados en medir el estado hídrico del suelo mediante diversos instrumentos: tensiómetros, bloques de yeso, sonda de neutrones.
- Métodos basados en la valoración del balance hídrico del conjunto suelo-planta-atmósfera.

Medición del estado hídrico de la planta

Cuando un vegetal transpira más agua que la que absorbe comienza a utilizar el agua de constitución de las células, provocando diversos cambios de aspecto, que pueden ser detectados y servir de base a agricultores experimentados para saber si el cultivo necesita con urgencia una aportación de agua. No se pueden dar normas generales, puesto que cada especie muestra síntomas característicos, que pueden variar incluso en los distitos cultivares. En muchas ocasiones estos síntomas se hacen visibles cuando el déficit hídrico provoca una disminución del rendimiento.

Los síntomas visibles más fáciles de observar son los siguientes:

- Cambios de color provocados por una alteración de la orientación de las hojas, que se produce como consecuencia de una pérdida de turgencia. En las hojas jóvenes del frijol (judía), el color pasa de un verde claro a un verde azulado más oscuro. En este caso concreto, el color vuelve a su normalidad después del riego, aunque se necesita tener cierta experiencia para conocer el momento oportuno del mismo.
- Enrollamiento de las hojas de algunas gramíneas, originado por cambios de volumen de ciertas células acuíferas. Este cambio se detecta, sobre todo, en algunas variedades semienanas de arroz y en el sorgo, que es el cereal más tolerante a la falta de agua. En el maíz estos síntomas se utilizan para determinar el momento del primer riego.
- Marchitez temporal provocada por una alta demanda evaporativa. En el caso de la remolacha azucarera se presenta una marchitez transitoria diaria después del mediodía, sin que ello implique la necesidad de regar.
- Reducción del crecimiento-vegetativo. En el caso del algodón, esta reducción del crecimiento provoca una rigidez en el tallo y un cambio de coloración en los extremos próximos al borde superior, que se vuelve de color marrón oscuro. El momento del riego se determina por el grado de flexibilidad del tallo principal junto al extremo superior.

En cualquier caso todos estos síntomas, válidos únicamente para agricultores experimentados, permiten decidir cuándo se ha de regar, pero no aportan ninguna información sobre la dosis de agua a emplear.

Los métodos de programación actualmente en uso, basados en la medición del estado hídrico, se fundamentan: en medir la tensión del agua en los vasos conductores de las plantas (medición directa), o en medir la temperatura del cultivo (medición indirecta). Estos métodos permiten determinar el momento del riego con mucha mayor precisión que los criterios cualitativos anteriormente mencionados, pero no permiten determinar la dosis de riego.

Medición del potencial hídrico

El potencial hídrico se mide con la cámara de tensión xilemática, que permite evaluar con rapidez los resultados a nivel de finca.

Este método requiere una buena información que relacione los valores de la tensión con el estado hídrico de la planta. Los trabajos de investigación han permitido definir unos valores umbrales para el riego del algodón, en donde conviene dar el primer riego cuando la tensión de la savia en el xilema es de 16-17 bares, haciendo la medición a mediodía en un día soleado de tipo medio. Los siguientes riegos se hacen con mediciones de 16-18 bares, salvo en la fase de una maduración, en donde el riego se aplica con

medición de 20 bares. En la última fase, cuando el cultivo se deja secar, se riega cuando la lectura alcanza 25 bares.

En el caso de otros cultivos, tales como girasol, maíz, durazno y manzano, la cámara de tensión se puede utilizar para comprobar la validez de una programación basada en parámetros de suelo y clima. La investigación sobre este tema se orienta en encontrar valores umbrales para diferentes cultivos en distintos sistemas de riego.

Para efectuar la medición se introduce el limbo de la hoja en la cámara, que se cierra herméticamente, y se somete a presión hasta que aparece una gota de agua en el corte del pecíolo de la hoja. La presión aplicada en ese momento es igual al potencial hídrico de la hoja.

Conviene realizar la medición sobre 4-6 muestras, tomando hojas expuestas al sol, de la misma edad e insertadas en el tallo al mismo nivel. La medición de cada muestra tarda en hacerse un minuto, aproximadamente.

Medición de la temperatura del cultivo

La temperatura de un cultivo está regulada por procesos transpiratorios, y éstos dependen, entre otras causas, de su grado de humedad. A medida que se reduce la transpiración, como consecuencia de la falta de humedad, se incrementa la temperatura.

Existen diferentes métodos para programar el riego en función de la temperatura del cultivo. El más utilizado es el llamado *CWSI*, que viene definido por la fórmula:

$$CWSI = (\Delta T - \Delta T \text{ mín}) (\Delta T \text{ máx} - \Delta T \text{ mín})$$

ΔT = Diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire.

ΔT máx = Valor máximo de la diferencia de temperatura entre cultivo y aire.

ΔT mín = Valor mínimo de la diferencia de temperatura entre cultivo y aire.

El ΔT máx corresponde a una porción de cultivo en donde la transpiración sea nula, para lo cual se trata un rodal con herbicida. El ΔT mín corresponde a una porción de cultivo en donde la transpiración es máxima, para lo cual se mantiene un rodal regado en exceso.

Cuando $CWSI = 0$ no existe falta de agua, mientras que cuando $CWSI = 1$, el «stress» originado por la falta de agua es máximo. En general se riega con valores de $CWSI$ alrededor de 0.2. El valor crítico para cada cultivo varía según las condiciones de suelo y clima, por lo que se debe investigar en cada caso.

Las mediciones se hacen con termómetro de infrarrojo, apuntando al cultivo con el sol de espalda y con una inclinación del aparato con respecto al suelo de 30°. En una parcela homogénea se hacen 10-12 muestreos. Para grandes superficies se utilizan técnicas de teledetección.

Medición del estado hídrico del suelo

Para medir el estado hídrico del suelo se utilizan dos parámetros: el contenido de agua (muestreo gravimétrico, sonda de neutrones) y el potencial hídrico (tensiómetro, bloques de resistencia eléctrica). Estos métodos permiten estimar el momento y la dosis de riego, y se han descrito en el capítulo 1.

Muestreo gravimétrico

Este método permite medir directamente la humedad del suelo. Para ello se toman unas muestras de suelo a lo largo de la zona radical, se pesan, se secan a estufa durante un día a 105 °C y se vuelven a pesar, para determinar, por diferencia de pesadas, el contenido de agua con relación al peso de suelo seco.

Este método exige un número elevado de muestras (unas 20) para que pueda ser utilizado con garantía. En suelos con alto contenido en materia orgánica se recomienda un secado a 50-70 °C, para evitar errores graves debidos a oxidación y combustión de la materia orgánica.

Sonda de neutrones

La sonda de neutrones permite una medición indirecta del agua del suelo. Para su utilización se colocan en el campo, de forma permanente, unos tubos metálicos de acceso a través de los cuales se desplaza la sonda hasta la profundidad deseada.

Se debe asegurar un buen contacto entre la tierra y las paredes exteriores del tubo, para que las lecturas no resulten falseadas por una acumulación de agua o de raíces en la zona de contacto.

La precisión del método depende, en gran parte, de la correcta calibración de la sonda, que debe hacerse para cada suelo en particular y para un amplio intervalo de contenidos de humedad (determinados por método gravimétrico) en muestras de suelo cercanas a los tubos de acceso.

Las lecturas realizadas en los 15-20 cm más superficiales no sirven, debido a que se produce un escape de neutrones a la atmósfera, salvo que estas lecturas se hagan con una calibración específica.

Es importante elegir el número y la localización de los puntos de medida, que han de ser representativos de la finca. Para seguir la evolución del contenido de humedad se puede proceder de la forma siguiente:

- Después de una lluvia o un riego abundante se determina la humedad a lo largo del perfil enraizado, a intervalos de unos 30 cm.
- Se determina la humedad correspondiente al nivel de abatimiento permisible, bien a lo largo de todo el perfil enraizado o sólo en la zona de máxima actividad radical. Es preferible hacerlo en ambos casos.
- Se realizan mediciones periódicas y se hace una representación gráfica de la evolución de la humedad, lo que permite predecir el momento del próximo riego.

El método de la sonda de neutrones tiene el inconveniente de un alto costo del instrumento y la necesidad de personal calificado. En cambio tiene la ventaja con relación al método gravimétrico, de que los controles periódicos se realizan siempre en el mismo sitio, lo que reduce considerablemente los errores.

Tensiómetro

El tensiómetro mide el potencial matricial del agua del suelo, que tiene valores negativos, por lo que conviene expresarlo como tensión del agua, que es la función opuesta del potencial matricial. El rango de utilización es de 0 a 80 centibares, que representa la casi totalidad del intervalo de humedad en suelos arenosos; en suelos arcillosos, una gran parte del contenido de agua disponible para las plantas se encuentra fuera de ese rango, de donde se deduce la mayor utilidad del aparato para suelos arenosos que para arcillosos. También resulta útil para cultivos con raíces someras y para los muy sensibles al déficit hídrico.

La lectura del tensiómetro debe ser corregida en función de la profundidad de la instalación, restando 0,1 centibares por cada centímetro de profundidad.

Resulta imprescindible elegir bien la ubicación del aparato, que ha de ser representativo de la finca. En riego por goteo se instala a una distancia de 30-50 cm del gotero. Por medio de lecturas periódicas, representadas gráficamente, se puede determinar la fecha y la dosis de riego.

El tensiómetro mide mejor los niveles altos de humedad, por lo que resulta muy adecuado para el riego por goteo, en donde conviene instalar dos tensiómetros en cada sitio: el menos profundo, cercano al emisor, y el más profundo, situado a mayor distancia. El riego se dará cuando la lectura del tensiómetro menos profundo esté comprendida entre 10 y 20 centibares en suelos arenosos, y entre 15 y 30 centibares en suelos arcillosos.

Las lecturas del tensiómetro más profundo se representan gráficamente, con el fin de determinar la evolución de la humedad en suelo. Cuando las lecturas tienden a aumentar significa que la humedad se va reduciendo, por lo que conviene aumentar la dosis de riego; cuando las lecturas se mantienen bajas de forma permanente significa que hay exceso de riego.

Bloques de resistencia eléctrica

La medición de la humedad del suelo por medio de bloques de material poroso (yeso, cerámica, etc) con electrodos embutidos se basa en la relación existente entre el contenido de humedad y la resistencia eléctrica.

Los bloques de resistencia eléctrica miden el potencial matricial del agua del suelo, cubriendo todo el intervalo de humedad disponible, por lo que son muy útiles para intervalos de poca humedad, en donde no se puede utilizar el tensiómetro. Son un instrumento adecuado para mediciones en suelos arcillosos y de textura media. No se pueden utilizar en suelos salinos, ya que el contenido de sales afecta a la resistencia eléctrica.

Los bloques de resistencia eléctrica son baratos y de fácil manejo. El yeso se disuelve en el agua de riego, por lo que deben ser renovados cada 2-3 años. La vida útil se prolonga añadiendo un poco de yeso al suelo de relleno durante la instalación.

Valoración del balance hídrico

Consiste en hacer un balance de forma similar a como se lleva la contabilidad de una cuenta bancaria. Conociendo el agua almacenada en el suelo en una fecha determinada, las aportaciones y extracciones, así como las fechas en que se producen, se puede calcular la reserva que en cualquier momento queda en el suelo y la fecha del próximo riego.

Para valorar el balance hídrico hay que tener en cuenta:

- Las necesidades de agua de la planta según su estado de desarrollo.
- Aportación de agua de lluvia.
- Control de la salinidad.
- Eficiencia del sistema de riego.
- Capacidad del suelo para almacenar agua.
- Profundidad de suelo explorado por las raíces.

Para aplicar este método se determina la reserva de agua existente en el suelo al comienzo de la temporada de riego. Es más práctico comenzar el balance después de un riego abundante a principio de temporada, con lo cual el suelo estará a la capacidad de campo y la reserva de agua será máxima. A partir de entonces se restan diariamente los valores de *ET* (cultivo) hasta que la reserva de agua alcance el nivel de abatimiento permitido, que corresponde a la reserva fácilmente disponible. En este momento se riega con la cantidad de agua precisa para alcanzar de nuevo la capacidad de campo y se empieza de nuevo el ciclo.

En cultivos anuales hay que tener en cuenta que en la primera etapa la profundidad de las raíces es inferior a la alcanzada posteriormente.

Según la información de que se disponga se puede hacer un programa o calendario de riegos para el año actual o para un año medio.

Para establecer un calendario para el año actual se precisa disponer de los datos climáticos que se van produciendo a lo largo de la temporada de riego, lo cual no siempre es posible, en cuyo caso conviene establecer un calendario para un año medio valiéndose de los datos climáticos medios de una serie de 10 o más años en la zona de cultivo. La dosis de riego debe ser corregida en los períodos en donde las condiciones climáticas varían significativamente respecto a la media. Estas correcciones también se pueden hacer mediante control de la humedad del suelo con tensiómetro.

Calendario para el año medio

El establecimiento del calendario para el año medio abarca las siguientes etapas:

- Cálculo de la ET_0 del año medio, mediante cualquiera de los procedimientos estudiados en el Capítulo 2. Conviene conocer también los niveles de probabilidad.
- Cálculo de ET (cultivo) aplicando los coeficientes de cultivo adaptados a la zona de riego.
- Cálculo de la precipitación efectiva del año medio.
- Cálculo de las necesidades de riego, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego y las necesidades de lixiviación.
- Cálculo de las dosis y fechas de riego de cada cultivo, conociendo las reservas de agua fácilmente disponible en la zona de suelo explorada por las raíces.

Las dosis y fechas de riego calculadas sirven para una primera orientación, pudiendo variar en determinados períodos de la temporada de riego al hacer los ajustes correspondientes a la climatología específica de ese año.

Calendario para el año actual

Para el establecimiento de este calendario se precisa conocer los datos climáticos que se van produciendo durante la temporada de riego. Lo más usual es utilizar diariamente los datos de precipitación y evaporación del tanque evaporímetro.

Las etapas a seguir son las siguientes:

- Cálculo de la ET_0 a partir de los datos de evaporación del tanque y coeficiente del tanque.
- Cálculo semanal de ET (cultivo) aplicando los correspondientes coeficientes de cultivo.
- Cálculo semanal de las necesidades de riego para reponer el consumo de agua de la semana anterior, teniendo en cuenta las aportaciones de la precipitación efectiva de esa semana.

Los servicios de asesoramiento de riegos

Un servicio de asesoramiento de riegos tiene por finalidad que los usuarios hagan un manejo eficiente del agua, proporcionando a la planta el agua necesaria y suficiente en el momento oportuno. De ello deriva un beneficio económico al obtener mayor producción (el cultivo dispone del agua necesaria en cada momento de su ciclo) y reducir los costos (se elimina el costo del agua superflua). A la vez se consigue una mejor utilización de los recursos hídricos y se evita la contaminación de los acuíferos con el agua sobrante que percola en el subsuelo.

Los servicios de asesoramiento de riegos se basan en calcular la evapotranspiración de cultivos concretos en zonas determinadas. Para el cálculo local de la *ET* (cultivo) se necesita conocer:

- La evapotranspiración del cultivo de referencia *ET_o*, escogiendo la fórmula que mejor se ajuste a las características climáticas de la zona. Las comprobaciones se suelen hacer con lisímetro de nivel constante.
- El coeficiente de cultivo *K_c*. Para el ajuste de la curva del coeficiente de un determinado cultivo se realizan ensayos locales, comparando la cantidad de agua aportada con la producción obtenida. Estos ensayos se pueden realizar con los aspersores de un ala de riego, lo que permite realizar un tratamiento diferencial continuo, midiendo la pluviometría y la producción a diferentes distancias a ambos lados del ala de riego.

Conocidos *ET_o* y *K_c* se calcula *ET* (cultivo) mediante la fórmula:

$$ET \text{ (cultivo)} = ET_o \times K_c$$

Un servicio de asesoramiento de riegos debe disponer de una red de estaciones meteorológicas situadas estratégicamente dentro de la zona que abarca dicho servicio. Sería preferible que las estaciones estuvieran automatizadas, lo que permitiría elaborar unas medias de los datos obtenidos por cada período de tiempo de unos 30 minutos. Para la transmisión de los datos meteorológicos se suele emplear la red telefónica mediante aparatos modem, recopilando estos datos en una central para el procesado de los mismos.

Después de recopilados los datos de los diferentes parámetros conviene hacer una revisión de los mismos mediante gráficos, con lo que se detectaría el funcionamiento anormal de alguno de los sensores.

Una vez comprobados los datos se calcula *ET_o* mediante un modelo que se adapte bien a la zona. La curva del coeficiente de cultivo se programa de forma que se obtengan los coeficientes teóricos correspondientes a cada fecha del ciclo. En el supuesto de que las condiciones meteorológicas del año actual modifiquen el ciclo del cultivo habrá que adecuar la curva a la realidad del ciclo.

En la difusión de la información se suele proporcionar al usuario la *ET* (cultivo), para que éste calcule las necesidades de riego conociendo la precipitación efectiva local y la eficiencia de su sistema de riego.

La difusión de la información se suele dar diariamente, con lo cual los usuarios que tienen un sistema de riego automatizado pueden mantener el contenido hídrico del suelo próximo a la capacidad de campo, mediante riegos frecuentes y ligeros. Cada semana transcurrida se hace una recopilación semanal de la información, para aquellos usuarios cuyo sistema de riego es más asequible a la programación semanal.

La información diaria se suministra por radio y por contestador telefónico automático. La información semanal se suministra por los medios anteriores y a través de la prensa local, en donde se detallan las necesidades diarias y el total semanal.

Repercusión de la dotación de riego en la producción. Aplicación a la programación del riego

Cuando se limita la disponibilidad de agua, la evapotranspiración real es menor que la evapotranspiración máxima, lo que se traduce en una disminución de la producción.

Para cuantificar el efecto que tiene una aportación deficitaria de agua sobre la producción se utilizan modelos de simulación o funciones de producción. Las más interesantes de estas últimas son las que relacionan la producción con la evapotranspiración, ya que se ha demostrado experimentalmente que existe una relación lineal entre ambas para casi todos los cultivos. La más generalizada es la siguiente, que establece una relación entre la reducción relativa de la producción y la reducción relativa de la evapotranspiración:

$$\frac{Y_m - Y_a}{Y_m} = K_y \frac{ET_m - ET_a}{ET_m}$$

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)$$

ET_m = Evapotranspiración máxima de un cultivo que crece en condiciones óptimas y con suministro suficiente de agua.

ET_a = Evapotranspiración de un cultivo que crece en unas condiciones en que el suministro del agua no cubre totalmente las necesidades hídricas.

Y_m = Producción máxima correspondiente a *ET_m*.

Y_a = Producción obtenida con *ET_a*.

K_y = Factor de respuesta del cultivo.

El factor *K_y* depende del cultivo y de la fase de su desarrollo. Las figuras 4-1 y 4-2 recogen de forma esquemática el efecto del déficit hídrico sobre la producción. En

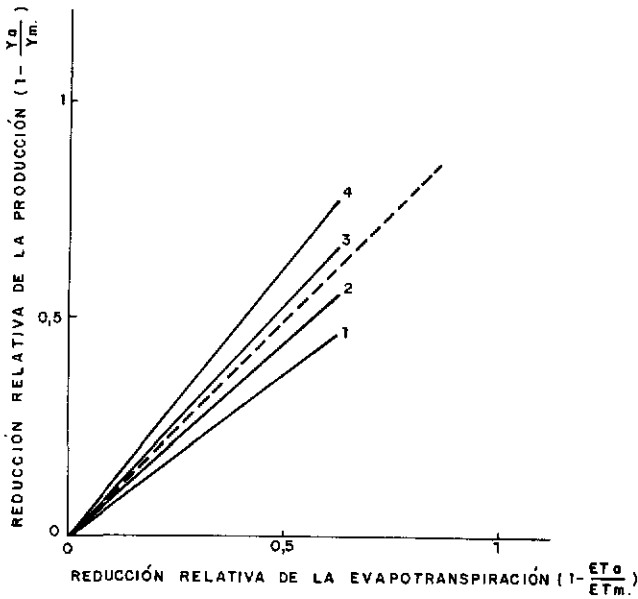


Fig. 4-1 Relación entre la reducción relativa de la evapotranspiración y la reducción relativa de la producción en diversos cultivos. Cultivos del grupo 1): alfalfa, cacahuete, cártamo, remolacha azucarera. Cultivos del grupo 2): col, cítricos, algodón, vid, sorgo, soya, girasol, tabaco, trigo. Cultivos del grupo 3): frijol (judía), cebolla, chícharo, pimiento, papa, tomate, sandía. Cultivos del grupo 4): plátano, maíz caña de azúcar.

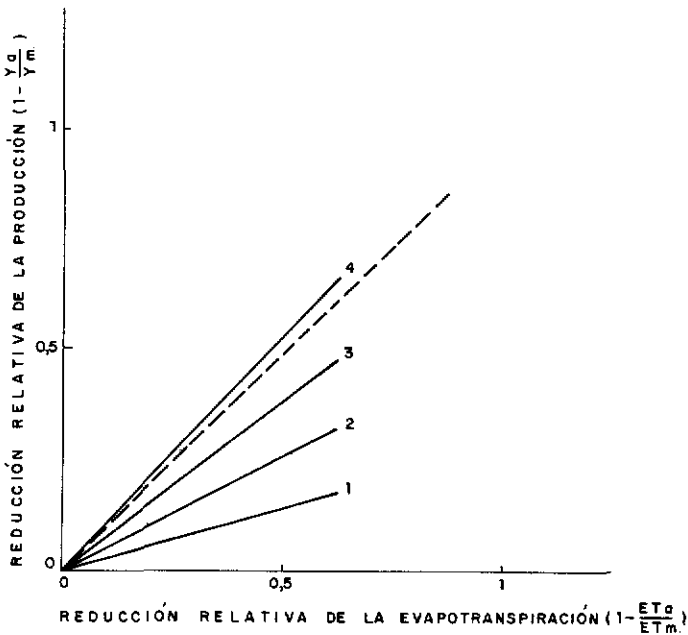


Fig. 4-2 Relación entre la reducción relativa de la evapotranspiración y la reducción relativa de la producción en las diferentes etapas de un cultivo. 1) Etapa de maduración. 2) Etapa de período vegetativo. 3) Etapa de formación de cosecha. 4) Etapa de floración.

los cultivos de los grupos I y II la disminución del rendimiento se hace proporcionalmente menor al aumentar el déficit hídrico ($K_y < 1$), mientras que en los cultivos de los grupos III y IV ocurre lo contrario ($K_y > 1$); todo ello considerando todo el ciclo biológico del cultivo. Cuando se consideran las distintas etapas del ciclo biológico, ocurre que la disminución del rendimiento debido al déficit hídrico es relativamente pequeño durante los períodos vegetativo y de maduración, y relativamente grande para los períodos de floración y formación de la cosecha.

En la tabla 4 se muestran los valores del factor de respuesta sobre el rendimiento (K_y) de diversos cultivos, referidos al total de su ciclo biológico y en diferentes etapas de su desarrollo. Estos valores se han deducido bajo el supuesto de que la relación entre el rendimiento relativo (Y_a / Y_m) y la evapotranspiración relativa (ET_a / ET_m) es lineal, y es válida para déficit de agua de hasta el 50 % ($1 - ET_a / ET_m = 0.5$).

Tabla 4: Factor K_y de diversos cultivos (FAO)

Cultivo	Período vegetativo		Período de floración	Formación de la cosecha	Maduración	Ciclo biológico	
	Inicial	Final					Total
Alfalfa			0.7 - 1.1			0.7 - 1.1	
Frijol (judía)			0.2	1.1	0.75	0.2	1.15
Col	0.2				0.45	0.6	0.95
Cítricos						0.8 - 1.1	
Algodón			0.2	0.5		0.25	0.85
Vid						0.85	
Maíz			0.4	1.5	0.5	0.2	1.25
Cebolla			0.45		0.8	0.3	1.1
Papa	0.45	0.8			0.7	0.2	1.1
Chícharo	0.2			0.9	0.7	0.2	1.15
Sorgo			0.2	0.55	0.45	0.2	0.9
Girasol	0.25	0.5		1.0	0.8		0.95
Cártamo		0.3		0.55	0.6		0.8
Soya			0.2	0.8	1.0		0.85
Remolacha azucarera							06. - 1.1
Tabaco	0.2	1.0				0.5	0.9
Tomate			0.4	1.1	0.8	0.4	1.05
Sandía	0.45	0.7		0.8	0.8	0.3	1.1
Trigo							
invierno			0.2	0.6	0.5		1.0
primavera			0.2	0.65	0.55		1.15

Una de las aplicaciones más interesantes de las funciones de producción es en la programación de riegos cuando hay déficit de agua.

Ejemplo

En un cultivo de maíz se dan los datos siguientes:

	<i>Establecimiento</i>	<i>Período vegetativo</i>	<i>Floración</i>	<i>Formación cosecha Maduración</i>	<i>Total</i>
Etapa (días)	20	50	30	40	140
<i>ETm</i> (mm/día)	2.4	7.2	9.8	7.2	
<i>ETm</i> (mm/ciclo)	48	360	294	288	990

Supongamos que se dispone de una reserva de agua que cubre el 90% de las necesidades hídricas totales. El déficit de agua será:

$$990 - 0.9 \times 990 = 99 \text{ mm}$$

Vamos a considerar diversas opciones:

1. Se considera el déficit hídrico durante todo el ciclo de cultivo. $K_y = 1.25$.

$$ETa = 0.9 ETm = 0.9 \times 990 = 891 \text{ mm}$$

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = K_y \left(1 - \frac{ETa}{ETm} \right)$$

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = 1.25 \left(1 - \frac{891}{990} \right) = 0.125$$

$$Ya = 0.875 Ym$$

El rendimiento obtenido será el 87.5 % del máximo.

2. Se considera el déficit hídrico sólo durante el período de floración. $K_y = 1.5$.

$294 - 99 = 195$ mm, que representa el 66.3 % de las necesidades totales durante ese período.

$$ETa = 0.663 ETm = 0.663 \times 294 = 195 \text{ mm}$$

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = 1.5 \left(1 - \frac{195}{294} \right) = 0.50$$

$$Ya = 0.5 Ym$$

El rendimiento obtenido será el 50 % del máximo.

3. Se considera el déficit sólo durante el período vegetativo. $K_y = 0.4$

$360 - 99 = 261$ mm, que representa el 72.5 % de las necesidades totales durante ese período.

$$ETa = 0.725 ETm = 0.725 \times 360 = 261 \text{ mm}$$

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = 0.4 \left(1 - \frac{261}{360} \right) = 0.11$$

$$Ya = 0.89 Ym$$

El rendimiento obtenido será el 89 % del máximo.

CAPÍTULO 5

CONDUCTOS ABIERTOS

La conducción del agua desde su origen o cauce natural hasta el punto de destino se puede hacer mediante conductos abiertos (canales o acequias) o mediante conductos cerrados (tuberías).

Los *canales* son conducciones de gran sección que conducen el agua que toman de los ríos o de los embalses. Las *acequias* son conducciones de menor sección que llevan el agua desde los canales hasta el sitio donde se ha de aplicar. En los regadíos donde no existen canales, las acequias llevan el agua desde su origen hasta el punto de destino.

La acequia que lleva el agua al lugar de mayor altura de la finca se llama *acequia primaria*. De ella parten las *acequias secundarias*, que distribuyen el agua por la finca. De las acequias secundarias parten las regaderas, que llevan el agua a los elementos de riego: surcos, tablares, etc.

El agua sobrante del riego y la procedente de las filtraciones es recogida por los *desagües*.

Resulta difícil construir conducciones abiertas cuando el terreno es muy accidentado o cuando su pendiente es demasiado grande o demasiado pequeña. En estos casos conviene llevar el agua mediante tuberías, que se puedan instalar enterradas o sobre la superficie del terreno. Al contrario de lo que sucede con las acequias, que requieren ser instaladas con una pendiente uniforme, las tuberías se pueden instalar con una pendiente no uniforme a lo largo de su recorrido.

Cuando el agua circula por una conducción, las partículas de agua correspondientes a una misma sección no circulan a la misma velocidad. En las tuberías las partículas periféricas disminuyen su velocidad, como consecuencia de su rozamiento con las paredes de la tubería, aumentando dicha velocidad desde la periferia hacia el centro; en las conducciones abiertas la velocidad varía con la profundidad.

Se considera *velocidad media* aquella que llevarían todas las partículas de la vena líquida para conducir el mismo caudal.

En las conducciones abiertas, la velocidad media, que es la que interviene en los cálculos, es menor que la velocidad en la superficie.

$$V = 0,8 Va$$

V = Velocidad media.

Va = Velocidad superficial, que se mide con flotador.

Datos para el diseño de conducciones abiertas

Los datos necesarios para diseñar estas conducciones son: la sección, el radio hidráulico, la pendiente de la conducción y la velocidad del agua.

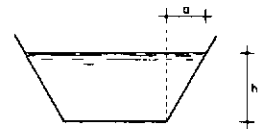
Se considera que la sección y la pendiente son constantes en todo el recorrido, lo que es difícil que ocurra en la práctica. Por eso, para estudiar una conducción abierta se la considera dividida en tramos tales que tengan la misma sección y pendiente, con lo cual la velocidad del agua es la misma en la totalidad de cada tramo.

Sección

Las secciones más comunes son: rectangular, trapecial y semicircular. En acequias que conducen poco caudal se suele emplear la sección rectangular, mientras que en aquellas otras de mayor caudal se suele emplear la sección trapecial. La sección semicircular se utiliza en acequias prefabricadas.

En la sección trapecial, la inclinación o talud de las paredes se expresa habitualmente por la relación entre la distancia vertical y la distancia horizontal correspondiente a esa pared.

En cada sección se pueden dar múltiples formas al variar sus dimensiones. Por ejemplo, dentro de la sección rectangular puede haber múltiples formas de acequias según varía la base y la altura del rectángulo. Entre las diferentes formas que puede presentar una determinada sección de una acequia se debe elegir aquella que, para el mismo caudal, presente menor superficie mojada. De este modo se obtienen las siguientes ventajas:



$$\text{Talud} = h : a$$

- Se reduce el rozamiento de agua sobre las paredes, lo que permite conducir el agua a mayor velocidad.
- Se reducen las pérdidas de agua, en el caso de acequias construidas de tierra.
- Se abarata la construcción de la acequia, en el caso de acequias revestidas de hormigón.

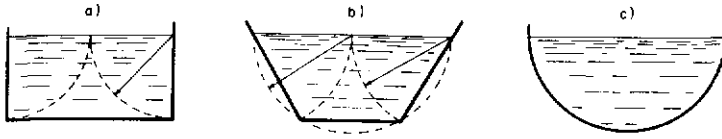


Figura 5-1 Secciones que presentan la menor superficie mojada. a) Rectangular. b) Trapecial. c) Semicircular.

Las secciones que presentan menor superficie mojada son las siguientes (figura 5-1):

- Rectangular con la base de doble longitud que la altura.
- Trapecial con la base superior (medida en la superficie del agua) de doble longitud que la superficie mojada en los muros laterales.
- Semicircular de cualquier medida de radio.

Radio hidráulico

El radio hidráulico es el cociente entre el área de la sección mojada y el perímetro mojado. El perímetro mojado es el contorno de la sección que está en contacto con el agua.

La fórmula del radio hidráulico es:

$$R = \frac{S}{P}$$

R = Radio hidráulico, expresado en m.

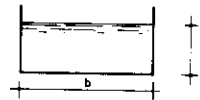
S = Area de la sección mojada, expresado en m^2 .

P = Perímetro mojado, expresado en m.

Las áreas y perímetros mojados de las secciones más usuales son las siguientes:

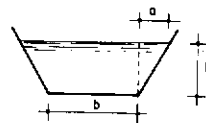
Rectangular

$$S = b \times h \quad ; \quad P = b + 2h$$



Trapecial

$$S = b \times h + a \times h \quad ; \quad P = b + 2 \sqrt{a^2 + h^2}$$



Semicircular

$$S = \frac{r^2 (\alpha - \text{sen } \alpha)}{2} \quad ; \quad P = r \times \alpha$$



El ángulo α se mide en radianes. Cuando $\alpha = 180^\circ$ la sección mojada es un semicírculo.

Ejemplo

Calcular el radio hidráulico de una acequia de sección rectangular, sabiendo que la base es 0.70 m y el agua llega en las paredes laterales hasta una altura de 0.40 m.

Solución:

$$S = b \times h = 0.70 \times 0.40 = 0.28 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2h = 0.70 + 2 \times 0.40 = 1.50 \text{ m}$$

$$R = \frac{S}{P} = \frac{0.28}{1.50} = 0.18 \text{ m}$$

Pendiente

La pendiente longitudinal del fondo de una conducción abierta se expresa por la relación entre la distancia vertical y la distancia horizontal correspondiente al tramo que estamos considerando.

Para una sección dada de la conducción, a medida que aumenta la pendiente se incrementa la velocidad del agua. La pendiente que se ha de adoptar viene impuesta, por tanto, por las características topográficas y por las limitaciones de velocidad. Las pendientes más usuales en la práctica oscilan entre 0.00015 y 0.005 m/m.

Velocidad del agua

Para transportar un determinado caudal, a medida que aumenta la velocidad se necesita menor sección, lo que se traduce en una reducción del costo. Sin embargo, esta velocidad no puede ser excesiva, ya que se producirán desmoronamientos en las acequias de tierra y erosiones en las acequias revestidas; por otra parte, si es escasa se depositan en el fondo los limos que las aguas llevan en suspensión, lo que provoca una disminución de la sección y la posible proliferación de plantas acuáticas.

En la práctica se admiten velocidades superficiales comprendidas entre 0.5 y 1 m/seg para acequias sin revestir: las cifras más bajas corresponden a terrenos arenosos, y las más altas, a terrenos arcillosos. En acequias revestidas de hormigón se admiten velocidades superficiales de hasta 6 m/seg.

La velocidad mínima no debe ser inferior a 0.3 m/seg.

Fórmulas experimentales para conducciones abiertas

Se han deducido experimentalmente diversas fórmulas que relacionan el radio hidráulico, la pendiente y la velocidad del agua.

Fórmula de Bazín

$$V = \frac{87 \sqrt{R}}{\sqrt{R} + \gamma} \sqrt{RJ}$$

V = Velocidad media, expresada en m/seg.

R = Radio hidráulico, expresado en m.

$$R = \frac{S}{P}$$

S = Sección mojada, expresado en m².

P = Perímetro mojado, expresado en m.

J = Pendiente expresada en m de desnivel por m de longitud.

γ = Coeficiente de rugosidad, dependiente de la naturaleza de la conducción.

Tabla 1: *Valores del coeficiente γ (fórmula de Bazín)*

	γ
1. Paredes muy unidas (cemento muy liso, madera acepillada y fibrocemento)	0.06
2. Paredes unidas (plancha, piedra tallada, ladrillo, etc.)	0.16
3. Paredes de mampostería	0.46
4. Paredes de naturaleza mixta (tierra en sección regular o con revestimiento de piedra) .	0.85
5. Canales de tierra en las condiciones normales	1.30
6. Canales de tierra ofreciendo gran resistencia al paso del agua (fondo de canto rodado, paredes con vegetación o de rocas)	1.75

El nomograma de la figura 5-2, correspondiente a la fórmula de Bazín, facilita los cálculos. Las líneas verticales corresponden al radio hidráulico y la pendiente, mientras que las líneas inclinadas corresponden a la velocidad.

Ejemplo

Calcular la velocidad del agua en una acequia de hormigón muy liso, sabiendo que la pendiente es 0.003 m/m de conducción y que el radio hidráulico es 0.10 m.

Solución:

$$V = \frac{87 \sqrt{R}}{\sqrt{R} + \gamma} \sqrt{RJ} = \frac{87 \sqrt{0.10}}{\sqrt{0.10} + 0.06} \sqrt{0.10 \times 0.003} = 1.26 \text{ m/seg}$$

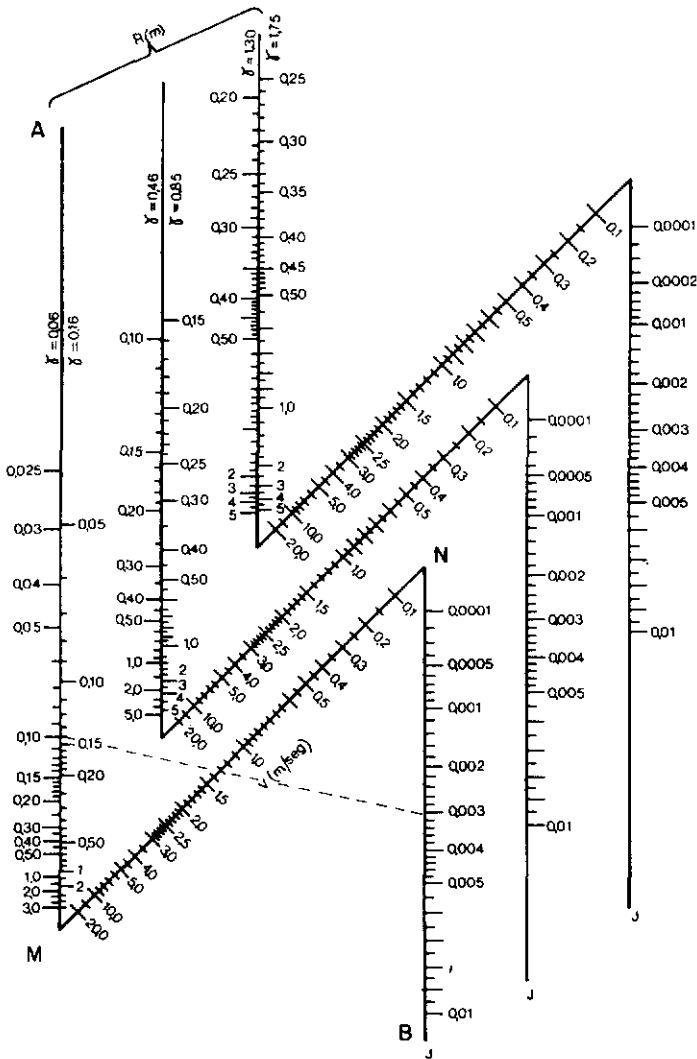


Fig. 5-2 Nomograma de la fórmula de Bazin.

Para hacer uso del nomograma se toma la línea quebrada $AMNB$, en cuyo lado izquierdo del tramo AM está el coeficiente $\gamma = 0.06$ correspondiente a acequias revestidas de hormigón o cemento muy lisos (tabla 1).

En el tramo AM se toma el valor $R = 0.10$ m, y en el tramo NB se toma el valor $J = 0.003$ m/m. Se unen ambos puntos mediante una línea, que corta al tramo MN en el punto correspondiente a una velocidad de 1.3 m/seg.

Fórmula de Koeschlin

$$V = K (1 + 0.6 \sqrt{R}) \sqrt{RJ}$$

V, R y J tienen el mismo significado que en la fórmula de Bazín.

K = Coeficiente de rugosidad (tabla 2).

Tabla 2: Valores del coeficiente K (fórmula de Koeschlin)

	K
Hormigón liso, madera, fibrocemento	52
Hormigón no liso; mampostería lisa	48
Ladrillo liso	46
Hormigón viejo	44
Hormigón rugoso, mortero descuidado	42
Mampostería ordinaria	40
Revestimientos ásperos con resaltos, y fondo en buen estado	36
Revestimientos descuidados, fondo en regular estado y con resaltos	32
Canal en tierra en muy buen estado, sin vegetaciones	28
Canal en tierra con fondo con sedimentos, poca vegetación	24
Canal en tierra con resaltos y vegetaciones	20
Canal en tierra en malas condiciones con mucha vegetación, con depósitos gruesos	18

El nomograma de la figura 5-3 facilita los cálculos.

Ejemplo

Calcular la velocidad del agua en una acequia de hormigón sin enlucir, sabiendo que la pendiente es 0.003 m/m de conducción y que el radio hidráulico es 0.20 m.

Solución:

$$V = K(1 + 0.6 \sqrt{R}) \sqrt{RJ} = 48(1 + 0.6 \sqrt{0.20}) \sqrt{0.20 \times 0.003} = 1.36 \text{ m/seg}$$

Para usar el nomograma se unen los puntos $R = 0.20 \text{ m}$ y $K = 48$ (tabla 2). La recta determinada por estos dos puntos corta en M a la recta auxiliar (A). El punto M se une con el punto $J = 0.003 \text{ m/m}$. La recta determinada por estos dos puntos corta a V en el punto correspondiente a una velocidad de 1.4 m/seg.

Cálculo de conducciones abiertas

Los datos que intervienen en el cálculo de conducciones abiertas son: Q, S, V, R y J . Conocidos tres de ellos se pueden calcular los otros dos mediante las fórmulas siguientes:

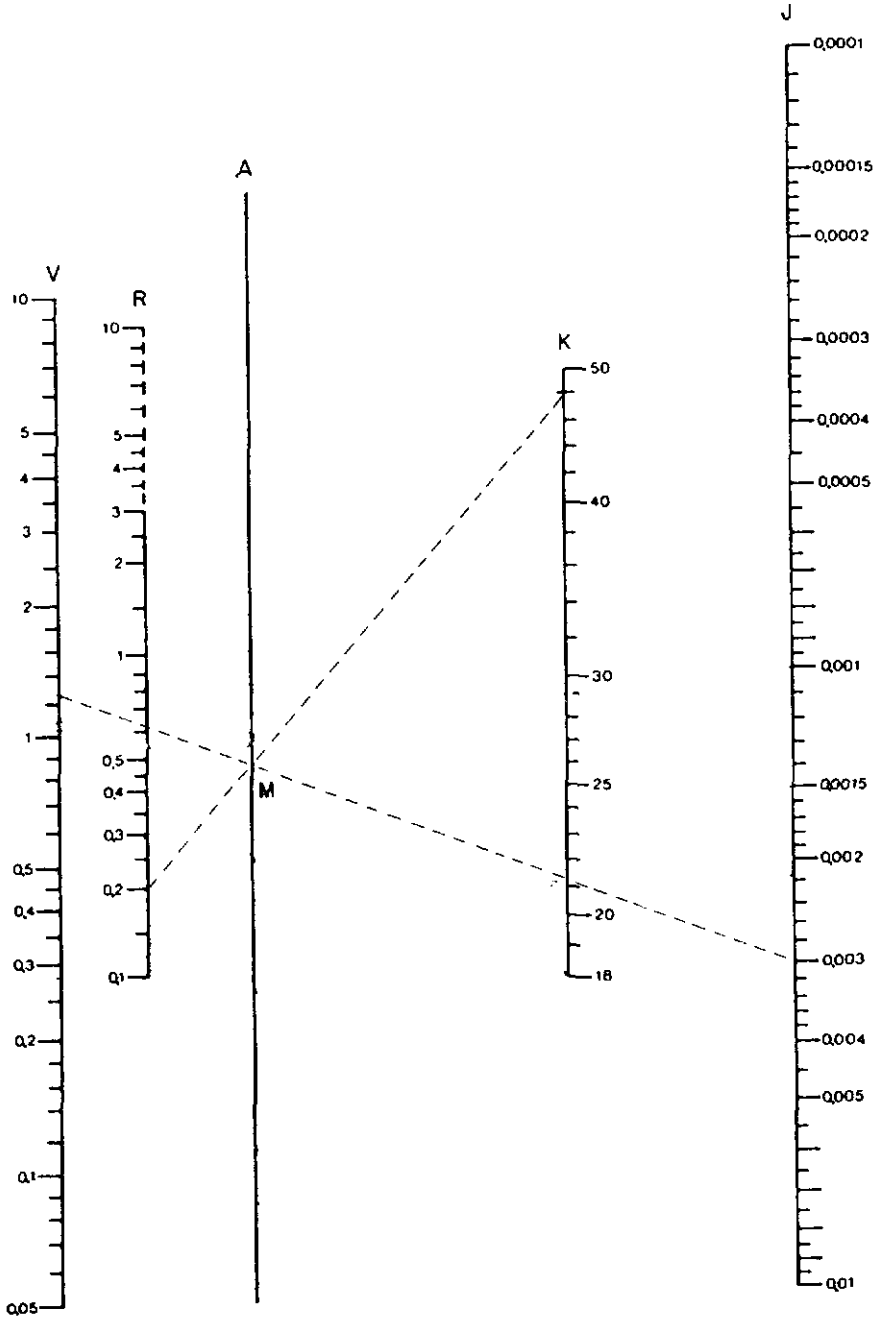


Fig. 5-3 *Nomograma de la fórmula de Koeschlin.*

— $Q = S \times V$.

— Fórmula de Bazín, Koechlin, etc., o sus nomogramas correspondientes. Para aplicar estas fórmulas hay que conocer el material de la acequia, que determina el coeficiente de rugosidad.

Q = Caudal, expresado en m^3/seg .

S = Sección, expresada en m^2 .

V = Velocidad, expresada en m/seg .

R = Radio hidráulico, expresado en m .

J = Pendiente, expresada en m/m .

Ejemplo

Conocido S , R y J , calcular Q y V .

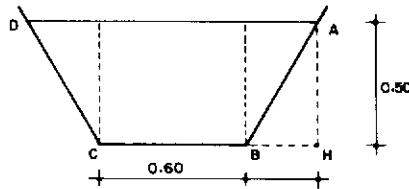
Calcular el caudal de una acequia de hormigón no liso, de sección trapezoidal, cuya base es 0.60 m, el talud de las paredes 2:1 y la altura del agua 0.50 m. La pendiente es 0.15 m por cada 100 m de longitud.

Solución:

Cálculo de la base DA

$$\frac{AH}{BH} = \frac{0.5}{BH} = \frac{2}{1}$$

$$BH = \frac{0.5}{2} = 0.25 \text{ m}$$



$$\text{Base } DA = 0.60 + 2 \times 0.25 = 1.10 \text{ m}$$

$$\text{Área mojada } S = \frac{DA + CB}{2} \times AH = \frac{1.10 + 0.60}{2} \times 0.50 = 0.425 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Perímetro mojado } P &= CB + 2BA = CB + 2 \sqrt{BH^2 + AH^2} = \\ &= 0.60 + 2 \sqrt{0.25^2 + 0.50^2} = 0.60 + 2 \times 0.56 = 1.72 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Radio hidráulico } R = \frac{S}{P} = \frac{0.425}{1.72} = 0.247 \text{ m}$$

$$\text{Pendiente } J = \frac{0.15}{100} = 0.0015 \text{ m/m de longitud}$$

$$K = 48 \text{ (según la tabla 2)}$$

$$\text{Velocidad} = 1.1 \text{ m/seg (según nomograma de la figura 5-3)}$$

$$\text{Caudal} = S \times V = 0.425 \times 1.1 = 0.467 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Ejemplo

Dados Q , V y J , calcular S y R .

Se trata de conducir un caudal de $0.45 \text{ m}^3/\text{seg}$ a una velocidad de $1.1 \text{ m}/\text{seg}$ en una acequia de hormigón cuya pendiente es $0.001 \text{ m}/\text{m}$. Calcular la sección y el radio hidráulico de la acequia, que ha de ser de forma rectangular.

Solución:

Cálculo de la sección:

$$Q = S \times V$$

$$0.45 = S \times 1.1$$

$$S = \frac{0.45}{1.1} = 0.409 \text{ m}^2$$

Cálculo del radio hidráulico:

$\gamma = 0.006$ (según tabla 1).

$R = 0.20$ (según nomograma de la figura 5-2)

Cálculo de las dimensiones del rectángulo:

Se define el perímetro (P) mediante la fórmula:

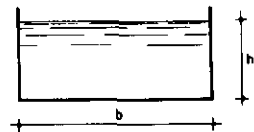
$$R = \frac{S}{P} ; 0.20 = \frac{0.409}{P} ; P = \frac{0.409}{0.20} = 2.04 \text{ m}$$

A continuación se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left. \begin{array}{l} S = b \times h \quad ; \quad b \times h = 0.409 \\ P = b + 2h \quad ; \quad b + 2h = 2.04 \end{array} \right\}$$

Soluciones:

$$\begin{array}{l} h = 0.74 \quad ; \quad b = 0.56 \\ h = 0.27 \quad ; \quad b = 1.50 \end{array}$$



Acequias de tierra

Las acequias de tierra ofrecen la ventaja de que su construcción es barata, pero tienen los siguientes inconvenientes:

- Las pérdidas de agua por infiltración son cuantiosas, especialmente en suelos bastante permeables.

- También se pierde agua por la transpiración de las hierbas que crecen dentro de la acequia y en los bordes de la misma.
- En suelos que se erosionan con facilidad, el flujo del agua puede destruir los taludes de la acequia.

Para disminuir las pérdidas de agua y el peligro de erosión, las acequias de tierra se revisten de algunos materiales más o menos impermeables. El revestimiento se puede hacer de varias formas:

- Con arcilla en suspensión. La arcilla, preferentemente de tipo bentonita, se coloca en la cabecera de la acequia para que sea arrastrada por el agua, en donde queda en suspensión. Posteriormente, al posarse, tapa los poros del suelo y de las paredes de la acequia. Este procedimiento es barato, pero poco duradero, y se puede aplicar en terrenos que no son muy permeables.
- Con una capa de arcilla apisonada de varios centímetros de espesor. Aplicando este procedimiento en tierras muy permeables se pueden reducir las pérdidas a la mitad.

En las acequias de tierra, la pendiente longitudinal puede variar desde el 0.5 por 1,000 hasta el 10 por 1,000.

La inclinación o pendiente de los taludes de las acequias de tierra depende de la naturaleza del terreno. Las pendientes más usuales son:

	<i>Pendiente</i>
Tierra firme, con taludes consolidados	1:1
Tierra firme, con taludes sin consolidar	1:1.5
Tierra suelta	1:2

Las acequias de tierra se pueden construir de tres maneras (figura 5-4):

- *En desmante*: El fondo o base de la acequia está situada por debajo de la superficie del suelo.
- *En terraplén*: El fondo o base está situada a nivel del suelo o por encima de él.

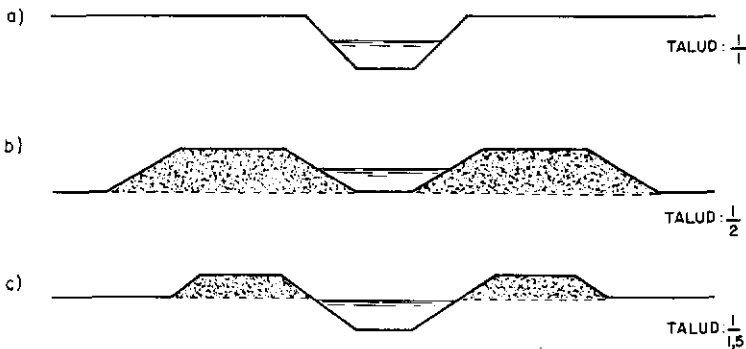


Figura 5-4 a) Acequia en desmante. b) Acequia en terraplén. c) Acequia con desmante y terraplén compensados.

— *Con desmonte y terraplén compensados*: El fondo o base está situada en una posición intermedia de las dos anteriores. La tierra que se saca en la excavación del desmonte se utiliza para construir el terraplén.

Acequias de hormigón

Las acequias de hormigón son más caras que las de tierra, pero se evitan los inconvenientes que ofrecen aquéllas. Pueden ser de varios tipos (figura 5-5).

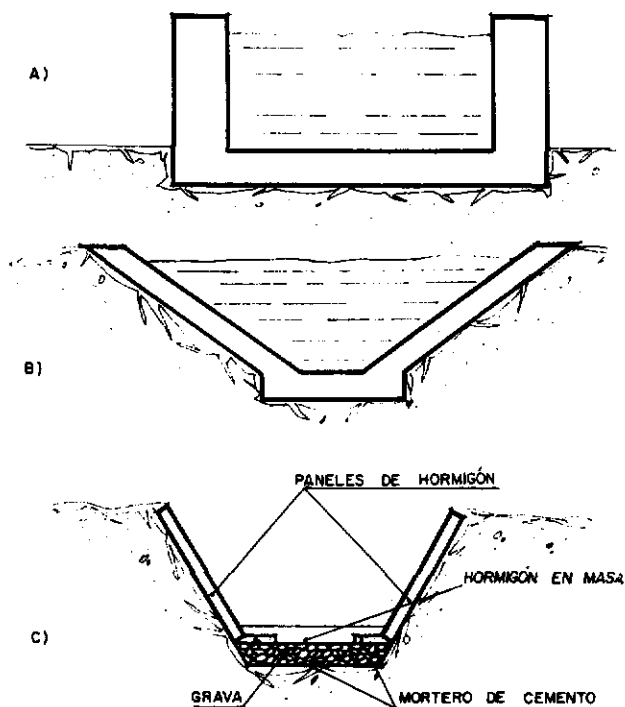


Fig. 5-5 A) Acequia con la base apoyada sobre el terreno. B) Acequia con base y muros apoyados sobre el terreno. C) Acequia con base y muros apoyados sobre el terreno, construida con revestimiento de bloques prefabricados de hormigón.

Acequias con la base apoyada en el terreno

Se pueden construir echando el hormigón sobre el propio terreno o empleando bloques prefabricados que se unen a otros mediante un mortero de cemento.

Las acequias construidas sobre el propio terreno son, por lo general, de sección rectangular. En su construcción se utiliza hormigón de 100 kg/cm^2 de resistencia característica, que corresponde, aproximadamente a una dosificación de 300 kg de cemento por m^3 de hormigón o a una dosificación en volumen de 1:2:4 (1 volumen de cemento, 2 volúmenes de arena y 4 volúmenes de grava).

La base de la acequia y los muros laterales de la misma se construyen a la vez, pues si se construyen los muros laterales cuando ya ha quedado endurecido el hormigón de la base se forman en la unión de ambos unas juntas por donde se pueden producir fugas de agua.

Cuando se emplean bloques completos de hormigón prefabricados, éstos se apoyan sobre una base de hormigón y se unen unos a otros con un mortero de cemento de dosificación 1:2 (1 volumen de cemento y 2 volúmenes de arena).

Acequias con la base y los muros laterales apoyados sobre el terreno

Estas acequias se pueden construir echando el hormigón sobre el propio terreno o empleando bloques prefabricados que se unen unos a otros mediante un mortero de cemento. En ambos casos es necesario que la base y los muros laterales de la acequia se apoyen sobre tierra dura.

Cuando la acequia va situada sobre un terraplén hay que compactar la tierra de este terraplén o, por lo menos, dejar que la tierra se humedezca y se consolide durante bastante tiempo. Cuando la tierra está ya consolidada se excava la acequia en esta tierra y se reviste de hormigón.

La sección de la acequia puede ser rectangular o trapecial. Cuando es trapecial conviene que la inclinación de las paredes de la acequia se acomode al talud natural de terreno.

En las acequias que se construyen echando el hormigón sobre el propio terreno se utiliza hormigón de 100 kg/cm^2 de resistencia característica. Hay que construir a la vez la base y los muros laterales, para evitar la formación de juntas por donde se producen fugas de agua.

Se puede revestir la acequia con planchas prefabricadas de hormigón. Para ello se coloca en el fondo de la acequia una capa de grava. En los bordes se echa mortero de cemento, y sobre este mortero se colocan las planchas que hacen de paredes laterales. Finalmente se reviste el fondo de la acequia vertiendo sobre la capa de grava una capa de hormigón en masa.

Acequias prefabricadas elevadas sobre el terreno

Estas acequias están formadas por piezas de hormigón prefabricado, cuya longitud suele ser de 3 a 5 m. En los sitios de unión de las piezas, éstas se apoyan en unos soportes de hormigón incrustados en el suelo.

Las acequias elevadas presentan las siguientes ventajas con respecto a las apoyadas en el suelo:

- Se montan con mucha rapidez.
- Se pueden desmontar para utilizarlas en otro lugar.

- Presentan una superficie interior muy lisa, lo que permite transportar mayor caudal.
- Se ahorra longitud de acequia cuando atraviesan terrenos ondulados.

Las acequias elevadas también pueden ser de material de plástico. Estas acequias son muy ligeras, pero son más caras que las de hormigón y, además, presentan problemas cuando el plástico envejece.

La tabla 3 nos da el diámetro de acequias prefabricadas de fibrocemento de sección semicircular, en función de la pendiente y del caudal. Se ha supuesto $\alpha = 160^\circ$ para evitar el desbordamiento del agua.

Aforo del caudal en conducciones abiertas

Caudal del agua es la cantidad de agua que pasa por una sección de la conducción durante un tiempo determinado. Los caudales se miden en litros por segundo, en metros cúbicos por segundo o en metros cúbicos por hora.

El aforo o determinación del caudal de una conducción abierta se puede hacer por diversos procedimientos, de los cuales los más utilizados son los siguientes:

- Medición directa.
- Mediante flotador.
- Mediante molinete.
- Mediante vertedores
- Mediante aforador Parshall.

Medición directa

El procedimiento consiste en determinar el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de volumen conocido. Para que el agua caiga en el recipiente se necesita construir un dique en cuya parte más alta se coloca un tubo que conduce toda el agua de la conducción hacia el recipiente.

Este procedimiento es sencillo, pero sólo se puede utilizar con pequeños caudales.

Medición mediante flotador

El caudal de agua que fluye por una conducción se puede calcular con la fórmula:

$$Q = S \times V$$

Q = Caudal de agua, expresado en m^3/seg .

S = Sección de la conducción, expresada en m^2 .

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

El cálculo de la velocidad del agua se basa en medir el tiempo que tarda un objeto flotante en recorrer una distancia conocida:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{Tiempo empleado}}$$

Para evitar errores conviene hacer varias mediciones del tiempo empleado y sacar la media aritmética de esas mediciones.

Hay que tener en cuenta que la velocidad media del agua en la conducción es inferior a la velocidad en la superficie, que es la marcada por el flotador. Por lo que para compensar lo anterior se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = 0.8Va$$

V = Velocidad media.

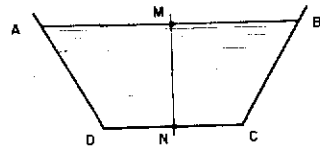
Va = Velocidad superficial.

Ejemplo

Calcular el caudal conducido por una acequia trapezoidal cuyas medidas son: $AB = 1.20$ m, $DC = 0.70$ m y $MN = 0.50$ m.

Solución:

Sección de la acequia:



$$S = \frac{AB + DC}{2} MN = \frac{1.20 + 0.70}{2} \times 0.50 = 0.475 \text{ m}^2$$

Para medir la velocidad del agua se toma una cierta longitud de la acequia, por ejemplo 10 m, y se hacen varias mediciones del tiempo en que un flotador tarda en recorrer esa longitud. Supongamos que se han hecho mediciones cuyos tiempos son: 20, 21 y 19 seg.

$$\text{Media aritmética} = \frac{20 + 21 + 19}{3} = 20 \text{ seg}$$

$$\text{Velocidad superficial} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} = \frac{10}{20} = 0.5 \text{ m/seg}$$

$$\text{Velocidad media} = 0.8 \times 0.5 = 0.4 \text{ m/seg}$$

Cálculo del caudal:

$$Q = S \times V = 0.475 \times 0.4 = 0.19 \text{ m}^3/\text{seg} = 190 \text{ l/seg}$$

Medición mediante molinete

Este aparato consiste esencialmente en un juego de hélices que al ser introducidas en la corriente giran a una velocidad proporcional a la velocidad del agua. Se mide el tiempo que tarda el molinete en dar un determinado número de vueltas y a continuación se lee en unas tablas, específicas de cada aparato, la velocidad del agua en función del número de revoluciones y del tiempo empleado.

Para medir la velocidad media se introduce el molinete en el centro del canal a una profundidad que sea 0.6 veces la profundidad del cauce, contado a partir de la superficie del agua.

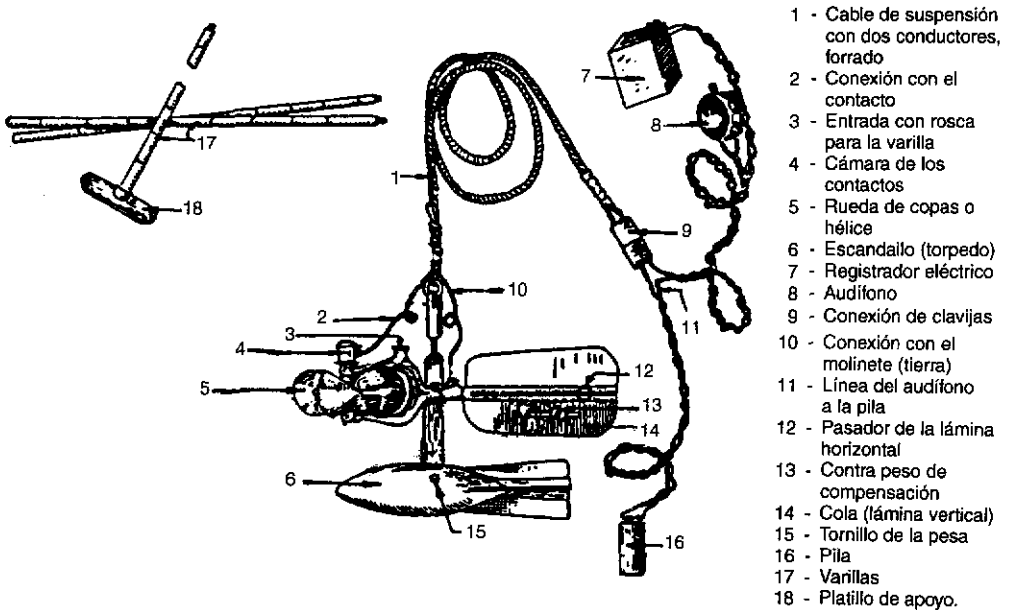


Fig. 5-6 Componentes de un molinete eléctrico de copas. (Fuente: Trueba, C. S.).

Medición mediante vertedores

Un vertedor consiste en una barrera que retiene el agua de la conducción para dejarlo verter por encima del borde superior o a través de una abertura de forma rectangular, trapecial o triangular. Mediante tablas o nomogramas adecuados se mide el caudal en función del nivel del agua con relación al borde del vertedor.

La barrera, formada por una placa metálica o de madera, se coloca en sentido perpendicular a la corriente formando un pequeño dique, con el fin de que el agua retenida caiga desde una altura suficiente para no lamer la placa. La placa debe ser de pared delgada y con los bordes biselados en las zonas por donde vierte el agua.

Los vertedores más utilizados son de tres tipos (figura 5-7):

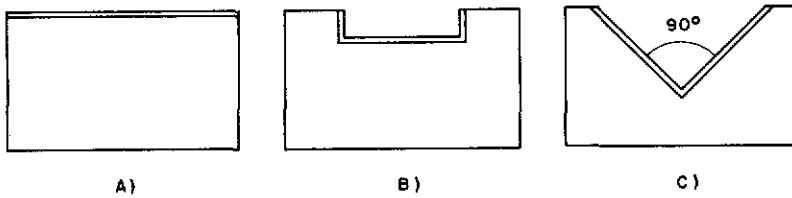


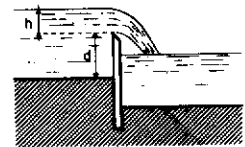
Fig. 5-7 Diferentes tipos de vertedores. A) Sin contracción lateral. B) Con contracción lateral. C) Triangular con escotadura de 90°.

- Sin escotadura.
- Con escotadura rectangular, en donde la vena líquida experimenta una contracción.
- Con escotadura triangular en ángulo de 90°.

Vertedores sin escotadura. En estos vertedores el agua vierte a lo largo de toda la arista superior. En la tabla 4 se dan los caudales de un vertedor de este tipo para una anchura de 1 m. Para vertedores de otra anchura se multiplican los valores de la tabla por la anchura del vertedor en metros.

Tabla 4: Caudales de un vertedor sin contracción lateral de anchura $b = 1$ m

Altura h (en m)	Caudales en l/seg							
	$d = 0,1$	$d = 0,2$	$d = 0,3$	$d = 0,4$	$d = 0,5$	$d = 0,6$	$d = 0,8$	$d = 1,0$
0.02	5.7	5.6	5.6	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
0.03	10.2	10.0	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.8
0.04	15.7	15.3	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	14.9
0.05	22.0	21.3	21.1	21.0	20.9	20.9	20.8	20.7
0.06	29.1	28.0	27.7	27.5	27.4	27.3	27.2	27.1
0.07	36.9	35.4	34.9	34.6	34.5	34.4	34.2	34.1
0.08	45.5	43.4	42.7	42.3	42.1	42.0	41.8	41.6
0.09	54.8	52.0	51.0	50.5	50.3	50.1	49.8	49.6
0.10	64.9	61.1	59.9	59.3	58.9	58.7	58.3	58.1
0.12	—	81.1	79.2	78.2	77.6	77.2	76.7	76.5
0.14	—	103.2	100.3	99.0	98.1	97.5	96.8	96.3
0.16	—	128	124	122	120	120	119	118
0.18	—	154	148	146	144	143	142	141
0.20	—	182	175	172	170	168	166	165
0.22	—	—	204	199	196	194	192	191
0.24	—	—	234	228	225	223	220	218
0.26	—	—	265	259	255	252	248	246
0.28	—	—	299	291	286	283	278	275
0.30	—	—	334	324	318	315	310	307



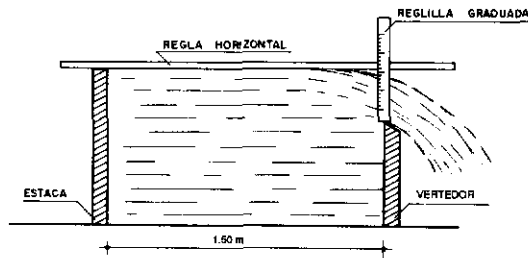
Vertedor con escotadura rectangular. Se recomienda que esta escotadura tenga la siguiente anchura, con relación al caudal que se pretende medir:

- $b = 0.25$ m para un caudal de 5 a 25 l/seg.
- $b = 0.50$ m para un caudal de 25 a 150 l/seg.
- $b = 1$ m para un caudal superior a 150 l/seg.

La distancia de las aristas verticales de la escotadura a las paredes del canal debe ser de 1 a 1.50 veces el valor de b .

La altura h no se mide encima del vertedor, sino a una distancia de 1.50 m aguas arriba del vertedor. Esta medición puede hacerse como se representa en la siguiente figura:

- Se clava una estaca en posición vertical, a una distancia de 1.50 m aguas arriba del vertedor. La cabeza de la estaca debe coincidir con la superficie del agua.



- Con ayuda de un nivel se coloca una regla en posición horizontal, apoyando uno de sus extremos en la cabeza de la estaca.
- Se mide con una reglilla graduada la altura entre la superficie del agua y la coronación del vertedor.

La altura también se puede medir mediante una escala graduada situada en la tabla del vertedor. El cero de la escala debe coincidir con la altura de la coronación del vertedor. Para evitar errores es mejor emplear dos escalas, una a cada lado del vertedor, situadas cerca del borde de la acequia, pues en las cercanías del vertedor el chorro de agua se contrae y tiene menor altura que la correspondiente a la superficie horizontal del agua. En la tabla 5 se dan los caudales de un vertedor de este tipo para diferentes anchuras del vertedor.

Vertedor con escotadura triangular de 90°. Este vertedor es el que da mediciones más exactas para caudales inferiores a 10 l/seg. Se recomienda que la medición de la altura del agua se haga de forma semejante a como se indicó en los vertedores de escotadura rectangular. En la tabla 6 se dan los caudales en función de la altura en un vertedor de este tipo.

Medición mediante aforador Parshall

El aforador Parshall es un aparato que se basa en la pérdida de altura del nivel del agua producida por el paso forzado de una corriente a través de un estrechamiento inclinado. Consta de tres partes fundamentales: la entrada, de paredes convergentes, y

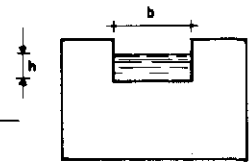


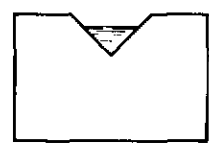
Tabla 5: Caudales de un vertedor con escotadura rectangular

Altura h (en cm)	Anchura del vertedor en cm (b)									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
	Caudal en l/seg									
1	0.4	0.62	0.84	1.06	1.28	1.50	1.72	1.94	2.16	
2	1.1	1.69	2.28	2.87	3.46	4.05	4.64	5.23	5.82	
3	1.9	2.96	4.02	5.08	6.14	7.20	8.26	9.32	10.38	
4	2.9	4.49	6.08	7.67	9.26	10.85	12.44	14.03	15.62	
5	4.1	6.29	8.48	10.67	12.86	15.05	17.24	19.43	21.62	
6	5.3	8.14	10.98	13.82	16.66	19.50	22.34	25.18	28.02	
7	6.6	10.17	13.74	17.31	20.88	24.45	28.02	31.59	35.16	
8	8.1	12.45	16.80	21.15	25.50	29.85	34.20	38.55	42.90	
9	9.6	14.79	19.98	25.17	30.36	35.55	40.74	45.93	51.12	
10	11.2	17.28	23.36	29.44	35.52	41.60	47.68	53.76	59.84	
11	12.8	19.81	26.82	35.05	40.84	47.85	54.86	61.87	68.88	
12	14.6	22.59	30.58	38.57	46.56	54.55	62.54	70.53	78.52	
13	16.4	25.41	34.42	43.43	52.44	61.45	70.46	79.47	88.48	
14	18.3	28.37	38.44	48.51	58.58	68.65	78.72	88.79	98.86	
15	20.3	31.44	42.58	53.72	64.86	76.00	87.14	98.28	109.42	
16	22.3	34.58	46.86	59.14	71.42	83.70	95.98	108.26	120.54	
17	24.5	37.91	51.32	64.73	78.14	91.55	104.96	118.37	131.78	
18	26.6	41.21	55.82	70.43	85.04	99.65	114.26	128.87	143.48	
19	28.8	44.65	60.50	76.35	92.20	108.05	123.90	139.75	155.60	
20	30.9	48.01	65.12	82.23	99.34	116.44	133.55	150.66	167.77	
21	33.2	51.37	69.94	88.31	106.68	125.05	143.42	161.79	180.16	
22	35.6	55.25	74.90	94.55	114.20	133.85	153.50	173.15	192.80	
23	37.8	58.76	77.72	100.68	121.64	142.60	163.56	184.32	205.48	
24	40.1	62.39	84.68	106.97	129.26	151.55	173.84	196.13	218.42	
25	42.4	66.10	89.80	113.50	137.20	160.90	184.60	208.30	232.00	
26	44.7	69.79	94.88	119.97	145.06	170.15	195.24	220.33	245.42	
27	47.2	73.67	100.14	126.61	153.08	179.55	206.02	232.49	258.96	
28	49.6	77.49	105.38	133.27	161.16	189.05	216.94	244.83	272.72	
29	52.2	81.53	110.86	140.19	169.52	198.85	228.18	257.51	286.84	
30	54.6	85.46	116.32	147.18	178.04	208.90	239.76	270.62	301.48	

la salida, de paredes divergentes, están separadas por una garganta de paredes paralelas y con el piso inclinado.

Se utilizan aforadores de tamaños escalonados para medir diferentes caudales de agua. Los de mayor tamaño son fijos y construidos con obra de albañilería, mientras que los más pequeños son móviles y se construyen de chapa metálica.

Tabla 6: Caudales (q) en función de la altura (h) en un vertedor triangular de 90°



h mm	q l/seg	h mm	q l/seg	h mm	q l/seg
10	0.014	140	10.25	180	19.26
20	0.079	142	10.72	182	19.80
30	0.218	144	11.03	184	20.40
40	0.448	145	11.40	186	20.90
50	0.784	148	11.80	188	21.42
60	1.235	150	12.20	190	22.10
70	1.816	152	12.64	192	22.65
80	2.536	154	13.06	194	23.20
90	3.404	156	13.48	196	23.90
100	4.430	158	13.90	198	24.70
120	6.980	160	14.35	200	25.15
122	7.3	162	14.81	210	28.3
124	7.6	164	15.28	220	31.8
125	7.91	166	15.75	230	34.5
128	8.22	168	16.21	240	39.5
130	8.55	170	16.71	250	43.7
132	9.88	172	17.21	260	48.3
134	9.23	174	17.73	270	53
136	9.60	176	18.22	280	58
138	9.94	178	18.75	300	69.2

La medición del caudal se obtiene mediante tablas y nomogramas específicos para cada tipo de aforador. Con este procedimiento se obtienen mediciones muy precisas, aún cuando el aforador trabaje con inmersión casi completa.

En la figura 5-8 se muestra un aforador Parshall con sus características y acotaciones de sus dimensiones.

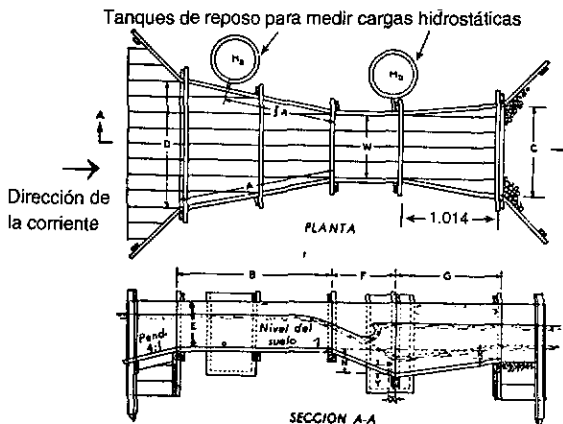


Fig. 5-8 Características y acotaciones de un aforador Parshall, vista planta y corte transversal.

CAPÍTULO 6

TUBERÍAS

Una tubería es una sucesión de tubos, accesorios y dispositivos unidos mediante juntas para formar una conducción cerrada.

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

Tuberías de plástico

Los materiales plásticos más utilizados son: policloruro de vinilo (PVC) y polietileno (PE).

Con respecto a la presión hay que considerar:

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

La presión de trabajo a 20 °C se corresponde con la presión nominal. Para otras temperaturas hay que aplicar un factor de corrección f .

$$\text{Presión de trabajo} = \text{Presión nominal} \times f$$

Factor de corrección f para diferentes temperaturas

<i>Material</i>	$0 < T \leq 20$	$20 < T \leq 25$	$25 < T \leq 30$	$30 < T \leq 35$	$35 < T \leq 40$	$40 < T \leq 45$
PVC	1	1	0.8	0.8	0.63	0.63
PE alta densidad	1	0.8	0.63	0.5	0.4	0.32
PE media densidad	1	0.8	0.63	0.5	0.4	0.32
PE baja densidad	1	0.75	0.56	0.44	0.36	—

En estas tuberías el *diámetro nominal* coincide con el diámetro exterior del tubo y con el interior de la zona de acoplamiento de los accesorios. El diámetro interior es igual al diámetro exterior menos el doble del espesor de la pared del tubo, cuyo espesor viene en función de la presión de trabajo.

Las tuberías de plástico tienen un elevado *coeficiente de dilatación lineal*. Durante el día se dilatan al exponerse al sol, y se contraen cuando se enfrían por la noche o cuando se entierran en una zanja. Esta contracción puede causar varios trastornos: movimientos en la tubería, separación de juntas, etc. Para evitar estos inconvenientes deben colocarse en la zanja y cubrirse cuando están frías (en las primeras horas de la mañana o en las últimas de la tarde en días calurosos).

Tuberías de policloruro de vinilo (PVC)

- El PVC tiene un peso específico de 1.4 kg/dm^3 y un coeficiente de dilatación elevado (7×10^{-5}). La tubería utilizada habitualmente es rígida, ya que no lleva aditivos plastificantes. No puede utilizarse a la intemperie porque la acción de los rayos solares descompone los polímeros del PVC, salvo que se recubra con pinturas que impidan el paso de la luz.

La unión de tubos y piezas especiales se hace habitualmente de dos formas:

- *Por encolado*: Un extremo del tubo es liso y el otro es abocardado. Para hacer la unión se limpian los extremos machihembrados de los tubos con un líquido limpiador, se aplica un adhesivo especial y se introduce, sin girar, un extremo en el otro, produciéndose una auténtica soldadura en frío. Esta unión se utiliza generalmente para tubería de hasta 50 mm de diámetro, y cuando se utiliza hay que hacer una junta elástica cada 100 m, con el fin de absorber dilataciones.
- *Por junta elástica*: Mediante un anillo de goma elástica que se aloja en una ranura de un extremo abocardado. El otro extremo es liso y el acoplamiento de los tubos se logra presionando un extremo sobre otro, consiguiendo la estanqueidad gracias al anillo de goma. Este tipo de unión se utiliza para tuberías con diámetro igual o superior a 63 mm y no es preciso hacer juntas de dilatación. Esta unión, además de ser sencilla, permite pequeñas variaciones de dirección en la alineación de los tubos.

Con menos frecuencia se utilizan otras uniones (sobre todo para acoplar a otro tipo de tubería o para intercalar accesorios), tales como: unión Gibault, bridas y uniones roscadas, etc.

Los tubos y accesorios de PVC deben llevar marcado, como mínimo, los siguientes datos:

- Marca comercial.
- Sigla PVC.
- Diámetro nominal (en mm).

- Presión nominal (en MPa).
- Referencia a la norma (UNE, MOP, NOM, ANSI, ASTM, ISO, según sea el caso). (En el anexo 1 se describen estas abreviaturas).

La tubería de PVC es ligera, resistente, de fácil acoplamiento y bajo costo, por lo que se ha difundido ampliamente en todo tipo de distribución de agua de riego (tuberías primarias, secundarias y terciarias). Se utiliza, también, en ramales portaaspersores de riego por aspersión.

Los diámetros más comunes oscilan desde 25 mm hasta 500 mm para presiones de 4 a 16 atmósferas.

Instalación

Durante el transporte y almacenamiento de los tubos se tomarán las siguientes precauciones:

- No dar golpes violentos, ni arrastrar, ni rodar por el suelo.
- Evitar su contacto con aristas puntiagudas u objetos cortantes.
- No colocar objetos pesados sobre ellos.
- No formar pilas con altura superior a 2 m.
- Colocarlos sobre terreno horizontal.
- No dejar a la intemperie por un período superior a un mes, salvo que el material esté protegido de la radiación solar. En tiempo caluroso se evitará cubrir con láminas de plástico, para evitar un aumento de temperatura que pudiera ocasionar deformaciones.

La profundidad y anchura de la zanja donde ha de ir instalada la tubería dependen del diámetro de la misma y del procedimiento a seguir en el montaje. Cuando el acoplamiento de tubos se hace dentro de la zanja, la anchura de la misma ha de permitir un trabajo cómodo para una o dos personas.

La tubería se asienta sobre un lecho de arena o tierra cribada (no arcillosa) de 10 cm de espesor. Después de colocados los tubos se cubren éstos con tierra exenta de piedras y terrones, hasta una altura de unos 20 cm por encima del tubo, tapando el resto de la zanja con el material extraído en la excavación. La compactación se realiza por capas de unos 10 cm de espesor, no utilizándose compactadoras mecánicas hasta haber cubierto, al menos, 30 cm por encima del tubo.

Cuando se producen empujes significativos en puntos singulares (cambio de dirección, cambio de diámetro, detención, etc) se colocan bloques de anclaje de hormigón, cuyo tamaño y orientación depende de la magnitud del empuje, de la dirección del flujo y de la resistencia del suelo.

Los codos unidos mediante encolado admiten tracciones muy severas y sólo necesitan un anclaje muy somero en la bisectriz del ángulo. En cambio las uniones elásticas y

mediante unión «Gibault» no admiten tracciones, por lo que se precisa hacer un buen anclaje para evitar que las uniones se desacoplen.

Los tramos de tubería recta con una gran pendiente ascendente o descendente necesitan ser anclados cuando las uniones se hayan hecho mediante junta elástica, ya que la lisura del material puede originar resbalamientos. El anclaje se hace cada 3 ó 4 tramos, fijando una garra con abrazadera a un dado de hormigón.

Las dimensiones de la zanja vienen especificadas en la fig. 6-1. Cuando la zanja atraviesa una vía de paso, el relleno por encima de la tubería será de, al menos, 1 m, y el calibre de la tubería, como mínimo, de la serie PN-6 (correspondiente a 6 atm ó 0.6 MPa). En caso de no proceder así se protegerá la tubería con un encamisado de tubos de hormigón.

En el montaje de la tubería se tendrán en cuenta las siguientes precauciones:

- El lecho de la zanja debe tener una pendiente uniforme.
- Los tubos se colocan con el extremo abocardado en sentido contrario al flujo del agua.
- Cuando el montaje se interrumpe se tapan los extremos de la tubería, para evitar la entrada de tierra o de animales.

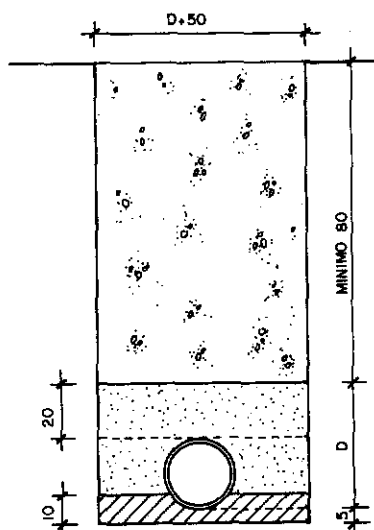


Fig. 6-1 Esquema de zanja para colocación de tubería de PVC (medidas en cm).

- Al final de cada uno de los ramales de la red se disponen unas válvulas que permitan el vaciado, con el fin de facilitar la limpieza periódica.

La tubería de la serie PN-4 (correspondiente a 4 atm ó 0.4 MPa) no resiste presiones negativas, por lo que debe evitarse su instalación en aquellos puntos donde se pueden producir (salida de la bomba, detrás de un elemento de cierre brusco).

Tuberías de polietileno (PE)

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

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

Se fabrican tres tipos de tubo de polietileno:

- *De baja densidad.* Con una densidad igual o inferior a 0.93 kg/dm^3 . Se designa así: LDPE, PE-32 y PEBD.
- *De media densidad.* Con una densidad comprendida entre 0.931 y 0.94 kg/dm^3 . Se designa así: MDPE, PE-50B y PEMD.
- *De alta densidad.* Con densidad superior a 0.94 kg/dm^3 . Se designa así: HDPE, PE-50A y PEAD.

Las cualidades mecánicas son directamente proporcionales a su densidad. En cambio, el más flexible es el de baja densidad, que es el que suele utilizarse en riego localizado. El de media densidad se utiliza en mangueras de aspersión.

Los tubos de polietileno deben llevar marcadas las siguientes indicaciones:

- Marca comercial.
- Tipo de material (PE-32, PE-50B, PE-50A).
- Diámetro nominal.
- Espesor nominal.
- Presión nominal.
- Año de fabricación.
- Referencia a la norma (UNE, MOP, NOM, ANSI, ASTM, ISO según sea el caso).

La unión de los tubos de polietileno se efectúa mediante abrazaderas o conectores. No admiten encolado ni roscado.

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

Los diámetros comerciales varían de 25 mm hasta 125 mm para presiones de 4 a 10 atmósferas.

En ramales de riego por goteo o microaspersión se utiliza tubería de polietileno de baja densidad, cuyos diámetros varían de 10 a 20 mm.

Estos tubos se unen entre sí y con otros elementos por medio de conectores exteriores o interiores con salientes en forma de «diente de sierra» o «diente de tiburón», (fig. 6-2). Estos últimos no deben producir un aumento en el diámetro del tubo del 13 % a una temperatura de 23 °C.

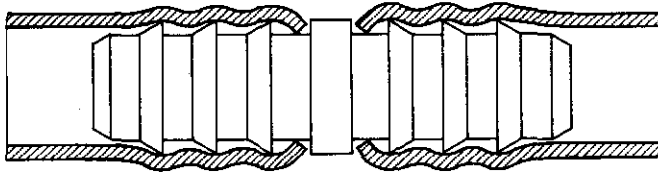


Fig. 6.2 Unión de tubería mediante conector interior con salientes en forma de «diente de tiburón».

Estos tubos deben llevar marcados a intervalos de 1 m los datos siguientes: marca comercial, referencia del material, diámetro nominal, espesor, referencia a la norma y año de fabricación.

Algunos fabricantes utilizan polietileno regenerado para la fabricación de tubería no normalizada para presiones iguales o inferiores a 2.5 atmósferas, que se utiliza en riego por goteo y que venden a un precio muy inferior al de la tubería normalizada. Esta tubería no normalizada es muy irregular en su calidad, ya que depende de la materia prima utilizada. En general, presenta defectos de porosidad, una gran rugosidad interior y un reparto irregular del negro de humo, por lo que es probable que se deteriore al cabo de 2-3 años. No es recomendable, en modo alguno, la utilización de tubería no normalizada, ya que para obtener las ventajas del riego por goteo hay que trabajar con materiales de buena calidad que se atengan a las normas internacionales de control.

Tuberías de fibrocemento

El fibrocemento o asbestocemento tiene un peso específico de 2 kg/dm³ y un bajo coeficiente de dilatación lineal (1.2×10^{-5}).

Hay que distinguir entre *presión de rotura* (P_r), *presión nominal* (P_n) o de ensayo en fábrica y *presión de trabajo* (P_t), siendo P_t del orden del 50 % de P_n , y ésta, a su vez, del 50% de P_r , lo que depende de la clase de tubería y del diámetro nominal, así la presión puede variar desde los 5 kg/cm² hasta 35 kg/cm².

El *diámetro nominal* es el diámetro interior, al contrario de las tuberías de plástico, que son los exteriores. Los *diámetros normalizados*, en mm, son los siguientes: 50 - 60 - 70 - 80 - 100 - 125 - 150 - 175 - 200 - 250 - 300 - 350 - 400 - 450 - 500 - 600 - 700 - 800 - 900 - 1.000 - 1.100 - 1.200.

El espesor de pared de los tubos de fibrocemento aumenta conforme aumenta el diámetro nominal, y varía desde 8 hasta 72 mm.

La unión de los tubos se hace de distintas maneras:

- Mediante junta «Gibault», formada por un conector y dos bridas de fundición. Entre las bridas y el conector se alojan unos aros de caucho.
- Con junta «supersimplex», constituida por un conector de fibrocemento y dos anillos de caucho.
- Con junta «RK», constituida por un conector de fibrocemento, dos gomas para la fijación y unos tacos de goma. Una variante es la junta «RKT», que dispone de unas varillas de anclaje.

Los accesorios de la tubería de fibrocemento se fabrican de fibrocemento o de fundición.

Tuberías de aluminio

Esta tubería se fabrica con aleación de aluminio y magnesio o aluminio y manganeso, por el método de extrusión y estirado. Es una tubería ligera, de gran duración y resistente a oxidaciones e incrustaciones. Se utiliza, fundamentalmente, en instalaciones de riego por aspersión móviles y semifijas. Su costo es elevado.

Los diámetros comerciales más utilizados son los siguientes:

<i>Diámetro exterior</i>		<i>Diámetro interior</i>
<i>Pulgadas</i>	<i>mm</i>	
1 ¹ / ₄	31.7	29.9
1 ¹ / ₂	38.1	36.3
1 ³ / ₄	44.4	42.6
2	50.8	49
2 ¹ / ₂	63.5	61.5
2 ³ / ₄	69.8	67.8
3	76.2	74.2
3 ¹ / ₂	88.9	86.7
4	101.6	99.2
5	127	124.4
6	152.4	149.5
8	203.2	199.9

Las más utilizadas son las de diámetros comprendidos entre 2 y 4 pulgadas.

El acoplamiento de los tubos se hace de dos formas:

- *Sistema mecánico*, en donde la fijación se consigue mediante una palanca.
- *Sistema hidráulico*, en donde la presión del agua es la que proporciona la fijación.

Pérdida de carga en tuberías a presión

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

Las pérdidas de carga (h) o de presión en una tubería son de dos clases:

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

Pérdidas de carga (h) = Pérdidas por fricción (h_f) + pérdidas en puntos singulares (h_s).

Pérdidas de carga por fricción

Supongamos un depósito a nivel constante, del que sale una tubería MN de diámetro uniforme (figura 6-3). En diversos puntos a lo largo de la tubería derivan unos cuantos tubos verticales abiertos. La presión a que circula el agua en un punto cualquiera es igual a la altura a que subiría el agua en un tubo vertical situado en ese punto.

Cuando el agua no circula por la tubería, el nivel del agua en todos los tubos verticales es el mismo que en el depósito. Cuando se abre la llave de paso y el agua circula por la tubería, el nivel del agua en los tubos verticales ya no alcanza el nivel del agua del depósito, sino que va disminuyendo a medida que nos alejamos del mismo, es decir, hay una pérdida de carga.

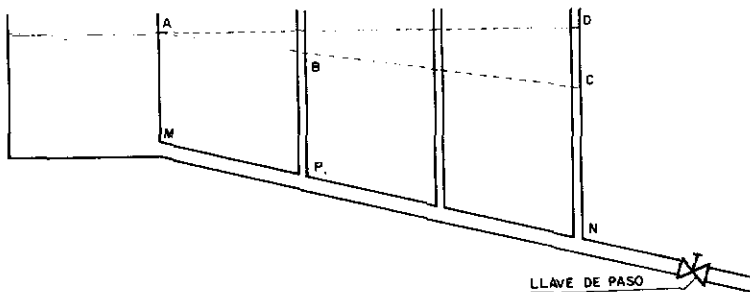


Fig. 6-3 Pérdida de carga en tubería con salida al final.

Las alturas del agua en los tubos verticales (BP, CN) se llaman *alturas piezométricas* y la línea que forman es una recta (AC). El desnivel DC mide la pérdida de carga en la tubería de longitud MN.

Las pérdidas por fricción dependen de los siguientes factores:

- Del material de la tubería y del estado de conservación de la misma.
- De la superficie mojada de la tubería, o lo que es igual, de la longitud y del diámetro interior de la tubería.
- De la velocidad de circulación del líquido. Como la velocidad es proporcional al caudal, la pérdida de carga también depende del caudal.

Por consiguiente, para un determinado caudal, las pérdidas por fricción son constantes en cada unidad de longitud de la tubería, siempre que se trate del mismo diámetro y material.

$$hf = J \cdot L$$

Tabla 1: *Pérdidas de carga por fricción en tuberías de asbesto-cemento (Scimmi) (en mm/m o en m/km)*

Caudal <i>l/seg</i>	Diámetro del tubo								
	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	100 mm	125 mm	150 mm	175 mm	200 mm
1.0	7.28	3.04							
1.5	15.02	6.28	3.00						
2.0	25.10	10.49	5.02	2.65					
2.5	37.40	15.63	7.47	3.94					
3.0	51.78	21.64	10.35	5.46					
3.5	68.18	28.49	13.62	7.19					
4.0	86.56	36.17	17.30	9.13	3.14				
4.5	106.81	44.63	21.34	11.26	3.87				
5.0	128.93	53.88	25.76	13.60	4.68				
5.5		63.87	30.54	16.12	5.54				
6.0		74.57	35.66	18.82	6.47	2.22			
6.5		86.07	41.16	21.72	7.47	2.57			
7.0		98.25	46.98	24.80	8.53	2.93			
7.5		111.13	53.14	28.05	9.65	3.31			
8.0			59.63	31.47	10.82	3.72			
8.5			66.45	35.07	12.06	4.14			
9.0			73.61	38.85	13.36	4.59	1.92		
9.5			81.06	42.78	14.71	5.05	2.11		
10.0			88.84	46.89	16.12	5.54	2.31		
11.0				55.57	19.11	6.57	2.74		
12.0				64.92	22.33	7.67	3.21	1.53	
13.0				74.90	25.76	8.85	3.70	1.77	
14.0					29.40	10.10	4.22	2.02	
15.0					33.26	11.43	4.77	2.28	1.20
16.0					37.33	12.82	5.36	2.56	1.35
17.0					41.59	14.29	5.97	2.85	1.51
18.0					46.05	15.82	6.61	3.16	1.67
19.0					50.72	17.43	7.28	3.48	1.84
20.0					55.60	19.10	7.98	3.82	2.01

152 Primera Parte Necesidades hídricas de los cultivos

hf = Pérdidas de carga por fricción, expresadas en mca.

J = Pérdida de carga unitaria, expresada en mca por m de longitud de tubería.

L = Longitud de la tubería, expresada en m.

Las pérdidas por fricción se pueden calcular mediante la fórmula fundamental de Darcy - Weisbach, que engloba las llamadas leyes de Chezy:

— Estas pérdidas son directamente proporcionales a la longitud e inversamente proporcionales al diámetro de la tubería.

Tabla 1: (Continuación)

Caudal l/seg	Diámetro del tubo									
	125 mm	150 mm	175 mm	200 mm	250 mm	300 mm	350 mm	400 mm	450 mm	500 mm
21	20.83	8.71	4.16	2.20						
22	22.65	9.47	4.53	2.39						
23	24.51	10.24	4.90	2.58						
24	26.45	11.05	5.28	2.79	0.96					
25	28.45	11.89	5.69	3.00	1.03					
26	30.52	12.75	6.10	3.22	1.11					
27	32.64	13.64	6.52	3.44	1.18					
28	34.83	14.56	6.96	3.67	1.26					
29	37.08	15.50	7.41	3.91	1.34					
30	39.40	16.46	7.87	4.15	1.43					
32	42.21	18.47	8.83	4.66	1.60					
34		20.59	9.84	5.20	1.79					
36		22.80	10.90	5.75	1.98	0.83				
38		25.11	12.01	6.34	2.10	0.91				
40		27.52	13.16	6.94	2.39	1.00				
42		29.94	14.32	7.56	2.60	1.08				
44		32.63	15.60	8.23	2.83	1.18				
46			16.89	8.91	3.06	1.28				
48			18.22	9.62	3.31	1.38	0.66			
50			19.60	10.34	3.56	1.48	0.71			
52			21.02	11.09	3.81	1.59	0.76			
54			22.49	11.87	4.08	1.70	0.81			
56			24.00	12.67	4.35	1.82	0.87			
58			25.55	13.48	4.63	1.94	0.93			
60			27.14	14.32	4.92	2.06	0.98	0.52		
62				14.97	5.15	2.15	1.03	0.54		
64				16.08	5.53	2.31	1.10	0.58		
66				16.98	5.84	2.44	1.17	0.61		
68				17.91	6.16	2.57	1.23	0.65		
70				18.87	6.49	2.71	1.29	0.68		
75				21.34	7.34	3.06	1.47	0.77		
80				23.95	8.23	3.44	1.64	0.87	0.49	
85					9.17	3.83	1.83	0.97	0.55	
90					10.16	4.24	2.03	1.07	0.61	
95					11.19	4.67	2.24	1.18	0.67	0.40
100					12.26	5.12	2.45	1.29	0.74	0.44

— Son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del líquido que circula.

Para calcular las pérdidas de carga por fricción se han establecido numerosas fórmulas deducidas de trabajos experimentales (Scimemi, Scobey, Hazen-Williams, Manning, Prandtl-Colebrook, etc.), con sus correspondientes tablas y nomogramas. En la tabla 1 se indican las pérdidas de carga en tuberías de asbesto-cemento (calculados por la fórmula de Scimemi) en función del caudal y del diámetro interior del tubo.

Ejemplo

Se dispone de un tubería de asbesto-cemento de 3,500 m de longitud y un diámetro de 150 mm. Se desea saber la pérdida de carga para un gasto de 20 litros/seg.

Tabla 1: (Continuación)

Caudal l/seg	Diámetro del tubo						
	250 mm	300 mm	350 mm	400 mm	450 mm	500 mm	600 mm
110	14.54	6.07	2.90	1.53	0.87	0.53	
120	16.98	7.09	3.39	1.79	1.02	0.61	
130		8.18	3.91	2.07	1.17	0.71	
140		9.34	4.47	2.36	1.34	0.81	0.30
150		10.57	5.05	2.67	1.52	0.92	0.38
160		11.85	5.67	2.99	1.70	1.03	0.43
170		13.21	6.32	3.33	1.90	1.15	0.48
180		14.63	7.00	3.69	2.10	1.27	0.53
190			7.71	4.07	2.31	1.40	0.58
200			8.45	4.46	2.54	1.53	0.64
210			9.22	4.86	2.77	1.67	0.70
220			10.01	5.29	3.01	1.82	0.76
230			10.70	5.72	3.26	1.97	0.82
240			11.70	6.17	3.51	2.12	0.89
250				6.64	3.78	2.28	0.95
260				7.12	4.05	2.45	1.02
270				7.62	4.34	2.62	1.09
280				8.18	4.63	2.79	1.17
290				8.66	4.93	2.98	1.24
300				9.20	5.23	3.16	1.32
320				10.32	5.87	3.55	1.48
340					6.55	3.95	1.65
360					7.25	4.38	1.83
380					7.98	4.82	2.01
400					8.75	5.28	2.21
420						5.76	2.41
440						6.26	2.62
460						6.78	2.83
480						7.32	3.06
500						7.87	3.29
550							3.90
600							4.55
650							5.25
700							6.00

Solución:

En la tabla 1, para un caudal de 20 litros/seg y un diámetro de 150 mm, la pérdida de carga es 7.98 m por km. En una longitud de 3.5 km las pérdidas de carga son:

$$7.98 \times 3.5 = 27.93 \text{ mca}$$

Ejemplo

En una tubería de asbesto-cemento de 200 mm de diámetro se admite una pérdida de carga de 3.10 m de columna de agua por km de tubería. Calcular el caudal que puede transportar.

Solución:

En la tabla 1 para la tubería de 200 mm de diámetro encontramos los valores siguientes:

<u>Pérdida de carga</u>	<u>Caudal</u>
3 m	25 litros/seg
3.22 m	26 litros/seg

Para una pérdida de 3.10 m se hace una interpolación.

$$\left. \begin{array}{l} \text{A } 3.22 - 3 = 0.22 \text{ corresponde } 26 - 25 = 1 \\ \text{A } 3.10 - 3 = 0.10 \text{ corresponde } \quad \quad \quad x \end{array} \right\}$$

$$x = \frac{0.10 \times 1}{0.22} = 0.45$$

$$25 + 0.45 = 25.45 \text{ litros/seg}$$

A una pérdida de 3.10 m corresponde un caudal de 25.45 litros/seg.

En el anexo 4 se expone una información más amplia de estos conceptos y se dan las fórmulas de uso más general, así como tablas y nomogramas.

Pérdidas de carga en elementos singulares

A las pérdidas de carga por fricción del agua contra las paredes de la tubería hay que añadir las pérdidas de carga localizadas en los elementos singulares de la conducción, que corresponden a cambios de dirección, cambios de diámetro o de velocidad, choques, etc. Estas pérdidas de carga localizadas son prácticamente despreciables en tuberías largas, pero sí tienen importancia en tuberías cortas, como es el caso de la tubería de aspiración.

Las pérdidas de carga localizadas se determinan mediante ensayos experimentales para cada accesorio, ya que existen infinidad de modelos con distintos procedimientos de fabricación y montaje, por lo que para hacer un estudio detallado se requieren las tablas y nomogramas suministrados por la empresa fabricante.

En la práctica las pérdidas de carga localizadas en elementos singulares se suelen expresar en forma de *longitud equivalente*, que es la longitud de tubería recta que con el mismo caudal y diámetro producen la misma pérdida de carga que el elemento singular. En la fig. 6-4 y en la tabla 2 se indican unos valores orientativos de longitud equivalente de tubería para diversos elementos singulares. (Véase anexo 4).

En general, las pérdidas localizadas no se consideran cuando son inferiores al 5 % de las pérdidas continuas por fricción o cuando hay una distancia superior a 1,000 diámetros entre cada dos puntos singulares.

Velocidad recomendable en el transporte

Para transportar un determinado caudal de agua se puede utilizar tubería de cualquier diámetro. Ahora bien, a medida que disminuye el diámetro se necesita imprimir mayor

Tabla 2: *Coefficiente de resistencia (Ks) y pérdidas de carga de algunos elementos singulares, expresadas en longitud de tubería equivalente según diámetro (V. Conesa).*

	<i>Ks</i>	<i>n = Le/D</i>
Válvula esférica abierta	10	350
Válvula en ángulo recto abierta	5	175
Válvula de retención abierta	2.5	135
Válvula de compuerta:		
Abierta	0.2	13
3/4 abertura	1.15	35
1/2 abertura	5.6	160
1/4 abertura	24	900
Válvula de mariposa abierta		40
Te, por salida lateral	1.80	67
Codo de 90° con bridas y radio:		
Corto	0.90	32
Normal	0.75	27
Grande	0.60	20

$Le = n \times D$

Le = Longitud equivalente de tubería recta

n = Número de veces el diámetro de la tubería

D = Diámetro de la tubería

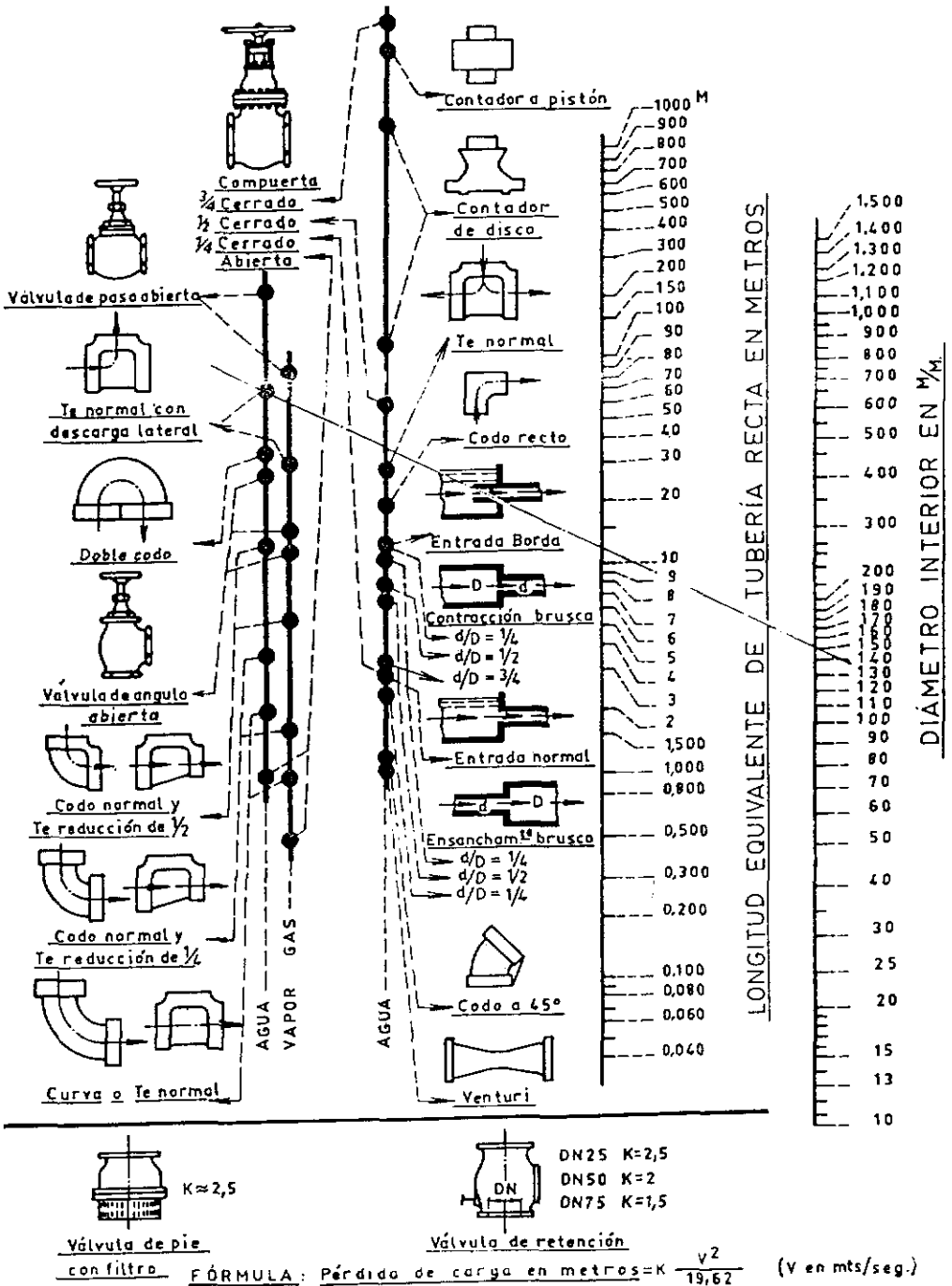


Fig. 6-4 Gráfico de pérdidas de carga por accesorios en tuberías. Ejemplo: La línea de trazos mixtos da la longitud equivalente a una te de descarga lateral de diámetro de 150 mm (escala de los diámetros), leyéndose el resultado de 12 m en la escala central. Para ensanchamiento o contracción, llevar el diámetro menor sobre la escala de la derecha.

velocidad al agua, para que no disminuya el caudal, lo que supone mayor pérdida de carga y, en consecuencia, mayor potencia de la bomba y mayor consumo de energía. Además, una velocidad excesiva del agua podría ocasionar serios inconvenientes (sobre todo, golpes de ariete). En el caso contrario, a mayor diámetro de la tubería corresponde menor consumo de energía, pero se necesita hacer un mayor gasto en tubería. Por consiguiente, en cualquier caso habrá que elegir la solución más económica considerando el costo de la tubería y el consumo de energía.

Como norma general se pueden dar las siguientes recomendaciones para tramos sin derivaciones:

- En diámetros pequeños (hasta 150 mm), la velocidad óptima está alrededor de 1 m/seg.
- En diámetros medios (de 150 a 350 mm) la velocidad óptima está comprendida entre 1 y 1.5 m/seg.
- En diámetros grandes (superiores a 350 mm) la velocidad óptima puede llegar a 2 m/seg.

La velocidad mínima suele fijarse en 0.5 m/seg, para evitar la sedimentación de las partículas en suspensión, mientras que la velocidad máxima oscila entre 2.5 y 3 m/seg, para evitar problemas de sobrepresiones y depresiones (golpe de ariete).

Cálculo de tuberías

Los datos que intervienen en el cálculo de tuberías a presión son: caudal (Q), diámetro interior (D), velocidad media (V) y pérdida de carga unitaria (J). Conocidos dos de ellos se pueden calcular los otros dos mediante fórmulas, tablas o nomogramas que relacionan tres o los cuatro datos citados. Por otra parte se sabe que:

$$Q = \frac{3.1416 \times D^2 \times V}{4}$$

Q = Caudal expresado en m³/seg.

D = Diámetro interior expresado en m.

V = Velocidad expresada en m/seg.

La velocidad viene dada por la fórmula:

$$V = \frac{4Q}{3.1416D^2}$$

V = Velocidad, en m/seg.

Q = Caudal, en m³/seg.

D = Diámetro, en m.

Cambiando de unidades:

$$V = \frac{0.353668Q}{Q^2}$$

V = Velocidad, en m/seg.

Q = Caudal, en litros/hora.

D = Diámetro, en mm.

Ejemplo

Una tubería de fibrocemento de 200 mm de diámetro toma agua de un depósito y lo vierte aguas abajo a una distancia de 3,000 m con una diferencia de presión de 10 m. Calcular el caudal y la velocidad del agua.

Solución:

$$\text{Pérdida de carga total} = 10 \text{ m}$$

Pérdida de carga unitaria:

$$J = \frac{10}{3} = 3.33 \text{ m por km}$$

Según tabla 1:

A $J = 3.22$ m por km corresponde $Q = 26$ litros/seg

A $J = 3.44$ m por km corresponde $Q = 27$ litros/seg

Interpolando:

$$\left. \begin{array}{l} \text{A } 3.44 - 3.22 = 0.22 \text{ corresponde } 27 - 26 = 1 \\ \text{A } 3.33 - 3.22 = 0.11 \text{ corresponde } \quad \quad \quad x \end{array} \right\} x = \frac{0.11 \times 1}{0.22} = 0.5$$

Caudal $Q = 26 + 0.5 = 26.5$ litros/seg.

Cálculo de la velocidad:

$$Q = \frac{3.1416 \times D^2 \times V}{4}$$

$$0.0265 = \frac{3.1416 \times 0.2^2 \times V}{4}$$

$$V = 0.84 \text{ m/seg}$$

Ejemplo

Una tubería de fibrocemento de 2,000 m de longitud transporta un caudal de 12 litros/seg, con una diferencia de presión entre el origen y el final de 50 m. Calcular el diámetro sabiendo que al final de la conducción se necesita una presión de 15 m de altura de agua.

Solución:

Pérdidas de carga totales en la tubería:

$$50 - 15 = 35 \text{ m}$$

Pérdida de carga unitaria:

$$J = \frac{35}{2} = 1.75 \text{ m por km}$$

En la tabla 1, para un caudal de 12 litros/seg se obtienen unas pérdidas de carga:

Para $D = 100$ mm corresponde $J = 22.33$ m por km

Para $D = 125$ mm corresponde $J = 7.67$ m por km

La tubería de 100 mm provoca una pérdida de carga superior a la prevista. Se tomaría el diámetro de 125 mm, en el supuesto de que se ponga un solo diámetro de tubería en todo el tramo.

Para economizar la instalación se puede poner tubería de dos diámetros.

	<i>Longitud</i>	<i>Pérdida de carga</i>
Diámetro de 100 mm	x km	$22.33 x$
Diámetro de 125 mm	y km	$7.67 y$

Sabemos que la longitud total de la tubería es 2 km y la pérdida de carga total es 35 m.

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} x + y &= 2 \\ 22.33 x + 7.67 y &= 35 \end{aligned} \right\} x = 2 - y \\
 & 22.33(2 - y) + 7.67 y = 35 \\
 & \quad 14.66 y = 9.66 \\
 & \quad y = 0.658 \text{ km} \\
 & x = 2 - y = 2 - 0.658 = 1.342 \text{ km}
 \end{aligned}$$

Se tendría en definitiva:

1,342 m de tubería de 100 mm
658 m de tubería de 125 mm

Ejemplo

Una tubería de fibrocemento conduce un caudal de 120 litros/seg a una velocidad de 1.20 m/seg. Calcular el diámetro y la pérdida de carga.

Solución:

$$Q = \frac{3.1416 \times D^2 \times V}{4}$$

$$0.120 = \frac{3.1416 \times D^2 \times 1.20}{4}$$

$$D = 0.356 \text{ m} = 356 \text{ mm}$$

Se puede seleccionar el diámetro de 350 mm o de 400 mm, variando en cada caso la velocidad y la pérdida de carga. La velocidad se obtiene entrando en la fórmula:

$$Q = \frac{3.1416 \times D^2 \times V}{4}$$

Para $D = 350 \text{ mm}$:

$$0.120 = \frac{3.1416 \times 0.35^2 \times V}{4}; V = 1.24 \text{ m/seg}$$

Para $D = 400 \text{ mm}$:

$$0.120 = \frac{3.1416 \times 0.40^2 \times V}{4}; V = 0.95 \text{ m/seg}$$

Las pérdidas de carga unitarias se obtienen en la tabla 1.

Para $D = 350 \text{ mm}$; $J = 3.39 \text{ m/km}$.

Para $D = 400 \text{ mm}$; $J = 1.79 \text{ m/km}$.

Dispositivos auxiliares

Con este nombre se agrupan aquellos aparatos que protegen y facilitan el buen funcionamiento de la red. Los más importantes son las válvulas y las ventilas.

Válvulas

Desde el punto de vista de su misión, las válvulas son de diferentes tipos:

- *Válvula de regulación o llave de paso.* Es un dispositivo que permite estrangular o interrumpir el paso del agua. Un hidrante es una válvula de regulación que permite derivar el agua de una tubería.
- *Válvula de retención o retroceso.* Esta válvula evita el cambio de dirección de la corriente. Cuando se utiliza en el riego agua procedente de conducciones urbanas, es obligado instalar una válvula de retención antes del punto de

inyección de los fertilizantes, con el fin de evitar el retroceso del flujo y la contaminación del agua utilizada para el consumo humano o del ganado.

La válvula de retención se instala junto al grupo motobomba, en el lado de la impulsión, con el fin de que pueda cerrar repentinamente cuando la bomba se para, y de esta forma evitar que la columna de impulsión invierta su dirección. La colocación de estas válvulas en puntos adecuados de la impulsión protege a la red de las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete, ya que se puede reducir la presión hidrostática en algún tramo, lo que hace posible, además, reducir el calibre de la tubería.

La válvula de pie es un caso particular de la válvula de retención, que se instala en la base de la tubería de aspiración para evitar la descarga de la tubería y el consiguiente descebado de la bomba. La entrada de la válvula se protege con un filtro que impide la entrada de partículas sólidas.

- *Válvula de seguridad.* La válvula de seguridad es un dispositivo que permite la salida automática de cierta cantidad de agua, con el fin de evitar un aumento excesivo de la presión. Consta esencialmente de un elemento móvil sobre el que actúan dos fuerzas; sobre una cara actúa la presión del agua, y sobre la otra, un resorte calibrado. Cuando la presión del agua sobrepasa un valor prefijado, la válvula se abre y sale una parte del caudal, provocando una caída de la presión.

Las válvulas de seguridad se instalan en los puntos donde se prevé la posibilidad de presentarse presiones excesivamente altas, ya sean estáticas o de onda.

- *Válvula reductora de presión.* Es un dispositivo que produce una pérdida de carga localizada cuando la presión sobrepasa el valor previsto. Sirve para proteger a la red de sobrepresiones y para lograr la presión requerida en una derivación.

Por lo general, esta válvula consta de un cuerpo cilíndrico en cuyo interior se desplace un pistón que vence la resistencia de un muelle. Cuando la presión aumenta en una cara del pistón, éste se desplace provocando un aumento de la pérdida de carga y una reducción de la presión.

- *Válvula reguladora de caudal.* Esta válvula impide el paso de un caudal superior al preestablecido, manteniéndolo constante en el valor prefijado. Se instala en la cabecera de parcela y en riegos a la demanda.
- *Válvula de drenaje.* Es un dispositivo que permite desaguar las tuberías una vez que el riego ha terminado, con la finalidad de que en el interior de las mismas no se desarrollen microorganismos ni se produzcan precipitados químicos. El mecanismo de apertura y cierre puede ser un resorte que mantiene cerrada la válvula cuando hay presión en la red.

- *Válvula antidesagüe.* Esta válvula impide el desagüe de la tubería a través de los emisores de riego situados en puntos bajos. Se regulan para que el cierre se produzca cuando la presión se sitúa por debajo del valor prefijado.

- *Válvula de flotador.* Sirve para cortar el paso del agua en un depósito cuando el nivel de agua en el mismo alcanza una determinada altura.

Desde el punto de vista de su accionamiento, las válvulas pueden ser manuales o automáticas. Las válvulas manuales pueden ser:

- *De esfera*. El elemento de apertura y cierre es una esfera, pudiendo adoptar posiciones intermedias que permiten la apertura parcial. Se utilizan en conducciones de pequeño diámetro.
- *De compuerta*. El elemento de cierre es una compuerta perpendicular al eje de la tubería, que se acciona mediante un volante. La presión del agua sobre la compuerta dificulta las operaciones de apertura y cierre.
- *De mariposa*. Esta válvula se cierra mediante un disco que gira mediante una palanca o un engranaje de tornillo sinfín. Estas últimas son más adecuadas que las de palanca, ya que abren y cierran más lentamente, evitando la aparición de sobrepresiones.
- *De asiento*. El elemento de cierre es un disco que se asienta sobre los tabiques interiores del cuerpo de la válvula. Las operaciones de apertura y cierre son más dificultosas que en la válvula de compuerta.

Las válvulas automáticas más utilizadas son las hidráulicas, en donde la apertura y cierre del paso del agua se logra mediante una orden hidráulica. Pueden ser de dos tipos:

- Normalmente abiertas.
- Normalmente cerradas.

Al recibir una orden hidráulica, las primeras se cierran y las segundas se abren.

En las electroválvulas el accionamiento se realiza mediante un solenoide que actúa al cerrarse el circuito eléctrico. Generalmente funcionan con tensiones de 12 y 24 voltios. Se utilizan en la automatización de instalaciones en donde se pretende realizar una programación del riego por tiempos.

Las válvulas hidráulicas en combinación con otros elementos pueden desempeñar diversas funciones, tales como la regulación de presión o de caudal, entre otras.

Ventilas

Las ventilas son unas válvulas que permiten la salida del aire presente en las conducciones de agua, y que puede provenir de las siguientes circunstancias.

- Del aire que llena la conducción antes de que ésta entre en servicio.
- De los torbellinos creados en la aspiración.
- Del aire disuelto en el agua, que se desprende cuando disminuye la presión.
- Del aire que entra por las fisuras de la tubería.

El aire de las conducciones se acumula en las partes altas de las mismas, interrumpiendo el paso del agua y originando unas sobrepresiones mucho mayores, a veces, que la presión de funcionamiento. Para evacuar este aire las ventilas se colocan en los puntos elevados y en aquellos otros en donde haya un cambio brusco de pendiente.

Algún tipo de ventila permite también la admisión de aire en la conducción cuando ésta se vacía de agua.

El diámetro de entrada de la ventila: no debe ser inferior a la cuarta parte del diámetro interior de la tubería.

Al eliminar el aire contenido en una tubería se pueden producir sobrepresiones importantes al final de la operación, debido al aumento brusco de la velocidad del agua que sustituye el aire eliminado. Para evitar este efecto conviene utilizar ventilas de doble orificio: uno de gran sección para el vaciado y llenado rápido del aire en la conducción, y otro de pequeña sección para el vaciado o llenado lento al final de la operación.

Golpe de ariete

El agua que fluye a través de una tubería tiene una energía cinética proporcional a su masa y al cuadrado de su velocidad. Cuando la corriente de agua se para, esa energía cinética se transforma en energía potencial, de tal forma que momentáneamente hay un aumento de la presión. En la puesta en marcha o parada de las bombas, apertura o cierre de válvulas, eliminación de aire de la conducción y, en general, cuando se altera el régimen de circulación del agua en una tubería, se producen unas sobrepresiones y depresiones instantáneas. Este fenómeno se llama presión de onda o golpe de ariete. Su intensidad depende: del tiempo que transcurre entre el inicio y el final del corte de la corriente (tiempo de parada), de la longitud de la columna de agua en movimiento y de la velocidad de la corriente de agua.

La sobrepresión se calcula mediante las fórmulas:

$$P = 0.0531 \frac{V \times L}{T} ; P = 67.6 \frac{Q \times L}{T \times D^2}$$

P = Aumento de la presión, en bares.

V = Velocidad de la corriente del agua, en m/seg.

L = Longitud de la tubería, en m.

T = Tiempo de parada, en seg.

Q = Caudal, en l/seg.

D = Diámetro de la tubería, en mm.

Ejemplo

Una tubería de PVC con características de resistencia a la presión de 6 atmósferas y de diámetro nominal 40 mm (diámetro interior 36.4 mm) conduce un caudal de 1.6 l/seg a una presión de funcionamiento de 2.5 bares. Calcular la elevación de presión cuando se cierra una válvula de paso en 3 seg, sabiendo que la longitud de la tubería por encima de la válvula es de 80 m.

Solución:

Aumento de presión:

$$P = 67.6 \frac{Q \times L}{T \times D^2} = \frac{67.6 \times 1.6 \times 80}{3 \times 36.4^2} = 2.18 \text{ bares}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión total} &= 2.50 + 2.18 = 4.68 \text{ bares} = \\ &= 4.68 \times 0.987 = 4.62 \text{ atmósferas} \end{aligned}$$

La presión total es inferior a la presión de trabajo de la tubería (6 atmósferas). Como la sobrepresión causada por el golpe de ariete es inversamente proporcional al tiempo empleado en cerrar la válvula, habrá que tener la prevención de aumentar ese tiempo de cierre.

Hay que tener en cuenta que las depresiones producidas en el golpe de ariete pueden originar deformaciones por aplastamiento en tubería de PVC con timbraje inferior a 6 atmósferas. No existe este peligro para calibres superiores de PVC ni para cualquier calibre de tubería de fibrocemento o de polietileno.

La sobrepresión que produce el golpe de ariete trae como consecuencia la necesidad de proyectar una tubería con mayor diámetro o mayor calibre, lo que incrementa el costo. Para evitar este inconveniente se reduce total o parcialmente el golpe de ariete mediante los siguientes procedimientos:

- *Instalación de una válvula de seguridad*, que puede ser de presión o de depresión. La válvula de presión se abre y deja salir una cantidad de agua cuando se sobrepasa la presión prefijada. La válvula de depresión se abre y deja entrar aire cuando se produce una depresión. Estas válvulas tienen el inconveniente de que han de instalarse por encima de la cota del terreno.
- *Instalación de varias válvulas de retención* a lo largo de la tubería. Cuando se produce el corte de la corriente se cierran estas válvulas, con lo cual se divide la tubería en varios tramos y disminuye la sobrepresión.

El golpe de ariete queda muy amortiguado en la tubería de polietileno. Para que fuera peligroso se necesitaría una velocidad superior a 8 m/seg, circunstancia que no suele darse.

Aforo del caudal en tuberías a presión

El aforo o determinación del caudal que circula por una tubería se puede hacer por diversos procedimientos, de los cuales los más utilizados son los siguientes:

- Medidor Venturi.
- Medidor volumétrico de hélices.

Medidor venturi

Este dispositivo permite medir el caudal que circula en tuberías con flujo a presión. El principio en el que se basa su funcionamiento consiste en aumentar la velocidad

del líquido al reducir el área de paso, esto provoca una disminución en la carga por presión en el área reducida. Este medidor reemplaza la medición del caudal por la medida del diferencial de presiones, así, la velocidad en la entrada es menor a la velocidad en la garganta y la presión en la entrada es mayor a la presión en la garganta.

Para medir la diferencia de presiones en el medidor Venturi se deben de insertar piezómetros a la entrada y en la garganta (figura 6-5a) o mediante un manómetro de mercurio (figura 6-5b).

El diámetro de la entrada (D_E) coincide con el diámetro del tubo. El estrechamiento está formado por una reducción cónica con un ángulo aproximado de 21 grados, seguido por el área de paso o garganta cuyo diámetro (D_G) debe ser de un cuarto a un medio el diámetro del tubo y después sigue una expansión cónica de 5 a 7 grados.

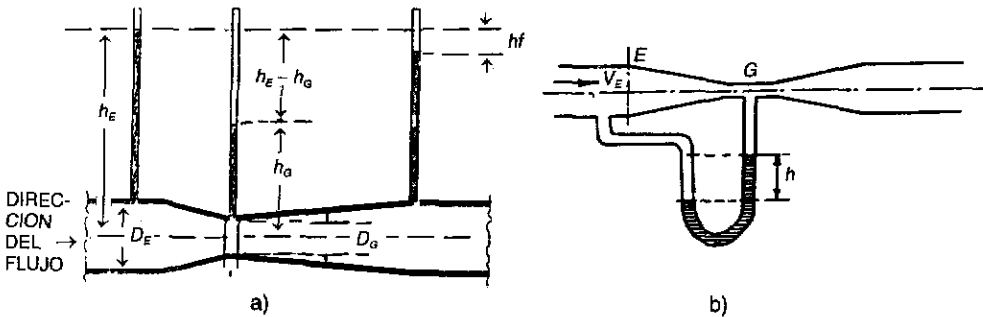


Fig. 6-5. Sección transversal de un medidor Venturi, a) con piezómetros, b) con manómetro de mercurio.

Al final del medidor Venturi se puede colocar un piezómetro para conocer la pérdida de carga que se origina por el medidor. En términos generales se puede esperar una pérdida de carga del 10 al 20%.

El caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = K \sqrt{h - hf} \text{ para medidor venturi con piezómetros.}$$

$$Q = K \sqrt{12.6 h - hf} \text{ para medidor venturi con manómetro de mercurio.}$$

$$Q = \text{Caudal en m}^3/\text{seg}$$

h = Diferencia de presiones entre la entrada y la garganta ($h_E - h_G$), en m.

hf = Pérdida de carga por fricción, en m.

K = Coeficiente que depende de la relación de diámetros de entrada y de la garganta, se calcula con la fórmula:

$$K = \frac{\pi}{4} (D_g)^2 \cdot \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{D_g}{D_E}\right)^4 - 1}}$$

D_g = Diámetro de la garganta, en m.

D_E = Diámetro de la entrada, en m.

g = Aceleración de la gravedad, en m/seg.

Medidor volumétrico de hélices

Este medidor de caudal está conectado a la línea de la tubería y consiste de un propulsor cónico de hélice o propela ubicado al centro del tubo y del flujo y este propulsor a su vez está conectado mediante engranes a un registrador (figura 6-6).

El principio de funcionamiento se basa en que la velocidad de la hélice es proporcional a la velocidad del agua en la tubería y como se conoce el diámetro del tubo, se puede calcular el caudal aplicando la ecuación de continuidad y el principio de Bernoulli.

La mayoría de los medidores de este tipo tienen una carátula que registra el volumen acumulado y el caudal que está circulando en ese instante por la tubería.

Los diámetros más comunes de los medidores varían conforme el diámetro de la tubería y varían desde los 10 cm hasta los 183 cm.

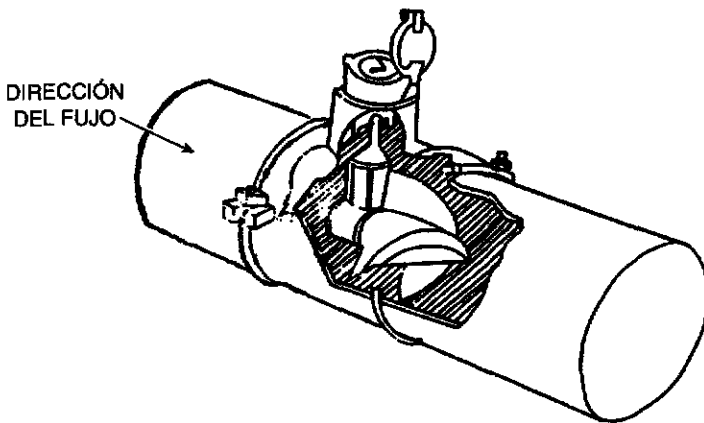


Fig. 6-6 Vista interior y exterior del medidor volumétrico de hélices.

CAPÍTULO 7

EQUIPOS DE BOMBEO

Alturas de elevación

La forma más usual de elevar el agua es por medio de bombas hidráulicas movidas por motores eléctricos o de explosión. En el caso más general las bombas hidráulicas actúan en dos fases:

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

La tubería que conduce el agua en la aspiración se llama tubería de aspiración, y la que conduce en la impulsión se llama tubería de impulsión.

En la fase de aspiración la misión de la bomba consiste en hacer el vacío en la tubería de aspiración, con el fin de que el agua pueda subir por ella impulsada por la presión atmosférica. En la fase de impulsión, la misión de la bomba consiste en crear la presión necesaria para que el agua se traslade a lo largo de la tubería de impulsión.

La instalación de una bomba viene representada en la figura 7-1 en donde la bomba aspira el agua del pozo y lo impulsa hasta un depósito.

Hay que considerar las siguientes alturas de elevación:

- *Altura geométrica de aspiración (H_s)*: Es la distancia vertical existente entre el eje de la bomba y el nivel inferior del agua.
- *Altura geométrica de impulsión (H_i)*: Es la distancia vertical existente entre el nivel superior del agua (superficie del agua en el depósito de impulsión o el punto de descarga libre de la tubería de impulsión) y el eje de la bomba.
- *Altura geométrica de elevación*: Es la distancia vertical existente entre los niveles superior e inferior del agua.

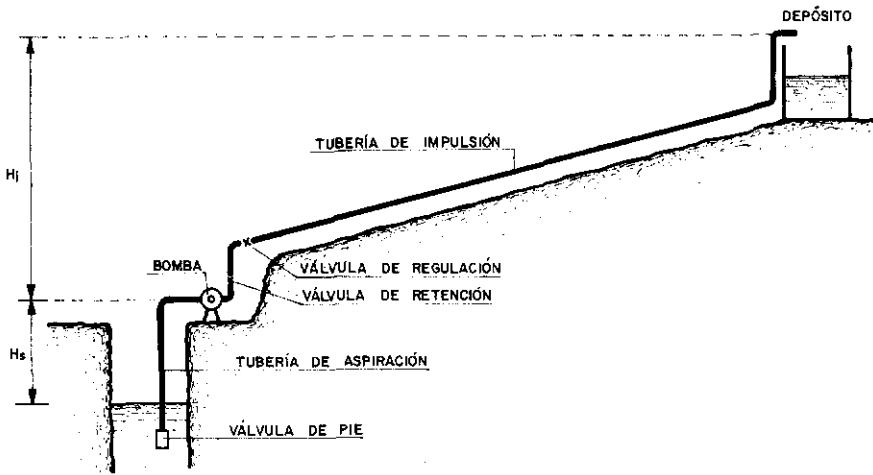


Fig. 7-1 Esquema de la instalación de una bomba. H_s = Altura geométrica de aspiración. H_i = Altura geométrica de impulsión.

- *Altura manométrica de aspiración (H_{ms})*: Es igual a la altura geométrica de aspiración más las pérdidas de carga en la tubería de aspiración.
- *Altura manométrica de impulsión (H_{mi})*: Es igual a la altura geométrica de impulsión más las pérdidas de carga en la tubería de impulsión.
- *Altura manométrica total o altura total de elevación (TDH)*: Es la suma de las alturas manométricas de aspiración e impulsión. Esta debe ser la altura suministrada por la bomba. Esta altura es independiente del peso específico del líquido, por lo que sólo puede expresarse en mca.

Bombas hidráulicas. Clasificación

Las bombas hidráulicas son máquinas que transforman la energía mecánica en energía hidráulica. Pueden ser de tres tipos:

- *Rotodinámicas*: El agua se desplaza por la acción de un mecanismo impulsor (rodete o impulsor) que tiene movimiento rotativo.
- *Volumétricas*: El elemento impulsor, que tiene movimiento rectilíneo alternativo (émbolo, membrana) o rotativo (engranajes, paletas), impulsa el líquido desde la cámara que lo contiene, por efecto de disminución del volumen de esa cámara.
- *Gravimétricas*: Trasladan el líquido desde una cota a otra más elevada (noria, cigüeñal, elevador de cangilones, tornillo de Arquímedes).

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

- *Centrífugas o de flujo radial*: El líquido sale de la bomba en sentido perpendicular al eje de giro. El nombre de centrífuga alude al hecho de que es una fuerza de

esa naturaleza la que aumenta la energía de la corriente. El agua en rotación tiende a escapar hacia fuera produciendo un vacío en su desplazamiento, lo que origina un flujo continuo de agua que entra en la dirección del eje de la bomba.

- *De hélice o de flujo axial*: El impulsor tiene la forma de hélice o tornillo, por lo que el flujo del agua se produce en la dirección del eje del mismo. Estas bombas se fundan en el mismo principio de propulsión de los barcos, con la diferencia de que en el caso de la bomba, la hélice gira en posición fija y desplaza al agua de forma continua.
- *Diagonales o de flujo mixto*: El flujo de agua es producido conjuntamente por la fuerza centrífuga y por el empuje de los álabes. Son, por tanto, intermedias entre los dos grupos anteriores, tanto en su diseño como en su funcionamiento.

Bombas centrífugas. Constitución y clasificación

Estas bombas son las más utilizadas en el riego, por las numerosas ventajas que ofrecen: tamaño reducido, caudal constante, presión uniforme, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación.

Una bomba centrífuga se compone de los siguientes elementos:

- *Rodete o impulsor*: Es el elemento móvil. Está formado por unas paletas o álabes divergentes unidos a un eje que recibe energía del exterior. Según que estos álabes vayan sueltos o unidos a uno o dos discos, los rodetes pueden ser:
 - *Abiertos*: Cuando van sueltos. Tienen la ventaja de que permiten el paso de impurezas, pero tienen poca eficiencia.
 - *Cerrados*: Cuando van unidos lateralmente a dos discos. Se obstruyen con más facilidad que los anteriores, pero tienen mayor rendimiento.
 - *Semiabiertos*: Cuando van unidos a un disco. Tienen características intermedias entre los dos tipos anteriores.
- *Distribuidor*: Consiste en un estrechamiento que conduce el agua desde la tubería de aspiración hasta el rodete.
- *Difusor*: Está formado por unos álabes fijos divergentes, que tienen por misión reducir la velocidad y aumentar la presión del agua que sale del rodete. El difusor y el rodete están encerrados en una cámara, llamada *carcasa o cuerpo de bomba*. Según su forma y disposición, las bombas centrífugas son de dos tipos (fig. 7-2):
 - *De voluta*: La carcasa tiene forma de caracol, rodeando al rodete de tal forma que el área de flujo de agua aumenta progresivamente hacia la tubería de descarga.
 - *De turbina*: La carcasa va provista de unos difusores fijos dispuestos de tal forma que el área de flujo se ensancha progresivamente hacia la salida.

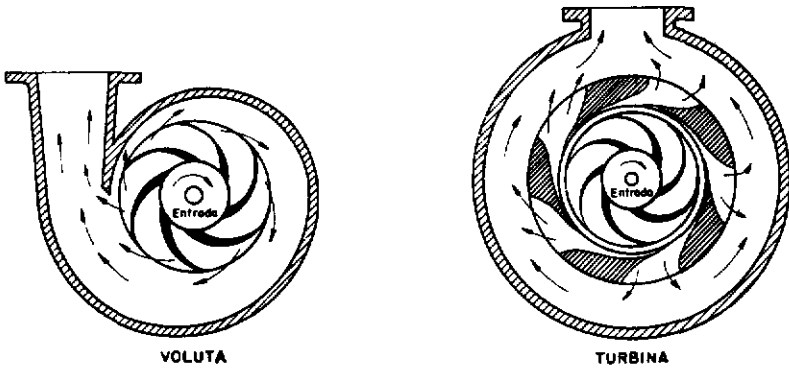


Fig. 7-2 Bombas de voluta y de turbina.

En ambos casos, la sección creciente de la carcasa reduce la velocidad del agua, lo que contribuye a transformar la energía cinética en energía de presión, mejorando el rendimiento de la bomba. A esta finalidad contribuye también el *cono o divergente*, situado a la salida de la bomba.

Según el número de rodets, las bombas centrífugas pueden ser:

- *Simples o monocelulares*: Con un solo rodete.
- *Múltiples o multicelulares*: Con varios rodets, que se colocan en serie, de tal forma que el flujo que sale por cada uno de ellos entra en el siguiente.

A su vez, las bombas simples o múltiples, según la disposición del eje de giro pueden ser: *de eje horizontal y de eje vertical*.

Altura de aspiración en bombas centrífugas

La capacidad de aspiración de una bomba centrífuga depende de la presión absoluta disponible a la entrada de la bomba.

Altura neta positiva de aspiración disponible (NPSHd)

Es la presión absoluta disponible en la entrada de aspiración de la bomba. Esta altura es una característica del sistema, y se calcula por la siguiente fórmula:

$$NPSHd = (H_o - H_v) \pm H_s - h_s$$

H_o = Presión atmosférica, en mca.

H_v = Presión de saturación del vapor de agua, en mca.

H_s = Altura geométrica de aspiración, expresada en m (va precedida con signo - cuando la bomba está situada por encima del nivel del agua, y con signo + cuando esté por debajo del nivel del agua).

h_s = Pérdida de carga en la tubería de aspiración, en mca.

La tabla I da los valores de $H_o - H_v$ en función de la temperatura del agua y de la altitud.

Tabla 1: $(H_o - H_v)$ en función de las temperaturas y altitudes (en mca)

Temperatura del agua (°C)	Altitud sobre el nivel del mar (m)				
	0	500	1,000	1,500	2,000
0	10.3	9.7	9.2	8.6	8.1
10	10.2	9.6	9.1	8.5	8.0
20	10.1	9.5	9.0	8.4	7.9
30	9.9	9.3	8.8	8.2	7.7
40	9.6	9.0	8.5	7.9	7.4

Ejemplo

Una bomba centrífuga trabaja a una altura de 500 m sobre el nivel del mar elevando agua cuya temperatura es de 20 °C. La altura geométrica de aspiración es de 3 m y las pérdidas de carga en la aspiración ascienden a 1.2 mca. Calcular $NPSH_d$. La bomba trabaja sobre el nivel del agua.

Solución:

$$NPSH_d = (H_o - H_v) - H_s - h_s = 9.5 - 3 - 1.2 = 5.3 \text{ m}$$

Altura neta positiva de aspiración requerida (NPSH_r)

Es la presión de entrada requerida por la bomba para que ésta funcione correctamente. Es una característica de la bomba, que varía según el diseño de la misma, tamaño de ésta y condiciones de servicio, por lo que es un dato que debe dar el fabricante.

En algunas circunstancias la presión absoluta dentro del rotor de la bomba puede ser inferior a la presión del vapor de agua. Ocurre entonces que se forman cavidades de vapor que desaparecen bruscamente cuando alcanzan zonas de presión más alta (cavitación), dando lugar a vibraciones, ruidos, bajo rendimiento y deterioro de la bomba. La cavitación se evita cuando la altura neta positiva de aspiración disponible ($NPSH_d$) es igual o mayor que la altura neta positiva de aspiración requerida por la bomba ($NPSH_r$).

Para evitar cavitaciones o acumulación de aire en el interior de la tubería de aspiración conviene tener en cuenta algunas consideraciones:

- Reducir en lo posible las pérdidas de carga en la tubería de aspiración. Hay que tener en cuenta la reducción de altura de aspiración originada por las pérdidas de carga en la tubería de aspiración y elementos singulares instalados en ella. Esta reducción de altura puede ser importante, como es el caso de algunos modelos de válvula de pie, que puede ocasionar pérdidas de carga de hasta 2 mca. Un

diámetro mayor disminuye las pérdidas, por lo que la tubería de aspiración suele ser de mayor diámetro que la de impulsión.

- En las bombas de eje horizontal el diámetro de la tubería de aspiración suele ser superior al orificio de aspiración de la bomba, en cuyo caso la unión entre ambos debe tener una forma que impida la formación de bolsas de aire que dan lugar a vibraciones peligrosas. Esta unión se hace mediante un cono asimétrico horizontal, colocando la generatriz más inclinada en la parte inferior. Conviene que la generatriz superior del cono no quede horizontal, sino que tenga una cierta inclinación (del 1 al 10 %) ascendente hacia la bomba (fig. 7-3).

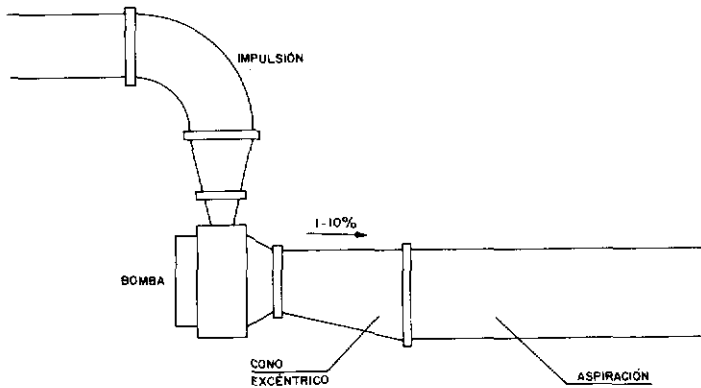


Fig. 7-3 Unión de la tubería de aspiración con la bomba mediante un cono excéntrico.

- En el extremo inferior de la tubería de aspiración se coloca una válvula de pie con una alcachofa o colador situada a una distancia mínima del fondo de 50 cm, para evitar la succión de sedimentos. La válvula de pie debe colocarse a una distancia mínima del nivel del agua de 2 veces el diámetro de la tubería, para evitar la succión de aire.
- Salvo en el caso de bombas que trabajan sumergidas, para que las bombas centrífugas funcionen es necesario llenar de agua la tubería de aspiración y la caja de la bomba, operación que recibe el nombre de *cebado de la bomba*. La válvula de pie en el extremo de la tubería de aspiración mantiene el agua en esa tubería y no es preciso cebar la bomba cada vez que ésta se ponga en funcionamiento. También se utilizan cebadores manuales y bombas de vacío.

No necesitan cebado las *bombas autocebantes*, que pueden elevar el agua desde gran profundidad. Estas bombas, instaladas a nivel del suelo, van conectadas por dos tuberías con un aparato inyector provisto de un tubo venturi sumergido en el agua. Su rendimiento es muy bajo, por lo que su utilización es muy limitada.

- Para evitar o minimizar las turbulencias a la entrada de la bomba debería instalarse un tramo de tubería recta antes de la entrada de la bomba, cuya longitud sea 5-6 veces el diámetro de la tubería.

- En la práctica ocurre que la altura geométrica de aspiración, en la mayoría de los casos, deberá ser inferior a 5-6 m.

Características de la aspiración y de la impulsión

En bombas horizontales, por lo general la bomba y el motor trabajan a la misma altura. No son autoaspirantes, por lo que requieren un cebado previo. Son de costo más bajo que las verticales (salvo en caso de bombas de gran caudal) y su operación y conservación son más sencillas y económicas.

En bombas verticales, normalmente el motor se instala a nivel superior, el cual acciona a la bomba mediante una prolongación del eje. Pueden funcionar en seco o sumergidas. Estas últimas no necesitan cebado y no presentan problemas en la aspiración, que suele ser la fuente principal de contratiempos en las bombas centrífugas. Sin embargo, tienen un costo inicial más alto y su mantenimiento es mucho más elevado, ya que cualquier reparación exige elevar la bomba hasta la superficie.

En pozos profundos de pequeño diámetro se utilizan bombas verticales de turbina, que ocupan menor espacio que las de voluta. Debido al diámetro limitado del impulsor, la altura alcanzada en la impulsión es pequeña, por lo que se utilizan varias fases (bombas multicelulares) y se construyen de tal forma que se puede montar el número de fases deseado añadiendo impulsores semejantes uno sobre otro.

Para extraer agua de pozos profundos se emplean los siguientes procedimientos:

- Bomba vertical sumergida accionada desde la superficie mediante un eje largo.
- Bomba vertical sumergida accionada mediante motor eléctrico sumergido (equipo buzo).
- Bomba accionada mediante motor hidráulico.

En el primer caso el eje prolongado suele ir guiado por unos cojinetes de fricción, separados a intervalos regulares y lubricados por aceite o grasa o por el agua bombeada. Cuando la lubricación es aceite o grasa, el eje se instala en el interior de un tubo que, a su vez, puede ir en el interior o en el exterior de la tubería de impulsión. Cuando la lubricación es por agua, el eje se dispone en la tubería de impulsión hasta las proximidades del motor, desde donde se desvía mediante un codo.

Las bombas de eje prolongado trabajan normalmente hasta una profundidad de 90 m. A mayor profundidad aumentan los problemas derivados de la alineación del eje y el desgaste de los cojinetes.

La electrobomba sumergida es accionada mediante un motor eléctrico instalado inmediatamente debajo de la bomba, con lo cual se suprimen la prolongación del eje, los cojinetes y el tubo protector. El motor eléctrico puede funcionar en seco, con cierre hermético, o inundado, con el adecuado aislamiento. Al arrancar el motor se pasa inmediatamente desde cero a las revoluciones de funcionamiento, lo que puede provocar arrastres que dañen al acuífero.

Las electrobombas sumergidas tienen la ventaja, sobre las bombas de eje largo, de que se pueda utilizar a mayor profundidad y que trabajen a mayor velocidad en caudales medios.

La bomba accionada mediante motor hidráulico tiene su fundamento en la oleodinámica. Una bomba hidráulica situada en la superficie envía aceite a alta presión a un motor hidráulico, que es el encargado de accionar la bomba centrífuga. El motor hidráulico se puede regular entre cero y 5,000 rpm, con lo cual el arranque es progresivo. Además, esto permite diseñar el equipo para que la bomba centrífuga trabaje siempre en el punto de máximo rendimiento, lo que se traduce en un ahorro energético. La profundidad límite a que puede trabajar este equipo se sitúa por debajo de los 600 m.

Si la bomba impulsa el agua a gran altura geométrica se coloca una válvula de retención al principio de la tubería de impulsión, con el fin de evitar la inversión de corriente cuando la bomba se para. A continuación se coloca una válvula de regulación, que puede ser una válvula de compuerta de funcionamiento manual o una válvula reductora de presión de control automático.

Si la tubería de impulsión se eleva desde la bomba se deberá colocar, a continuación de la válvula de regulación, una válvula de descarga de presión, con el fin de reducir el golpe de ariete provocado por la corriente de retorno cuando la bomba se para.

Cuando se llena la tubería de impulsión al arrancar la bomba, ésta eleva un caudal superior al correspondiente a su curva característica, debido a la falta de resistencia. Con ello se incrementa la *NPSH_r*, lo que puede dar lugar a algunos inconvenientes, tales como cavitación, descebado, etc. Para evitarlo se puede instalar una válvula de control para que la velocidad del agua durante el llenado de la tubería no sobrepase 0.3 m/seg.

Curvas características

Las curvas características de una bomba son unos gráficos que relacionan las características de esa bomba (caudal, altura manométrica, rendimiento, potencia requerida, altura de aspiración, velocidad de giro) y que están en función de su tamaño, diseño y construcción.

En el eje de abscisas se representan los caudales y en el eje de ordenadas se representan las alturas, rendimientos y potencias, con lo que se obtienen las siguientes curvas características (figura 7-4).

- *Curva altura manométrica total-caudal (TDH-caudal)*. En esta curva se observa que el caudal aumenta cuando disminuye la altura manométrica. Cuando la curva se inclina paulatinamente indica que la bomba soporta variaciones de altura con variaciones reducidas de caudal. En cambio, la curva que tiende a la horizontal descendiendo muy lentamente corresponde a una bomba en donde una pequeña variación de la altura provoca una importante variación de caudal.

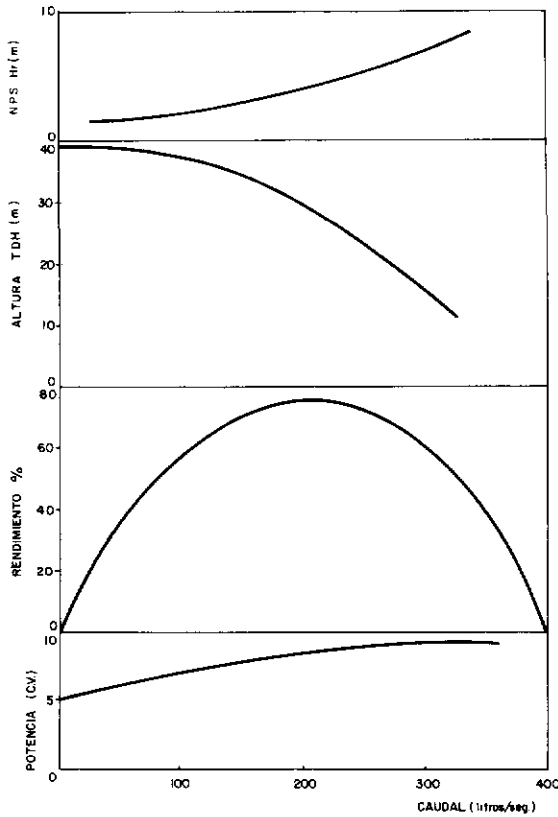


Fig. 7-4 Curvas características de una bomba.

- *Curva rendimiento-caudal.* En esta curva se observa que el rendimiento es nulo para un caudal nulo y para un caudal máximo. Entre ambos el rendimiento varía, alcanzando el máximo en un punto correspondiente a un cierto caudal, que es aquel para el cual ha sido diseñada la bomba.
- *Curva potencia-caudal.* La potencia requerida en el eje de una bomba es función del caudal, altura manométrica y rendimiento. Esta potencia, para una altura dada y su caudal correspondiente, es tanto más elevada cuando menor sea el rendimiento.
- *Curva altura neta positiva de aspiración requerida-caudal (NPSHr-caudal).* La *NPSHr* en una bomba a velocidad constante aumenta con el caudal.

Las curvas características típicas de los 3 grupos de bombas vienen indicados en la figura 7-5. En ellas se observa lo siguiente:

- *Bombas radiales.* Dan el máximo rendimiento con pequeños y medianos caudales y grandes alturas manométricas. La curva altura-caudal suele tener un máximo, y la potencia absorbida aumenta a medida que crece el caudal. El rendimiento máximo no disminuye mucho en un cierto margen de caudales.

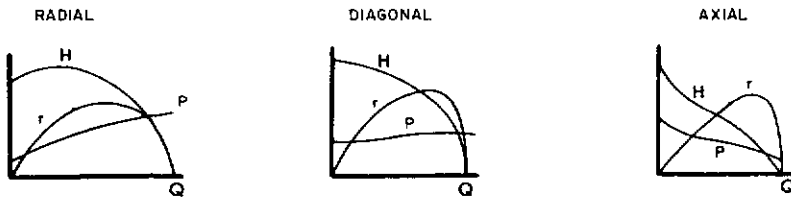


Fig. 7-5 Curvas características típicas de las bombas centrífugas. H = Curva característica TDH-caudal. r = Curva característica rendimiento-caudal. P = Curva característica potencia-caudal.

- **Bombas axiales.** Dan el máximo rendimiento con grandes caudales y pequeñas alturas. La curva altura-caudal es muy decreciente, con lo cual las diferencias de altura producen grandes modificaciones en el caudal y la potencia requerida disminuye a medida que aumenta el caudal. El máximo rendimiento disminuye con rapidez al variar el caudal.
- **Bombas diagonales.** Ofrecen unas características intermedias entre las dos anteriores, dando el máximo rendimiento con medianos y grandes caudales y medianas alturas. La potencia absorbida se mantiene con poca variación a medida que aumenta el caudal y disminuye la altura manométrica.

Las áreas de aplicación de los tres grupos de bombas se muestran en la figura 7-6.

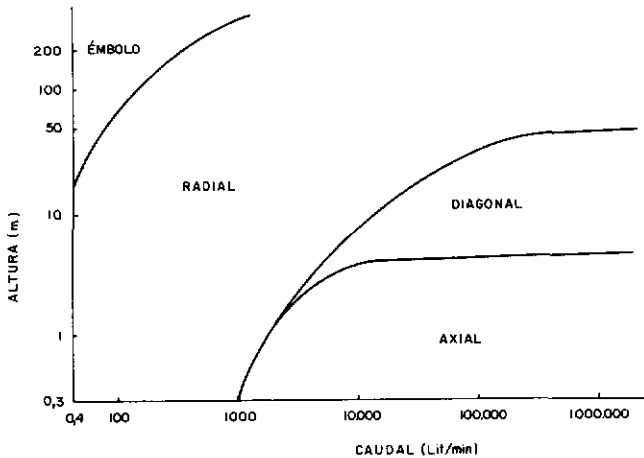


Fig. 7-6 Áreas de aplicación de las bombas centrífugas.

Curvas características según la velocidad de giro

Las características de una bomba varían en función del diámetro del rotor y de su velocidad de giro. En la figura 7-7A-B-C se representan las curvas características de una bomba para distintas velocidades de giro.

En la figura 7-7D se representan las curvas de igual rendimiento en el diagrama altura TDH-caudal para distintas velocidades de giro del rotor. Este gráfico, por tanto,

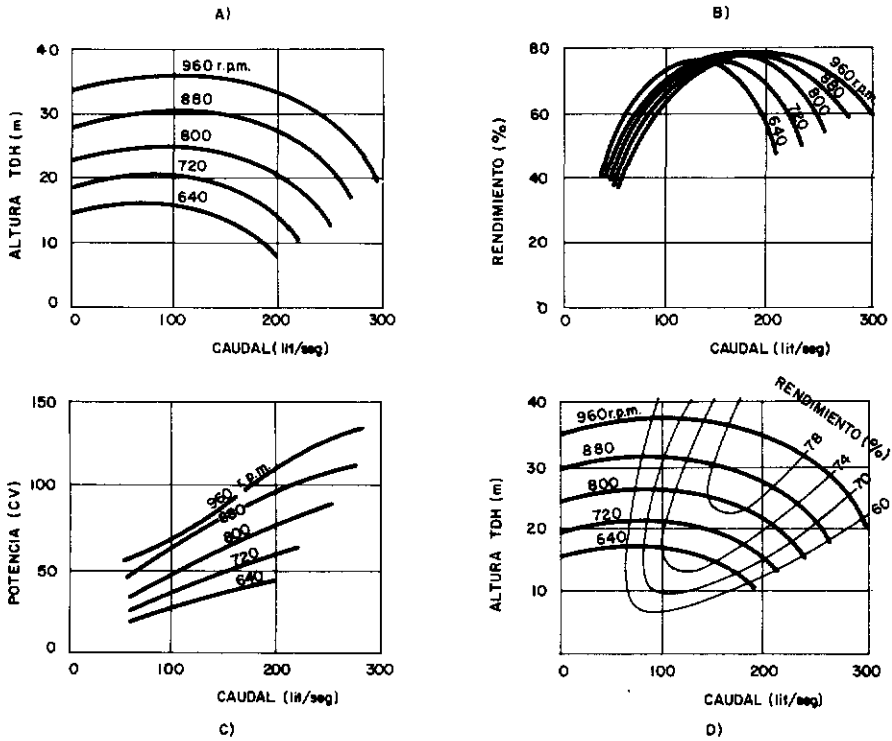


Fig. 7-7 Curvas características a distintas velocidades de una misma bomba. A) Altura-caudal. B) Rendimiento-caudal. C) Potencia-caudal. D) De igual rendimiento en el diagrama altura TDH-caudal.

nos suministra información de velocidad, caudal, altura TDH y rendimiento. Por ejemplo, para obtener un caudal de 200 l/seg a una altura manométrica total de 20 m se requiere una velocidad de 780 rpm y se obtiene un rendimiento del 74 %.

La potencia requerida se obtiene mediante la fórmula:

$$P = \frac{Q \times H}{75 \times r} = \frac{200 \times 20}{75 \times 0.74} = 72 \text{ CV}$$

Las curvas características a distintas velocidades nos permiten seleccionar la bomba y su velocidad de giro que mejor se acomode a nuestros requerimientos de altura TDH y caudal. Cuando la bomba se acciona con motor diesel, puede ocurrir que las revoluciones de funcionamiento del motor que producen un rendimiento máximo no coincidan con las revoluciones de funcionamiento de la bomba que suministra el caudal y la altura TDH requeridos. Se pueden predecir las nuevas características de la bomba (velocidad o diámetro del rotor) en virtud de las leyes de semejanza de las bombas centrífugas, que son las siguientes:

- El caudal es directamente proporcional a la velocidad de giro.
- La altura TDH es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad.

- La potencia es directamente proporcional al cubo de la velocidad.
- La velocidad es directamente proporcional al diámetro del rotor.

Algebraicamente estas leyes se expresan así:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\frac{TDH_1}{TDH_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3$$

Q = Caudal de la bomba, en l/seg.

TDH = Altura manométrica total, en m.

P = Potencia al freno, en kw.

n = Velocidad de giro, en rpm.

D = Diámetro del rotor, en mm.

Los cambios de la velocidad y del diámetro del rotor no afectan al rendimiento.

Ejemplo

Una bomba funcionando a 1,400 rpm suministra un caudal de 120 l/seg a una altura manométrica total de 50 m con un rendimiento del 80 %. La bomba ha de ser accionada por un motor que la hará trabajar a 2,100 rpm. Calcular las nuevas características de funcionamiento.

Solución:

Potencia a 1,400 rpm:

$$P = \frac{Q \times H}{75 \times r} = \frac{120 \times 50}{75 \times 0.8} = 100 \text{ CV} = 100 \times 0.735 = 73.5 \text{ kw}$$

$$\frac{120}{Q_2} = \frac{1,400}{2,100} \quad ; \quad Q_2 = 180 \text{ l/seg}$$

$$\frac{50}{TDH_2} = \left(\frac{1,400}{2,100} \right)^2 \quad ; \quad TDH_2 = 112.5 \text{ m}$$

$$\frac{73.5}{P_2} = \left(\frac{1,400}{2,100} \right)^3 \quad ; \quad P_2 = 248.2 \text{ kw}$$

El rendimiento para las nuevas condiciones de funcionamiento permanece constante en el 80 %.

Elección de la bomba

La elección de la bomba más adecuada es de suma importancia, ya que si se instala una bomba inadecuada se puede obtener el caudal preciso, pero con un rendimiento bajo y, por tanto, con un alto consumo de energía. En primer lugar se elige el tipo de bomba y después se seleccionan el tamaño y el modelo.

El tipo de bomba se elige teniendo en cuenta los requerimientos de altura manométrica y caudal, que se resumen así:

<i>Tipo de bomba</i>	<i>Altura manométrica</i>	<i>Caudal</i>
Radial	Grande	Bajo-mediano
Axial	Pequeña	Alto
Diagonal	Mediana	Mediano-alto

Cuando se requiere una determinada presión al final de la conducción (como es el caso de riego por aspersión) hay que tener en cuenta esta circunstancia y añadir esa carga a la altura manométrica correspondiente.

El tamaño de la bomba se elige con relación a la altura y caudal requeridos. Con estos datos se elige el modelo que ofrezca el máximo rendimiento cuando trabaje en esas condiciones de altura y caudal. Por lo general, es más conveniente una bomba cuya curva rendimiento-caudal sea relativamente plana en la zona de mayor rendimiento, para que este rendimiento se mantenga con moderadas variaciones de caudal. Si se espera tener fluctuaciones en la altura manométrica (como es el caso de bombas utilizadas en pozos cuyo nivel experimenta variaciones estacionales) es importante que la curva altura-caudal sea de gran inclinación, para que las variaciones de altura no se traduzcan en variaciones importantes de caudal.

Las revoluciones de funcionamiento suelen ser de 960, 1,450 y 2,900 rpm, o velocidades muy próximas, que corresponden a las velocidades de los motores eléctricos más comunes. También se fabrican bombas con otras revoluciones, para acoplar con motores térmicos. Conviene advertir que no se debe sobrepasar la velocidad marcada por el fabricante, pues de lo contrario se deteriora con rapidez el eje de la bomba.

Las bombas que trabajan a mayor velocidad suelen tener mejor rendimiento y son más baratas de adquisición que aquellas otras que trabajan a menor velocidad, aunque su duración es inferior a la de estas últimas.

En las bombas no sumergidas hay que tener en cuenta los requerimientos de la altura neta positiva de aspiración.

Ejemplo

Elegir una bomba centrífuga para instalar a 2 m de altura sobre la superficie del agua de un embalse situado a 500 m de altitud y con una temperatura del agua en verano 20 °C. El caudal requerido es de 125 l/seg.

Solución:

Tomando como referencia las curvas características de la figura 7-8, para un rendimiento máximo (82 %) la bomba de 300 mm de diámetro suministra el caudal requerido (125 l/seg) a una altura *TDH* de 23 m. Esta bomba requiere una potencia al freno de 45 CV y una *NPSHr* máxima de 5.2 mca.

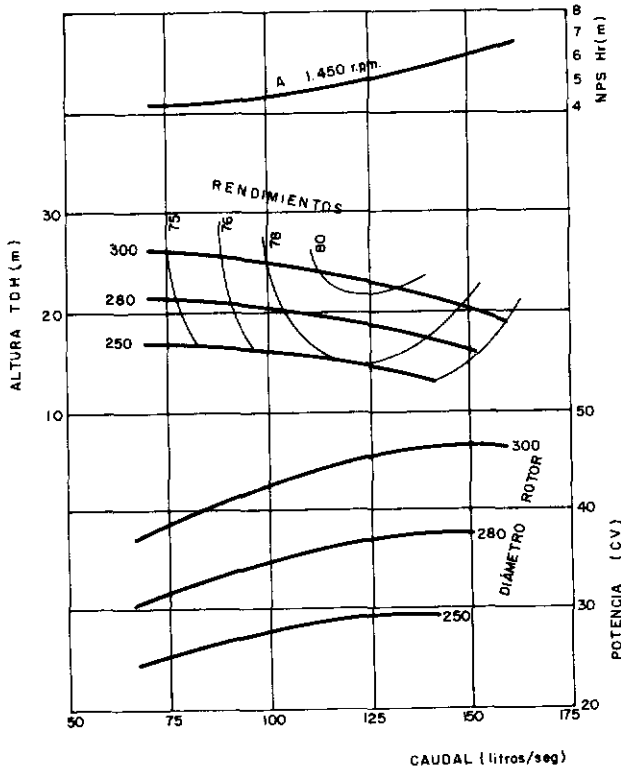


Fig. 7-8

La *NPSHd* se calcula mediante la fórmula:

$$\begin{aligned}
 NPSHd &= (H_o - H_v) - H_s - h_s = 9.5 - 2 - h_s = 7.5 - h_s \\
 H_o - H_v &= 9.5 \text{ (según tabla 1)} \\
 NPSHd &\geq NPSHr \\
 7.5 - h_s &\geq 5.2 \\
 h_s &\leq 2.3 \text{ mca}
 \end{aligned}$$

Las pérdidas de carga en la tubería de aspiración no pueden exceder de 2.3 mca.

Velocidad específica

La velocidad específica o número específico de revoluciones es un indicador excelente de las características de una bomba. Viene dado por la fórmula:

$$Ng = \frac{N \times \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

- Ng = Velocidad específica.
- N = Velocidad de la bomba en rpm.
- Q = Caudal en m³/seg.
- H = Altura manométrica en mca.

Cuando hay varios impulsores:

$$H = \frac{\text{Altura total}}{\text{Número de impulsores}}$$

La velocidad específica de un impulsor es un índice de su forma geométrica y de las proporciones de sus dimensiones principales. Por tanto, cada tipo de bomba corresponde a un determinado campo de velocidad específica.

<i>Velocidad específica</i>	<i>Tipo de bomba</i>
10-80	Radial
80-180	Diagonal
180-300	Axial

Cuando la velocidad específica es muy baja (inferior a 25) se producen pérdidas de carga importantes, lo que reduce el rendimiento. Este mejora a medida que aumenta la velocidad específica hasta llegar a un límite, en que disminuye de nuevo, aunque de forma más suave (figura 7-9).

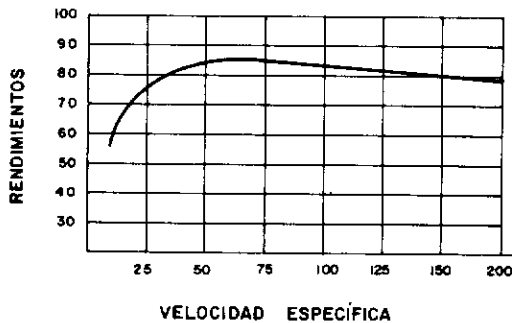


Fig. 7-9 Curva de rendimiento de una bomba centrífuga de caudal medio en función de la velocidad específica.

Para pequeños caudales y grandes alturas la velocidad específica es muy baja, lo que acarrea unos rendimientos bajos. La bomba centrífuga unicelular que se requiere es muy barata de adquisición, pero consume mucha energía. Para evitar este inconveniente se divide la altura total entre varios impulsores acoplados en serie (bomba multicelular), con lo cual aumenta la velocidad específica y se mejora el rendimiento.

Ejemplo

Se desea elevar un caudal de 10 l/seg a una altura manométrica de 50 mca con una bomba de 2,900 rpm.

Solución:

Con un solo impulsor la velocidad específica es:

$$Ng = \frac{N \times \sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{2,900 \times \sqrt{0.01}}{50^{0.75}} = 15.42 \text{ rpm}$$

La velocidad específica es inferior a 25 y, por tanto, habrá un rendimiento bajo.

Con dos impulsores la velocidad específica es:

$$Ng = \frac{2,900 \times \sqrt{0.01}}{25^{0.75}} = 25.93 \text{ rpm}$$

Esta solución es aceptable.

Potencias requeridas para el bombeo

La *potencia hidráulica* es la potencia que necesita la bomba para bombear el agua.

La potencia absorbida por el eje de la bomba o *potencia al freno* es la potencia total que necesita la bomba para realizar una determinada cantidad de trabajo. Es igual a la potencia hidráulica más la potencia consumida en vencer la fricción y viene determinada por la fórmula:

$$Pb = \frac{Q \times H}{75 \times rb}$$

Pb = Potencia de la bomba, en CV.

Q = Caudal, en l/seg.

H = Altura manométrica, en mca.

rb = Rendimiento de la bomba, en tanto por uno.

75 = Coeficiente para expresar la potencia en CV.

Quando la potencia se expresa en kilovatios la fórmula es:

$$Pb = \frac{0.735 \times Q \times H}{75 \times rb} = 0.0098 \frac{Q \times H}{rb}$$

Si se desea expresar la potencia en HP el coeficiente es 76.

Rendimiento mecánico de la bomba es la relación entre la potencia de salida y potencia de entrada.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia salida}}{\text{Potencia entrada}} = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia al freno}}$$

El rendimiento de las bombas centrífugas es el producto de los rendimientos de cada componente que interviene. Por ejemplo, si en el punto de trabajo el rendimiento de una bomba de eje prolongado es del 81 %, el de la transmisión por el eje es del 97 %, y el del cabezal de engranajes es un 80 %, el rendimiento total de la bomba será:

$$0.81 \times 0.97 \times 0.80 = 0.62$$

En las electrobombas sumergidas el rendimiento del motor es inferior al de otro de igual potencia en superficie. Este rendimiento suele ser del 83 %. En el cable eléctrico suele haber una pérdida de tensión del 5 %. Por consiguiente, el rendimiento total de un equipo electrobomba sumergido cuya bomba tenga un rendimiento del 81 % será:

$$0.81 \times 0.83 \times 0.95 = 0.63$$

En la bomba centrífuga accionada por motor hidráulico los rendimientos parciales suelen ser:

- Rendimiento del motor hidráulico: 96 %.
- Rendimiento de la bomba hidráulica: 96 %.
- Rendimiento de la transmisión: 98 %.

El rendimiento total de un equipo cuya bomba centrífuga tenga un rendimiento del 81 % será:

$$0.81 \times 0.96 \times 0.96 \times 0.98 = 0.73$$

La potencia absorbida por la bomba es la que tiene que suministrar el motor. La potencia del motor (P_m) será:

$$P_m = \frac{P_b}{r_m}$$

siendo r_m el rendimiento del motor expresado en tanto por uno. Por tanto, la potencia del motor expresada en CV será:

$$P_m = \frac{Q \times H}{75 \times r_b \times r_m}$$

Cuando la potencia del motor se expresa en kilovatios la fórmula es:

$$P_m = 0.0098 \frac{Q \times H}{r_b \times r_m}$$

Para calcular la potencia del transformador, expresada en kva, se divide la potencia, expresada en kw, por el coseno del ángulo de desfase de la intensidad y el voltaje.

$$P_t = \frac{P_m}{\cos \psi}$$

P_t = Potencia del transformador, en kva.

P_m = Potencia del motor, en kw.

$\cos \psi$ = Factor de potencia, en tanto por uno (suele oscilar alrededor de 0.85).

Como margen de seguridad se eleva un 15 % la potencia instalada:

$$P_t = \frac{1.15P_m}{\cos \psi}$$

La relación entre la potencia del motor, expresada en CV, y la potencia instalada del transformador, expresada en kva, es, aproximadamente, la unidad.

$$\frac{P_m \text{ (CV)}}{P_t \text{ (kva)}} = \frac{\frac{Q \times H}{75 \times r_b \times r_m}}{\frac{1.15 \times 0.0098 \times Q \times H}{0.085 \times r_b \times r_m}} = \frac{0.0133}{0.0132} \approx 1$$

En la práctica, cuando se trata de elegir una bomba se elige aquella que eleva el caudal deseado con el mejor rendimiento. Para cubrir posibles eventualidades conviene considerar la potencia máxima requerida en el eje de esa bomba, que vendrá indicado en las curvas características o en el cuadro de características del catálogo suministrado por el fabricante. Dada la potencia máxima de la bomba se calcula la potencia del motor y, dentro de la gama de motores disponibles, se elige aquel cuya potencia es inmediatamente superior a la obtenida en el cálculo.

Ejemplo

Se necesita elevar un caudal de 6 m³/minuto a una altura manométrica de 35 m. Calcular la potencia del motor, eléctrico o de diesel, suponiendo que los rendimientos de estos motores son, respectivamente, 0.90 y 0.70.

Solución:

Se elige la bomba que eleve 6 m³/minuto con el mejor rendimiento posible. La potencia de esa bomba, según catálogo, varía de 30 a 65 CV.

$$\text{Potencia del motor eléctrico} = \frac{P_b}{r_m} = \frac{65}{0.90} = 72.2 \text{ CV}$$

$$\text{Potencia del motor diesel} = \frac{P_b}{r_m} = \frac{65}{0.70} = 92.8 \text{ CV}$$

Motores eléctricos

Los motores eléctricos son seguros, duraderos, silenciosos, tienen fácil manejo y un bajo costo de adquisición y mantenimiento. El motor ideal para bombeo es el asíncrono, alimentado por corriente trifásica, con rotor en cortocircuito y a una tensión de 440/220 voltios (440 voltios entre fases y 220 voltios entre fase y neutro). Los motores monofásicos se utilizan para potencias de hasta 1 HP.

El régimen de revoluciones viene marcado por la frecuencia de la corriente, que puede ser de 50 o 60 Hz, por lo que funciona a 2,900 rpm o submúltiplo de esta cifra (1,760, 1,450, 1,160, 860).

El rendimiento de los motores eléctricos varía según la potencia nominal:

<i>Potencia</i>	<i>Rendimiento</i>
1	73 - 83
5	82 - 87
10	85 - 89
20	87 - 90
50	90 - 93
100	91 - 94
150	92 - 94
200	93 - 95

La potencia de los motores eléctricos se suele indicar para servicio permanente, frecuencia de 50 Hz, temperatura ambiente de 30-40 °C y una altitud de 1,000 m sobre el nivel del mar. Las variaciones de potencia en función de la temperatura y la altitud vienen indicadas en la tabla 2.

Tabla 2: *Potencia admisible en función de la temperatura ambiente y la altitud sobre el nivel del mar (en motores eléctricos)*

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Potencia admisible en porcentaje de la potencia nominal</i>	<i>Altitud (m)</i>	<i>Potencia admisible en porcentaje de la potencia nominal</i>
Inferior a 30	107	1,000	100
30 a 40	100	1,500	97
45	96	2,000	94
50	92	2,500	90
55	87	3,000	86
60	82	3,500	82

La energía consumida por los motores eléctricos genera unas necesidades de energía aparente total. Se llama factor de potencia ($\cos \psi$) a la relación entre la energía activa o

real (consumida por el motor) y la energía teórica o nominal (suministrada por la empresa fabricante).

$$\cos \psi = \frac{ea}{en} = \frac{ea}{\sqrt{ea^2 + er^2}}$$

ea = Energía activa, medida en kw.

en = Energía nominal, medida en kva.

er = Energía reactiva, medida en kva.

La energía reactiva no es utilizada y constituye una pérdida. Cuando el factor de potencia se aproxima a la unidad hay poca diferencia entre el consumo (energía activa) y las necesidades (energía nominal).

Cuando el motor eléctrico trabaja casi al 100 % de su potencia nominal, el rendimiento es muy alto y hay muy poco consumo de energía reactiva. En cambio, cuando el motor está sobredimensionado, el factor de potencia es bajo y hay un excesivo consumo de energía reactiva, que se corrige acoplado en paralelo con el motor una batería de condensadores que elevan el factor de potencia hasta el valor deseado.

Se llama *factor de servicio* de un motor eléctrico al porcentaje de sobrecarga permitido por encima de su potencia nominal. Suele ser de un 15-20 %.

La potencia de salida de un motor eléctrico trifásico viene dada por la fórmula:

$$Pm = \sqrt{3} / 735 \times V \times I \times \cos \psi \times rm$$

Pm = Potencia del motor, en CV.

V = Voltaje de la línea, en voltios.

I = Intensidad de la corriente, en amperios.

rm = Rendimiento del motor, en tanto por uno.

$\cos \psi$ = Factor de potencia, en tanto por uno.

El acoplamiento entre el motor eléctrico y la bomba depende de la diferencia de velocidad entre ambos. En el caso de que estas velocidades sean distintas se precisa un acoplamiento indirecto a través de correas transmisoras o cajas elevadoras o reductoras. Cuando las velocidades son iguales se hace un acoplamiento directo que aumenta la resistencia mecánica del conjunto y se reduce espacio.

El costo de la energía consumida en el funcionamiento de una bomba movida por motor eléctrico es:

$$C = Pm \times t \times Ce$$

C = Costo de energía en el funcionamiento, en \$.

Pm = Potencia del motor, en kw.

t = Tiempo de funcionamiento, en horas.

Ce = Costo de la energía eléctrica, en \$/kw-hora.

Motores de combustión interna diesel

Los motores diesel tienen la única ventaja, sobre los motores eléctricos, de que no necesitan la costosa instalación de línea eléctrica. La potencia varía con la presión atmosférica y con la temperatura, de tal forma que se reduce en el 1 % cada 100 m de elevación por encima del nivel del mar y en el 1 % cada 6 °C por encima de 15 °C.

Las transmisiones que se utilizan generalmente son los engranajes en ángulo recto y las correas trapezoidales. En cada una de estas transmisiones se pierde, aproximadamente, un 5 % de la potencia del motor. Hay que tener en cuenta también las pérdidas ocasionadas por accesorios, tales como la refrigeración del motor (ventilador o sistema intercambiador de calor), alternadores, etc. La potencia calculada se incrementa en un 10-15 %, en concepto de factor de servicio, para compensar el desgaste del motor con el tiempo.

El costo del combustible consumido viene dado por la fórmula:

$$C = P_m \times t \times C_c \times p$$

C = Costo de combustible en el funcionamiento, en \$.

P_m = Potencia del motor, en CV.

t = Tiempo de funcionamiento, en horas.

C_c = Consumo específico de combustible, en 1/CV-hora. (Varía de 0.16-0.21 kg/CV-hora.)

p = Precio del combustible, en \$/litro.

Ejemplo

Una bomba centrífuga eleva 80 l/seg a una altura manométrica total de 40 mca, con un rendimiento del 78 %. Calcular la potencia requerida en el motor sabiendo que la altitud es de 700 m y la temperatura ambiente en verano es de 40 °C. Calcular el costo horario del combustible sabiendo que el litro de diesel cuesta \$60.

Solución:

Potencia al freno de la bomba:

$$P_b = \frac{Q \times H}{75 \times r_b} = \frac{80 \times 40}{75 \times 0.78} = 54.70 \text{ CV}$$

Pérdida de potencia:

— Debido a la altitud	$\frac{1 \times 700}{100} =$	7 %
— Debido a la temperatura	$\frac{1 \times (40 - 15)}{6} =$	4.1 %
— Debido a la transmisión		5 %
— Debido a accesorios del motor		5 %
— Debido a factor de servicio		15 %
Total		36.1 %

Potencia requerida en el motor:

$$54.70 + (54.70 \times 0.361) = 74.33 = 75 \text{ CV}$$

Costo horario del combustible:

$$C = Pm \times t \times Cc \times p = 75 \times 1 \times 0.18 \times 60 = \$810$$

Acoplamiento de bombas

Las bombas se acoplan en serie para aumentar la altura manométrica total. En este acoplamiento, la curva *TDH*-caudal se obtiene sumando en vertical las curvas *TDH*-caudal de cada una de las bombas.

Las bombas se acoplan en paralelo para aumentar el caudal. En este acoplamiento, la curva *TDH*-caudal se obtiene sumando en horizontal las curvas *TDH*-caudal de cada una de las bombas.

El rendimiento de las bombas acopladas en serie o en paralelo viene dada por la fórmula:

$$r = \frac{r_1 \times P_1 + r_2 \times P_2 + \dots}{P_1 + P_2 + \dots}$$

r_1, r_2, \dots = Rendimiento de las bombas.

P_1, P_2, \dots = Potencia de las bombas.

Defectos de funcionamiento en el equipo de bombeo

Algunas de las fallas más frecuentes en los equipos de bombeo y sus causas más probables son las siguientes:

1. *La bomba no entrega agua*

- Bombas sin cebar.
- Velocidad muy lenta.
- Altura de descarga muy elevada.
- Excesiva altura de aspiración.
- Impulsor atascado.
- Rotación en sentido contrario.

2. *La bomba no entrega el caudal suficiente*

- Entrada de aire en la tubería de aspiración.
- Ha quedado aire en la caja de bomba o en la tubería de aspiración, como consecuencia de haber hecho un cebado incorrecto.
- Se forma una bolsa de aire en la tubería de aspiración, como consecuencia de no colocar el cono excéntrico o no disponer de aparato de vaciado.
- La velocidad es muy lenta.
- El impulsor está parcialmente atascado.
- La altura manométrica es mayor que la calculada.
- La altura de aspiración ha aumentado como consecuencia de una bajada del nivel del agua.
- La válvula de aspiración es demasiado pequeña o no está sumergida a la profundidad adecuada.

3. *Falta de presión*

- Velocidad muy lenta.
- Aire mezclado con el agua.
- Diámetro insuficiente del impulsor.
- Defectos mecánicos, tales como: cojinetes en malas condiciones, impulsor deteriorado, etc.

4. *Excesivo consumo de energía motriz*

- Velocidad excesiva.
- Altura manométrica inferior a la calculada.
- Defectos mecánicos tales como: eje descentrado o torcido, caja de estopas demasiado apretada, conjinetes desgastados, empaquetaduras defectuosas, etc.

SEGUNDA PARTE

Riegos por superficie, aspersión y goteo. Estudio económico

CAPÍTULO 8

RIEGO POR SUPERFICIE

El riego por superficie es un sistema de riego en donde el agua fluye debido a la fuerza de gravedad, utilizándose la superficie del suelo agrícola como parte del sistema de distribución del agua. El caudal disminuye a medida que el agua avanza por la parcela regada, debido a su infiltración en el suelo. Para que la lámina de agua infiltrada se distribuya lo más uniformemente posible a lo largo de la parcela es preciso diseñar y manejar el riego de tal forma que haya un equilibrio entre los procesos de avance e infiltración del agua.

Las pérdidas de agua se producen por escurrimiento superficial y por percolación profunda. El escurrimiento superficial puede ocasionar problemas de erosión. La percolación profunda produce lixiviación de nutrientes y sales del suelo, lo que provoca un deterioro de las aguas de drenaje cuando éstas retornan al regadío.

La geometría de la superficie del suelo (forma y tamaño de las parcelas, pendiente del terreno, rugosidad) condiciona el escurrimiento, mientras que las características físicas del suelo (textura, estructura, porosidad) condicionan la infiltración. El empleo eficiente del agua requiere que su aportación y distribución se logre sin que se produzcan pérdidas excesivas por escurrimiento y percolación.

El riego por superficie debe limitarse a terrenos con pendientes suaves y con suelos relativamente profundos, ya que de otra forma habría que realizar obras costosas de movimiento de tierras, con el inconveniente añadido de dejar al descubierto capas del subsuelo. Otra limitación de este sistema de riego es la dificultad de aplicar láminas bajas, necesarias en ocasiones, como por ejemplo, para favorecer la nacencia en caso de que haya costra superficial. Con estos condicionantes, el riego por superficie ofrece la ventaja, con respecto a otros sistemas de riego, de muy bajo costo de instalación y conservación.

Tipos de riego por superficie

El riego por superficie se puede hacer de dos formas:

- *Riego a manta*: El agua moja toda la superficie del suelo.
- *Riego por surcos*: El agua fluye por surcos paralelos infiltrándose por el fondo y costados de los mismos, sin que la superficie del suelo quede mojada en su totalidad. Los surcos pueden ser con pendiente cero (en surcos cortos) o con pendiente distinta de cero (en surcos largos). Con respecto a otras modalidades de riego por gravedad, el riego por surcos exige mayores necesidades de mano de obra. Además ésta ha de ser suficientemente experimentada, para aplicar el agua de forma que se consiga una buena uniformidad en la distribución y una buena eficiencia en la aplicación del agua.

A su vez el riego a manta admite dos modalidades:

- *Riego por escurrimiento o por fajas*: Las unidades de riego, llamados *tablares, amelgas, melgas o fajas*, tienen una ligera pendiente longitudinal que facilita el avance del agua y pueden estar abiertos o cerrados en la parte inferior. En el primer caso el agua sobrante vierte a una red de desagüe o se almacena en una balsa de donde es bombeada para regar los mismos tablares. (Véase la foto 1).
- *Riego por inundación o por estanques*: Los tablares, generalmente de forma rectangular o cuadrada, están bordeados de un dique o bordo que impide la salida del agua. La nivelación con pendiente cero hace que el avance del agua sea debido exclusivamente a la pendiente que forma la lámina de agua. Un caso especial de esta modalidad es el riego del arroz, en donde los bordos suelen seguir las curvas de nivel y se mantiene el agua sobre la superficie durante el ciclo del cultivo.



Foto 1.
Riego por fajas o melgas.

Bases del riego por superficie

Desde que el agua entra en la melga o en el surco, una parte de su volumen discurre por éstos y el resto se va infiltrando progresivamente a lo largo de los mismos. Para comprender mejor el movimiento del agua en el suelo regado por superficie, cuyo proceso hidráulico es sumamente complejo, conviene dividir el tiempo de riego en distintas fases separadas por unos momentos singulares:

- *Momento de inicio del riego (Ma_1)*: Cuando el agua empieza a entrar en la melga o en el surco.
- *Momento de avance (Ma_2)*: Cuando el agua cubre toda la melga o llega al final del surco.
- *Momento de corte (Mc)*: Cuando deja de entrar agua en la melga o en el surco.
- *Momento de vaciado (Mv_1)*: Cuando en la parte inicial de la melga o del surco se ha infiltrado toda el agua.
- *Momento de receso (Mv_2)*: Cuando en la parte final de la melga o del surco se ha infiltrado toda el agua.

Las fases delimitadas por estos momentos son las siguientes:

- *Fase de avance*: Comprendida entre el momento de avance y el momento de inicio del riego.
- *Fase de receso*: Comprendida entre el momento de receso y el momento de vaciado.

Para representar gráficamente el avance y el receso se llevan al eje de ordenadas los tiempos transcurridos desde el inicio del riego, y al eje de abscisas las longitudes mojadas.

El avance es mucho más rápido al principio que al final de la melga o del surco, debido a que conforme avanza el riego hay más superficie de suelo infiltrando agua, lo que se refleja en la forma de la curva de avance.

El *tiempo de contacto o de oportunidad* de infiltración es el período de tiempo en que el agua permanece en un punto determinado, o sea, el tiempo comprendido entre el avance y el receso del agua en dicho punto. Durante este tiempo el agua se infiltra en el suelo. En el punto A (fig. 8-1 A) el tiempo de contacto viene representado por $A_1A_2 = TC_A$, que es la ordenada comprendida entre las curvas de avance y de receso. Igualmente $B_1B_2 = TC_B$ representa el tiempo de contacto en el punto B.

Se observa en la figura que el tiempo de contacto va disminuyendo a medida que nos aproximamos al final de la melga o del surco. En el supuesto de que éstos fueran de mucha longitud, el avance al final sería muy lento y la curva de avance se inclinaría mucho hacia arriba, con lo cual el tiempo de contacto sería muy pequeño.

La figura 8-1 A representa el diagrama avance-receso en el caso de surcos o melgas abiertos con nivelación distinta de cero. Por lo general el riego se corta después de terminado el avance, con lo que se consigue una dosis mayor y más uniforme. Con este

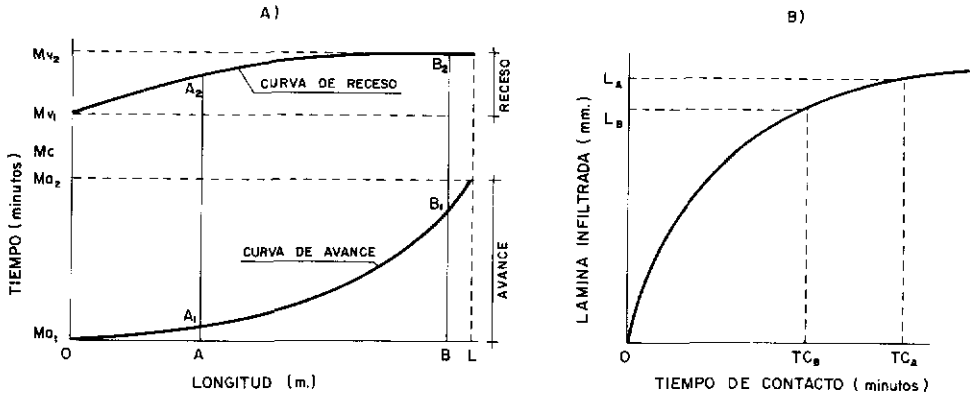


Fig. 8-1 A) Representación del tiempo de contacto en función de la longitud mojada y el tiempo transcurrido desde el inicio del riego. B) Representación de la lámina infiltrada en función del tiempo de contacto.

sistema de riego se genera una importante cantidad de agua sobrante por escurrimiento, que es preciso aprovechar de forma adecuada. En el riego por surcos ocurre con frecuencia que el riego se corta bastante tiempo después de terminado el avance.

En la fig. 8-1 B se representa en abscisas el tiempo de contacto, y en ordenadas la lámina infiltrada. Se observa que la lámina infiltrada crece muy rápidamente al principio y muy lentamente al final. Como consecuencia de ello, la lámina infiltrada en el punto B (OL_B) no difiere mucho de la lámina infiltrada en el punto A (OL_A), a pesar de que había una diferencia considerable entre el tiempo de contacto en el punto B (OTC_B) y el tiempo de contacto en el punto A (OTC_A).

La figura 8-2 A representa el diagrama avance-receso en melgas cerradas con nivelación a pendiente cero. Por lo general el agua se corta antes o al mismo tiempo de que termine el avance ($M_c < M_{a_2}$), debido a que se suelen aplicar dosis de riego muy elevadas. Una vez terminada la fase de avance se forma una lámina de agua de la misma altura en toda la superficie de la melga (debido a su nivelación con pendiente cero),

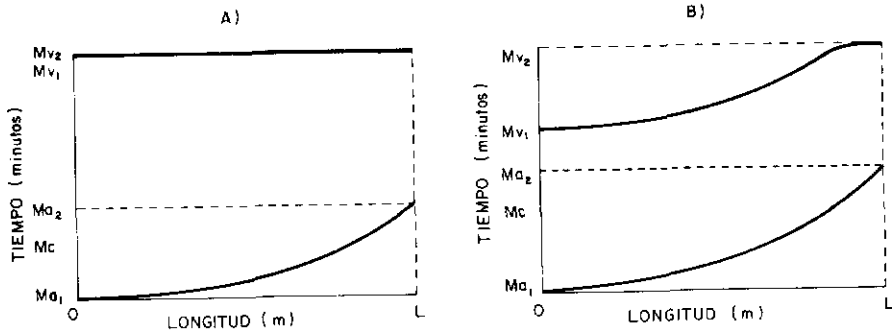


Fig. 8-2 A) Diagrama avance-receso en melgas cerradas niveladas con pendiente cero. B) Diagrama avance-receso en melgas cerradas con pendiente distinta de cero.

con lo cual el agua desaparece al mismo tiempo en toda la superficie de la melga, es decir, que el momento de vaciado Mv_1 coincide con el momento de receso Mv_2 .

La figura 8-2 B representa el diagrama avance-receso en el caso de melgas cerradas con nivelación distinta de cero. La forma de la curva de receso indica que el agua se ha acumulado en la parte baja de la melga. El agua se corta antes de que termine el avance, siendo importante el momento de corte, ya que si es temprano no llega agua suficiente al final de la melga, y si es tardío se forman encharcamientos.

La figura 8-3 A representa el perfil típico de la lámina de agua infiltrada a lo largo de la melga o del surco. Se observa que la lámina disminuye progresivamente desde el principio hasta el final. En el caso de surcos o melgas cerrados con nivelación distinta de cero, la acumulación de agua al final del surco o de la melga provoca un aumento del agua infiltrada en ese tramo (fig. 8-3 B).

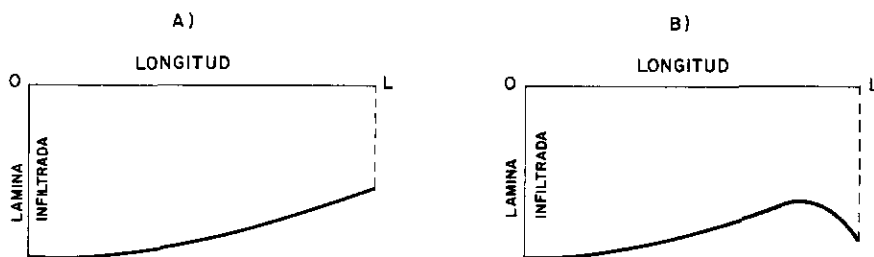


Fig. 8-3 A) Perfil típico de la lámina de agua infiltrada. B) Lámina de agua infiltrada en surcos o melgas cerradas con pendiente distinta de cero.

Como resumen de lo expuesto anteriormente se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El avance del agua es mucho más rápido al principio que al final del riego.
- La lámina de agua infiltrada crece rápidamente al principio de la infiltración, y muy lentamente al final.
- La lámina de agua infiltrada a lo largo de una melga o surco será tanto mayor cuanto mayor es el tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo, pero ambas magnitudes no son proporcionales, de tal forma que la diferencia entre las láminas infiltradas en dos puntos es menor que la diferencia de los correspondientes tiempos de contactos en dichos puntos.
- La uniformidad del riego depende de la uniformidad del tiempo de contacto en los diferentes puntos de la parcela. A su vez, la uniformidad del tiempo de contacto es tanto mayor cuanto más rápido sea el avance.
- El avance es tanto más rápido cuanto mayor sea el caudal, por lo que se procurará, en términos generales, aplicar el mayor caudal posible que no produzca erosión en el suelo.

- El momento de corte ha de producirse oportunamente, ya que si es temprano no llega agua suficiente al final de la melga o surco, y si es tardío se producen pérdidas por escurrimiento (cuando los surcos o melgas están abiertos) o encharcamientos (cuando están cerrados).

Técnicas de mejora del riego por superficie

En el riego por superficie se produce mayor porcentaje de pérdidas de agua que en otros sistemas de riego, pero esto no tiene por qué ser necesariamente así, ya que se pueden conseguir altas eficiencias cuando el agua se aplica con criterios racionales previamente estudiados.

La superficie regada por gravedad en el mundo, representa el mayor porcentaje de la superficie bajo riego, y no parece previsible que se reduzca, sino más bien que se implante en nuevas zonas donde se dan condiciones topográficas favorables, ya que este sistema de riego requiere poca inversión inicial, en comparación con otros sistemas, salvo en el caso de terrenos ondulados que exigen grandes movimientos de tierra.

Aparte de los programas de computadora para el diseño de unidades de riego, los avances técnicos más notables en riego por superficie son los siguientes:

1.º Nivelación con rayo láser

La uniformidad del riego por superficie viene condicionada, en buena medida, al estado de la nivelación. El método de nivelación convencional, topográfico, es lento, costoso y poco preciso, además de que normalmente exige operaciones de refino que aumentan el costo. El método de nivelación con rayo láser es mucho más preciso, y la ejecución, más rápida y económica.

Un equipo de rayo láser para nivelación consta esencialmente de:

- Un transmisor de rayo láser que genera un plano de luz horizontal o con pendiente de hasta el 9 %. Este transmisor se monta sobre un trípode colocado en el centro de la parcela que se pretende nivelar.
- Un receptor montado sobre un mástil hidráulico de la niveladora. Este mástil controla la posición de la cuchilla utilizando como referencia el plano de luz emitido por el receptor.
- Una consola de control montada en la cabina del tractor que arrastra a la niveladora.

Al lograrse una nivelación mucho más perfecta que con el sistema convencional se consigue una mejora indudable en la uniformidad de distribución del agua y, en consecuencia, en la eficiencia del riego. Estas ventajas son más perceptibles en el riego por compartimentos cerrados sin pendiente en donde se utilizan grandes caudales.

La nivelación con rayo láser es aconsejable, sobre todo, para labores de refino, en donde se pueden conseguir resultados óptimos con bajo costo, ya que se necesitan pocas horas de funcionamiento del equipo.

2.º *Riego intermitente o por impulsos*

Cuando se suministra agua al surco de una forma continua el avance se produce lentamente, con lo cual la oportunidad de infiltración es grande en los primeros tramos, reduciéndose progresivamente a lo largo del recorrido. Al suministrar la cantidad de agua precisa a los tramos finales, se producen pérdidas por percolación a lo largo del surco (más severas en cabecera) y por escurrimiento en el extremo del surco.

En el caso de que el surco reciba agua de forma intermitente, cuando cesa el flujo de agua las partículas de arcilla continúan su proceso de expansión, con lo cual disminuye el tamaño de los poros y se reduce la cantidad de agua infiltrada. Como consecuencia de ello, en los siguientes suministros el agua circula con mayor rapidez, consiguiéndose una mayor uniformidad en el tiempo de contacto del agua circulante con la superficie del suelo y, en suma, una mayor uniformidad de riego.

Basándose en estos hechos se ha ideado un sistema de riego que consiste en suministrar agua a los surcos de una forma intermitente. Este suministro se logra mediante una tubería de compuertas provista de una válvula (generalmente alimentada por un panel fotovoltaico) que distribuye el agua de cada compuerta alternativamente hacia dos surcos consecutivos durante intervalos de tiempo que se fijan previamente. Es preferible (aunque suponga una mayor dificultad técnica y práctica) programar los ciclos de riego de distinta duración: más largos al principio del riego, para que el mojado del surco se haga con mayor rapidez, y más cortos al final del riego, con el fin de controlar mejor el escurrimiento en el extremo final del surco.

3.º *Automatización del riego*

Los métodos de riego por superficie más susceptibles de automatizar son el riego por inundación permanente de compartimentos cerrados y el riego de surcos mediante tubería con compuertas. En el primer caso la automatización consiste en un mecanismo que controla la apertura y el cierre de las compuertas por donde fluye el agua al compartimento.

El riego de surcos mediante tubería con compuertas puede automatizarse mediante unas válvulas (eléctricas, hidráulicas o neumáticas) que controlan el flujo de agua. Estas válvulas tienen un distribuidor con tres posiciones, lo que permite dirigir el agua a uno u otro de dos grupos de surcos o a ambos a la vez. En primer lugar se riega con todo el caudal un grupo de surcos hasta que el agua llega al final; a continuación se riega de

igual forma el otro grupo de surcos, y después se riegan los dos grupos de surcos con el caudal repartido entre ambos.

4.º *Reutilización del agua de escurrimiento superficial*

El empleo de grandes caudales produce una mayor velocidad de avance del agua y una mayor uniformidad en su distribución, pero tiene el inconveniente de que se producen unas grandes pérdidas por escurrimiento al final de la parcela. Este inconveniente se puede resolver mediante la reutilización del agua sobrante, con lo cual se consigue una mejora en la eficiencia de aplicación de hasta un 25-30 %.

El agua sobrante se recoge en una zanja, se almacena en un embalse y se eleva hasta la acequia de riego mediante una estación de bombeo. (Véase la foto 2).



Foto2.
Estanque revestido con plástico.

RIEGO POR SURCOS

El riego por surcos es aconsejable para cultivos sensibles al exceso de humedad en la base de los tallos y para aquellos otros que se cultivan en hileras, tales como: maíz, papa, girasol, algodón, remolacha, etc.

En surcos largos con desagüe libre la lámina infiltrada disminuye progresivamente desde la cabecera hasta el final. Además es muy probable que se produzcan pérdidas por escurrimiento al final de los surcos, por lo que se recomienda la reutilización de estas aguas o utilizar alguna técnica de recorte de caudal. En términos generales se suele empezar el riego con caudales relativamente grandes, y se termina con caudales pequeños, con lo cual se logra un avance rápido (y en consecuencia, una mayor uniformidad en la distribución) y se reduce el escurrimiento al final de los surcos.

El riego suele realizarse en dos operaciones: mojado del surco y riego propiamente dicho. El mojado se hará lo más rápidamente posible, para que la diferencia de agua infiltrada en los extremos del surco sea lo menor posible, y ello requiere que se aporte el mayor caudal posible sin producir erosión del suelo. Cuando el agua llega al final del surco empieza el riego propiamente dicho, haciendo modificación del caudal de acuerdo con la intensidad de absorción del suelo. Hay que tener en cuenta que la velocidad de infiltración disminuye con rapidez cuando el suelo se va saturando de agua y, por consiguiente, en esta segunda etapa el agua discurre más en los primeros tramos y se infiltra más en los últimos.

En el diseño de riego por surcos se han de combinar todos los condicionantes que intervienen en la infiltración (forma, anchura, pendiente y longitud del surco y caudal preciso) para que la distribución del agua sea lo más uniforme posible (figura 8-4).

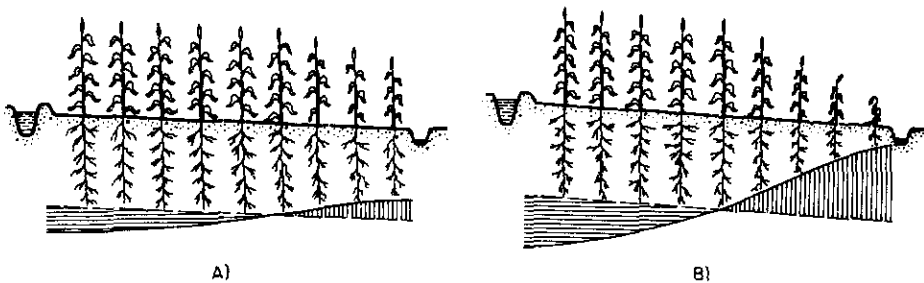


Fig. 8-4 Aprovechamiento del agua por las plantas a lo largo del surco con drenaje al final del mismo. A) Distribución prácticamente uniforme. B) Distribución no uniforme debido a gran longitud del surco y poca inclinación del mismo. (Línea continua: profundidad alcanzada por el agua. Línea discontinua: profundidad máxima de las raíces. Rayado horizontal: exceso de agua. Rayado vertical: falta de agua.)

Sección de los surcos

La sección transversal del surco ha de ser suficientemente amplia para conducir el caudal necesario. Los surcos estrechos y de poca profundidad admiten un caudal escaso, que influye negativamente sobre la eficiencia y uniformidad del riego.

La forma más corriente es la sección en «V» abierta, con una altura que varía, sobre todo, con el tipo de cultivo: para cultivos en una sola fila por surco y espaciamiento reducido se suele dar una altura de 20 cm, mientras que en cultivos a mayor espaciamiento, con una o dos filas de plantas por surco, se puede llegar hasta una altura de 80 cm. Al hacer los surcos hay que tener en cuenta que al humedecer el terreno con el primer riego se reduce la altura. (Véase la foto 3).

Los surcos de poca altura requieren una buena nivelación del terreno, para evitar desbordamientos del agua de un surco a otro.

En suelos arcillosos, con baja velocidad de infiltración, se puede aumentar el perímetro mojado haciendo los surcos en forma de «U», con una anchura del fondo de



Foto 3.
Formación de bordos para el riego por surcos.

20-40 cm en hortalizas y hasta 60 cm en frutales. En estos suelos, los surcos de sección en «U» tienen la ventaja sobre los de sección en «V» de que el perímetro mojado varía poco con la altura del agua y, por tanto, la infiltración es más uniforme (figura 8-5).

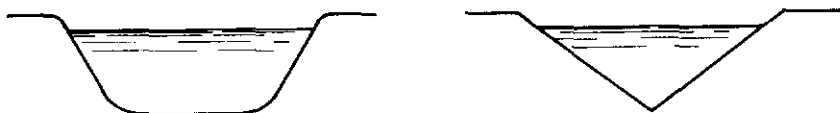


Fig. 8.5 En el surco en forma de «U» el perímetro mojado varía poco con la altura del agua, mientras que en el surco en forma de «V» varía mucho.

Separación de los surcos

La distancia entre el eje de los surcos depende de los siguientes factores: tipo de suelo, tipo de cultivo y maquinaria que se pretende utilizar.

El objetivo principal al determinar la separación de los surcos es asegurar que el movimiento lateral de agua entre dos surcos consecutivos moje la totalidad de la zona radical de la planta, antes de que alcance profundidades superiores a las previstas en el riego y existan pérdidas de agua por percolación profunda. El movimiento horizontal y vertical del agua en el suelo depende, fundamentalmente, de su textura:

- En suelos arenosos el agua penetra más en profundidad que lateralmente. En estos suelos la separación máxima de los surcos será de 50 cm.

- En los suelos de textura media se produce una infiltración compensada en sentido vertical y en sentido horizontal. Los surcos pueden tener una separación de 50 a 100 cm.
- En suelos arcillosos el agua penetra con más rapidez en sentido horizontal que en sentido vertical, con lo cual los surcos pueden tener una separación de hasta 1.50 m (figura 8-6).

Para determinar en la práctica la separación de los surcos se riega un surco con la cantidad de agua que se ha de usar normalmente. Se dejan transcurrir 48 horas para que se establezca el movimiento del agua en el suelo y, a continuación, se hace un corte en el terreno para observar el desplazamiento lateral del agua. Conviene que haya una pequeña superposición entre las zonas húmedas de dos surcos consecutivos para asegurar un humedecimiento completo.

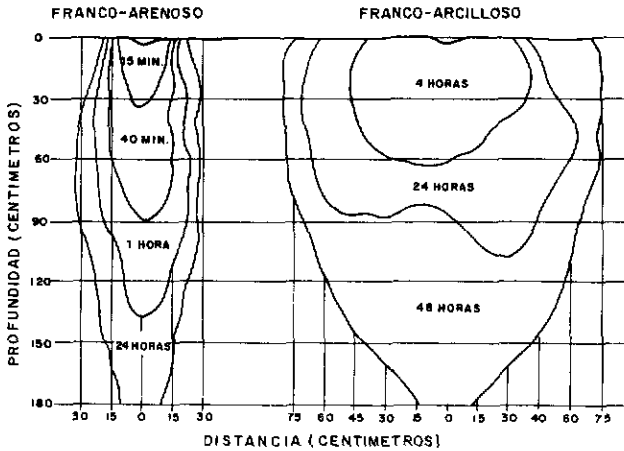
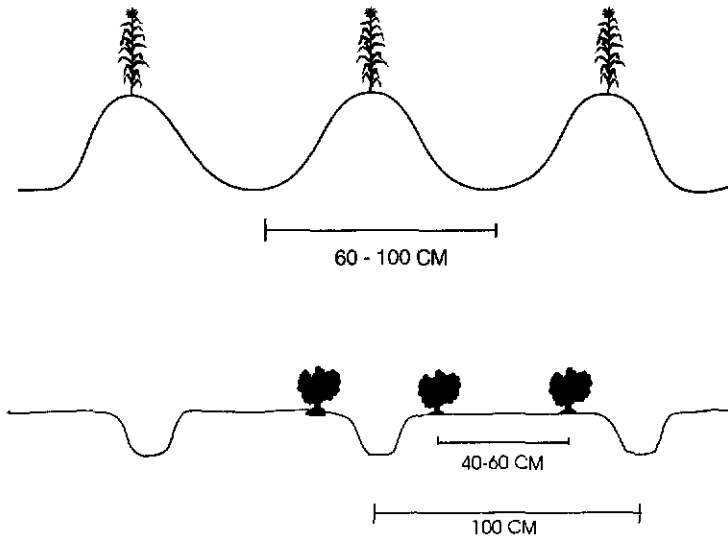


Fig. 8-6. Infiltración del agua en suelos de diferente textura. Las líneas curvas marcan la sección del suelo que se va mojando progresivamente.

Algunas veces, en la práctica, no es posible acomodar la separación de los surcos a la textura del suelo, ya que es preciso tener en cuenta el cultivo y la maquinaria. Hay cultivos, tales como el maíz, la papa, el algodón, etc., que requieren un surco entre dos filas consecutivas, con una separación entre 60 y 100 cm. En otros cultivos, como la lechuga, la zanahoria, la cebolla, etc., con un solo surco se pueden regar dos filas de plantas que se encuentran sobre el mismo bordo; lo normal es que las plantas estén situadas en los extremos del bordo, con unas separaciones respectivas de 40 y 60 cm, con lo cual los surcos tendrían una separación de 1 m. Los cultivos con marco de plantación amplio, como los frutales, requieren más de un surco entre cada dos filas de plantas. (Véase la figura de la página siguiente).

Desde el punto de vista de utilización de maquinaria para las labores de cultivo hay que tener en cuenta la anchura del implemento menos flexible.



Pendiente de los surcos

La uniformidad de riego se consigue, aparte de otras consideraciones, cuando los surcos tienen la misma pendiente en toda su longitud, pues en caso contrario se originan zonas con falta de agua y otras con exceso, pudiendo llegar a encharcamientos y desbordamientos del agua de un surco a otro. Además, en las zonas de mayor pendiente se puede originar erosión.

La velocidad del agua en el surco está en razón directa con el caudal y con la pendiente, y en razón inversa de la rugosidad del surco.

Al aumentar la pendiente de los surcos aumenta la velocidad del agua y existe más peligro de erosión. Son más erosionables los suelos arenosos que los arcillosos. La pendiente óptima está comprendida entre 0.2 y 0.5 %, pudiendo llegar hasta un máximo del 2 %. Con caudales pequeños y surcos cortos se pueden sobrepasar estas cifras, a condición de que haya una mano de obra muy experimentada.

Cuando la parcela tiene una pendiente excesiva en sentido longitudinal los surcos se orientan en sentido oblicuo. En este caso hay que dar a los surcos el tamaño suficiente para evitar los desbordamientos. Cuando por excesiva pendiente no sea posible conseguir surcos en sentido diagonal se recurre a los surcos en contorno, siguiendo ligeramente las curvas de nivel. Estos surcos en contorno pueden tener mayor pendiente que los surcos rectos y son aceptables en parcelas que tengan hasta el 10 % de pendiente máxima.

En surcos con pendiente alta se puede disminuir la velocidad del agua poniendo en el fondo de los mismos plantas no sensibles al exceso de humedad en la base del tallo, como el maíz.

Longitud de los surcos

La longitud de los surcos viene condicionada por los siguientes factores:

- *Economía*: A medida que disminuye la longitud de los surcos aumentan las necesidades de mano de obra y los costos de la instalación, ya que los surcos cortos exigen mayor longitud de acequias o tuberías de abastecimiento, que dificultan el uso de maquinaria, y se incrementa la superficie que queda improductiva.
- *Textura del suelo*: En suelos de textura arenosa hay que limitar la longitud de los surcos, para evitar la larga permanencia del agua en los primeros tramos del surco, con las consiguientes pérdidas por percolación profunda.
- *Cultivo*: Las plantas de raíces profundas necesitan mayor dosis de riego que las de raíces someras; por tanto, en aquéllas se puede aumentar la longitud de los surcos, con el fin de incrementar la permanencia del agua en los mismos.

A la vista de estas consideraciones habrá que buscar un equilibrio entre las consecuencias que se derivan de los surcos largos (más económicos) o cortos (mayor eficiencia de riego). Como regla general se puede aconsejar hacer los surcos tan largos como sea posible, a condición de que se tenga controlada la erosión y haya una eficiencia de riego razonable. Los surcos cortos pueden ser convenientes en el cultivo de hortalizas, que requieren una mano de obra abundante y en donde, en muchos casos, los surcos y bordos se construyen a mano. (Véase la foto 4).



Foto 4.
Variante de riego por surcos cortos
formando compartimientos cerrados.

Por lo general, en suelos arenosos los surcos deben ser más cortos que en suelos arcillosos. Con pendientes suaves (inferiores al 0.3 %) la longitud del surco puede aumentar a medida que aumenta la pendiente, pero a partir de esa cifra es preciso disminuir la longitud del surco a medida que aumenta la pendiente, ya que debe reducirse el caudal de agua para evitar la erosión.

En la tabla 1 se dan unas normas orientativas de longitud de surco en función de su pendiente, la textura del suelo y la altura de agua aplicada. En la práctica conviene hacer las comprobaciones pertinentes para adecuar estas cifras en cada caso particular.

Tabla 1: *Longitudes máximas de surcos para diferentes suelos, pendientes y profundidades de agua aplicada (FAO)*

Pendiente del surco	Arcillas				Limos				Arenas			
	Profundidad media de agua aplicada (cm)											
	7.5	15	22.5	30	5	10	15	20	5	7.5	10	12.5
Porcentaje Metros											
0.05	300	400	400	400	120	270	400	400	60	90	150	190
0.1	340	440	470	500	180	340	440	470	90	120	190	220
0.2	370	470	530	620	220	370	470	530	120	190	250	300
0.3	400	500	620	800	280	400	500	600	150	220	280	400
0.5	400	500	560	750	280	370	470	530	120	190	250	300
1.0	280	400	500	600	250	300	370	470	90	150	220	250
1.5	250	340	430	500	220	280	340	400	80	120	190	220
2.0	220	270	340	400	180	250	300	340	60	90	150	190

Caudal de riego

El caudal de cada surco se debe ajustar a la longitud y pendiente del mismo y a la naturaleza del suelo. A mayor caudal corresponde un avance más rápido del agua en el surco. Por lo general, el mayor aprovechamiento del riego se consigue cuando el mojado del surco se hace con el avance más rápido posible, y ello requiere utilizar el máximo caudal que no cause erosión (*caudal máximo no erosivo*). Una vez que el agua ha llegado al extremo del surco se reduce el caudal de forma que satisfaga únicamente los requerimientos de la velocidad de infiltración, y se mantiene hasta el final del riego (*caudal permanente*).

En surcos largos el caudal máximo no erosivo se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{36}{P}$$

Q = Caudal máximo no erosivo expresado en litros/minuto.

P = Pendiente del surco expresada en porcentaje.

Los valores obtenidos con esta fórmula son adecuados para suelos de textura media y con pendiente superior al 0.15 %. En suelos arcillosos se puede aumentar el caudal, y en los arenosos habrá que disminuirlo.

El caudal permanente se calcula de acuerdo con la velocidad media de infiltración en el surco. Los valores de la velocidad de infiltración para distintos tipos de suelo son los siguientes:

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Velocidad de infiltración (litros/minuto y por cada 100 m)</i>
Arcilla compacta	0-12
Arcillo-limoso a arcilloso	6-25
Franco-arcilloso a franco limoso	12-25
Franco-limoso a franco	12-35
Franco-arenoso	20-125
Arenoso-franco	60-175

El tiempo de riego será el necesario para suministrar la dosis de riego. Si esta dosis de riego se suministra con el caudal permanente se tiene seguridad de que las plantas del final del surco disponen de la cantidad necesaria de agua, pero seguramente habrá una percolación profunda importante en los primeros tramos cuando el surco es demasiado largo. Para conocer con mayor exactitud la cantidad de agua que aportan en cada tramo el caudal máximo y el caudal permanente se recurre a ensayos en el propio campo.

Ensayos para la determinación de caudales y longitudes de surco

Estos ensayos se realizan sobre surcos de pendiente conocida y uniforme y con una humedad del suelo cercana al punto de marchitamiento. Los resultados sólo serán válidos para suelos que presenten condiciones análogas.

Determinación del caudal máximo no erosivo

Para determinar el caudal máximo no erosivo se preparan varios surcos y se deja fluir el agua aplicando caudales distintos. Durante los cinco primeros minutos del paso del agua por cualquier punto del surco se produce alguna erosión y el agua pasa oscura; pero pasado ese tiempo no se deben producir cortes verticales en los bordos del surco y el agua debe correr limpia. Después de terminar la aplicación del agua se comprueba si al final de los surcos se ha producido algún azolve de tierra arrastrada.

Determinación de la velocidad de infiltración

Para determinar la infiltración en los surcos (véase Capítulo 1) se toma un tramo de surco (por ejemplo, 40 m) y se alimenta con un caudal constante. Se afora el agua con el aforador Parshall al final del tramo, con diversos intervalos de tiempo, hasta comprobar que el caudal se hace constante. (Véase la foto 5). La diferencia entre el caudal de entrada y el de salida es la infiltración del agua en el surco, que se mide en mm de altura de agua por hora. La velocidad de infiltración debe ser superior a 5 mm/hora e inferior a 100 mm/hora.

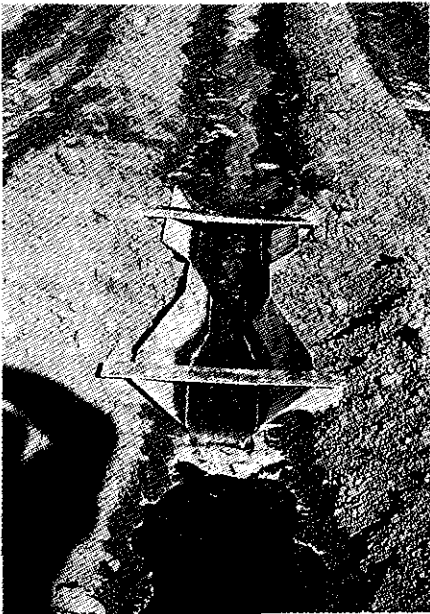


Foto 5.
Aforador Parshall.

Ejemplo

En un tramo de surco de 40 m de longitud y 0.75 m de anchura se ha hecho un ensayo de infiltración con un caudal de entrada de 45 litros/minuto. Calcular la infiltración sabiendo que el caudal de salida ha sido de 30 litros/minuto. Calcular también el tiempo de riego y el tiempo de mojado sabiendo que las raíces alcanzan una profundidad de 90 cm y que la capacidad de almacenamiento del agua fácilmente utilizable es de 150 mm/m de profundidad.

Solución:

Caudal que se infiltra en el surco:

$$45 - 30 = 15 \text{ litros/minuto} = 15 \times 60 = 900 \text{ litros/hora}$$

Caudal que se infiltra por m²:

$$\frac{900}{40 \times 0.75} = \frac{900}{30} = 30 \text{ litros/m}^2 \cdot \text{hora}$$

Teniendo en cuenta que 1 litro/m² = 1 mm de altura de agua.

$$\text{Velocidad de infiltración} = 30 \text{ mm/hora}$$

Las plantas extraen la mayor parte del agua en los 2/3 de profundidad de su sistema radical. Consideramos sólo esta profundidad.

$$\text{Profundidad útil} = 90 \times \frac{2}{3} = 60 \text{ cm}$$

Almacenamiento de agua fácilmente disponible:

$$150 \times 0.60 = 90 \text{ mm}$$

Tiempo de riego:

$$\frac{\text{Agua fácilmente disponible}}{\text{Velocidad de infiltración}} = \frac{90}{30} = 3 \text{ horas}$$

Se estima que el tiempo de mojado (el agua llega al final del surco) ha de ser 1/4 del tiempo de riego.

$$\text{Tiempo de mojado} = \frac{3}{4} = 0.75 \text{ horas} = 0.75 \times 60 = 45 \text{ minutos}$$

Determinación de la longitud del surco

En un surco se colocan estacas distanciadas 20 m y se aplica el caudal máximo no erosivo, anotando las horas en que el agua entra en el surco y va llegando sucesivamente a las estacas. Se hace un gráfico llevando distancias y tiempo a unos ejes de coordenadas (figura 8-7).

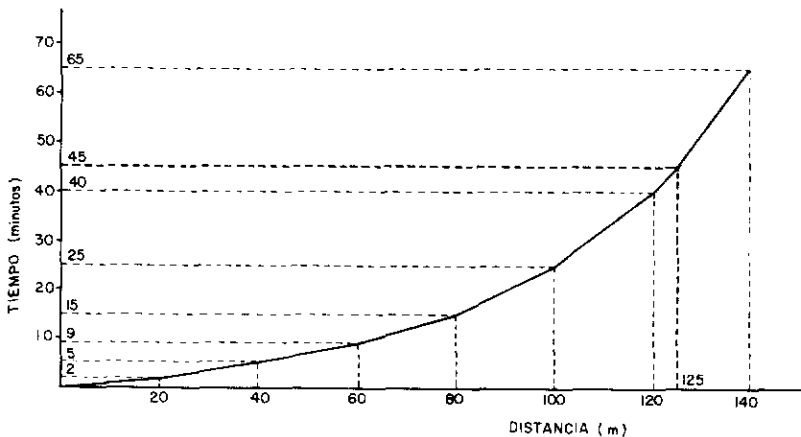


Fig. 8-7 Curva de avance del agua en el surco.

<i>Distancia al origen (m)</i>	<i>Tiempo (minutos)</i>
0	0
20	2
40	5
60	9
80	15
100	25
120	40
140	65

El agua ha de llegar al final del surco en 1/4 del tiempo de riego. En el ejemplo anterior el tiempo de mojado es de 45 minutos. En el gráfico se toma en ordenadas el punto correspondiente a 45 minutos, que corresponde en el eje de abscisas a una longitud de surco de 125 m.

Práctica del riego

Se llama *unidad de riego* al número de surcos que se abastecen de una toma y que se riegan de una sola vez. Habitualmente se compone de 4 a 10 surcos. Un regador puede manejar un caudal de 30 a 100 litros/seg según su pericia, caudal disponible, preparación del terreno, etc.

Una forma práctica de realizar el riego consiste en mojar sucesivamente varias unidades de riego y después proceder al riego propiamente dicho de esas unidades.

Ejemplo

Se pretende regar una parcela cuyos surcos tienen una longitud de 150 m y una pendiente del 0.2 %. El suelo es de textura media, con una velocidad de infiltración de 30 litros/minuto por cada 100 m. Se dispone de un caudal de abastecimiento de 30 litros/seg.

Solución:

Caudal máximo no erosivo:

$$Q = \frac{36}{P} = \frac{36}{0.2} = 180 \text{ litros/minuto} = 3 \text{ litros/seg}$$

Caudal permanente:

$$0.3 \text{ litros/minuto} \cdot m \times 150 \text{ m} = 45 \text{ litros/minuto} = 0.75 \text{ litros/seg}$$

Unidad de riego:

$$\frac{\text{Caudal de abastecimiento}}{\text{Caudal máximo no erosivo}} = \frac{30}{3} = 10 \text{ surcos}$$

Número de unidades de riego comprendidas en una tanda de riego:

$$\frac{\text{Caudal máximo no erosivo}}{\text{Caudal permanente}} = \frac{3}{0.75} = 4$$

En primer lugar se moja la primera unidad de riego, con un caudal de 3 litros/seg por surco, y a continuación se mojan sucesivamente las otras tres unidades que componen la tanda. Una vez mojadas las 4 unidades se deja correr el agua por las 4 a la vez, con un caudal de 0.75 litros/seg por surco, hasta que se completa la dosis prevista.

En muchos lugares no efectúan el riego en dos operaciones (mojado y riego propiamente dicho), sino en una sola. En estos casos se utiliza un caudal superior al caudal permanente, pero inferior al caudal máximo no erosivo. El regador distribuye el agua entre los surcos que componen la unidad de riego y corta el flujo de agua a esa unidad cuando falta por regar $1/4$ ó $1/5$ de la longitud del surco, comprobando que el agua que discurre después de cortar el flujo de agua es suficiente para regar la totalidad del surco.

En otras ocasiones, cuando el agua llega a los $3/4$ de longitud del surco se reduce el caudal a la mitad y se mantiene ese caudal hasta que el regador experimentado estime oportuno. Para regular caudales y tiempos conviene hacer pozos de observación después del primer riego, con la finalidad de comprobar la infiltración a lo largo del surco.

Se puede aprovechar el sobrante de agua de los surcos dejando que retroceda hasta los surcos secos próximos, o bien llevándolo a un canal de desagüe de forma que se pueda utilizar en parcelas situadas aguas abajo.

Cuando la pendiente es muy reducida y los surcos muy cortos se utiliza un caudal elevado para llenarlos con rapidez. Posteriormente se corta el flujo de agua y se deja que el agua contenida en los surcos se infiltre. Cuando la pendiente supera el 0.5 % y el suelo tiene una permeabilidad reducida, los surcos cortos se trazan siguiendo las curvas de nivel y se enlaza el final de cada uno de ellos con el principio del siguiente. De esta forma el agua tiene que hacer un recorrido en zig-zag, con lo que se reduce su velocidad y aumenta la infiltración a través de los surcos (figura 8-8).

Regulación del flujo de agua a los surcos

Por lo general los surcos se trazan en la dirección de la pendiente del terreno, o en sentido diagonal a ella cuando la pendiente es excesiva. En estos casos las acequias de abastecimiento siguen, aproximadamente, las curvas de nivel en la cabecera de los surcos.

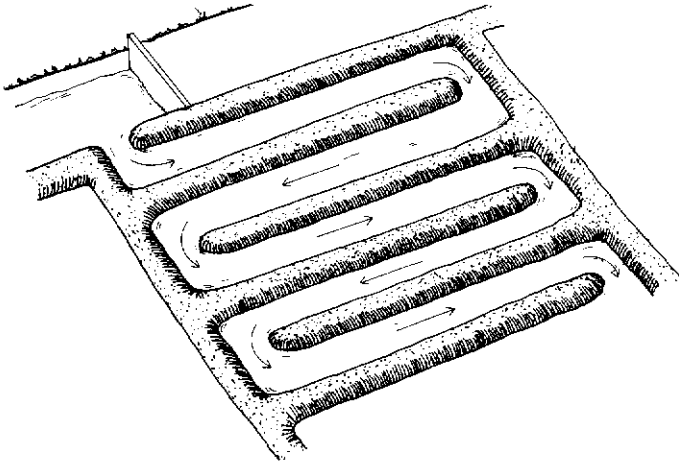


Fig. 8-8 Surcos en zig-zag.

Existen diferentes formas de derivar el agua desde la acequia de abastecimiento hasta los surcos. Estas formas dependen de diversos factores: tipo de suelo, tipo de cultivo, caudal de agua disponible, etc. Las más usuales son las siguientes:

1. *Derivación directa:* El agua va directamente desde la acequia de abastecimiento hasta los surcos. Esta derivación se hace rompiendo el borde de la acequia e introduciendo el agua simultáneamente en un determinado número de surcos (unidad de riego), procurando repartir el caudal por igual entre cada uno de ellos. (Véase la foto 6). Una vez finalizado el riego de esta unidad se tapa el boquete de entrada del agua y se abre otro enfrente de la unidad de riego siguiente (figura 8-9).

Para evitar la apertura y tapado de boquetes en los bordes de la acequia se puede poner una caja de derivación provista de una pequeña compuerta que permita graduar la entrada del agua.

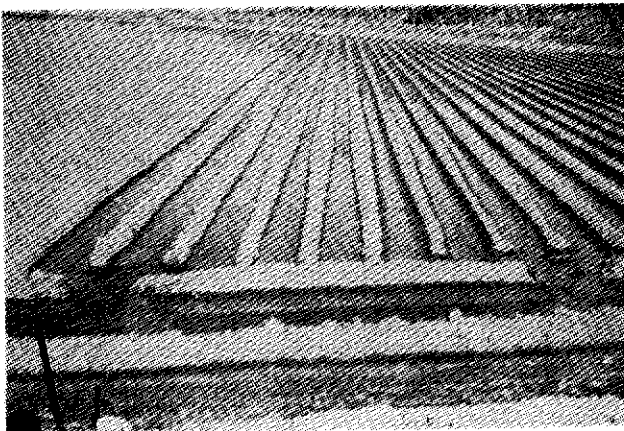


Foto 6.
Riego por surcos mostrando el caudal dividido en varios módulos.

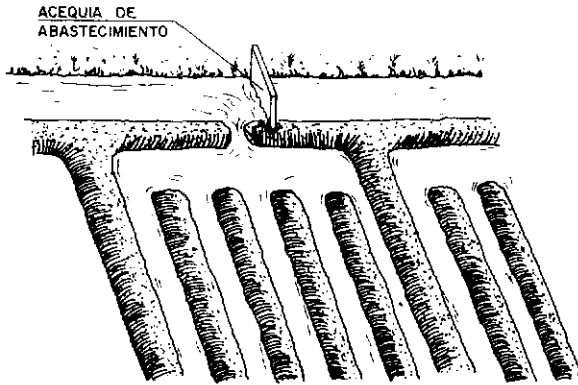


Fig. 8.9 Alimentación directa desde la acequia de abastecimiento hasta los surcos.

2. *Derivación mediante una acequia auxiliar:* Para evitar la apertura de boquetes en la acequia de alimentación se puede hacer una acequia auxiliar, paralela a la anterior, en donde se abran los boquetes para derivar el agua hacia los surcos.

En ocasiones la acequia auxiliar se divide en unos compartimientos (zona auxiliar de estancamiento), a donde entra el agua desde la acequia de abastecimiento mediante una caja de derivación. El acceso de agua de esta zona auxiliar hasta los surcos puede hacerse mediante unos tubos cortos de igual diámetro que se colocan sobre el bordo de la acequia a la misma altura, con el fin de que la distribución del agua en los surcos sea uniforme. Esto permite aforar el agua y determinar el tiempo de riego (figuras 8-10 y 8-11).

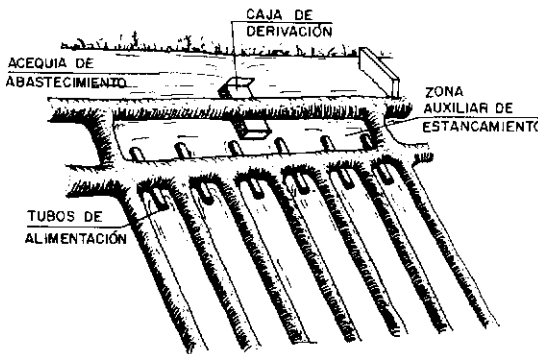


Fig. 8-10 Alimentación desde la acequia de abastecimiento hasta los surcos por intermedio de una zona auxiliar de estancamiento.

3. *Derivación mediante sifones:* Los sifones son unos tubos flexibles o de forma curvada construidos de plástico o de aluminio. Con su empleo es fácil controlar el abastecimiento de agua a los surcos, ya que el caudal del sifón depende de

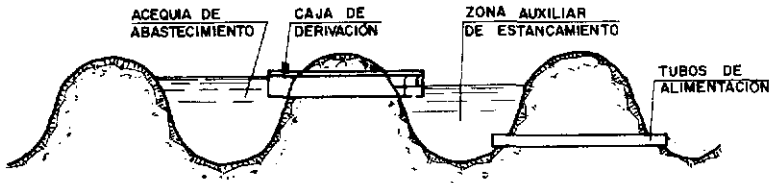


Fig. 8-11 Derivación del agua mediante cajas de derivación y tubos de alimentación.

su diámetro y de la carga hidrostática. Esta es igual a la diferencia de altura existente entre la superficie del agua de la acequia y el centro de la salida del sifón, o la superficie del agua en el surco cuando la salida del sifón está sumergida (figuras 8-12 y 8-13).

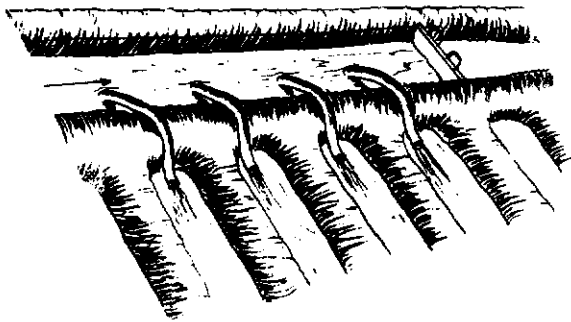


Fig. 8-12 Derivación del agua a los surcos mediante sifones.



Fig. 8-13 Perspectiva de la derivación de la acequia a los surcos mediante sifones (h es la altura hidrostática o carga hidráulica).

Para colocar cada sifón se llena totalmente de agua sumergiéndolo en la acequia. Luego se tapa un extremo con la mano y se pasa sobre el surco. Al quitar la mano el agua fluye sobre el surco.

En la tabla 2 se indica el flujo de agua a través de sifones y tubos cortos para diferentes cargas hidrostáticas y diámetros.

Ejemplo

Para el riego de surcos de 180 m de largo y 0.80 m de ancho se utiliza un caudal de 2 litros/seg durante el tiempo de mojado y de 0.5 litros/seg durante el tiempo de

Tabla 2: Caudal a través de pequeños sifones y tubos cortos (FAO)

Diámetro del sifón o tubo (en cm)	Carga hidrostática (en cm)							
	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
 l/seg							
1	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09
2	0.13	0.19	0.23	0.26	0.30	0.32	0.35	0.37
3	0.30	0.42	0.51	0.59	0.66	0.73	0.79	0.84
4	0.53	0.75	0.91	1.06	1.18	1.29	1.40	1.49
5	0.83	1.17	1.43	1.65	1.85	2.02	2.18	2.33
6	1.19	1.68	2.06	2.38	2.66	2.91	3.14	3.36
7	1.62	2.29	2.80	3.24	3.62	3.96	4.28	4.58
8	2.11	2.99	3.66	4.23	4.72	5.18	5.59	5.98
9	2.67	3.78	4.63	5.35	5.98	6.55	7.07	7.56
10	3.30	4.67	5.72	6.60	7.38	8.09	8.73	9.34

riego. Calcular el tiempo de riego y los sifones de alimentación a los surcos, sabiendo que se tiene que aplicar una altura de agua de 50 mm. La carga hidrostática de los sifones es de 7.5 cm.

Solución:

Caudal de riego:

$$0.5 \text{ litros/seg} = 0.5 \times 3,600 = 1,800 \text{ litros/hora}$$

$$\frac{1,800}{180 \times 0.80} = 12.5 \text{ litros/m}^2 \cdot \text{hora}$$

Sabiendo que 1 litro/m² = 1 mm de altura de agua.

$$\text{Infiltración} = 12.5 \text{ mm/hora}$$

$$\text{Tiempo de riego} = \frac{50}{12.5} = 4 \text{ horas}$$

La tabla 2 nos indica que para una carga hidrostática de 7.5 cm, el sifón de 3 cm de diámetro da un caudal de 0.51 litros/seg. Durante el tiempo de mojado se ponen 4 sifones de 3 cm de diámetro y durante el tiempo de riego se deja uno de los 4 sifones.

Otras formas de alimentación de los surcos son las tuberías portátiles, que pueden ser de aluminio, PVC o polietileno. (Véanse las fotos 7 y 8). Trabajan con presiones muy bajas y pueden conectarse a una tubería de baja presión o a una toma con compuerta de una acequia. Van provistas de salidas espaciadas que coinciden con la separación de los surcos: Estas salidas pueden ser simples orificios de un determinado diámetro, de acuerdo con el caudal que se desea obtener, o compuertas de salida con regulación de caudal (figura 8-14).



Foto 7.
Riego por surcos mediante tubería de plástico perforada.



Foto 8.
Riego por surcos mediante tubería de aluminio con orificios de tamaño graduable.

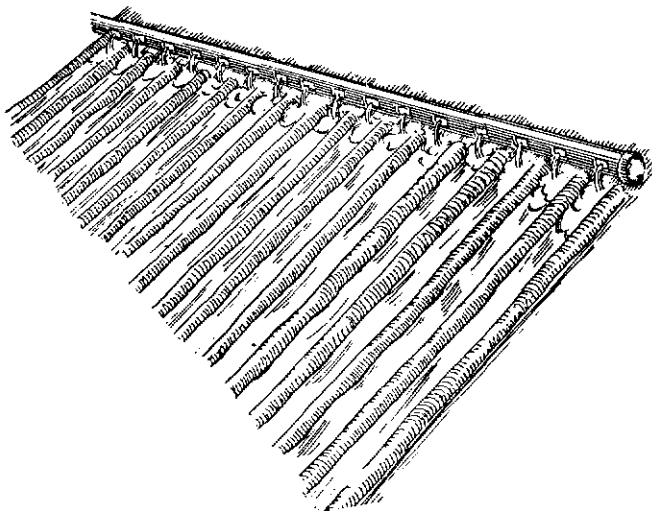


Fig. 8-14 Alimentación de los surcos mediante tuberías portátiles o multicompuertas.

RIEGO POR ESCURRIMIENTO

En este método de riego el terreno se divide en porciones rectangulares, estrechas, llamadas *fajas*, *amelgas*, *melgas* o *tablares*, separados unos de otros mediante bordos dispuestos longitudinalmente.

Se hacen acequias de abastecimiento en el extremo superior de las fajas y canales de desagüe en el extremo inferior. El agua discurre a lo largo de las fajas formando una lámina delgada que se va filtrando paulatinamente (figura 8-15).

Los bordos se construyen en sentido perpendicular a las curvas de nivel y han de tener una altura suficiente para contener el agua dentro de las fajas sin que se produzcan desbordamientos. Hay que tener en cuenta que al efectuar el primer riego baja la altura de los bordos, por lo que inicialmente tendrán una altura de 50-60 cm. La anchura de su base dependerá de la estabilidad del suelo humedecido: en suelos arcillosos basta una anchura de 60-80 cm, mientras que en suelos arenosos puede llegar a 100-120 cm.

Los bordos suelen tener una longitud menor que las fajas: en fajas largas terminan 10-20 m antes de llegar al final, y en fajas cortas, 5-10 m antes del final.

Este método de riego se utiliza, sobre todo, en cultivos de cobertera, tales como alfalfa, pastos y cereales. (Véase la foto 9). Los suelos más adecuados son los de textura media con buena permeabilidad, pero también se puede utilizar en suelos arcillosos y arenosos. En los arcillosos el agua ha de distribuirse con lentitud, para facilitar su penetración en toda la profundidad de las raíces, mientras que en los suelos arenosos la distribución del agua ha de ser rápida, para evitar la pérdida de agua por percolación profunda.

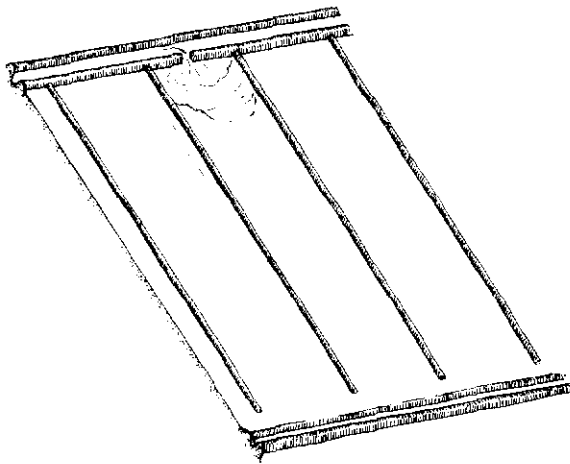


Fig. 8-15 Riego por fajas, con acequia de abastecimiento en la cabecera de las fajas y canal de desagüe en el extremo opuesto.

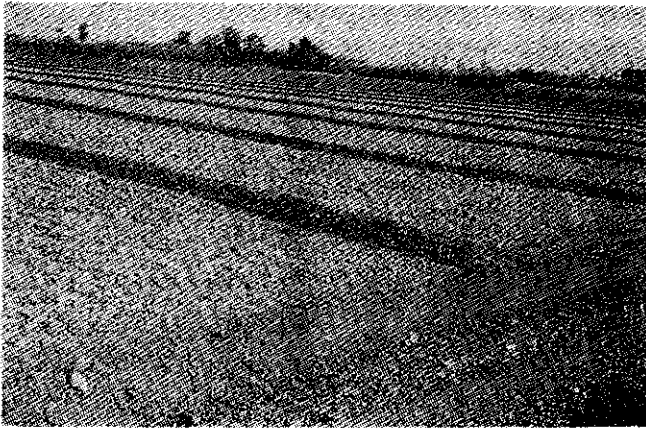


Foto 9.
Parcela preparada para el
riego por fajas o melgas.

La velocidad de distribución del agua en las fajas viene determinada por los siguientes factores: longitud y anchura de la faja, pendiente del suelo y caudal de agua.

Pendiente de las fajas

Las pendientes longitudinales más recomendadas están comprendidas entre 0.2 y 0.5 %. En suelos arcillosos y cultivos de raíces profundas se pueden utilizar pendientes próximas al 0 %, y en suelos arenosos pueden llegar hasta el 2 %. Con pendientes muy pequeñas puede haber problemas de encharcamiento en épocas de lluvias, por lo que conviene disponer un drenaje adecuado.

En la cabecera de la faja se suele construir una franja horizontal que abarca toda la anchura de la faja y una longitud de unos 10 m; tiene por finalidad extender el agua de forma uniforme desde la acequia de alimentación.

La pendiente transversal debe ser prácticamente nula, aunque se puede aceptar una diferencia de altura de 5-6 cm entre dos bordos consecutivos. Estos se construyen en sentido perpendicular a las curvas de nivel, con lo cual la pendiente transversal se reduce al mínimo. Tanto la pendiente longitudinal como la transversal han de ser muy uniformes, con el fin de conseguir una buena distribución del agua.

Una variante del riego por fajas es el riego por acequias de contorno, que se utiliza cuando la pendiente es muy pronunciada, como ocurre en zonas de montaña. Se construyen acequias de abastecimiento siguiendo ligeramente las curvas de nivel y se hace rebosar el agua para regar las fajas comprendidas entre dos acequias consecutivas. El agua sobrante de cada faja se recoge en la acequia situada a nivel inferior (figura 8-16).

Anchura de las fajas

La anchura de las fajas viene condicionada por la pendiente del suelo y la anchura de la maquinaria que se utilice. Las anchuras recomendadas, según las pendientes, son las siguientes:

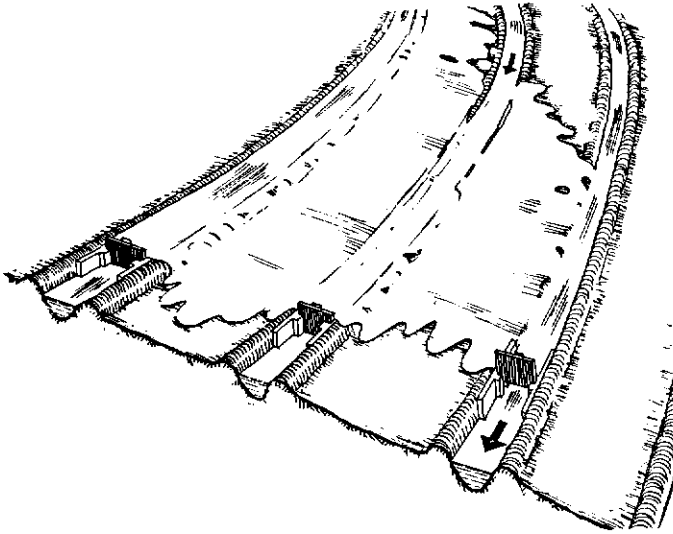


Fig. 8-16 Riego por acequias de contorno.

	<u>Anchura (m)</u>
Pendiente longitudinal:	
De 0.2 a 0.4 %	10-20
De 0.4 a 0.5 %	<10
Pendiente transversal:	
De 0 a 0.1 %	20
De 0.1 a 0.2 %	<12
Mayor de 0.2 %	6-8

Siempre que sea posible, la anchura de la faja debe ser un múltiplo de la anchura de trabajo de la maquinaria menos flexible que se pretenda utilizar.

Longitud de las fajas

Las fajas deben tener la mayor longitud posible, siempre que se obtenga una eficiencia aceptable de riego. Ello se debe a que los gastos de implantación del riego y las pérdidas de superficie cultivada invertidas en acequias de abastecimiento y canales de desagüe disminuyen a medida que aumenta la longitud de las fajas.

La longitud de las fajas viene determinada por los siguientes factores:

- *La velocidad de infiltración*, que, a su vez, depende del tipo de suelo. A mayor velocidad de infiltración corresponde menor longitud. En suelos arcillosos, con baja velocidad de infiltración, se pueden sobrepasar los 500 m; en suelos de

textura media la longitud más razonable está comprendida entre 80 y 200 m; y en suelos arenosos no se deben sobrepasar los 80 m.

- *El caudal de agua.* A mayor caudal corresponde mayor longitud. Cuando el caudal es escaso hay que reducir la superficie de la faja, ya sea en anchura o en longitud, con el fin de cubrirla de agua en un tiempo razonable y evitar pérdidas excesivas por percolación en el extremo superior. Como norma general resulta más barato reducir la anchura que la longitud.
- *El tipo de cultivo.* Aquellos cultivos que oponen menor resistencia a la circulación del agua limitan la longitud de la faja.

Caudal

El caudal que se debe aplicar a cada faja viene en función de la naturaleza del suelo y de las dimensiones de las fajas. Como norma general se deberá utilizar el máximo caudal que no provoque erosión. Como datos orientativos se incluyen las tablas 3 y 4, aunque en cada caso particular habrá que hacer las rectificaciones que exijan las pruebas de campo. Por otro lado, el tiempo de aplicación del riego viene dado por la fórmula:

$$T = \frac{H \times S}{3,600 \times Q}$$

T = Tiempo, expresado en horas.

H = Altura de agua a aplicar, expresada en mm.

S = Superficie de la faja, expresado en m².

Q = Caudal, expresado en l/seg.

Tabla 3: Normas de diseño de fajas para cultivos de raíces someras (FAO)

Tipo de suelo	Pendiente	Flujo unidad por metro de anchura del tablar	Altura media de agua aplicada	Faja	
				Anchura	Longitud
	%	l/seg	mm Metros	
Franco arcilloso	0.15-0.6	6-8	50-100	5-18	90-180
(0.6 m de profundidad sobre subsuelo permeable	0.6-1.5	4-6	50-100	5-6	90-180
	1.5-4.0	2-4	50-100	5-6	90
Arcilloso	0.15-0.6	3-4	100-150	5-18	180-300
(0.6 m de profundidad sobre subsuelo permeable)	0.6-1.5	2-3	100-150	5-6	180-300
	1.5-4.0	1-2	100-150	5-6	180
Franco	1.0-1.4	1-4	25-75	5-6	90-300
(0.15 a 0.45 m de profundidad sobre capa dura)					

Tabla 4: Normas de diseño de fajas para cultivos de raíces profundas (FAO)

Tipo de suelo	Pendiente	Flujo unidad por metro de anchura del tablar	Altura media de agua aplicada	Faja	
				Anchura	Longitud
	%	l/seg	mm Metros	
Arenoso	0.2-0.4	10-15	100	12-30	60-90
(Velocidad de infiltración de 2.5 cm por hora)	0.4-0.6	8-10	100	9-12	60-90
	0.6-1.0	5-8	100	6-9	75
Arenoso franco	0.2-0.4	7-10	125	12-30	75-150
(Velocidad de infiltración de 1.8 a 2.5 cm por hora)	0.4-0.6	5-8	125	9-12	75-150
	0.6-1.0	3-6	125	6-9	75
Franco arenoso	0.2-0.4	5-7	150	12-30	90-250
(Velocidad de infiltración de 1.2 a 1.8 cm por hora)	0.4-0.6	4-6	160	6-12	90-180
	0.6-1.0	2-4	160	6	90
Franco arcilloso	0.2-0.4	3-4	175	12-30	180-300
(Velocidad de infiltración de 0.6 a 0.8 cm por hora)	0.4-0.6	2-3	175	6-12	90-180
	0.6-1.0	1-2	175	6	90
Arcilloso	0.2-0.3	2-4	200	12-30	350+
(Velocidad de infiltración de 0.25 a 0.6 cm por hora)					

Como norma práctica, para regar en fajas se combinan, mediante ensayos, el caudal y el tiempo de aplicación, de tal forma que cuando se haya aplicado el volumen de agua precisa, ésta cubra, aproximadamente, las 3/4 partes de la longitud de la faja. Posteriormente el agua que está sobre la superficie fluye hacia el extremo inferior completando el riego. Con esta práctica se suele conseguir una uniformidad de riego aceptable.

Ensayos para determinar el caudal

En primer lugar se determina la velocidad de infiltración mediante infiltrómetro de anillos (véase Capítulo 1). Se añade una determinada altura de agua al anillo central y se determina el descenso en distintos períodos. Se considera la velocidad de infiltración básica cuando la variación de altura entre dos determinaciones consecutivas es inferior al 10 %. Se termina también la lámina de agua acumulada durante el tiempo transcurrido.

El caudal a utilizar debe ser el máximo que no provoque erosión, teniendo en cuenta, además, los siguientes factores: velocidad de infiltración, pendiente del terreno, dimen-

siones de las fajas y lámina de agua aplicada. La figura 8-17 muestra la relación entre estos factores. El caudal unitario está referido a 10 m² de faja y a una pendiente del 0.5 %. Para otras pendientes se corrigen los valores obtenidos mediante los coeficientes de la figura 8-18.

El caudal total Q_t será igual a:

$$Q_t = \frac{Q_u \times S}{10}$$

Q_t = Caudal total, expresado en l/seg.

Q_u = Caudal unitario, expresado en l/seg.

S = Superficie de la faja, en m².

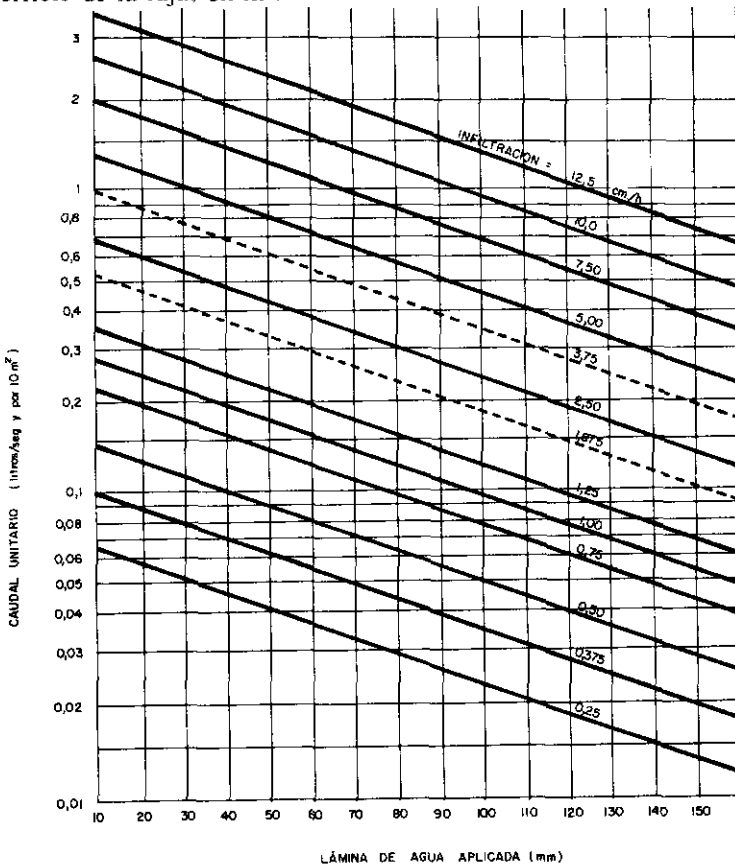


Fig. 8-17

En un suelo uniforme, la cantidad de agua aplicada al terreno en cada punto depende del tiempo que ésta permanezca sobre su superficie. Por tanto, para evaluar la uniformidad de riego se mide el tiempo que el agua tarda en circular sobre cada unidad de longitud. Esto se puede hacer colocando estacas, a intervalos regulares de 20-30 m, en una línea longitudinal del tablár. Se toman los tiempos de comienzo del riego y de

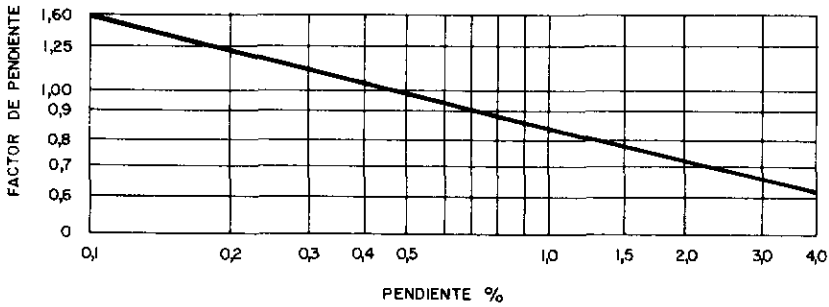


Fig. 8-18

llegada a cada estaca e, igualmente, los tiempos en que se corta el riego y cuándo retrocede de cada estaca. Con las dos series de tiempos se calcula el tiempo de permanencia del agua en cada punto. Si este período es el mismo o suficientemente cercano en todos los puntos, puede considerarse que el riego es uniforme.

RIEGO POR INUNDACION

El terreno se divide en *compartimientos, fajas o tablares cerrados*, dentro de los cuales se vierte un caudal superior a la velocidad de infiltración, quedando el agua estancada hasta que penetra en el suelo (figura 8-19). La nivelación se hace con pendiente cero.

La separación de los compartimientos se hace por medio de diques o bordos, de unos 50 cm de altura, sobrepasando en 20 cm el nivel de la lámina de agua. Al construir

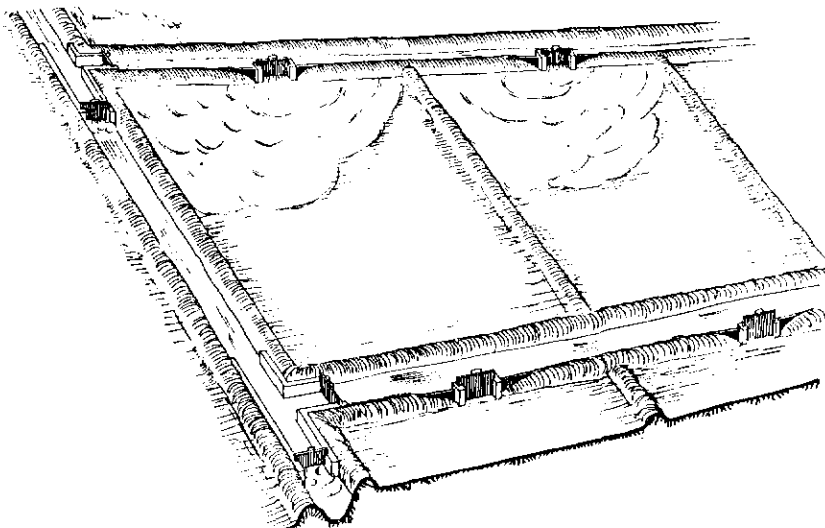


Fig. 8-19 Riego por compartimientos cerrados.

los bordos hay que hacerlos un poco más altos, para compensar la pérdida de altura que se produce al dar el primer riego. La anchura de los bordos en la coronación oscila entre 40 y 50 cm. Los taludes se construyen con una inclinación de 45° o más.

El agua se lleva a los compartimentos por medio de acequias provistas de compuerta de salida. En ocasiones algunos compartimentos se alimentan por desbordamiento del agua del compartimento situado encima (figura 8-20).

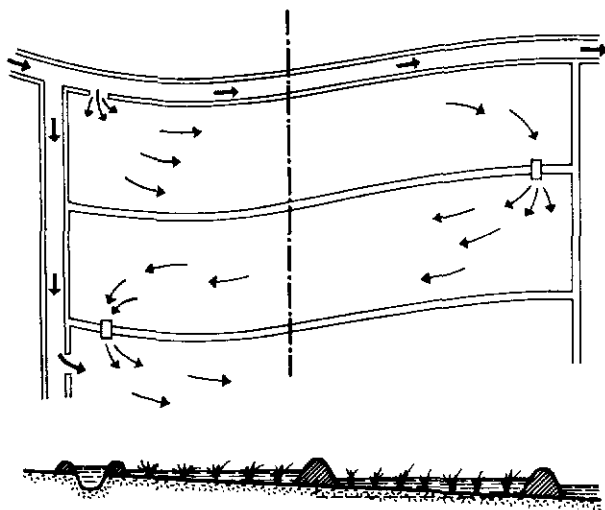


Fig. 8.20 Alimentación de los compartimentos.

Existen dos formas de efectuar el riego por compartimentos:

Por inundación temporal

Se aplica una cantidad de agua equivalente a la dosis de riego y se deja en la superficie hasta que se infiltra totalmente. Cuando el contenido de humedad del suelo se reduce a la fracción fácilmente disponible por el cultivo, se procede a dar un nuevo riego. El compartimento se encuentra inundado durante un tiempo relativamente pequeño, que depende de la velocidad de infiltración.

El riego por inundación temporal se aplica en cultivos que toleran bien el terreno encharcado durante algún tiempo, tales como: forrajeras, algodón, maíz, frutales, etc. Se puede aplicar a cualquier tipo de suelo, aunque en los suelos arenosos, con menor capacidad de almacenamiento de agua, el tamaño de los compartimentos puede resultar tan pequeño que llegue a ser un inconveniente serio para las prácticas de cultivo; sólo en explotaciones intensivas de huerta, donde se emplea gran cantidad de mano de obra, podrá ser económico emplear el riego por inundación en suelos arenosos.

Por inundación permanente

Este tipo de riego es el que se utiliza habitualmente para el cultivo del arroz. Los compartimentos se llenan de agua hasta el nivel deseado, y una vez alcanzado ese nivel se continúa el aporte de agua, pero con un caudal inferior, evacuando el exceso por medio de vertederos. Este exceso de agua puede verter a otro compartimento situado a nivel inferior o a un canal de desagüe. (Véase la foto 10).

La inundación permanente requiere suelos arcillosos, con baja velocidad de infiltración, o terrenos donde la capa freática esté próxima a la superficie, pues en caso contrario las pérdidas de agua por infiltración profunda disminuyen la eficiencia del riego hasta niveles no económicos. Cuando hay una superficie extensa cultivada por este sistema es necesario la reutilización del agua evacuada de los compartimentos, con el fin de aumentar la eficiencia del riego.



*Foto 10.
Parcela inundada para el
cultivo de arroz.*

Tamaño de los compartimentos

El tamaño de los compartimentos ha de ser adecuado para conseguir una uniformidad aceptable. Este tamaño depende del caudal disponible y de la velocidad de infiltración.

Las medidas mínimas vienen determinadas por el caudal disponible, ya que es deseable cubrir de agua la totalidad del compartimento en un tiempo relativamente corto:

- En terreno arenoso, hasta 0.5 horas.
- En terreno franco-arenoso, hasta 1 hora.
- En terreno franco-arcilloso, hasta 2 horas.

El caudal debe ser suficiente para cubrir la totalidad de la superficie en un 60-70 % del tiempo requerido para suministrar la dosis de riego. La altura de la capa de agua suele ser de 25 cm como media.

En la tabla 5 se incluyen unos datos orientativos del dimensionado de compartimentos cerrados, aunque en cada caso habrá que comprobar mediante pruebas de campo.

La topografía del terreno determinará la forma de los compartimentos. Cuando la topografía y la profundidad del terreno permitan una nivelación adecuada se pueden formar compartimentos rectangulares o cuadrados de gran superficie; pero cuando la topografía es muy ondulante, los bancales y compartimentos se adaptarán a las curvas de nivel, lo que da lugar a una gran irregularidad en la forma y tamaño de los mismos. Siempre que la topografía lo permita se debe dar a los compartimentos la forma cuadrada, con el fin de disminuir la longitud de los bordos para una misma superficie útil de riego.

Tabla 5: *Áreas de compartimentos cerrados para diferentes tipos de suelo y caudales de agua (FAO)*

Caudal	Tipo de suelo			
	Arenoso	Franco arenoso	Franco arcilloso	Arcilloso
<i>l/seg</i>	<i>Hectáreas</i>			
30	0.02	0.06	0.12	0.2
60	0.04	0.12	0.24	0.4
90	0.06	0.18	0.36	0.6
120	0.08	0.24	0.48	0.8
150	0.10	0.30	0.60	1.0
180	0.12	0.36	0.72	1.2
210	0.14	0.42	0.84	1.4
240	0.16	0.48	0.96	1.6
270	0.18	0.54	1.08	1.8
300	0.20	0.60	1.20	2.0

CAPÍTULO 9

RIEGO POR ASPERSIÓN

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

El riego por aspersión puede realizarse de dos formas:

- *Riego individual*, basado en el aprovechamiento individual de una fuente de suministro de agua.
- *Riego colectivo*, en donde se proporciona agua a presión en unas tomas, hidrantes, o bocas de riego situadas en las distintas unidades de explotación.

Hay dos modalidades de utilización de estas tomas: *por turno* (cada toma se puede utilizar durante períodos previstos de antemano) y *a la demanda* (cada toma se puede utilizar en cualquier momento). El riego por turno es recomendable en zonas de monocultivo y suelo homogéneo, que condicionan al agricultor a un régimen periódico de riegos. El riego a la demanda supone una mayor complejidad en la distribución del agua y un mayor costo, pero estimula al agricultor a no utilizar mayor cantidad de agua que la necesaria, ya que el cobro se hace por volumen gastado.

Una instalación de riego por aspersión consta, esencialmente, de los siguientes elementos:

- Un equipo de bombeo encargado de proporcionar el agua a presión. Este equipo puede variar desde un simple grupo motobomba para pequeñas explotaciones, hasta una complicada instalación de gran potencia para grandes extensiones.
- Una red de *tuberías principales* que llevan el agua hasta los *hidrantes*, que son las tomas de agua en la parcela. Estas tomas presentan una gran variedad de

dispositivos, que abarcan desde una simple llave de paso (que permite la apertura y cierre) hasta los más complejos accesorios de riego, que comprenden, además de la llave de paso, otros dispositivos, tales como: limitador de caudal (que evita el paso de un caudal superior al previsto), regulador de presión (que la mantiene constante a la salida de la bomba), medidor volumétrico (para conocer el volumen utilizado), etc.

- Una red de tuberías de distribución para conducir el agua por la parcela que se pretende regar. Hay que distinguir entre los *ramales de alimentación*, que distribuye el agua por la parcela, y los *ramales laterales* o *líneas regadoras*, que derivan de los anteriores y conducen el agua hasta los dispositivos de aspersión.
- Dispositivos de aspersión, que son los elementos encargados de repartir el agua en forma de lluvia, conocidos como aspersores.

Ventajas e inconvenientes del riego por aspersión

Con respecto al riego por gravedad, el riego por aspersión ofrece las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas

- Se necesita menos mano de obra y menos cualificada que en el riego por gravedad, ya que, en este último, el regante, además del trabajo efectivo del manejo del agua, tiene que prestar una atención permanente al riego.
- No es necesaria la preparación previa del terreno, tanto en terrenos planos como ondulados. Al suprimir la nivelación del terreno se evita la pérdida de fertilidad del suelo y, por otro lado, queda disponible para el cultivo la mayor parte del terreno regable, al suprimir canales, acequias y regaderas que se precisan para el riego por gravedad.
- Se puede utilizar en una gran variedad de suelos, incluso en aquellos muy permeables que exigen riegos frecuentes y ligeros.
- La eficiencia del riego por aspersión es del orden de un 80 %, frente al 40-70 % del riego por superficie.
- Hay una mayor posibilidad de mecanizar los cultivos, ya que se eliminan los obstáculos propios del riego por superficie.
- Con respecto al riego por superficie se reduce la pérdida de elementos fertilizantes por lixiviación.
- El riego por aspersión se puede utilizar de un modo eficaz en la lucha contra las heladas.
- Se puede utilizar también para realizar fertilizaciones y tratamientos fitosanitarios.

Inconvenientes

- Elevado costo de primera instalación (que es inversamente proporcional a la superficie de riego) y de gastos de explotación, debido a la alta energía necesaria para garantizar la presión del agua a la salida de los aspersores. Sin embargo, este costo se compensa con la supresión de otros gastos (nivelación, construcción de acequias, etc).
- En algunos cultivos y en algunas fechas la vegetación puede verse perjudicada por un incremento de enfermedades fungosas en las plantas mojadas o porque se dificulta la fecundación cuando se riega en época de floración.
- El viento dificulta el reparto uniforme del agua.
- No se pueden utilizar aguas salinas sobre el follaje de las plantas sensibles a la sal, debido al riesgo de quemaduras en las hojas.

Dispositivos de aspersión

Los dispositivos de aspersión tienen por misión pulverizar el chorro de agua en gotas finas y repartirlas uniformemente por el terreno.

Pueden ser de varias clases:

- Tuberías perforadas.
- Aspersores no giratorios.
- Aspersores giratorios.

Tuberías perforadas

Las tuberías perforadas están constituidas por tubos metálicos o de PVC, provistos de orificios calibrados o de pequeñas boquillas roscadas en la parte superior y distribuidas en toda su longitud con un espaciamiento de 10-15 cm.

Las tuberías perforadas pueden ser estáticas o dotadas de movimiento oscilante mediante un motor hidráulico o eléctrico. Riegan franjas de terreno de 5 a 15 m y funcionan con poca presión. Su campo de aplicación se limita a cultivos hortícolas o florales.

Aspersores no giratorios

Existen en el mercado numerosos modelos de aspersores no giratorios. Uno de los más utilizados tiene un orificio calibrado por donde sale el chorro, que se dispersa al chocar contra un deflector colocado de forma perpendicular u oblicua con respecto al

eje del aspersor. Estos aspersores se utilizan, por lo general, a baja presión, con un radio de alcance pequeño (0.5 a 5 m), y su campo de aplicación se limita a invernaderos y jardinería.

Aspersores giratorios

Los aspersores giratorios, que son los más utilizados en agricultura, están constituidos por una o más salidas provistas de boquillas calibradas, cuyo diámetro oscila de 2 a 20 mm. El aspersor gira alrededor de su eje, lo que le permite regar la superficie de un círculo cuyo radio corresponde al alcance del chorro.

Según el mecanismo que produce el movimiento giratorio, estos aspersores se clasifican de la siguiente forma:

- *Aspersores de brazo oscilante*. El movimiento rotativo de cuerpo del aspersor es discontinuo, debido a impulsiones periódicas provocadas por el chorro del agua que golpea intermitentemente un brazo oscilante, el cual vuelve a su posición inicial por la acción de un resorte o de un contrapeso. Son aspersores de giro lento.

Los aspersores de brazo oscilante son los más utilizados, existiendo en el mercado una amplia gama de modelos, desde pequeños aspersores con una sola boquilla hasta grandes aspersores con varias boquillas. (Figura 9-1).

Algunos aspersores tienen un dispositivo que limita el área regada a un sector circular (*aspersores sectoriales*) y se utilizan en los linderos, junto a caminos y en los ángulos de las parcelas, con el fin de evitar el riego de áreas exteriores a la parcela. (Véase la foto 11).

- *Aspersores de reacción*. Están basados en el molinete hidráulico, en donde la reacción a la salida del agua provoca el movimiento de giro del aspersor. La

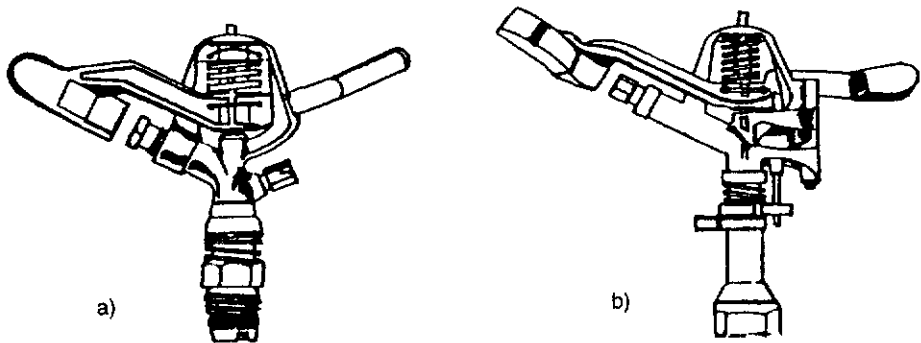


Fig. 9-1 Aspersores de brazo oscilante, a) de círculo completo, b) de círculo parcial o sectorial.

Foto 11.
Aspersor regando.



boquilla o boquillas están orientadas de forma que la reacción al cambio de dirección en el movimiento del agua provoque el movimiento de rotación.

Estos aparatos son de giro rápido. Se utilizan en jardinería y en riego de árboles bajo las copas.

- *Aspersores de turbina.* En estos aspersores el chorro incide sobre una turbina (rueda con aspas), cuyo movimiento se transmite a un eje instalado a lo largo del tubo del aspersor, y de éste, mediante engranajes, a la base del aspersor, para producir un giro del aspersor lento y uniforme.

Estos aspersores, por lo general, son de gran tamaño y suministran grandes caudales.

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

- *De baja presión.* Funcionan con presiones inferiores a 2 kg/cm^2 . Suelen arrojar un caudal inferior a 1,000 litros/hora y se instalan en espaciamentos inferiores a 12-15 m. Producen un riego uniforme, aun en el caso de vientos de cierta consideración. Se utilizan en jardinería, en hortalizas, en riego de frutales por debajo de las copas de los árboles y en el riego antihelada.
- *De presión media.* Funcionan con presiones comprendidas entre 2 y 4 kg/cm^2 . Arrojan un caudal comprendido entre 1,000 y 6,000 l/hora y se utilizan con espaciamentos comprendidos entre $12 \times 12 \text{ m}$ y $24 \times 24 \text{ m}$. Producen un riego bastante uniforme y se utilizan en una gran variedad de suelos y de cultivos extensivos.
- *De alta presión.* Funcionan con una presión superior a 4 kg/cm^2 y arrojan un caudal superior a 6,000 l/hora. Dentro de esta categoría se sitúan los cañones de

riego, dotados a veces de 2 ó 3 boquillas (con el fin de conseguir un riego más uniforme), que arrojan unos caudales de hasta 200 m³/hora o mayores aún.

Los cañones de riego tienen los inconvenientes de que son costosos, tanto de costo inicial como de funcionamiento, el reparto del agua se ve muy afectado por el viento y producen unas gotas muy gruesas que perjudican a determinados suelos y cultivos.

Características de funcionamiento

Las características más importantes del funcionamiento del sistema son las siguientes:

Marco de riego

Se llama marco de riego a la distancia que existe, por un lado, entre dos líneas regadoras contiguas y, por otro, entre dos aspersores contiguos de la misma ala. Las disposiciones que pueden adoptar los aspersores son:

- *Disposición en cuadrado.* Los aspersores ocupan los vértices de un cuadrado, siendo la distancia entre líneas regadoras igual a la separación entre los aspersores dentro de la misma línea. Los marcos más utilizados son: 12 × 12 m, 15 × 15 m y 18 × 18 m.
- *Disposición en rectángulo.* Los aspersores ocupan los vértices de un rectángulo, debido a que la separación de los aspersores es distinta que la separación de las líneas regadoras. Para reducir el número de líneas regadoras y de cambios (en el caso de sistema semifijo) se tomará la mayor distancia para la separación de líneas y la menor para la separación de aspersores dentro de la misma línea. Los marcos más utilizados son: 12 × 15 m, 12 × 18 m y 15 × 18 m.
- *Disposición en triángulo.* Los aspersores ocupan los vértices de una red de triángulos equiláteros. La disposición en triángulo ofrece mejores condiciones, ya que para una misma superficie se precisa menor número de aspersores que en la disposición en cuadrado; pero esta última es más utilizada en los riegos con ramales portátiles, por las dificultades que ofrece la disposición en triángulo para el cambio de los tubos. Los marcos más utilizados son: 18 × 15 m y 21 × 18 m.

La superficie (S) que se considera regada por cada aspersor es la siguiente (fig. 9-2):

— Disposición en cuadrado. $S = a^2$

— Disposición en rectángulo. $S = a \times b$

— Disposición en triángulo. $S = \frac{a^2 \sqrt{3}}{2}$

Distribución del agua

La distribución en el suelo del agua aplicada por cada aspersor no es uniforme, sino que varía a lo largo del radio de alcance del aspersor. Por lo general, la zona próxima

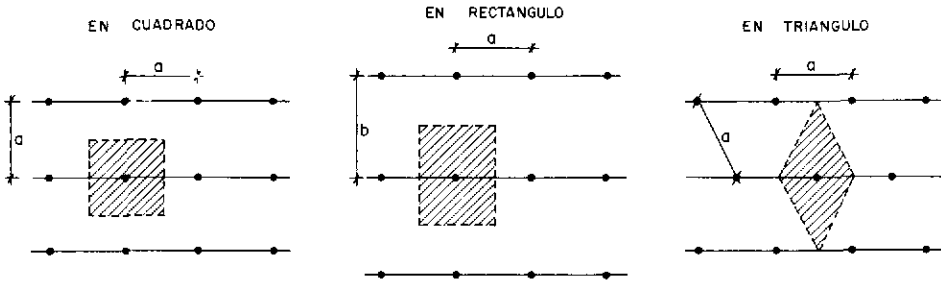
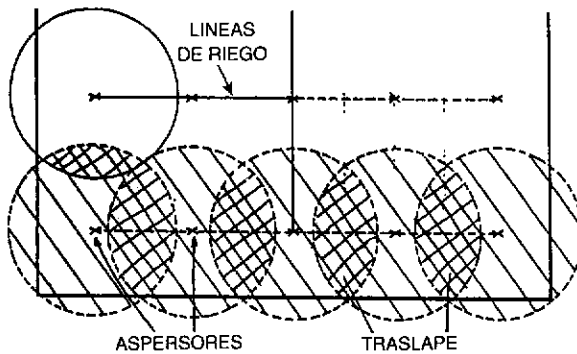


Fig. 9-2 Marcos de riego. Las superficies que se consideran regadas por cada aspersor vienen indicadas en trama rayada.

al aspersor recibe más agua, decreciendo conforme aumenta la distancia al aspersor. Para lograr una mayor uniformidad de reparto en el sistema es preciso traslapar una parte de las áreas regadas por aspersores consecutivos.



En cuanto a la separación de aspersores con relación al radio de alcance del chorro hay diversas recomendaciones dadas por distintos autores, que varían sensiblemente de unos a otros para un mismo marco de riego. Dado que cada modelo de aspersor tiene un comportamiento distinto, para diseñar correctamente el marco de riego es necesario que el fabricante suministre los datos del comportamiento real de la uniformidad conseguida con dicho modelo en los distintos marcos de riego. A falta de esos datos (que debieran exigirse siempre al fabricante) pueden servir de orientación las siguientes recomendaciones de separación de aspersores.

- En marcos cuadrado y triangular: 60% del diámetro mojado.
- En marco rectangular: 75% (en separación de líneas regadoras) y 40% (en separación de aspersores dentro de la misma línea) del diámetro mojado.

Estos datos se refieren a velocidad de viento inferior a 2 m/segundo. Deben reducirse proporcionalmente hasta un 25% a medida que la velocidad del viento se incrementa hasta 10 m/segundo.

Caudal

El caudal emitido por un aspersor está relacionado con el diámetro de sus boquillas y con la presión que existe en ellas. Viene dado por su *curva característica* o *ecuación de descarga*:

$$q = kh^x$$

q = Caudal emitido, en litros/hora.

h = Presión en las boquillas, en mca.

k y x = Constantes características del aspersor.

Pluviometría

La pluviometría media del sistema es la cantidad de agua que descarga un aspersor sobre la superficie que teóricamente le corresponde regar, suponiendo que esa cantidad se repartiera de modo uniforme. Viene dada por la fórmula:

$$P = \frac{q}{S}$$

P = Pluviometría, en mm/hora (o en litros/m² y por hora).

q = Caudal del aspersor, en litros/hora.

S = Superficie regada por aspersor, en m².

La pluviometría debe ser inferior a la velocidad de infiltración básica, con el fin de evitar encharcamientos o escurrimientos.

La pluviometría máxima admisible varía en función de la textura del suelo, de la pendiente del terreno y de la cobertura vegetal. Como aproximación se pueden dar las siguientes cifras, expresadas en mm/hora:

Clase de suelo	Pendiente 0-5 %		Pendiente 5-8 %		Pendiente 8-12 %		Más del 12 %	
	Con vegetación	Desnudo	Con vegetación	Desnudo	Con vegetación	Desnudo	Con vegetación	Desnudo
1. Arena gruesa de textura uniforme hasta 1.8 m . .	50	50	50	38	38	25	25	12
2. Arena gruesa sobre subsuelo más compacto . . .	44	38	31	25	25	19	19	10
3. Arenoso franco de textura uniforme	44	25	32	20	25	15	19	10
4. Arenoso franco sobre subsuelo más compacto	32	19	25	13	19	10	13	7.5
5. Limoso franco de textura uniforme hasta 1.8 m . .	25	13	20	10	15	7.5	10	5.1
6. Limoso franco sobre subsuelo más compacto . . .	15	7.5	13	6.4	10	3.8	7.5	2.5
7. Arcilloso fuerte o arcilloso franco	5	3.8	3.8	2.5	3	2.0	2.5	1.5

Aun cuando se puedan dar cifras elevadas de pluviometría en suelos de textura gruesa, desde el punto de vista práctico se recomienda que la pluviometría sea baja (6-7 mm/hora), con el fin de compensar las distorsiones causadas por el viento.

Pulverización

El grado de pulverización varía con arreglo a los siguientes factores:

- Las gotas son de mayor tamaño a medida que aumenta su separación del aspersor.
- El tamaño de las gotas aumenta, a igualdad de otras circunstancias, cuando se incrementa el diámetro de la boquilla.
- El tamaño de las gotas aumenta a medida que disminuye la presión de funcionamiento.

Las gotas gruesas pueden producir daños, por efecto del choque, en algunos cultivos delicados (florales, hortalizas). Por otra parte, las gotas gruesas producen compactación en la capa superficial de los suelos de textura fina, lo que reduce la velocidad de infiltración, con el consiguiente riesgo de erosión o encharcamiento.

En el extremo opuesto, una lluvia demasiado fina es más fácilmente arrastrada por el viento y se producen pérdidas importantes por evaporación.

Sistemas de riego por aspersión

Los sistemas de riego por aspersión se pueden dividir en dos grandes grupos:

- *Sistemas estacionarios*. Permanecen en la misma posición durante el riego.
- *Sistemas mecanizados*. Se desplazan continuamente durante el riego.

A su vez, el grupo de los sistemas estacionarios comprende:

- *Sistema móvil*. Todos los elementos de la instalación son móviles, incluso puede serlo el grupo motobomba cuando se hace una toma de agua distinta en cada posición de riego. Este sistema se utiliza sólo en pequeñas superficies o para dar riegos complementarios.

El grupo motobomba móvil, que puede ser accionado por la toma de fuerza de un tractor, envía el agua a una tubería en donde se instalan los aspersores. Con el fin de disminuir el número de posiciones se pueden acoplar a la tubería unas mangueras, en cuyos extremos se disponen los aspersores instalados sobre patines. De este modo, cada aspersor ocupa varias posiciones de riego antes de que sea necesario cambiar la tubería.

- *Sistema semifijo*. En este sistema son fijos el grupo motobomba y la red de tuberías principales, que suele ir enterrada. De ella derivan los hidrantes en donde se conectan los ramales de alimentación (fijos o móviles), en donde, a su vez,

se conectan las líneas de riego, que son móviles. Estas últimas llevan acoplados los aspersores, bien directamente o a través de unas mangueras y montados sobre patines, con el fin de permitir el riego en varias posiciones sin necesidad de cambiar la tubería.

Este sistema se utiliza cada vez menos, pues tiene mayores necesidades de mano de obra y exige un trabajo incómodo al tener que trasladar las tuberías en suelo mojado.

- *Sistema fijo.* Todos los elementos de este sistema son fijos, salvo algunos casos en donde los aspersores van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de las líneas de riego. La colocación de la red puede ser permanente (permanece enterrada a una profundidad de 0.6-1 metro durante toda la vida útil) o temporal (se coloca al principio de la temporada de riego y se retira al final de la misma). Esta última modalidad requiere un poco más de trabajo, pero ofrece la ventaja de que el equipo se puede utilizar cada año en parcelas diferentes y es posible variar el marco de plantación cuando se crea conveniente.

Un sistema en donde todas las tuberías y aspersores son fijos se llama de *cobertura total*. Se utiliza cada vez más, debido a la poca mano de obra que requiere, ya que el trabajo se reduce, prácticamente, a abrir y cerrar las llaves de paso. Es el sistema más idóneo para parcelas pequeñas o medianas de forma irregular.

Cuando el sistema se automatiza, la puesta en marcha y la parada de los aspersores se realiza mediante la recepción de unas señales enviadas desde un programador central, en donde puede existir un programa de riego preestablecido, o bien se utiliza la información enviada desde unos sensores situados en diversos puntos del terreno de riego, que indican la humedad existente en ellos.

Un sistema automatizado contiene, además de los elementos convencionales: una central de mando, desde donde se envían las órdenes, y unos órganos ejecutivos encargados de la distribución automática del agua. Estos últimos suelen ser válvulas con dos posiciones (apertura y cierre) que funcionan mediante señales eléctricas transmitidas por cables o mediante señales transmitidas por las distintas presiones del agua en las conducciones.

Las tuberías fijas suelen ser de fibrocemento o de material plástico: PVC o polietileno. Estas últimas no se utilizan en diámetros grandes, por su mayor precio.

Las tuberías portátiles son de duraluminio o de material plástico. La primera tiene poco peso y una gran resistencia a la corrosión. La de PVC (con material especial para uso a la intemperie) es muy ligera y ofrece muy poca resistencia al paso del agua, pero tiene el inconveniente de que es muy frágil. La tubería portátil de acero galvanizado prácticamente no se utiliza, debido a su mayor peso. Las tuberías portátiles flexibles (mangueras), utilizadas en el riego con trineos, están fabricadas con caucho reforzado o materiales plásticos de buena calidad, con el fin de soportar los esfuerzos que se producen en su traslado.

Las tuberías rígidas portátiles están constituidas por elementos de 6 y 9 metros de longitud, y unos diámetros normalizados que varían desde 40 mm (1½ pulgadas) hasta 150 mm (6 pulgadas), aunque los de diámetro superior a 100 mm se utilizan raramente. Las uniones de los elementos permiten un cierto movimiento angular, consiguiéndose que queden fijos mediante juntas troncocónicas de caucho que se comprimen mediante la presión del agua o mediante un anillo de goma que se comprime por medio de un cierre de palanca.

Disposición de las tuberías en los sistemas estacionarios

Las disposiciones básicas más frecuentes son las siguientes:

- *Disposición unilateral.* El ramal de alimentación se sitúa en el lindero de la parcela, mientras que los ramales laterales se colocan a un solo lado de dicho ramal. Cuando los ramales laterales son portátiles se van desplazando a lo largo del ramal de alimentación a medida que se realiza el riego (fig.9-3).

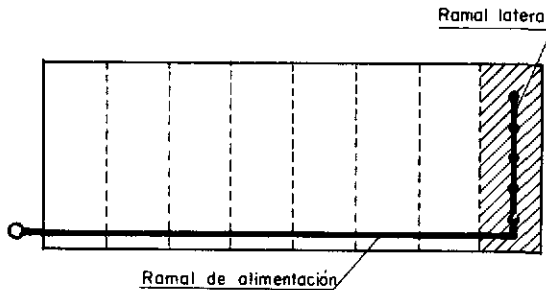


Fig. 9-3 *Disposición unilateral y cobertura parcial, con un solo ramal lateral.*

- *Disposición bilateral.* El ramal de alimentación se sitúa atravesando la parcela por su centro, mientras que los ramales laterales se colocan en ambos lados de aquél (fig. 9-4 y 9-5). Si los ramales laterales son portátiles se van desplazando sucesivamente a lo largo del ramal de alimentación. Si la instalación es fija se va regando por bloques de riego, ya que de esta forma, al disminuir los bordes

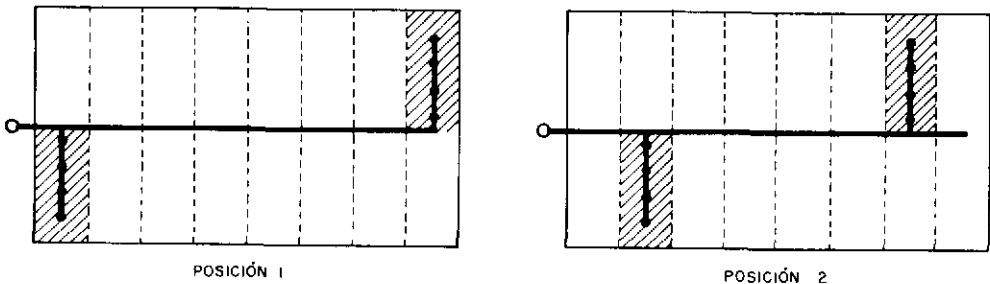


Fig. 9-4 *Disposición bilateral y cobertura parcial, con dos ramales laterales y una posición de riego.*

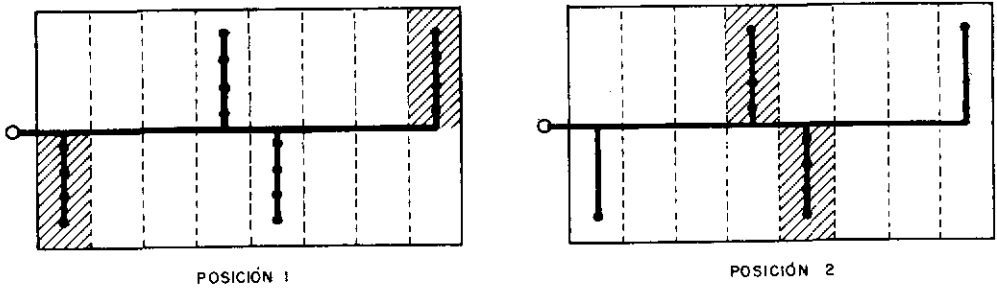


Fig. 9-5 Disposición bilateral y cobertura parcial con posición de espera, con cuatro ramales laterales y dos posiciones de riego. La posición de espera permite hacer el traslado de tuberías en terreno seco.

de la zona regada, se logra una mayor uniformidad y una disminución de las pérdidas por evaporación.

Un caso particular de esta disposición se da cuando del ramal de alimentación parten unas tuberías flexibles, en cuyos extremos se acoplan unos aspersores montados sobre trineos. Los aspersores se desplazan de una posición a la siguiente tirando de la tubería flexible, operación que se realiza desde terreno seco (fig. 9-6).

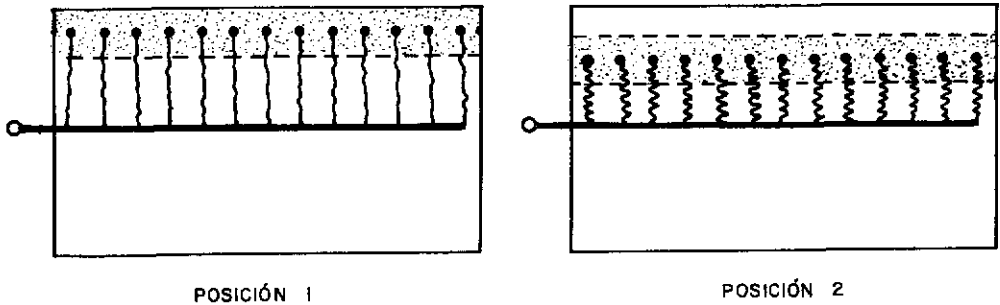


Fig. 9-6 Ramales laterales flexibles con aspersores sobre trineos.

Para el trazado de los ramales laterales hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Forma de la parcela.
- Topografía del terreno.
- Cultivo.
- Dirección del viento dominante.

Cuando no sea posible atender a todos estos factores se tomará la decisión más favorable. Dentro de lo posible se seguirán las siguientes recomendaciones relativas a los ramales laterales:

- Se situarán paralelos a uno de los linderos de la parcela.
- Se colocarán en dirección perpendicular al viento dominante.
- Se colocarán en la dirección de las hileras de las plantas.

— Seguirán, en lo posible, las curvas de nivel, para reducir al mínimo las diferencias de presión entre los aspersores de un ramal lateral. Estas diferencias de presión no deben sobrepasar el 20 % de la presión media. Mejor aún, conviene que sigan una dirección ligeramente descendente, para compensar los aumentos de pérdidas de carga a medida que los aspersores se alejan del origen.

Ejemplo de instalaciones de sistemas estacionarios

Ejemplo 1. Sistema semifijo de laterales móviles (fig. 9-7).

La tubería principal, de PVC o de fibrocemento, se coloca enterrada y en ella se instalan los hidrantes. El PVC es más económico que el fibrocemento para diámetros inferiores a 200 mm. En parcelas pequeñas la tubería principal suele ser de aluminio, colocada sobre la superficie.

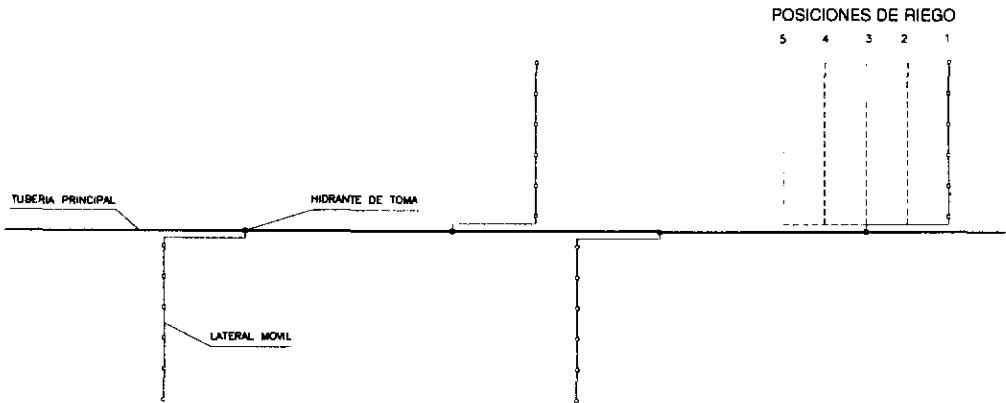


Fig. 9.7.

A cada hidrante se conecta un ramal lateral móvil, de aluminio, que realiza un determinado número de posiciones de riego.

La mano de obra necesaria se estima en 2.5 horas por riego y hectárea.

Ejemplo 2. Sistema semifijo de laterales con mangueras (fig. 9-8)

El esquema es semejante al anterior. A los laterales se conectan unas mangueras en cuyos extremos se acoplan los aspersores montados sobre trineos. Estos aspersores realizan un determinado número de posiciones de riego con sólo desplazar las mangueras. (Véase la foto 12).

Las mangueras suelen ser de 36 m de longitud, con una separación entre posiciones de riego de 12 ó 18 m, lo que permite hacer 7 ó 5 posiciones respectivamente, sin modificar la posición del lateral. Cuando se ha realizado el número total de posturas posibles en cada hidrante se traslada el equipo (formado por un lateral y las mangueras y trineos correspondientes) hasta el hidrante siguiente.

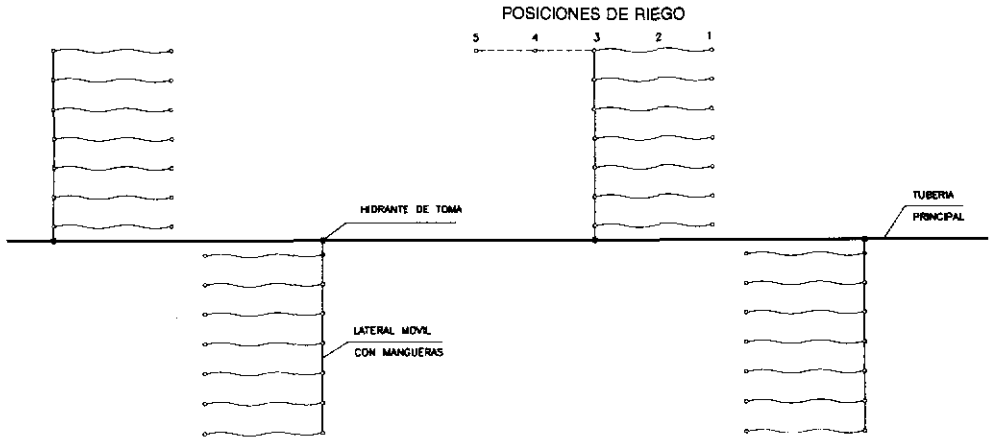


Fig. 9.8.

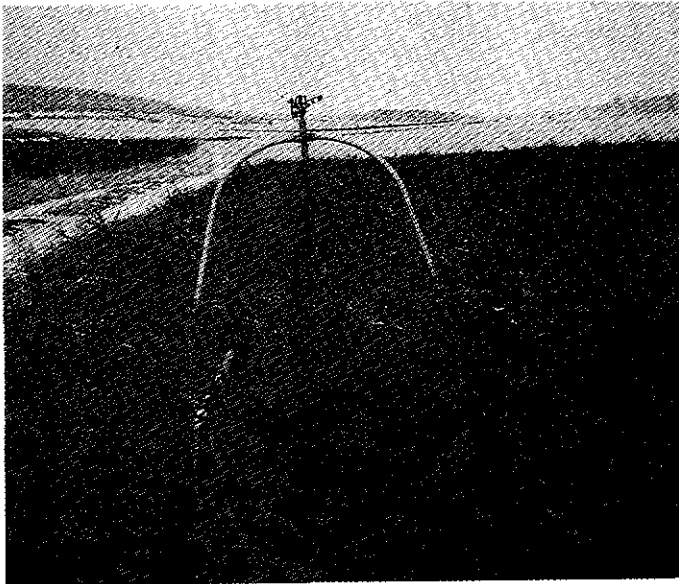


Foto 12.
Aspersor montado
sobre trineo.

Ejemplo 3. Sistema fijo enterrado con aspersores móviles (fig. 9-9)

De la tubería principal (de PVC o de fibrocemento) derivan las tuberías secundarias (de PVC) y, a su vez, de éstas derivan las conducciones terciarias en donde se sitúan las tomas de riego con aspersores móviles, que se desplazan después de cada posición de riego a la siguiente.

Las tuberías terciarias, que forman malla cerrada con la secundaria (con el fin de abaratar el costo) suelen ser de polietileno de alta densidad, de 32 mm de diámetro. Esta tubería se entierra con un equipo especial sin necesidad de hacer zanja.

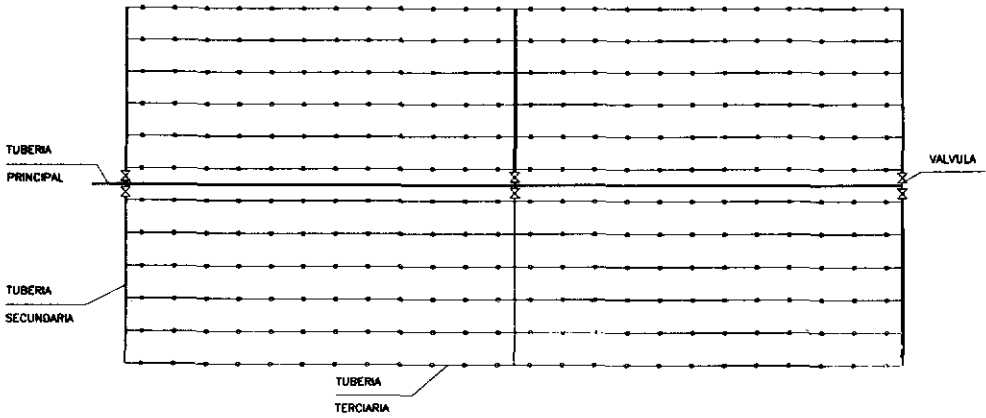


Fig. 9.9.

Se puede emplear un doble juego de aspersores y portaaspersores, con el fin de no tener que entrar en terreno mojado para hacer el cambio de posición.

Ejemplo 4. Cobertura total enterrada

De la tubería principal (de PVC o de fibrocemento) derivan las secundarias (de PVC) y de éstas, las terciarias (de PE de alta densidad), en donde se instalan los aspersores fijos. El cambio de posición se realiza mediante válvulas manuales o automáticas. El riego se realiza simultáneamente con varias líneas de aspersores formando un bloque (fig. 9-10).

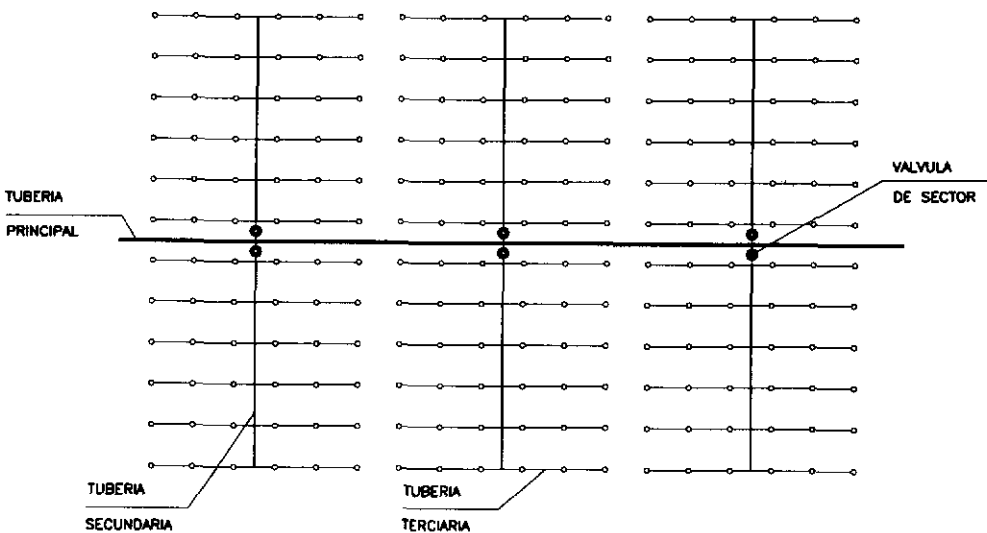


Fig. 9.10.

Una modalidad distinta consiste en instalar los aspersores sobre la tubería secundaria de PVC (con diámetros de 50 a 75 mm). Esta modalidad requiere excavar la zanja para enterrar todas las tuberías, factor importante a considerar desde el punto de vista económico (fig. 9-11).

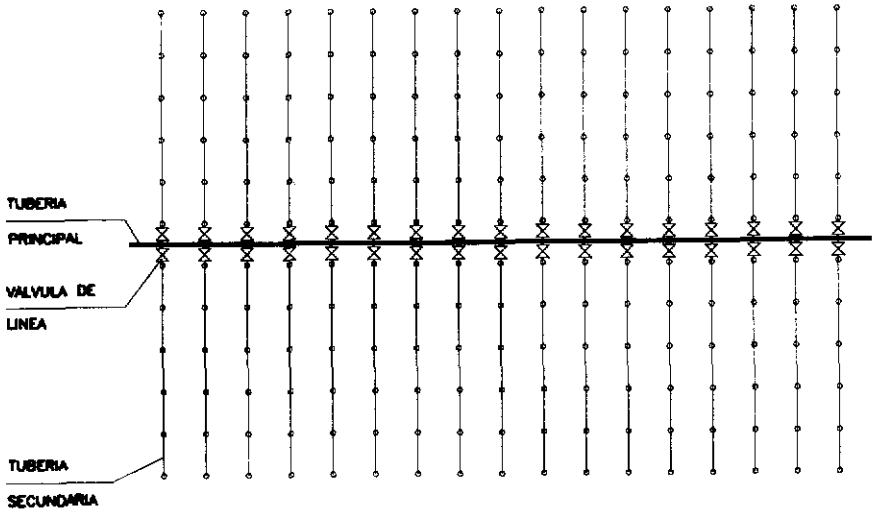


Fig. 9.11.

Ejemplo 5. Cobertura total aérea

En la tubería principal se instalan hidrantes de toma a los que se conectan las tuberías que abastecen a los laterales con los aspersores (fig. 9-12).

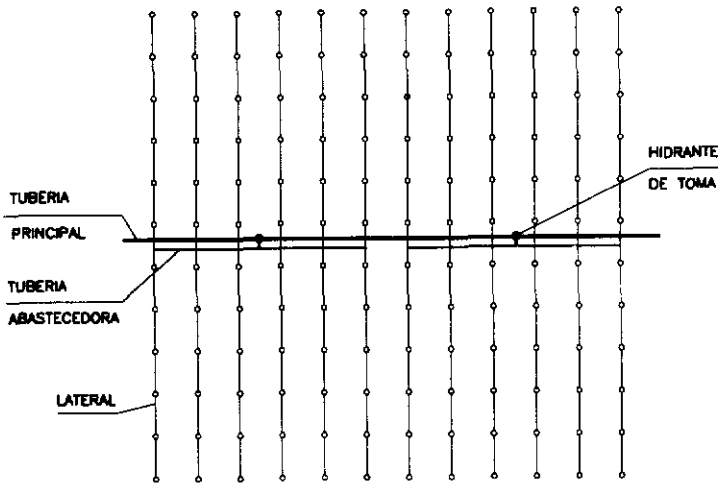


Fig. 9.12.

En la actualidad se ha extendido el uso de tubería de plástico (PVC y PE) con tratamiento, que evita su deterioro por la acción de la luz solar y que tienen unos precios competitivos con la tubería de aluminio.

Información previa para el diseño del sistema de riego

Para diseñar un sistema de riego por aspersión hay que determinar todas las características técnicas del riego, con el fin de que el reparto del agua sea uniforme y eficiente. Se hace en dos etapas: en el diseño agronómico se consideran aquellos aspectos relacionados con el medio (suelos, clima, cultivos, etc.), y en el diseño hidráulico se dimensiona la red de distribución. Los datos imprescindibles que se necesitan son los siguientes:

- *Del suelo.* Densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento, profundidad y velocidad de infiltración básica.
- *Del clima.* Interesa conocer, sobre todo, los datos relativos al viento (dirección y velocidad), ya que es la causa principal de distorsión en el reparto del agua.
- *Del cultivo.* Alternativa de cultivos, necesidades hídricas, fracción de abatimiento del agua disponible, profundidad radical, marco de plantación, labores.
- *De la parcela.* Dimensiones, topografía, punto de captación de agua y área a regar.
- *Del agua.* Caudal disponible y calidad agronómica.
- *Del riego.* Tiempo disponible de riego cada día y días libres de riego durante el ciclo. Se fija de antemano la eficiencia que se pretende conseguir.

Diseño agronómico

El diseño agronómico tiene por finalidad garantizar que la instalación sea capaz de suministrar la cantidad suficiente de agua, con un control efectivo de las sales y una buena eficiencia en la aplicación del agua. Se desarrolla en dos fases:

- Cálculo de las necesidades de agua del cultivo.
- Determinación de los parámetros de riego: dosis, frecuencia e intervalo entre riegos, caudal necesario, duración del riego, número de aspersores y disposición de los mismos.

Necesidades de agua de los cultivos

Las necesidades totales (véase capítulo 4) vienen definidas por la fórmula:

$$N_t = \frac{N_n}{E_a} = \frac{N_n}{R_p \times FL \times Fr \times CU}$$

- N_t = Necesidades totales, en mm/día
- N_n = Necesidades netas, en mm/día
- E_a = Eficacia de aplicación, en tanto por uno
- R_p = Relación de percolación, en tanto por uno
- FL = Factor de lavado, en tanto por uno
- Fr = Factor de rociado, en tanto por uno
- CU = Coeficiente de uniformidad, en tanto por uno

En circunstancias normales el factor de rociado tiene un valor muy próximo a la unidad, por lo que no se suele considerar. R_p y FL no se toman simultáneamente, sino que se considera sólo el de menor eficiencia, que es el que produce mayor pérdida de agua.

— Si $R_p < FL$, las necesidades totales son:

$$N_t = \frac{N_n}{R_p \times CU}$$

— Si $FL < R_p$, las necesidades totales son:

$$N_t = \frac{N_n}{(1-RL) CU}$$

$FL = 1-RL$, siendo RL el requerimiento de lavado, en tanto por uno.

En riego por aspersión de baja frecuencia el requerimiento de lavado (RL) viene dado por la fórmula:

$$RL = \frac{CE_a}{5 CE_e - CE_a}$$

En riego por aspersión de alta frecuencia el requerimiento de lavado es:

$$RL = \frac{CE_a}{2 \text{ máx } CE_e}$$

- RL = Requerimiento de lavado, en tanto por uno
- CE_a = Conductividad eléctrica del agua de riego, en dS/m
- CE_e = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, para el cual el descenso de producción es un porcentaje que se impone. Se expresa en dS/m
- máx CE_e = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, para el cual el descenso de producción es del 100 %. Se expresa en dS/m

A efectos de diseño, el coeficiente de uniformidad (CU) es una condición que se impone, y debe tener un valor de alrededor de 0.8 para considerarse aceptable. Cuando

la instalación está en funcionamiento se efectúa la comprobación de *CU* previsto en el diseño. Un valor bajo de *CU* indica alguna incorrección en la presión de trabajo, número y tamaño de las boquillas de los aspersores o inadecuado marco de riego.

Para el cálculo de las necesidades de agua en riego por aspersión se suele utilizar también el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} \text{Si } RL < 0.1 & \quad N_t = \frac{Nn}{E'a} \\ \text{Si } RL > 0.1 & \quad N_t = \frac{0.9 Nn}{E'a (1-RL)} \end{aligned}$$

E'a es una eficiencia de aplicación que incluye los efectos de pérdidas debidas a percolación, evaporación desde el chorro y arrastre del mismo por el viento y falta de uniformidad en la aplicación del agua.

Los valores orientativos de *E'a* que se deben tomar en el diseño son los siguientes, según Tarjuelo:

Sistemas estacionarios o sistemas de líneas con desplazamiento continuo, con uniformidad excelente, en climas frescos o húmedos y vientos débiles	0.85
Sistemas de líneas con desplazamiento continuo en la mayor parte de climas y vientos. Sistemas estacionarios en la mayor parte de climas y vientos débiles, con pluviometría media o alta y buena uniformidad	0.80
Sistemas estacionarios en la mayor parte de climas y vientos. Sistemas de líneas desplazables en climas áridos y vientos fuertes...	0.75
Sistemas estacionarios con pluviometría alta en climas áridos con vientos fuertes o con pluviometría baja en otros climas con vientos fuertes. Cañones desplazables	0.70
Sistemas estacionarios con pluviometría moderadamente baja en climas áridos y vientos fuertes	0.65
Sistemas estacionarios con pluviometría baja de pequeño tamaño de gotá, en climas semiáridos y vientos medios o fuertes. Cañones en posición fija	0.60

Ejemplo

Calcular las necesidades totales de riego en un cultivo de maíz que se riega por aspersión con los datos siguientes:

— Intervalo de riego: 8 días.

- Demanda de agua: 7.5 mm/día.
- Salinidad del agua de riego: 1.2 dS/m.
- El rendimiento no se ve afectado por la salinidad.
- La eficacia de aplicación que incluye efectos de pérdidas por percolación, evaporación en el chorro y falta de uniformidad es igual a 0.75.

Solución

Necesidades netas = $8 \times 7.5 = 60 \text{ mm} = 600 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Requerimiento de lavado:

$$RL = \frac{CEa}{5 CEE - CEa} = \frac{1.2}{5 \times 1.7 - 1.2} = 0.16$$

$CEE = 1.7 \text{ dS/m}$, según tabla 2 del capítulo 3

Como $RL > 0.1$

$$Nt = \frac{0.9 Nn}{E'a (1-RL)} = \frac{0.9 \times 600}{0.75 (1-0.16)} = 857.14 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Determinación de los parámetros de riego

Una vez conocidas las necesidades hídricas de los cultivos se determinarán los distintos parámetros del riego: dosis, intervalo entre riegos, caudal necesario, duración del riego, número de aspersores y disposición de los mismos. Los cálculos de la dosis, intervalo entre riegos y caudal necesario vienen especificados en el capítulo 4.

La duración del riego en cada posición se calcula mediante la fórmula:

$$t = \frac{Dt}{pm}$$

t = Duración de cada posición, en horas.

Dt = Dosis total, en mm de altura de agua.

pm = Precipitación media, en mm/hora.

La precipitación media debe ser inferior a la velocidad de infiltración básica con el fin de evitar encharcamientos o escurrimiento del agua sobrante.

En los sistemas semifijos hay que tener en cuenta el tiempo empleado en el traslado del equipo móvil. El traslado de las líneas de riego móviles de una posición a otra requiere una mano de obra de 2.5 horas por hectárea, aproximadamente.

Cuando se utiliza energía eléctrica interesa regar el mayor tiempo posible durante la noche, para tener una mejor eficiencia de riego (al disminuir las pérdidas por evaporación) y mayor uniformidad en el reparto del agua (porque los vientos suelen ser menos intensos).

El número de aspersores que funcionan simultáneamente en una posición de riego viene dado por la fórmula:

$$N = \frac{Q}{q}$$

N = Número de aspersores en cada posición de riego.

Q = Caudal necesario.

q = Caudal de cada aspersor.

Para diseñar la red de distribución y la disposición de los aspersores hay que procurar que sean mínimas las diferencias de presión de los aspersores situados en una línea de riego, por lo que se procurará que las líneas de riego sigan las curvas de nivel o, mejor aún, con una ligera pendiente descendente, para compensar los aumentos de pérdidas de carga a medida que los aspersores se alejan del origen.

Ejemplo

Se considera una parcela cultivada de maíz, con los datos siguientes:

- Densidad aparente del suelo seco $da = 1.25 \text{ tm/m}^3$ de suelo seco.
- Humedad a la capacidad de campo $Cc = 26 \%$ del suelo seco (en peso).
- Humedad en el punto de marchitamiento $Pm = 14 \%$ del suelo seco (en peso).
- Profundidad del suelo explorado por las raíces $H = 0.5 \text{ m}$.
- Fracción de abatimiento del agua disponible $f = 0.4$.
- Eficiencia de aplicación $Ea = 0.7$.
- Duración del período vegetativo del maíz = 130 días.
- La siembra se hace el día 1 de junio. Se cosecha, por tanto, el día 8 de octubre.
- Necesidades netas mensuales de agua (evapotranspiración mensual).

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
m ³ /ha	896	1,651	1,800	1,660	240

- Velocidad de infiltración básica = 6 mm/h.
- Marco de los aspersores: 18 × 18 m.
- No se tiene en cuenta la aportación de agua de lluvia.

Solución:

1. Cálculo del intervalo entre riegos:

$$\text{Intervalo} = \frac{\text{Dosis neta}}{ET \text{ (cultivo) diario}}$$

248 Segunda Parte Riegos por superficie, aspersión y goteo. Estudio económico

$$\begin{aligned} \text{Dosis neta } Dn &= 100 \times H \times da \times (Cc - Pm) \times f = \\ &= 100 \times 0.5 \times 1.25 \times (26 - 14) \times 0.4 = 300 \text{ m}^3/\text{ha} \end{aligned}$$

ET (cultivo) diario:

	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiembre</i>	<i>Octubre</i>
m ³ /ha	$\frac{896}{30} = 29.8$	$\frac{1.651}{31} = 53.2$	$\frac{1.800}{31} = 58$	$\frac{1.660}{30} = 55.3$	$\frac{240}{8} = 30$

Intervalo entre riegos:

	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiembre</i>	<i>Octubre</i>
Días	$\frac{300}{29.8} = 10$	$\frac{300}{53.2} = 5.6 = 5$	$\frac{300}{58} = 5.1 = 5$	$\frac{300}{55.3} = 5.4 = 5$	$\frac{300}{30} = 10$

Se redondea, por conveniencia, el número de días del intervalo entre riegos.

2. *Cálculo de la dosis de riego*

Una vez ajustado el número de días del intervalo entre riegos, la dosis neta ajustada será:

$$Dn \text{ ajust} = \text{Intervalo} \times ET \text{ (cultivo)}$$

	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiembre</i>	<i>Octubre</i>
m ³ /ha	$10 \times 29.8 = 298$	$5 \times 53.2 = 266$	$5 \times 58 = 290$	$5 \times 55.3 = 276.5$	$10 \times 30 = 300$

La dosis total ajustada será:

$$Dt \text{ ajust.} = \frac{Dn \text{ ajust.}}{Ea}$$

	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiembre</i>	<i>Octubre</i>
m ³ /ha	$\frac{298}{0.7} = 425.7$	$\frac{266}{0.7} = 380$	$\frac{290}{0.7} = 414.2$	$\frac{276.5}{0.7} = 395$	$\frac{300}{0.7} = 428.5$

3. *Elección del aspersor*

Con los datos de catálogo se elige un aspersor que, para el marco de riego considerado (18 × 18 m), tenga una pluviometría inferior a la velocidad de infiltración básica y se

obtenga una buena uniformidad en el reparto. Supongamos que ese aspersor proporciona una pluviometría media del sistema de 5.9 mm/hora.

4. Duración del riego en cada posición

$$\text{Duración (horas)} = \frac{\text{Dosis total ajustada (mm)}}{\text{Pluviometría media (mm/hora)}}$$

	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiembre</i>	<i>Octubre</i>
Horas	$\frac{42.5}{5.9} = 7.2$	$\frac{38}{5.9} = 6.4$	$\frac{41.4}{5.9} = 7$	$\frac{39.5}{5.9} = 6.7$	$\frac{42.8}{5.9} = 7.2$

En el caso de sistema semifijo, suponiendo que se necesitan 2 horas para el cambio de posición de las líneas de riego, y que este cambio tiene que hacerse de día, el número de posiciones diarias, durante cualquier mes, es de 2. El cambio de postura se hace inmediatamente antes e inmediatamente después del primer riego diario.

5. Número de ramales laterales

Dado que el intervalo entre riegos es de 5 días, cada día se ha de regar una franja de $600:5 = 120$ metros. Como cada día se hacen 2 posiciones de riego y los ramales laterales están separados 18 m, el número mínimo de ramales laterales que se necesitan en un sistema semifijo será:

$$\frac{120}{2 \times 18} = 3.3 = 4$$

Se redondea por exceso el número de ramales laterales, con lo cual se aumenta la dosis de riego, lo que obliga a modificar la duración del riego en cada posición o el número de días de riego dentro del intervalo.

Diseño hidráulico. Cálculo de laterales y portlaterales

El diseño hidráulico tiene por finalidad el cálculo de las dimensiones de la red de distribución y del óptimo trazado de la misma. En el anexo 4 se incluye, de forma generalizada, el cálculo de la red de distribución en sistemas de riego a presión, haciendo uso de las fórmulas de Blasius y de Hazen-Williams. A continuación se expone un cálculo más sencillo haciendo uso de la tabla 1 (para tubería de aluminio) o de las tablas incluidas en el anexo 5 (para tubería de PE o de PVC).

Los ramales laterales, portaaspersores o líneas de riego son los que distribuyen el agua al cultivo por medio de los aspersores acoplados a ellos. Las tuberías portlaterales

o de alimentación son aquellos de donde derivan los laterales. Tanto en laterales como en portallaterales se da el caso de una conducción con salidas múltiples distribuidas a lo largo de ella, uniformemente espaciadas y por las que descarga el mismo caudal.

$$Q = n \cdot q$$

Q = Caudal del ramal.

n = Número de salidas.

q = Caudal de cada salida.

Al principio de la tubería con salidas múltiples (en su conexión con la tubería de alimentación), el caudal es Q . A medida que se avanza en la tubería, las pérdidas de carga por fricción son menores que las que ocurrirían en una tubería de igual diámetro y longitud, pero sin salidas intermedias. Estas pérdidas de carga se pueden calcular tramo por tramo entre dos salidas consecutivas, en donde el caudal se mantiene constante, y luego sumar los valores obtenidos en todos los tramos. Para evitar este procedimiento tan engorroso, Christiansen ideó un método basado en calcular la pérdida en una tubería de igual longitud, diámetro y rugosidad, sin salidas intermedias, por la que circula el caudal Q . Posteriormente se multiplica por un coeficiente reductor F (*Factor de Christiansen*) para que las pérdidas en ambos casos sean equivalentes.

El 75% de las pérdidas de carga por fricción que se producen en los ramales laterales ocurren en la primera cuarta parte de su longitud, por cuyo motivo es importante la distancia a que está acoplada la primera salida. En la tabla 2 se muestran los valores del Factor Christiansen, en función del número de emisores, de la constante β , y de la distancia del origen al primer emisor, que puede ser: $l_0 = l$ (la distancia del origen al primer emisor es igual a la distancia entre emisores consecutivos) y $l_0 = l/2$ (la distancia del origen a la primera salida es igual a la mitad de la distancia entre dos emisores).

Cálculo de laterales

El cálculo del diámetro de un ramal lateral se basa en la uniformidad conseguida en la descarga del agua por los aspersores del ramal. Como norma se establece que la diferencia máxima del caudal descargado por dos aspersores cualesquiera del mismo ramal sea inferior al 10 % del caudal nominal. Se demuestra que en riego por aspersión una variación del 10 % del caudal representa una variación del 20 % en la presión de entrada del emisor. Por tanto, la diferencia en la presión de entrada entre dos aspersores cualesquiera del ramal debe ser inferior al 20 % de la presión nominal del aspersor, en caso de ramales horizontales.

Este mismo criterio se podría aplicar (como se hace en riego localizado) a un bloque de riego formado por una tubería portallaterales y por los laterales que derivan de ella. En este caso, el costo mínimo de la instalación ocurre cuando el 55 % de las pérdidas admisibles en el bloque se produce en los laterales, mientras que el 45 % restante se produce en la tubería portallaterales.

Consideremos el primer caso, en que la diferencia de presiones entre dos aspersores cualesquiera del mismo lateral horizontal sea inferior al 20 % de la presión nominal del aspersor.

En un lateral, aparte de las pérdidas por fricción, se producen unas pérdidas singulares (en los acoplamientos de los tubos, en la conexión de los emisores, etc.). Estas pérdidas singulares representan del 5 al 15% de las pérdidas por fricción (los valores más bajos corresponden a tuberías de PVC y PE, y los más altos a tuberías de aluminio), por lo que la pérdida de carga total podría ser:

$$h = 1.10 hf$$

siendo h y hf , respectivamente, la pérdida total y las pérdidas por fricción.

También se puede considerar que la pérdida total es la de una tubería semejante de igual diámetro, pero con una longitud ficticia (L_f) cuyo valor es igual a 1.10 su longitud real (L).

$$L_f = 1.10 L$$

Hay que tener en cuenta que la fórmula de Scobey y los nomogramas y tablas derivados de ella incluyen las pérdidas singulares.

Las pérdidas de carga que se producen en un lateral son:

$$h = J \cdot F \cdot L_f$$

- h = Pérdida de carga en el lateral, en mca.
- J = Pérdida de carga unitaria, en mca/m lineal.
- F = Factor de Christiansen.
- L_f = Longitud ficticia, en m.

Estas pérdidas de carga deben ser, como máximo, las admisibles, es decir, inferiores al 20 % de la presión nominal del aspersor.

Ejemplo 1

Calcular el diámetro de un lateral horizontal de aluminio en riego por aspersión, con los datos siguientes:

- Número de aspersores: 10.
- Caudal del aspersor: 1.5 m³/hora.
- Presión de trabajo: 3 kg/cm² (30 mca).
- Separación de aspersores: 12 m.
- Distancia del primer aspersor al origen: 6 m.

Solución:

Longitud de lateral

$$L = 6 + 12 \times 9 = 6 + 108 = 114 \text{ m}$$

Longitud ficticia del lateral

$$L_f = 1.10 L = 1.10 \times 114 = 125.4 \text{ m}$$

Caudal en el origen del lateral

$$\begin{aligned} Q &= \text{Número de aspersores} \times \text{Caudal de cada aspersor} = \\ &= 10 \times 1.5 = 15 \text{ m}^3/\text{hora} \end{aligned}$$

Pérdida de carga máxima admisible

$$0.2 \times 30 = 6 \text{ mca}$$

Se elige un diámetro y se comprueba si la pérdida de carga está dentro de los límites admisibles.

Elegimos el diámetro de $1\frac{3}{4}$ pulgadas.

Pérdida de carga.

$$h = J \cdot F \cdot L_f$$

Según tabla 1, para un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{hora}$ la pérdida de carga es $18.40 \text{ mca}/100 \text{ m}$. Luego,

$$J = 0.184 \text{ mca/m}$$

Según tabla 2, $F = 0.371$ para $l_0 = l/2$, $\beta = 1.85$ y $n = 10$.

$$h = 0.184 \times 0.371 \times 125.4 = 8.56 \text{ mca}$$

La pérdida de carga es superior a la admisible. No sirve este diámetro. Se comprueba el diámetro inmediatamente superior, de 2 pulgadas. Para un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{hora}$.

$$J = 0.093 \text{ mca/m}$$

$$h = 0.093 \times 0.371 \times 125.4 = 4.32 \text{ mca}$$

La pérdida de carga es inferior a la admisible. Luego es diámetro válido.

Ejemplo 2

Calcular el diámetro del lateral del ejemplo anterior en los siguientes casos:

- 1) El lateral es ascendente con un desnivel de 4 m entre ambos extremos.
- 2) El lateral es descendente, con un desnivel de 4 m entre ambos extremos.

Solución:

Pérdida de carga admisible

$$0.2 \times 30 \pm 4$$

Signo + con ramal descendente, y signo - con ramal ascendente.

1) Ramal ascendente. Pérdida de carga admisible:

$$0.2 \times 30 - 4 = 6 - 4 = 2 \text{ mca}$$

El diámetro de 2¹/₂ pulgadas tiene una pérdida de carga:

$$h = 0.0307 \times 0.371 \times 125.4 = 1.42 \text{ mca}$$

Este diámetro es válido.

2) Ramal descendente. Pérdida de carga admisible:

$$0.2 \times 30 + 4 = 6 + 4 = 10 \text{ mca}$$

El diámetro de 1³/₄ pulgadas tiene una pérdida de carga:

$$h = 0.184 \times 0.371 \times 125.4 = 8.56 \text{ mca}$$

Este diámetro es válido.

Presión en el origen del lateral

La presión en el origen del lateral portaaspersores viene dada por la fórmula:

$$P_o = P_m + 0.75 h + H_a \text{ Si el lateral es horizontal}$$

$$P_o = P_m + 0.75 h \pm Hg/2 + H_a$$

Si el lateral es ascendente (signo +) o descendente (signo -)

P_o = Presión en el origen del lateral.

P_m = Presión de trabajo del aspersor.

h = Pérdida de carga en el lateral.

Hg = Desnivel geométrico entre los extremos del lateral.

H_a = Altura del tubo portaaspersores.

Ejemplo 3

En el ejemplo 2, caso de ramal descendente, se considera que la altura del tubo portaaspersor es de 2 m. Calcular la presión necesaria en el origen.

Solución:

$$\begin{aligned} P_o &= P_m + 0.75 h - Hg/2 + H_a = \\ &= 30 + 0.75 \times 8.56 - 4/2 + 2 = 36.42 \text{ mca} \end{aligned}$$

Tabla 1: Pérdida de carga por fricción en tubería de aluminio (en m/100 m) (Según fórmula de Hazen-Williams)

Caudal m ³ /h	Diámetro											
	1" 1/2" 38.1 mm (exterior) 36.3 mm (interior)	1" 3/4" 44.4 mm (exterior) 42.6 mm (interior)	2" 50.8 mm (exterior) 49 mm (interior)	2" 1/2" 63.5 mm (exterior) 61.5 mm (interior)	2" 3/4" 69.8 mm (exterior) 67.8 mm (interior)	3" 76.2 mm (exterior) 74.2 mm (interior)	3" 1/2" 88.9 mm (exterior) 86.7 mm (interior)	4" 101.6 mm (exterior) 99.2 mm (interior)	5" 127 mm (exterior) 124.4 mm (interior)	6" 152.4 mm (exterior) 149.5 mm (interior)	m/100 m	
1	0.266	0.122	0.062									
2	0.961	0.441	0.223									
3	2.037	0.934	0.473									
4	3.470	1.592	0.805	0.266								
5	5.246	2.406	1.217	0.402	0.250							
6	7.353	3.372	1.706	0.564	0.351	0.226						
7	9.782	4.487	2.269	0.750	0.467	0.301						
8	12.526	5.745	2.906	0.961	0.598	0.385	0.180					
9	15.579	7.146	3.614	1.195	0.743	0.479	0.224					
10	18.936	8.685	4.393	1.453	0.903	0.582	0.273	0.142				
11	22.591	10.362	5.241	1.733	1.078	0.695	0.325	0.169				
12	26.541	12.173	6.157	2.036	1.266	0.816	0.382	0.198				
13	30.782	14.118	7.141	2.361	1.468	0.946	0.443	0.230				
14	35.310	16.195	8.191	2.709	1.684	1.086	0.509	0.264				
15	40.122	18.402	9.307	3.078	1.914	1.234	0.578	0.300				
16	45.215	20.739	10.489	3.468	2.157	1.390	0.651	0.338	0.112			
17	50.587	23.203	11.735	3.880	2.413	1.555	0.729	0.378	0.126			
18	56.236	25.793	13.045	4.314	2.683	1.729	0.810	0.420	0.140			
19	62.158	28.509	14.419	4.768	2.965	1.911	0.895	0.465	0.154			
20	68.351	31.350	15.856	5.243	3.261	2.101	0.984	0.511	0.170			
21		34.315	17.355	5.739	3.569	2.300	1.078	0.559	0.186			
22		37.402	18.917	6.255	3.890	2.507	1.174	0.609	0.202			
23		40.611	20.540	6.792	4.224	2.722	1.275	0.662	0.220			
24		43.941	22.224	7.349	4.570	2.945	1.380	0.716	0.238	0.097		

25	47.392	23.969	7.926	4.929	3.177	1.488	0.772	0.256	0.105
26	50.962	25.775	8.523	5.300	3.416	1.600	0.830	0.276	0.113
27		27.641	9.140	5.684	3.663	1.716	0.891	0.296	0.121
28		29.566	9.777	6.080	3.918	1.836	0.953	0.316	0.129
29		31.551	10.433	6.488	4.182	1.959	1.017	0.338	0.138
30		33.596	11.109	6.909	4.453	2.086	1.082	0.359	0.147
31		35.699	11.805	7.341	4.731	2.216	1.150	0.382	0.156
32		37.861	12.519	7.786	5.018	2.351	1.220	0.405	0.165
33		40.081	13.254	8.242	5.312	2.489	1.291	0.429	0.175
34		42.359	14.007	8.711	5.614	2.630	1.365	0.453	0.185
35		44.695	14.779	9.191	5.924	2.775	1.440	0.478	0.195
36			15.571	9.683	6.241	2.924	1.517	0.504	0.206
37			16.381	10.187	6.566	3.076	1.596	0.530	0.217
38			17.211	10.703	6.898	3.232	1.677	0.557	0.227
39			18.059	11.231	7.238	3.391	1.760	0.584	0.239
40			18.926	11.770	7.585	3.554	1.844	0.612	0.250
41			19.811	12.320	7.940	3.720	1.930	0.641	0.262
42			20.715	12.883	8.303	3.890	2.018	0.670	0.274
43			21.638	13.456	8.672	4.063	2.108	0.700	0.286
44			22.579	14.042	9.050	4.240	2.200	0.731	0.298
45			23.538	14.638	9.434	4.420	2.294	0.762	0.311
46			24.516	15.246	9.826	4.603	2.389	0.793	0.324
47			25.512	15.866	10.225	4.790	2.486	0.825	0.337
48			26.527	16.497	10.632	4.981	2.585	0.858	0.351
49			27.559	17.139	11.046	5.175	2.685	0.892	0.364
50			28.610	17.792	11.467	5.372	2.788	0.926	0.378
51			29.678	18.457	11.895	5.573	2.892	0.960	0.392
52			30.765	19.133	12.330	5.777	2.998	0.995	0.407
53			31.869	19.819	12.773	5.984	3.105	1.031	0.421
54			32.992	20.518	13.223	6.195	3.215	1.067	0.436
55			34.132	21.227	13.680	6.409	3.326	1.104	0.451
56			35.290	21.947	14.144	6.626	3.439	1.142	0.466
57			36.466	22.678	14.616	6.847	3.553	1.180	0.482
58				23.420	15.094	7.071	3.670	1.218	0.498
59				24.174	15.579	7.299	3.788	1.258	0.514
60				24.938	16.072	7.529	3.907	1.297	0.530
61				25.713	16.572	7.763	4.029	1.338	0.547

Tabla 1: Pérdida de carga por fricción en tubería de aluminio (en m/100 m) (Según fórmula de Hazen-Williams)
(Continuación)

Caudal m ³ /h	Diámetro										Caudal m ³ /h
	1" 1/2" 38.1 mm (exterior) 36.3 mm (interior)	1" 3/4" 44.4 mm (exterior) 42.6 mm (interior)	2" 50.8 mm (exterior) 49 mm (interior)	2" 1/2" 63.5 mm (exterior) 61.5 mm (interior)	2" 3/4" 69.8 mm (exterior) 67.8 mm (interior)	3" 76.2 mm (exterior) 74.2 mm (interior)	3" 1/2" 88.9 mm (exterior) 86.7 mm (interior)	4" 101.6 mm (exterior) 99.2 mm (interior)	5" 127 mm (exterior) 124.4 mm (interior)	6" 152.4 mm (exterior) 149.5 mm (interior)	
62					26.499	17.078	8.001	4.152	1.379	0.563	
63					27.296	17.592	8.241	4.277	1.420	0.580	
64					28.104	18.112	8.485	4.403	1.462	0.597	
65					28.922	18.640	8.732	4.532	1.505	0.615	
66					29.752	19.174	8.983	4.662	1.548	0.632	
67					30.592	19.716	9.236	4.793	1.592	0.650	
68						20.264	9.493	4.927	1.636	0.668	
69						20.820	9.754	5.062	1.681	0.687	
70						21.382	10.017	5.198	1.726	0.705	
71						21.951	10.284	5.337	1.772	0.724	
72						22.527	10.553	5.477	1.818	0.743	
73						23.110	10.826	5.618	1.866	0.762	
74						23.699	11.103	5.762	1.913	0.782	
75						24.296	11.382	5.907	1.961	0.801	
76						24.899	11.665	6.053	2.010	0.821	
77						25.509	11.951	6.202	2.059	0.841	
78						26.126	12.239	6.352	2.109	0.862	
79						26.750	12.532	6.503	2.159	0.882	
80						27.380	12.827	6.656	2.210	0.903	
81						28.017	13.126	6.811	2.262	0.924	
82						28.661	13.427	6.968	2.314	0.945	
83						29.312	13.732	7.126	2.366	0.967	
84						29.969	14.040	7.286	2.419	0.988	

85	30.633	14.351	7.447	2.473	1.010
86	31.304	14.665	7.610	2.527	1.032
87	31.981	14.983	7.775	2.582	1.055
88	32.666	15.303	7.941	2.637	1.077
89		15.627	8.109	2.693	1.100
90		15.953	8.279	2.749	1.123
91		16.283	8.450	2.806	1.146
92		16.616	8.623	2.863	1.170
93		16.952	8.797	2.921	1.193
94		17.291	8.973	2.980	1.217
95		17.633	9.151	3.038	1.241
96		17.979	9.330	3.098	1.266
97		18.327	9.511	3.158	1.290
98		18.678	9.693	3.219	1.315
99		19.033	9.877	3.280	1.340
100		19.390	10.063	3.341	1.365
102		20.115	10.438	3.466	1.416
104		20.851	10.821	3.593	1.468
106		21.600	11.209	3.722	1.521
108			11.604	3.853	1.574
110			12.005	3.986	1.629
112			12.412	4.121	1.684
114			12.826	4.259	1.740
116			13.246	4.398	1.797
118			13.672	4.540	1.855
120			14.104	4.683	1.913
122			14.542	4.829	1.973
124			14.987	4.976	2.033
126			15.438	5.126	2.094
128			15.894	5.278	2.156
130			16.357	5.431	2.219
132			16.826	5.587	2.283
134			17.302	5.745	2.347
136			17.783	5.905	2.412
138			18.270	6.067	2.478
140			18.764	6.230	2.545

188	10.755	4.394
190	10.968	4.481
192	11.183	4.569
194	11.399	4.657
196	11.618	4.746
198	11.838	4.837
200	12.061	4.927
202	12.285	5.019
204	12.511	5.111
206		5.205
208		5.299
210		5.393
212		5.489
214		5.585
215		5.633
225		6.128
230		6.383
235		6.642
240		6.906
245		7.175
250		7.449
255		7.727
260		8.010
265		8.297
270		8.590
275		8.886
280		9.188
285		9.494
290		9.805
295		10.120
300		10.440
305		10.765
310		11.094
315		11.427
320		11.766
325		12.108
330		12.456

Tabla 2: Factor de Christiansen F

n	to = l					n	to = l/2				
	$\beta = 1.75$	$\beta = 1.80$	$\beta = 1.85$	$\beta = 1.90$	$\beta = 2.00$		$\beta = 1.75$	$\beta = 1.80$	$\beta = 1.85$	$\beta = 1.90$	$\beta = 2.00$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.650	0.644	0.639	0.634	0.625	2	0.532	0.525	0.518	0.512	0.500
3	0.546	0.540	0.535	0.528	0.518	3	0.455	0.448	0.441	0.434	0.422
4	0.497	0.491	0.486	0.480	0.469	4	0.426	0.419	0.412	0.405	0.393
5	0.469	0.463	0.457	0.451	0.440	5	0.410	0.403	0.397	0.390	0.378
6	0.451	0.445	0.435	0.433	0.421	6	0.401	0.394	0.387	0.381	0.369
7	0.438	0.432	0.425	0.419	0.408	7	0.395	0.388	0.381	0.375	0.363
8	0.428	0.422	0.415	0.410	0.398	8	0.390	0.383	0.377	0.370	0.358
9	0.421	0.414	0.409	0.402	0.391	9	0.387	0.380	0.374	0.367	0.355
10	0.415	0.409	0.402	0.396	0.385	10	0.384	0.378	0.371	0.365	0.353
11	0.410	0.404	0.397	0.392	0.380	11	0.382	0.375	0.369	0.363	0.351
12	0.406	0.400	0.394	0.388	0.376	12	0.380	0.374	0.367	0.361	0.349
13	0.403	0.396	0.391	0.384	0.373	13	0.379	0.372	0.366	0.360	0.348
14	0.400	0.394	0.387	0.381	0.370	14	0.378	0.371	0.365	0.358	0.347
15	0.397	0.391	0.384	0.379	0.367	15	0.377	0.370	0.364	0.357	0.346
16	0.395	0.389	0.382	0.377	0.365	16	0.376	0.369	0.363	0.357	0.345
17	0.393	0.387	0.380	0.375	0.363	17	0.375	0.368	0.362	0.356	0.344
18	0.392	0.385	0.379	0.373	0.361	18	0.374	0.368	0.361	0.355	0.343
19	0.390	0.384	0.377	0.372	0.360	19	0.374	0.367	0.361	0.355	0.343
20	0.389	0.382	0.376	0.370	0.359	20	0.373	0.367	0.360	0.354	0.342
22	0.387	0.380	0.374	0.368	0.357	22	0.372	0.366	0.359	0.353	0.341
24	0.385	0.378	0.372	0.365	0.355	24	0.372	0.365	0.359	0.352	0.341
26	0.383	0.376	0.370	0.364	0.353	26	0.371	0.364	0.358	0.351	0.340
28	0.382	0.375	0.369	0.363	0.351	28	0.370	0.364	0.357	0.351	0.340
30	0.380	0.374	0.368	0.362	0.350	30	0.370	0.363	0.357	0.350	0.339
35	0.378	0.371	0.365	0.359	0.347	35	0.369	0.362	0.356	0.350	0.338

40	0.376	0.370	0.364	0.357	0.345	40	0.368	0.362	0.355	0.349	0.338
50	0.374	0.367	0.361	0.355	0.343	50	0.367	0.361	0.354	0.348	0.337
60	0.372	0.366	0.359	0.353	0.342	100	0.365	0.359	0.353	0.347	0.335
80	0.370	0.363	0.357	0.351	0.340	200	0.365	0.358	0.352	0.346	0.334
100	0.369	0.362	0.356	0.350	0.338						
150	0.367	0.360	0.354	0.348	0.337						
300	0.365	0.359	0.353	0.346	0.335						
>300	0.364	0.357	0.351	0.345	0.333						

n = Número de salidas.

β = 1.75. Blasius, Cruciani-Margaritora.

β = 1.786. Scimemi.

β = 1.80. Iso, Veronese-Datei.

β = 1.85. Hazen-Williams.

β = 1.90. Scobey.

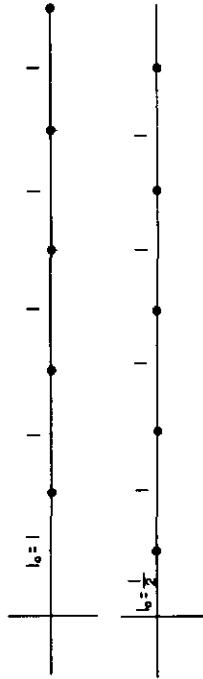
β = 2. Manning, Darcy-Weisbach.

En la práctica se toman los siguientes valores de β :

β = 1.75 para tubería de PE

β = 1.80 para tubería de PVC

β = 1.85 - 1.90 para tubería de aluminio



Cálculo de tuberías secundarias y principales

El cálculo de las tuberías secundarias y principales se hace en cada caso con arreglo al diseño de la instalación. Las pérdidas de carga se pueden calcular por tramos sucesivos de caudal constante, o aplicando el coeficiente de Christiansen para tuberías con salidas uniformemente espaciadas por las que descarga un caudal constante. Para tubería de PVC se utilizan los nomogramas del capítulo 10 o las tablas del anexo 5. Para tubería de fibrocemento se utiliza la tabla 5 del capítulo 6. Si las tuberías son de aluminio de acople rápido se utiliza la tabla 1 del capítulo 9.

Cuando en el diseño se forman bloques de riego semejantes a las subunidades de riego localizado, se puede aplicar en el cálculo el mismo criterio que en este sistema de riego (véase anexo 5 o capítulo 10).

Uniformidad de distribución

La uniformidad de distribución del agua en la superficie del suelo depende, fundamentalmente, de los siguientes factores:

- Del modelo de reparto del agua por el aspersor, que depende, a su vez: del diseño del aspersor, de la presión de trabajo y del número y tipo de boquillas.
- De la disposición de los aspersores (marco de riego).
- De la intensidad del viento dominante durante la aplicación del agua. El tamaño de las gotas juega un papel fundamental en las pérdidas causadas por evaporación, mientras que la longitud y altura de la trayectoria del chorro influyen en el arrastre del agua por el viento.

También influyen en la uniformidad, aunque en menor medida, otros factores, como por ejemplo, la duración del riego, que al incrementarse favorece la uniformidad, ya que se compensan los efectos de distorsión del viento al cambiar la dirección del mismo durante el tiempo de riego. Por otro lado hay que tener en cuenta que la distribución del agua en el perfil del suelo se mejora con respecto al reparto en la superficie, debido a las diferencias de potencial hídrico.

Para valorar la uniformidad del reparto de agua se utiliza generalmente el *coeficiente de uniformidad de Christiansen*, que viene dado por la fórmula:

$$CU = 1 - \frac{\sum |d|}{M \times n}$$

CU = Coeficiente de uniformidad, en tanto por uno.

M = Precipitación media en los puntos de control.

n = Número de puntos de control.

$\sum |d|$ = Suma de las desviaciones (en valor absoluto) en los puntos de control, con respecto a M .

Para determinar el reparto de agua de los aspersores se utilizan los siguientes procedimientos:

- Se coloca una red de pluviómetros en una instalación de riego por aspersión.
- Se colocan los pluviómetros alrededor de un solo aspersor aislado, y se establece después (mediante programa de computadora) la distribución correspondiente a cualquier marco de riego.
- Se coloca una sola fila de pluviómetros en un radio del círculo mojado, para determinar el modelo de reparto radial, de donde se deduce (mediante programa de computadora) la pluviometría de toda la red.

En la fig. 9-13 se representa un ensayo de campo utilizando el primer procedimiento. Dentro de la instalación se eligen 4 aspersores con disposición en cuadrado (2 aspersores consecutivos en 2 ramales consecutivos), y dentro del cuadrado limitado por los 4 aspersores se distribuye una cuadrícula de pluviómetros.

El coeficiente de uniformidad de este ejemplo es:

$$CU = 1 - \frac{\sum |d|}{M \times n} = 1 - \frac{37}{24.40 \times 32} = 0.95$$

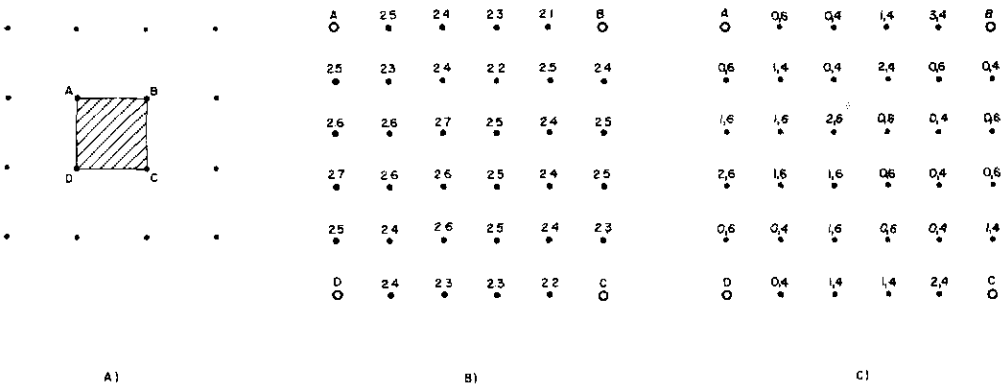


Fig. 9-13 Ensayo para determinar la uniformidad de riego: A) Localización del ensayo. B) Cantidad de agua medida en los pluviómetros. C) Desviaciones (en valor absoluto) con respecto a la media de los pluviómetros.

Con un CU elevado se obtiene mayor uniformidad en la distribución y, en consecuencia, una mayor eficiencia de riego y un incremento de la producción, pero se requiere un equipo más costoso. El objetivo primordial del riego es obtener el máximo beneficio; pero puede ocurrir que los valores elevados de uniformidad y eficiencia no coincidan con el mayor beneficio, debido al incremento del costo de la instalación. Como orientación se pueden recomendar los siguientes valores de CU:

- Cultivos de alta rentabilidad, especialmente con sistema radical superficial 0.85-0.88
- Cultivos con sistemas radical de profundidad media en suelos de textura media 0.80-0.85
- Cultivos de huerta, forrajes y cultivos en zonas lluviosas 0.75-0.80

Elección de la instalación de riego

Para la elección de la instalación de riego hay que tener en cuenta una serie de factores: climáticos, agronómicos, técnicos, económicos y prácticos.

Factores climáticos

Viento. El viento distorsiona el modelo de reparto de los aspersores. La magnitud de esta distorsión depende de la velocidad del viento (a mayor velocidad, mayor distorsión) y del tamaño de las gotas (a menor tamaño, mayor distorsión). (Fig. 9-14 y 9-15). Para paliar los efectos distorsionadores del viento es aconsejable regar en las horas de vientos menos intensos (generalmente de noche) o cuando la velocidad de éste es inferior a 2 m/segundo. Si esto no es posible se instalarán aspersores de poco alcance y baja o mediana presión, para que no haya una excesiva pulverización. El riego de frutales con porta-aspersores altos sólo se hará si existen barreras rompevientos.

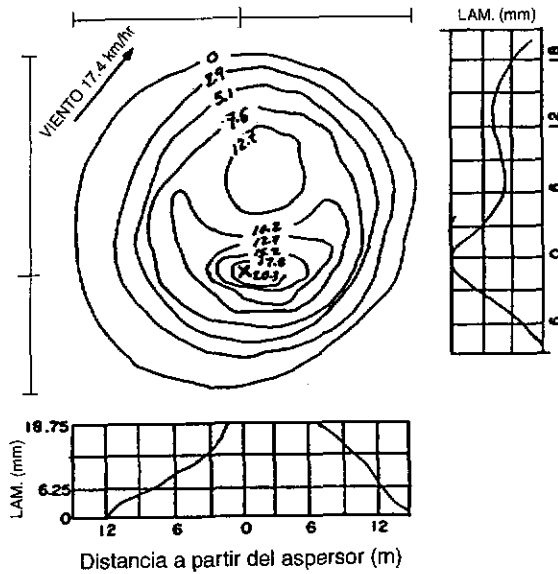


Fig. 9-14 Efecto del viento sobre el modelo de reparto de un aspersor y la altura de agua captada en la red de pluviómetros.

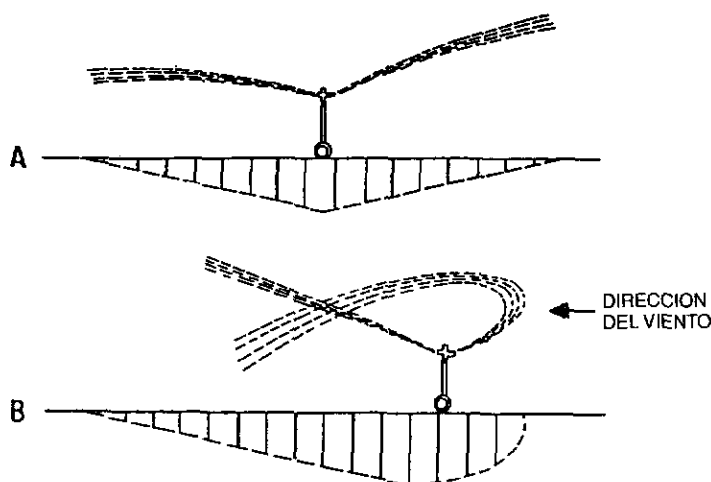


Fig. 9-15 Modelo de reparto de un aspersor funcionando en ausencia (A) y presencia del viento (B) y su efecto en el perfil de humedecimiento del suelo.

Temperatura. Las temperaturas altas acentúan las pérdidas por evaporación, especialmente si la lluvia es muy pulverizada. Para paliar estos efectos negativos conviene utilizar aspersores de baja o mediana presión, con boquillas de mayor diámetro.

Factores agronómicos

Topografía. Cuando la topografía es accidentada no es aconsejable utilizar aspersores de baja presión, con los cuales sería difícil cumplir la norma de que la pérdida de carga existente entre los aspersores de la misma línea de riego sea inferior al 20% de la presión de trabajo, salvo que se utilicen líneas muy cortas. Además, las pendientes fuertes favorecen el escurrimiento, por lo que se aconseja menor pluviometría que en terreno llano.

Suelo. La velocidad de infiltración del agua en el suelo limita la pluviometría. Las gotas gruesas provocan la compactación de determinados suelos, con la consiguiente disminución de la velocidad de infiltración, por lo que se aconseja una lluvia fina en aquellos suelos con malas condiciones de estabilidad. En suelos de textura fina, si la velocidad de giro del aspersor es demasiado baja, las largas fases sin riego entre dos pasadas consecutivas puede provocar el deterioro de la estructura superficial.

Cultivo. El tipo de cultivo, su porte y su cobertura sobre el suelo condicionan el tipo de instalación. Algunos cultivos muy frágiles (flores, algunas plantas hortícolas) necesitan pluviometrías débiles, con gran pulverización y una excelente uniformidad de riego, lo cual exige poca separación entre los aspersores. En cultivos de porte alto (maíz, girasol) se aconseja el riego con pluviometrías medias o elevadas. En frutales se pueden

utilizar aspersores colocados sobre porta-aspersores altos (para regar por encima de follaje) o aspersores de ángulo bajo (para regar por debajo del follaje). En praderas se utilizan aspersores de gran alcance, con el fin de disminuir el costo.

Agua. Con aguas sucias se utilizan aspersores con boquilla grande, para evitar su obstrucción.

Factores técnicos

El tipo y el diámetro de las boquillas determina el modelo de reparto del aspersor. Lo más general es que tenga dos boquillas, con funciones diferentes y complementarias: una distribuye el agua en la periferia del círculo mojado, y la otra lo distribuye en la adyacente del aspersor. En el caso de una sola boquilla (por lo general, aspersores de baja presión y pequeño alcance) ésta ha de cumplir las dos misiones.

Cada aspersor se diseña para operar dentro de un rango de presiones, dentro del cual la distribución del agua se acomoda a un modelo de reparto de agua normal. Cuando la presión es inferior, el chorro se fracciona en gotas grandes, y si esa disminución es excesiva la lluvia se concentra en dos círculos concéntricos, uno en la zona adyacente al aspersor, y otra en la periferia del diámetro mojado. En cambio, cuando la presión es excesiva se produce una gran pulverización, lo que provoca una disminución del alcance del chorro y un exceso de precipitación en la zona circundante al aspersor. (Fig. 9-16).

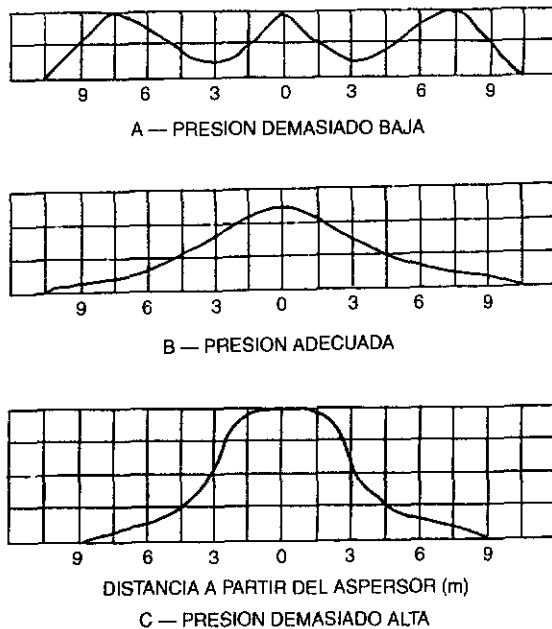


Fig. 9-16 Efecto de diferentes presiones sobre el modelo de reparto del aspersor.

En general, los marcos o espaciamentos pequeños (inferiores a 12 m) hacen un riego más uniforme y precisan de menores presiones; presentan los inconvenientes de un mayor costo del equipo y la necesidad de efectuar mayor número de traslados de tuberías en las instalaciones portátiles. Los marcos grandes (superiores a 24 m) presentan las ventajas e inconvenientes opuestos. Los marcos medianos (comprendidos entre 12 y 24 m) participan parcialmente de las ventajas de ambos.

En tubería superficial se suelen utilizar marcos de riego múltiplos de 6 y 9 m, mientras que en tubería enterrada se puede utilizar cualquier marco.

Factores económicos

El grado de cobertura de la red viene condicionada, sobre todo, por el límite de inversión que el agricultor pueda realizar y por la disponibilidad de mano de obra.

En sistemas semifijos de líneas regadoras móviles o en sistemas fijos con colocación temporal de las tuberías sobre la superficie, la longitud de las líneas regadoras, desde el punto de vista económico, no debe sobrepasar de 200 metros, aunque en cualquier caso conviene hacer el estudio económico pertinente.

Los aspersores de baja presión requieren menor consumo de energía, pero en sistemas semifijos hay que hacer mayor número de cambios de posición, con el consiguiente aumento de mano de obra.

En sistemas fijos se tenderá a instalar aspersores que trabajen a presiones comprendidas entre 2.5 y 3.5 kg/cm² y hagan un buen reparto del agua.

Factores prácticos

En términos generales se pueden tomar las siguientes recomendaciones:

- Es necesario que el fabricante suministre los datos del comportamiento real, en cualquier marco de riego, del aspersor elegido.
- Siempre que sea posible, hacer riego nocturno, por los motivos siguientes: el viento es más suave y hay menos pérdidas por evaporación. Tiene el inconveniente de que se necesita cierta automatización.
- Procurar que la pluviometría sea baja (5-7 mm/hora), para compensar las distorsiones causadas por el viento, ya que duran más tiempo las posiciones de riego.
- Regar formando bloques de riego, pues al disminuir los bordes de la zona regada se logra una mayor uniformidad en el reparto y una disminución de las pérdidas por evaporación.
- Utilizar aspersores de baja presión (menor a 2 kg/cm²) en marcos pequeños (con separación entre aspersores inferior o igual a 12 o 15 metros), para cultivos

frágiles (jardinería, hortalizas), para riego de frutales por debajo de las capas de los árboles o en zonas de mucho viento.

- Utilizar aspersores de mediana presión (de 2 a 4 kg/cm²), con dos boquillas, en marcos medianos 12 × 12 m a 24 × 24 m para gran variedad de cultivos extensivos e intensivos. En aspersores con 2 boquillas conviene utilizar una vaina prolongadora del chorro (que lo hace más compacto) en la boquilla de mayor diámetro cuando la velocidad del viento es mayor de 2 m/segundo.
- Utilizar cañones de riego para riegos de auxilio en cultivos poco frágiles y vientos poco intensos.
- En marcos rectangulares (como 12 × 18 m) es más recomendable que el menor espaciamiento sea paralelo a la dirección del viento cuando se utilizan aspersores de una boquilla. Con aspersores de 2 boquillas es más recomendable que el mayor espaciamiento sea paralelo a la dirección del viento, aunque esto suele tener poca influencia si la boquilla más grande lleva vaina prolongadora.

Sistemas mecanizados de riego por aspersión

La mecanización del riego por aspersión comprende dos sistemas: desplazamiento de un aspersor de gran tamaño y desplazamiento de la línea de riego. El primer caso corresponde a los cañones de riego, en sus modalidades de cañón viajero y enrollador. El desplazamiento automático de la línea de riego corresponde al pivote (con desplazamiento circular) y al lateral de riego (con desplazamiento frontal).

En estos equipos los aspersores riegan a la vez que se desplazan, con lo cual la pluviometría no está determinada únicamente por el caudal instantáneo, sino que es preciso considerar también la velocidad de avance.

Conviene mencionar, puesto que aún se utiliza, el sistema de *línea regadora rodante*, consistente en una tubería con aspersores que actúa como eje de unas grandes ruedas (de 2.5-3 m de diámetro), que trasladan al equipo en sentido frontal desde una posición de riego a la siguiente.

Las ruedas se mueven mediante un motor situado en un extremo o al centro de la línea regadora, y la transmisión se efectúa mediante un eje paralelo a la tubería. El suministro del agua suele ser una tubería enterrada provista de hidrantes para cada una de las posiciones de riego. En otros casos el suministro se hace mediante tubería flexible. (Véase la foto 13).

Este equipo, de bajo costo inicial, se adapta bien a parcelas grandes de forma rectangular, lográndose una buena uniformidad de riego. Desde el punto de vista mecánico es poco resistente y no se puede utilizar en cultivos de porte alto ni en terrenos de topografía irregular.

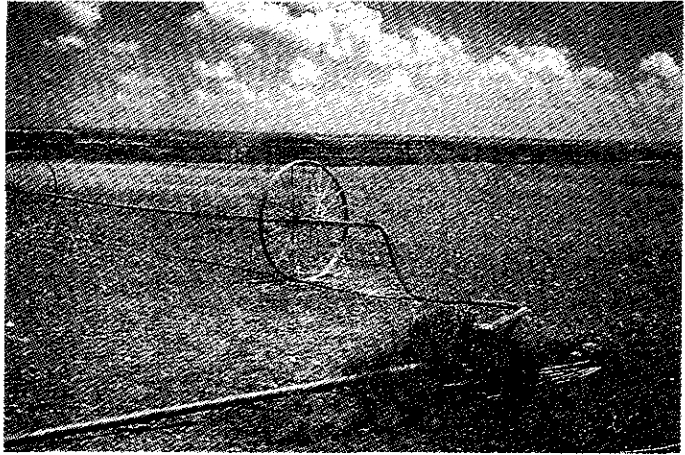


Foto 13.
Línea rodante. (Side Roll).

Cañones de riego

El cañón motorizado de riego consta de un aspersor de gran alcance y caudal (cañón) montado sobre un carro o patín y conectado al suministro de agua mediante una manguera. El equipo riega una superficie en forma de sector circular y siempre hacia atrás con respecto al sentido de avance, con el fin de que se desplace siempre en terreno seco. El sistema motriz suele ser un motor hidráulico accionado por la presión del agua de riego, con una velocidad de avance ajustable en función del flujo.

Hay dos modalidades de cañón motorizado: cañón viajero («traveller») y enrollador («trac»):

Cañón viajero. Consiste en un cañón montado sobre un carro que arrastra una manguera flexible conectada a un hidrante. El carro recorre una calle entre los cultivos, desplazándose con ayuda de un cable de acero anclado en el extremo de la calle o guiado por una rueda directora que se desplace sobre una rodada previamente trazada. (Véase la foto 14).

Para iniciar el riego se coloca el carro con el cañón en un extremo de una calle de la parcela. En el otro extremo de la calle se ancla el cable previamente desenrollado desde un carrete alojado en su carro. El desplazamiento de éste se produce a la vez que se enrolla el cable en el carrete, que va accionado mediante un pistón o una turbina alimentada por una parte del caudal que llega por la manguera. Cuando el carro llega al otro extremo de la calle se para automáticamente y se cierra el paso del agua (figura 9-17).

Para cambiar de posición se desconecta la manguera, se vacía de agua, se recoge en un carrete accionado por la toma de fuerza del tractor y se coloca la máquina en la posición siguiente.



Foto 14.
Cañón de riego montado sobre un carrillo.

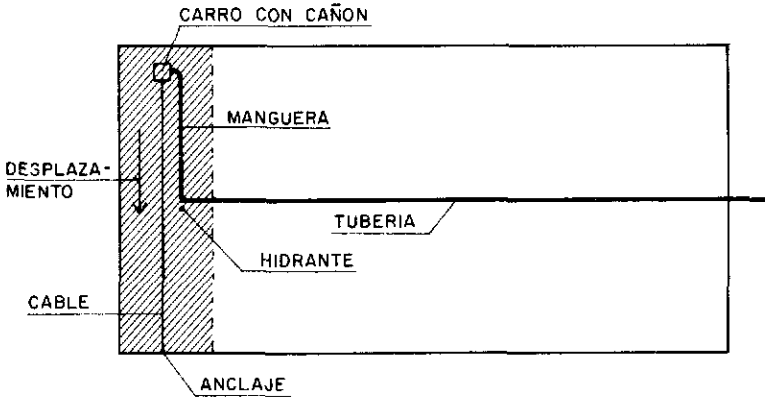


Fig. 9-17 Riego con cañón viajero. En la primera posición se riega la franja rayada.

Enrollador. El enrollador consta de un cañón montado sobre un carrillo y un carrete en donde se enrolla una manguera flexible. Este carrete se mantiene fijo en cada posición de riego, junto a un hidrante.

Para regar se coloca el carrillo con el cañón en el extremo opuesto al carrete, se desenrolla la manguera y se conecta al cañón. A la vez que se riega entra en funcionamiento un mecanismo hidráulico (accionado por la presión de servicio) que hace girar al carrete, con lo cual la manguera se va enrollando a la vez que arrastra al carrillo con el cañón. Cuando el carrillo llega al final de su recorrido entra en funcionamiento un mecanismo que detiene el riego (figura 9-18).

El carro en donde va montado el carrete lleva un dispositivo que le permite girar 180°, con lo cual se puede desenrollar la manguera en sentido opuesto y regar otro tanto de superficie sin cambiar la posición del carrete. (Véase la foto 15).

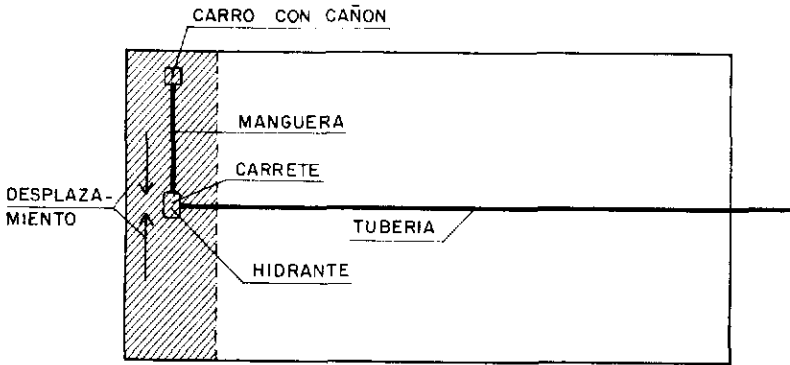


Fig. 9-18 Riego con enrollador. En la primera posición del carrete se riega la franja rayada.

Foto 15.
Cañón de riego con
manguera enrollable.



El enrollador se utiliza más que el cañón viajero, debido a que aquél es de más fácil manejo y necesita menos mano de obra para los cambios de posición. En una posición de riego se pueden regar bandas de más de 100 m de anchura y hasta 500 m de longitud. El caudal está comprendido entre 20 y 150 m³/hora y la pluviometría suele variar de 5 a 35 mm/hora.

El diámetro de la manguera está comprendido entre 50 y 125 mm y la longitud varía de 100 a 500 m. Tienen que soportar grandes presiones de servicios y fuerzas de tracción al ser arrastradas por el suelo. Suelen durar de 6 a 8 años.

Estos equipos son muy adecuados para climas y cultivos en donde la pluviometría natural permite espaciar los riegos, o en aquellos otros casos en donde se necesitan riegos de apoyo. Los cultivos más adecuados son aquellos que cubren una gran proporción de superficie de suelo. Debe tenerse precaución con cultivos delicados, sobre

todo durante la germinación y la floración. En este caso se deben utilizar boquillas más pequeñas y a mayor presión, con el fin de disminuir el tamaño de las gotas.

Los inconvenientes más notables del riego con cañones son los siguientes:

- Se requiere una presión elevada (de 4 a 10 kg/cm²).
- Se produce escurrimiento en suelos arcillosos con velocidad de infiltración lenta.
- El impacto de las grandes gotas producidas actúa desfavorablemente sobre el suelo, sobre todo en suelos arcillosos y sin cobertura vegetal.
- La uniformidad del riego está muy afectada por el viento, debido a la gran altura y longitud del chorro.

Frente a estos inconvenientes, el riego con cañones ofrece la ventaja de que se requiere una inversión inicial baja con relación a la superficie regada.

Se puede conseguir una buena uniformidad en el reparto del agua cuando se diseña y maneja bien el equipo, eligiendo adecuadamente el tipo y tamaño de la boquilla, la presión de trabajo, el ángulo de descarga y el espaciamiento entre las posiciones de riego.

Como norma general se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- La presión de trabajo aumenta con el caudal. Para caudales comprendidos entre 20 y 150 m³/hora, las presiones más adecuadas varían desde 4 a 9 kg/cm².
- En ningún punto de la parcela la presión debe variar más del 20 %, con el fin de que el caudal no varíe más del 10 %. Cuando la variación de presión supera esa cifra se coloca un regulador de presión a la entrada del cañón.
- El ángulo de descarga estará comprendido entre 20° y 25°. Por debajo de 20° el chorro tiene poco alcance, y por encima de 25° está muy afectado por el viento. Cuando la velocidad del viento supera los 4 m/seg, se rebaja el ángulo a 20-21°, aunque quizá sea mejor dejar de regar.
- El espaciamiento entre dos posiciones de riego (expresado en % de diámetro mojado) estará comprendido entre el 80 y el 60 %, según que la velocidad del viento varíe desde cero hasta 5 m/seg.
- Cuando la parcela tiene bastante pendiente conviene que el desplazamiento del cañón se haga en el sentido de la máxima pendiente, con el fin de que el escurrimiento se produzca en terreno seco.
- Se recomienda que el desplazamiento sea perpendicular a los vientos dominantes.
- Cuando hay una línea de alta tensión, el cañón se situará a una distancia mínima de la misma de 30 m, procurando en todo caso que el chorro de agua se rompa antes de llegar a los cables.

En algunos casos, los cañones de riego evolucionan en el sentido de sustituir el cañón por una tubería en donde se montan los emisores (aspersores, difusores o goteros).

De esta forma el cañón se transforma en una línea de riego que se sustenta sobre un carro y se desplaza de forma análoga a como lo hacía el cañón. Estas líneas de riego trabajan a baja presión y con ellas se consigue una buena uniformidad de riego. Riegan franjas de 20 a 40 m y suministran pequeñas dosis de riego, lo que obliga a dar mayor número de riegos.

Líneas de riego automotriz rotatoria («pivote»)

La línea de riego rotatoria, «pivot» o pivote es una máquina constituida fundamentalmente por una estructura metálica que soporta la tubería con los aspersores, dotada de un mecanismo de avance automático y una alimentación de agua continua, lo que permite regar durante el avance. La máquina gira alrededor de un extremo fijo (punto pivote), por donde recibe el agua y la energía eléctrica y en donde se sitúan los elementos de control. (Véase la foto 16).

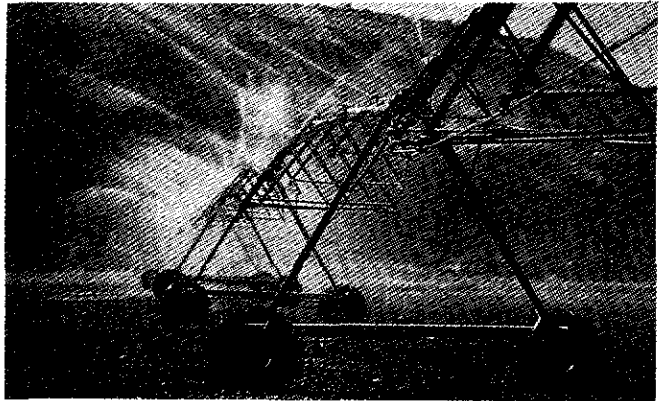
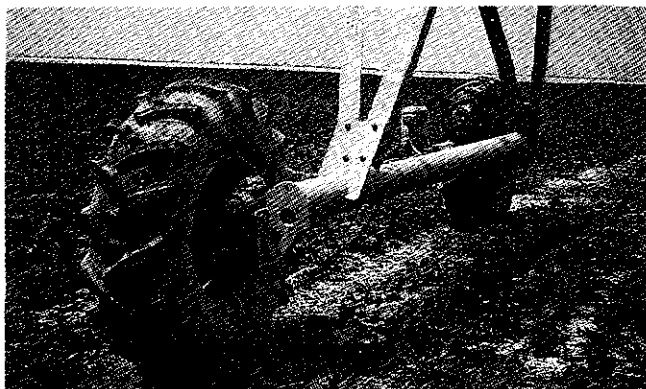


Foto 16.
Riego con pivote central.

Un equipo de riego se compone de varios tramos articulados, soportados cada uno de ellos por una torre metálica, que en su movimiento describen anillos circulares concéntricos. El movimiento de cada tramo se logra mediante un motor eléctrico o hidráulico que transmite el movimiento a unas ruedas mediante un engranaje reductor. El motor eléctrico se ha impuesto sobre el hidráulico, porque permite cambiar el sentido de la marcha y desplazar la máquina sin regar. (Véase la foto 17).

Todos los tramos se mantienen en alineación mediante unos sensores que actúan sobre el sistema motriz. Existe un dispositivo de seguridad que detiene el funcionamiento de la máquina cuando la desalineación sobrepasa los límites previstos.

La longitud del equipo de riego varía de 50 a 800 m, lo que permite seleccionar el modelo adecuado al tamaño de la finca. La inversión inicial por hectárea regada disminuye a medida que aumenta la longitud del equipo.



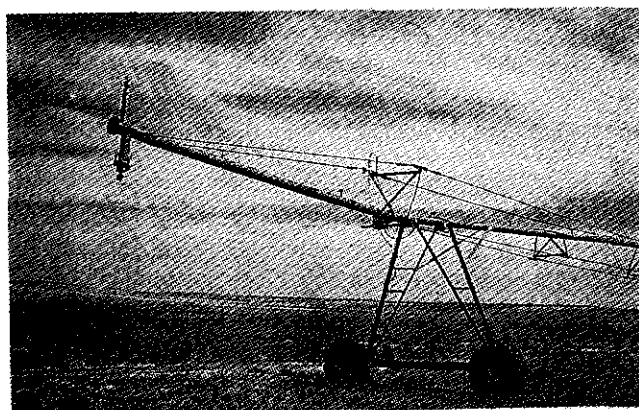
*Foto 17.
Detalle de traslación de pivote.*

La longitud de los tramos (separación de torres) varía de 25 a 75 m. Los equipos con tramos largos resultan más baratos (porque disponen de menos torres por unidad de longitud), pero se adaptan peor a terrenos ondulados; al disponer de menos torres transmiten más peso al suelo, lo que puede originar problemas de atascamiento en algunos terrenos.

La tubería de riego está a una altura de 3 m, aproximadamente, lo que origina una gran dispersión de la lluvia en caso de vientos fuertes. Para salvar este inconveniente algunos modelos incorporan unas alargaderas verticales en cuyo extremo se colocan los emisores.

Los emisores son aspersores y boquillas pulverizadoras. En el extremo móvil de la línea de riego se suele colocar un aspersor de gran caudal, que incrementa la superficie regada. (Véase la foto 18).

Se ha de procurar que la pluviometría se mantenga constante en todo el círculo regado, lo que requiere aumentar la pluviometría de los tramos de la línea de riego a



*Foto 18.
Aspersor de gran caudal
colocado en el extremo de
la línea del pivote central.*

medida que avanzamos desde el centro hacia el extremo. Para ello se adoptan dos modalidades:

- Colocar aspersores desiguales, de gasto creciente desde el centro hacia el extremo, que trabajan a una presión superior a 3 kg/cm².
- Colocar todos los aspersores iguales a lo largo de la línea de riego, pero variando su separación, cada vez menor a medida que nos alejamos del centro. Los emisores pueden ser aspersores que trabajan a una presión de 2-3 kg/cm² o boquillas pulverizadoras que trabajan a una presión de 0.8-1.8 kg/cm².

Cuando la línea de riego es bastante larga, la mayor pluviometría del extremo podría sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo, lo que limitaría la longitud de la línea. La pluviometría más alta en el extremo se obtiene con boquillas pulverizadoras (de 150 a 300 mm/hora), seguido de aspersores iguales de media presión (de 50 a 80 mm/h) y, por último, están los aspersores desiguales de alta presión (de 25 a 40 mm/h).

La evolución actual del pivote se orienta hacia la baja presión, que ahorra energía, pero vemos que las modalidades de baja presión originan una gran pluviometría en el extremo. Para solventar este inconveniente se trata de aumentar la anchura mojada, montando a lo largo de la línea regadora unos tramos cortos de tubería en donde se colocan de 2 a 5 emisores (sistema denominado «booms»). La inclinación de estos tramos de tubería con relación a la línea regadora varía a lo largo de la misma, siendo más perpendiculares hacia el extremo y más inclinados hacia el centro. De este modo, en cada momento de riego se forma un sector circular mojado, con lo cual la pluviometría resultante es bastante homogénea en toda la superficie.

La superficie regada es de forma circular, por lo que resulta inevitable que queden áreas de la finca sin regar. Cuando estas áreas se quieren aprovechar para el riego se instala un mecanismo, denominado «de esquina», que consiste en un brazo articulado montado en el extremo del ala y que entra en funcionamiento sólo cuando la máquina llega a una esquina de la finca sin regar. Este equipo presupone un costo elevado con relación al aumento de superficie de riego, por lo que sería preferible regar esa superficie por otro sistema o dejarla sin regar.

El riego con pivote se adapta a todos los cultivos, salvo aquellos en donde la altura de las plantas o las características del cultivo impidan el paso de la máquina. Las características idóneas para este riego son las fincas de gran tamaño con suelos permeables de escasa retención de la humedad y topografía llana. La eficiencia de aplicación del agua alcanza valores comprendidos entre el 80 y el 85 %. El costo de aplicación del agua (que comprende los gastos de mantenimiento, mano de obra, energía y agua consumida) desciende a medida que aumenta el tamaño del equipo, pero permanece constante a partir de las 50-60 ha regadas, que corresponde a una longitud de la línea de 400-500 m. El costo de aplicación del agua con pivote, con relación al riego de cobertura total enterrada, resulta más económico a partir de 10-15 ha de superficie regada.

Línea de riego automotriz de traslación paralela (lateral de avance frontal)

Este equipo, de estructura semejante al pivote, consiste en una línea de riego montada sobre unos soportes de dos ruedas que se desplaza en sentido perpendicular a la tubería, regando superficies de forma rectangular. El suministro de agua se hace tomándolo directamente de una acequia, que corre paralela al lindero de la parcela, o mediante tubería flexible que se conecta a unos hidrantes situados en el margen de la parcela. (Véanse las fotos 19 y 20).

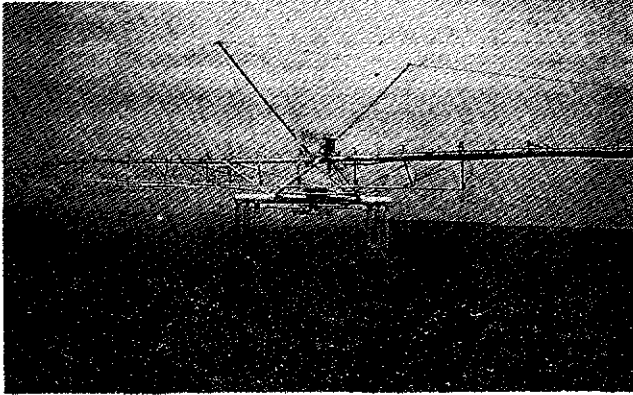


Foto 19.
*Línea de riego lateral
de avance frontal.*

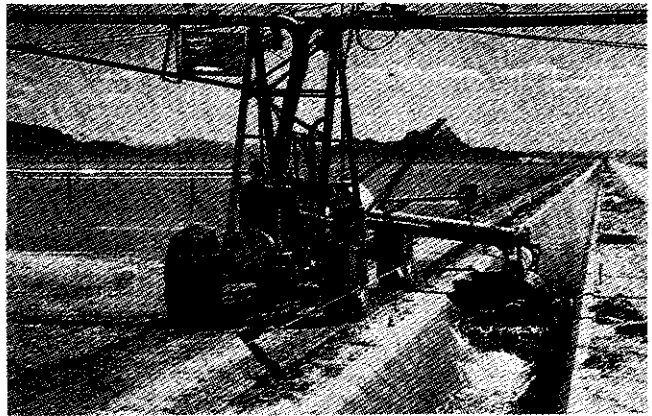


Foto 20.
*Línea de riego lateral de
avance frontal con toma
de agua de un canal.*

El lateral de avance frontal presenta ventajas e inconvenientes, con respecto al pivote. Las ventajas más notables son:

- Deja menos superficie sin regar, ya que la forma usual de las parcelas se asemeja más al rectángulo que al círculo.

- Resulta más fácil conseguir una pluviometría constante en toda la superficie regada.
- Se consigue una alta uniformidad de riego con baja presión.

Los inconvenientes son los siguientes:

- Requiere mayor inversión que el pivote y su manejo es más complicado.
- Las tomas de agua y de energía no son fijas, lo que ocasiona mayores dificultades de instalación y funcionamiento.
- Resulta más difícil lograr el alineamiento de la línea regadora, ya que los tramos están libres por ambos extremos.

Una vez que se van resolviendo técnicamente estos inconvenientes, esta máquina presenta un futuro muy prometedor. Actualmente se fabrican equipos más pequeños que se adaptan bien a fincas de tamaño pequeño y forma irregular.

Situación actual del riego por aspersión mecanizado

En máquinas regadoras se tiende actualmente a poner emisores de baja presión. En el caso del pivote, la presión viene limitada por la velocidad de infiltración del agua en el suelo, ya que la mayor pluviometría en el extremo de la línea de riego corresponde a una presión baja. No existe esta limitación en el lateral de avance frontal, por lo que pueden actuar a baja presión en toda clase de suelos, lográndose un alto coeficiente de uniformidad. Tanto en pivote como en lateral de avance frontal se tiende a colocar los aspersores más cerca del cultivo. Junto a las máquinas grandes aparecen en el mercado otras pequeñas que se acomodan a fincas de menor superficie, de topografía menos uniforme y de forma menos regular. También se ofrecen pivotes que se pueden trasladar a una nueva posición de riego.

Los cañones de riego (cañones viajeros y enrolladores) son adecuados para el riego de praderas y riegos de auxilio en cultivos extensivos, porque con poca inversión se puede regar una gran superficie. Precisan una gran presión y producen un chorro de gotas gruesas (que actúan desfavorablemente sobre la estructura del suelo) y de gran altura (fácilmente distorsionado por el viento). Por estos inconvenientes los cañones se van sustituyendo por líneas de riego montadas sobre carro autopropulsado o arrastradas por un carrete accionado por un mecanismo hidráulico.

CAPÍTULO 10

RIEGO LOCALIZADO

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

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

La localización del agua en la proximidad de las plantas se manifiesta en que se modifican algunas características de las relaciones suelo-agua-planta, tales como: reducción de la evaporación, distribución del sistema radical, régimen de salinidad, etc. La alta frecuencia de aplicación del agua implica unas importantes consecuencias sobre su aprovechamiento, ya que al estar siempre el suelo a la capacidad de campo o muy próximo a ella, las plantas absorben el agua con mucha facilidad.

El riego localizado incluye:

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

El riego localizado en las relaciones suelo-agua-planta

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

Pérdida de agua en el suelo

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

En términos generales se puede decir que la evapotranspiración en el riego localizado es análoga a la de otros sistemas. Únicamente hay alguna ventaja, a favor del riego localizado, en el caso del cultivo de árboles cuando éstos aún son pequeños. El verdadero ahorro de agua, con relación a otros sistemas de riego, consiste en que se eliminan las pérdidas en las conducciones y las ocasionadas por percolación profunda y escurrimiento superficial.

La transpiración se hace más difícil cuando la humedad del suelo desciende por debajo de ciertos límites. Por este motivo, cuando en los riegos por gravedad y por aspersión el intervalo de riego se prolonga más de lo debido se produce una disminución de la transpiración; pero esta disminución no se puede considerar como un ahorro de agua, puesto que al descender la transpiración disminuye la fotosíntesis y, en consecuencia, disminuye también la biomasa. En este supuesto, el riego de alta frecuencia supone un mejor aprovechamiento del agua y un mayor rendimiento del cultivo.

Régimen de humedad

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

El nivel mínimo depende, sobre todo, del tipo de cultivo y de su estado de desarrollo. A su vez, el nivel mínimo se caracteriza por una cantidad de agua existente en un suelo determinado, pero de ninguna manera depende del método de riego utilizado. La respuesta de los cultivos al riego no depende, por tanto, del método de riego, sino del régimen de humedad del suelo que produce ese método.

En la práctica, los riegos por gravedad y por aspersión sin cobertura total se practican por el sistema de turnos, mediante el cual las parcelas se riegan cada cierto número de días aplicando una dosis de riego suficiente para cubrir las necesidades del cultivo durante ese período. A partir del momento del riego, el suelo va perdiendo agua por evapotranspiración. En suelo con poca capacidad de retención de agua (suelos arenosos o poco profundos) el nivel mínimo se alcanza en seguida, con lo cual la producción se

resiente si el intervalo de riego se alarga más allá de 3 ó 4 días. Pero estos intervalos tan cortos aumentan el costo de la operación de regar.

En el riego localizado el intervalo entre riegos se elige a voluntad, por lo que el contenido de humedad del suelo se mantiene siempre alejado del nivel mínimo, esto es muy cercano a la capacidad de campo del suelo.

Aireación del suelo

En los riegos por gravedad y por aspersión se suelen utilizar dosis grandes de riego. El suelo queda saturado de agua después del riego, por lo que pueden presentarse problemas de aireación en suelos muy arcillosos. En el riego localizado el suelo sólo se satura en un volumen muy reducido próximo al emisor, con lo cual no se presentan esos problemas.

Distribución del sistema radical

Numerosas experiencias han puesto de manifiesto que las plantas pueden desarrollarse normalmente con un volumen de suelo inferior al que normalmente ocupan. Ello se debe a que el sistema radical se desarrolla rápidamente en la zona húmeda disponible, por lo que no es raro que en la zona húmeda del riego localizado la concentración de raíces sea 3-4 veces mayor que en otros riegos no localizados.

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

Cabría la posibilidad de disminuir el marco de la plantación para aprovechar el volumen de suelo no mojado, pero ello acarrearía problemas de falta de luz en el follaje, aparte de otras consideraciones de orden práctico, como puede ser el espacio necesario para el paso de las máquinas.

Los cultivos arbóreos entran en producción muy pronto, debido al gran desarrollo que alcanza el sistema radical. Por esto mismo no se debe labrar, ya que fácilmente se deteriora un sistema radical tan tupido.

El bulbo húmedo

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

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

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

- *La textura del suelo.* En suelos arenosos, con gran cantidad de poros grandes, el agua circula con mayor facilidad hacia abajo, mientras que en suelos arcillosos el agua se extiende con más facilidad hacia los lados. En consecuencia, en suelos arenosos el bulbo tiene forma alargada y en suelos arcillosos tiene forma achatada (figura 10-1).

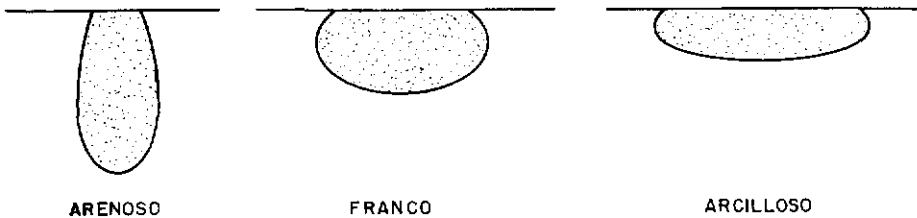


Fig. 10-1 Forma del bulbo húmedo en suelos de diferente textura.

- *El caudal de cada emisor.* Cuando el agua empieza a salir por un emisor se forma un pequeño charco, a la vez que el suelo empieza a absorber agua en toda la superficie del mismo. El tamaño del charco depende del caudal que sale por el emisor: a mayor caudal corresponde una superficie mayor del charco y, por tanto, un bulbo más extendido en sentido horizontal (figura 10-2).
- *El tiempo de riego.* A medida que aumenta el tiempo de riego (suponiendo un caudal constante en el emisor) el tamaño del bulbo aumenta en profundidad, pero apenas aumenta su extensión en sentido horizontal. La figura 10-2 muestra la forma y el tamaño que adquiere el bulbo en un suelo franco cuando se aplica la misma cantidad de agua con dos emisores de distinto caudal.

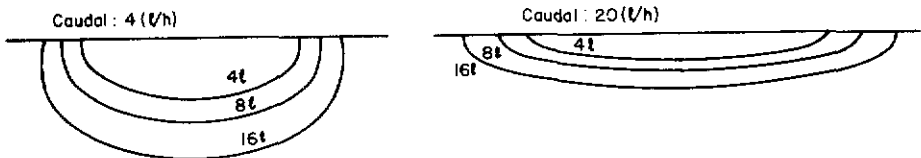


Fig. 10-2 Forma y tamaño del bulbo húmedo en un suelo franco cuando se aplica la misma cantidad de agua con dos emisores de distinto caudal.

Salinidad

Las sales contenidas en el suelo y las aportadas con el agua de riego se mantienen en disolución en el agua del suelo. La planta absorbe el agua y una pequeña parte de

sales, quedando el resto en el suelo. A medida que disminuye el agua aumenta la concentración de sales, con lo cual aumenta la tensión osmótica de la disolución y las plantas encuentran mayor dificultad para absorber el agua.

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

En términos generales, el potencial del agua en el suelo es la suma del potencial osmótico y del potencial matricial. Al ser este último muy bajo en el riego localizado, el potencial osmótico puede ser mayor, por cuyo motivo pueden utilizarse agua y suelo más salinos que en otros sistemas de riego.

La concentración de sales dentro del bulbo va aumentando progresivamente hacia la periferia del mismo, sobre todo en la zona superficial, en donde se presenta con frecuencia una corona blanca de sales (figura 10-3). Las raíces de las plantas se concentran en la zona más húmeda del bulbo, que corresponde a la de menor concentración de sales, en tanto que la periferia del mismo, con mayor concentración, ofrece una barrera que dificulta el paso de las raíces hacia zonas exteriores del bulbo. En el caso de cultivos anuales se presenta el riesgo de que en el cultivo siguiente las semillas se coloquen en las zonas salinizadas, lo que puede dificultar su nacencia.

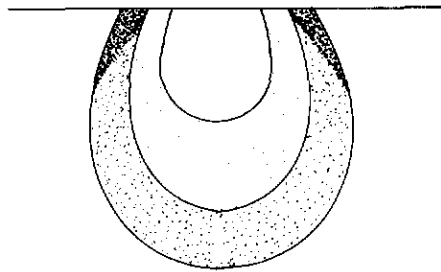


Fig. 10-3 Distribución de las sales en el bulbo húmedo. (El punteado indica la magnitud de la concentración de sales.)

En caso de lluvias no muy copiosas, las sales del anillo superficial son arrastradas hacia el interior del bulbo. Para paliar este aumento de salinidad conviene no detener el riego durante la lluvia, o ponerlo en funcionamiento inmediatamente después de terminar aquélla, con el fin de arrastrar de nuevo las sales hacia la periferia del bulbo.

Para mantener baja la salinidad del bulbo hay que efectuar lavados frecuentes, salvo en los lugares donde el régimen de lluvias permita hacer un lavado natural. La solución ideal sería que cada riego lleve su dosis de lavado. En otros casos, cada cierto tiempo se hace un riego complementario por aspersión para provocar el lavado.

Aplicación de fertilizantes

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

Ventajas e inconvenientes del riego localizado

El riego localizado ofrece una serie de ventajas e inconvenientes que es preciso conocer y evaluar para tomar una decisión razonable al momento de elegir o no su implantación.

Las ventajas con respecto a los sistemas de riego tradicionales son las siguientes:

- Mejor aprovechamiento del agua.
- Posibilidad de utilizar aguas con un índice de salinidad más alto.
- Mayor uniformidad de riego.
- Mejor aprovechamiento de los fertilizantes.
- Aumento de la cantidad y calidad de las cosechas.
- Menor infestación por malas hierbas, debido a la menor superficie de suelo humedecida.
- Posibilidad de aplicación de fertilizantes, mejoradores químicos y pesticidas con el agua de riego.
- Facilidad de ejecución de las labores agrícolas, al permanecer seca una buena parte de la superficie del suelo.
- Ahorro de mano de obra.

Los inconvenientes son los siguientes:

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

Componentes de la instalación

Los componentes fundamentales de una instalación de riego localizado son los siguientes:

- Cabezal de riego.
- Red de distribución.
- Mecanismos emisores de agua.
- Dispositivos de control.

El cabezal de riego comprende un conjunto de aparatos que sirven para tratar, medir y filtrar el agua, comprobar su presión e incorporar los fertilizantes. Existe una gran variedad de cabezales, aunque los elementos básicos (equipo de tratamiento del agua, filtros, equipo de fertilización) son comunes a todos ellos y varían según la calidad del agua, grado de automatización y características de los materiales.

Del cabezal depende, en gran parte, el éxito o fracaso del riego, por lo que debe prestarse una gran importancia a su instalación, ya que desde él se regula el suministro de agua y un gran número de prácticas agrícolas, tales como la fertilización y la aplicación de pesticidas. (Véase la foto 21).



Foto 21.
Cabezal de riego por goteo.

La red de distribución conduce el agua desde el cabezal hasta las plantas. Del cabezal parte una red de tuberías que se llaman primarias, secundarias, etc., según su orden. Las de último orden, llamadas *tuberías laterales*, distribuyen el agua uniformemente a lo largo de su longitud por medio de emisores u orificios.

Se suele colocar un regulador de presión al principio de cada tubería de donde parten los laterales. La superficie de riego dominada por un regulador de presión se denomina *sub-unidad de riego*. Al conjunto de sub-unidades de riego que se riegan desde un mismo punto se denomina *unidad de riego*, en cuyo punto se suele instalar un aparato para controlar el caudal de agua (figura 10-4).

Las tuberías primarias, secundarias y terciarias suelen ser de PVC o de PE. Las primeras deben ir enterradas para evitar el deterioro ocasionado por la exposición a la radiación solar. Los laterales suelen ser de PE de baja densidad. (Véase la foto 22).

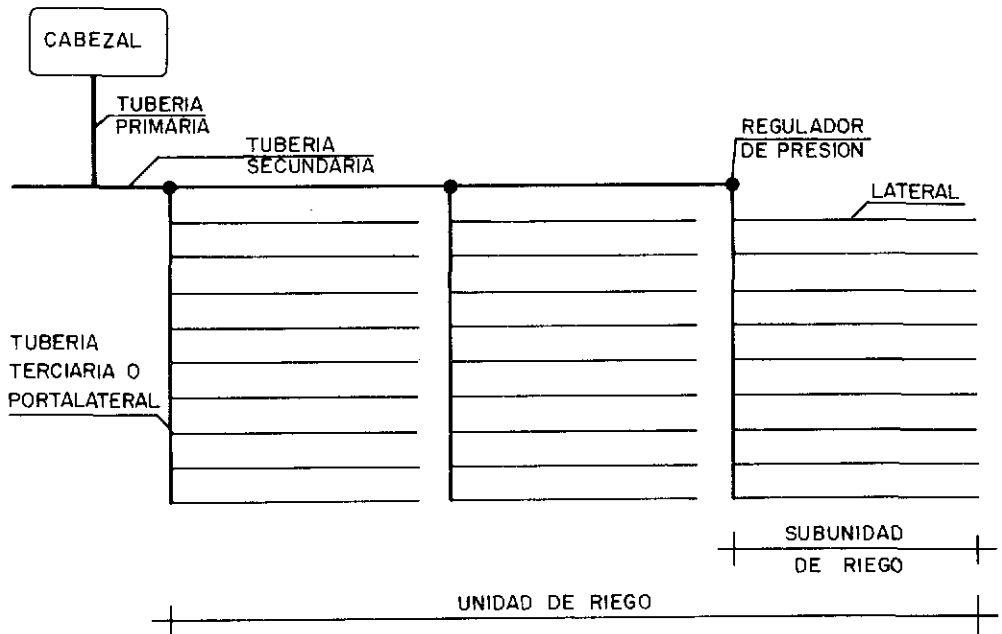


Fig. 10-4 Red de distribución de una instalación de riego localizado.



Foto 22.
Riego por goteo mostrando las líneas regantes con goteros que parten de otra secundaria.

Los emisores son los dispositivos encargados de aplicar el agua. En riego por goteo son los goteros y las tuberías emisoras. En riego por microaspersión son los difusores (con boquillas fijas) y los microaspersores (tienen algún elemento con movimiento de rotación).

Los dispositivos de control son los elementos que permiten regular el funcionamiento de la instalación. Estos elementos son: medidores, manómetros, reguladores de presión o de caudal, etcétera. (Véase la foto 23).

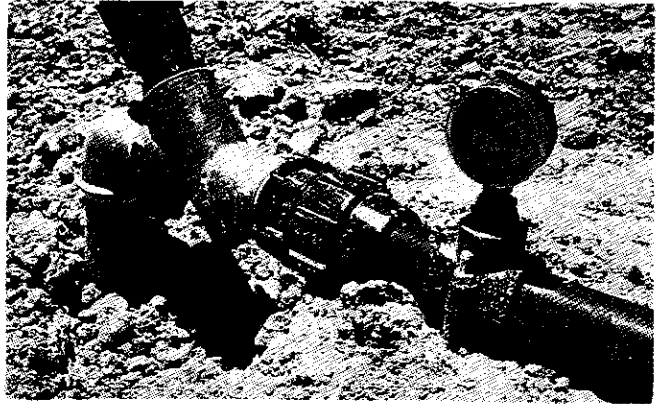


Foto 23.
Regulador y medidor de presión.

Obstrucciones

Uno de los mayores problemas que se presentan en el riego por goteo es la obstrucción de los emisores, producida por materias que van reduciendo progresivamente el paso del agua. Durante los últimos años se ha tratado de resolver el problema mediante el perfeccionamiento de las técnicas de filtrado y la mejora en el diseño de los emisores, pasando de pequeños pasos de agua y régimen laminar a pasos de agua más amplios y régimen turbulento.

La obstrucción de los goteros puede ser producida por materias de distinta naturaleza:

- Partículas orgánicas: restos vegetales y animales, algas, bacterias.
- Partículas minerales: arena, limo, arcilla.
- Precipitados químicos.

El mayor o menor riesgo de obstrucción se debe, sobre todo, a las características del agua: sales disueltas, pH, temperatura, etc. La fertirrigación es un riesgo de obstrucción, puesto que modifica algunas cualidades del agua de riego.

Para combatir las obstrucciones se utilizan dos tipos de procedimiento:

- *Preventivo*: Consiste en evitar las obstrucciones mediante filtrado y tratamientos químicos del agua.
- *De limpieza*: Cuando la obstrucción ya se ha producido se hacen tratamientos del agua o se rompe la obstrucción mediante aplicaciones de agua o aire a presiones altas.

La prevención de obstrucciones debe empezar antes de entrar en servicio la instalación, efectuando un lavado de la misma con agua a presión, con el fin de facilitar la salida de partículas de plástico y de tierra que hubieran podido quedar dentro de las

conducciones durante el montaje. Se deben colocar purgadores en los extremos de las tuberías principales, secundarias y portagoteros.

Prefiltrado

Cuando el agua contiene en suspensión una gran proporción de partículas inorgánicas (arena, limo, arcilla) hay que eliminar una buena parte de ellas antes de la entrada del agua en el cabezal de riego. Esta separación de partículas o prefiltrado se hace de dos formas:

- *Depósito de decantación.* Cuando la cantidad de partículas de limo y arcilla sobrepasa 200 ppm, los equipos de filtración se obturan continuamente, por lo que procede la eliminación de esas partículas mediante un depósito de decantación. Los limos muy finos y las partículas de arcilla decantan muy lentamente, pero no importa que una parte de esas partículas pase al sistema de distribución, a condición de que se tomen las precauciones adecuadas.
- *Hidrociclón.* Es un dispositivo que permite la separación de las partículas de arena cuyo tamaño sea superior a 75 micras.

Depósito decantador

Este depósito tiene por misión separar del agua, por sedimentación, las partículas minerales en suspensión (arena, limo, arcilla). Algunas aguas subterráneas contienen ácido carbónico, que favorece la disolución de compuestos de hierro. Cuando esas aguas son bombeadas y se airean dan lugar a precipitados de hierro. La permanencia del agua en el depósito decantador favorece la precipitación y sedimentación del hierro antes de pasar a la instalación.

La superficie del depósito decantador se determina en función del caudal de entrada y de la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión. Esta velocidad de sedimentación se determina experimentalmente en un recipiente que tenga la misma profundidad que el depósito decantador. El funcionamiento del depósito es independiente de su profundidad, por lo que ésta no se calcula, estableciéndose en un metro, aproximadamente.

La superficie del depósito decantador viene dada por la fórmula:

$$S = \frac{F \times Q}{10V}$$

S = Superficie del depósito, en m^2 .

Q = Caudal de entrada, en l/seg.

V = Velocidad de sedimentación, en cm/seg.

F = Factor de almacenaje. (Se suele hacer $F = 2$).

La longitud del depósito se hace 5 veces mayor que su anchura.

En la entrada del decantador se colocan unos deflectores que distribuyen el agua por toda su anchura, con lo que se evita la formación de turbulencias. La salida del agua del decantador se efectúa a una altura media, de tal forma que impida el paso de cuerpos flotantes y partículas sedimentadas.

Ejemplo

Dimensionar un depósito decantador para eliminar las partículas minerales mayores de 75 micras, sabiendo que el caudal de entrada es 30 l/seg y que la velocidad de sedimentación de las partículas de menor tamaño es de 0.50 cm/seg.

Solución:

$$S = \frac{F \times Q}{10V} = \frac{2 \times 30}{10 \times 0,50} = 12 \text{ m}^2$$

Anchura del depósito: a

Longitud del depósito: $l = 5a$

$$12 = a \times 5a = 5a^2$$

$$a = \sqrt{\frac{12}{5}} = 1,54 \text{ m}$$

$$l = 5a = 5 \times 1,54 = 7,70 \text{ m}$$

Hidrociclón

El hidrociclón es un dispositivo, desprovisto de elementos móviles, que permite la separación de las partículas sólidas en suspensión cuyo tamaño sea superior a 75 micras y cuya densidad sea superior a la del agua. Consiste en un recipiente de forma de cono invertido en donde el agua entra tangencialmente por la parte superior, lo que provoca un movimiento rotacional descendente en la periferia del recipiente. Las partículas sólidas en suspensión se proyectan contra las paredes y descienden hacia un depósito de sedimentos colocado en la parte inferior. El agua libre de sedimentos es impulsada en movimiento rotacional ascendente y sale por un tubo situado en la parte superior (figura 10-5).

El hidrociclón es un separador sencillo, económico y de gran eficacia (elimina hasta el 98 % de las partículas anteriormente citadas). Requiere que el caudal se mantenga constante dentro de límites muy estrechos, que dependen de sus dimensiones.

En un hidrociclón se producen importantes pérdidas de carga, que dependen del caudal y de sus dimensiones geométricas (diámetro de hidrociclón y diámetros de las tuberías de entrada y de salida), pero no vienen influidas por la mayor o menor

acumulación de sedimentos en el depósito inferior. Las pérdidas de carga suelen ser del orden de 3-7 mca; en cualquier caso el fabricante debe suministrar los nomogramas o tablas correspondientes.

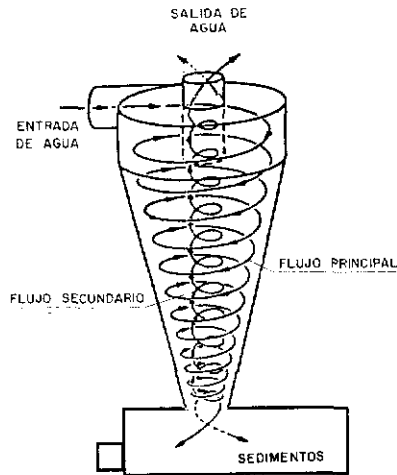


Fig. 10-5 Esquema de un hidrociclón.

Filtrado

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

Filtro de arena

El filtro de arena sirve para retener contaminantes orgánicos (algas, bacterias, restos orgánicos) e inorgánicos (arenas, limos, arcillas, precipitados químicos). Es el tipo de filtro más adecuado para filtrar aguas muy contaminadas con partículas pequeñas o con gran cantidad de materia orgánica.

Un filtro de arena consiste en un depósito metálico, de forma cilíndrica, en cuyo interior pasa el agua a través de varias capas de arena silíceo o granítica. El agua entra por la parte superior del depósito y se recoge en la parte inferior a través de unos colectores que desembocan en la tubería de salida. El depósito lleva una boca de carga de arena en la parte superior y otra de descarga en la parte inferior (figura 10-6). El espesor de la capa de arena debe ser, como mínimo, de 45 cm.

La eficacia del filtrado depende del tamaño de la arena que, a su vez, determina el tamaño de los poros entre las partículas. Se estima que el filtro de arena deja pasar las partículas cuyo tamaño es la décima parte del diámetro efectivo de la arena. Las partículas

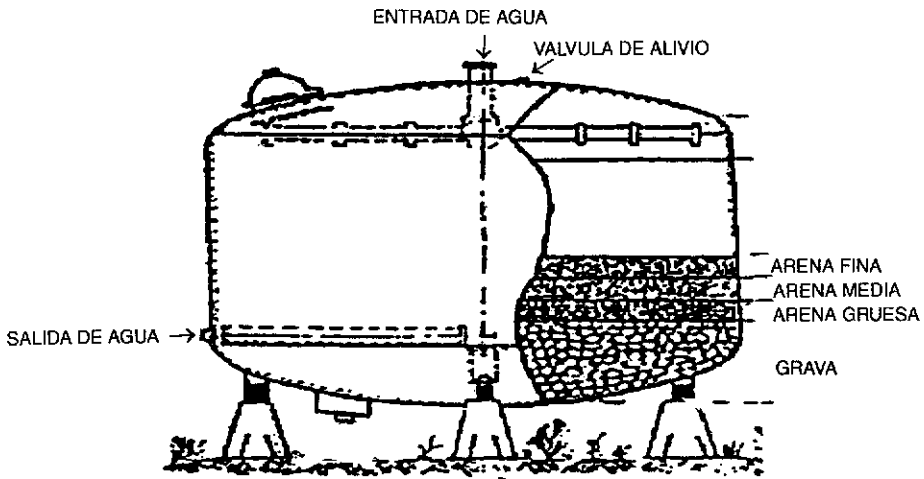


Fig. 10-6 Esquema de un filtro de arena.

contaminantes que lleguen a los goteros deben tener un tamaño máximo igual a la décima parte del diámetro del gotero, por lo que el diámetro efectivo de la arena debe ser igual al diámetro de paso de agua del gotero. Un tamaño mayor de la arena origina un filtrado deficiente, y un tamaño menor da lugar a una rápida saturación del filtro y, por tanto, a limpiezas de filtro más frecuentes.

La tabla 1 indica datos de las clases de arena disponibles en el mercado.

Tabla 1: Clases de arena

Número del tamiz	Diámetro efectivo (mm)	Coficiente de uniformidad	Calidad de filtrado (mesh)
8	1.50	1.47	100-140
11	0.78	1.54	140-200
16	0.66	1.51	140-200
20	0.46	1.42	200-250

El número de tamiz o número de malla (número mesh) es el número de orificios por pulgada lineal (25.4 mm).

Diámetro efectivo es la apertura del tamiz que deja pasar a su través el 10 % de la arena y retiene el 90 % restante.

Coficiente de uniformidad es la relación entre las aperturas de los tamices que dejan pasar el 60 % y el 10 % de la arena. La arena de filtro para riego debe tener un coeficiente de uniformidad cercano a 1.50.

En la tabla 1 se indican calidades de filtrado. Por ejemplo, la arena del tamiz 11 hace la misma calidad de filtrado que una malla de 200 mesh; ambas retienen partículas de 78 micras (1/10 de 0.78 mm es 0.078 mm = 78 micras).

La capacidad de filtrado viene dada por el caudal de agua que atraviesa la unidad de superficie filtrante (expresada en $m^3/h \cdot m^2$ de superficie filtrante), o lo que es igual, por la velocidad del agua dentro del filtro (expresada en m/h), que a su vez depende de la granulometría de la arena.

La tabla 2 indica los diferentes caudales y velocidades adecuados para cada tipo de arena.

Tabla 2: Capacidad de filtrado según la granulometría de la arena

Arena	Tamaño mm	Caudal $m^3/h \cdot m^2$	Velocidad m/hora
Fina	0.4-0.8	25-50	25-50
Media	0.8-1.5	50-70	50-70
Gruesa	1.5-3	70-90	70-90

Ejemplo

Calcular la superficie filtrante para un riego por goteo con un caudal de 80 m^3/h y un diámetro mínimo del gotero de 0.90 mm.

Solución:

El tamaño de la arena debe ser igual al diámetro de paso de agua en el gotero. Corresponde a una arena de tipo medio. (Véase tabla 2).

A esta arena corresponde una velocidad del agua dentro del filtro de 60 m/h y un caudal de 60 m^3/h y por m^2 de superficie filtrante.

Superficie filtrante:

$$S = \frac{80}{60} = 1.33 \text{ m}^2$$

Diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.33}{3.14}} = 1.30 \text{ m}$$

Se instala un filtro de 1.30 m de diámetro. Si se instalan dos filtros, cada uno de ellos tendría una superficie filtrante de $1.33:2 = 0.66 \text{ m}^2$

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.66}{3.14}} = 0.91 \text{ m}$$

Se instalan dos filtros de 1 m de diámetro.

Cuando el filtro entra en uso se van contaminando sucesivamente las capas de arena desde arriba hacia abajo. En el momento en que toda la capa de arena está contaminada se produce una diferencia de presión importante entre las partes superior e inferior del filtro, pudiendo ocurrir que se originen conductos a través de la capa de arena (canales preferentes) por donde el agua pasa sin filtrar. Antes de llegar a esta situación hay que limpiar el filtro.

En filtros limpios la pérdida de carga no debe ser superior a 3 mca, aumentando progresivamente conforme el filtro se va contaminando. Se debe efectuar la limpieza del filtro cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida del mismo sea de 2 mca, con respecto a las condiciones de limpieza total. Conviene utilizar el mismo manómetro para ambas tomas, con el fin de que su descalibrado no afecte a la lecturas.

Para limpiar el filtro de arena se invierte el sentido de la circulación del agua, para lo cual se prevé de antemano las correspondientes derivaciones en las tuberías de entrada y de salida. Para garantizar una mejor limpieza conviene instalar dos filtros, de tal forma que el agua filtrada de uno de ellos sirva para hacer la limpieza del otro (figura 10-7).

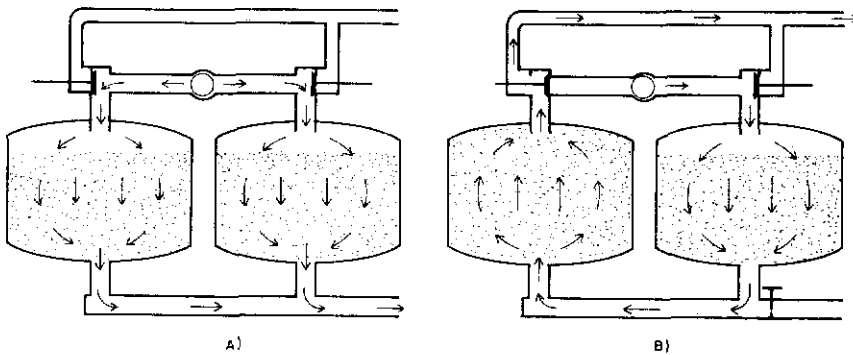


Fig. 10-7 A) Funcionamiento de un filtro de arena en fase de filtración. B) Funcionamiento en fase de lavado.

Se puede automatizar la limpieza mediante un sistema que se acciona cuando la diferencia de presión en la conducción, antes y después del filtro, alcance el valor prefijado.

La operación de lavado se hace durante 5 minutos, por lo menos, con el fin de remover bien la arena y eliminar los posibles canales preferentes que se hayan podido formar en su interior. Se puede sospechar de la existencia de dichos canales cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro es inferior a 2-3 mca y, sin embargo, los filtros de malla (que se colocan aguas abajo) se ensucian reiteradamente.

Al final de la temporada de riegos los filtros de arena se lavan con agua y cloro, para evitar la proliferación de microorganismos.

Los filtros de arena se colocan en el cabezal, antes de los medidores y válvulas volumétricas, ya que estos aparatos requieren agua limpia para su correcto funcionamiento.

Filtro de malla

La filtración se verifica en la superficie de una o más mallas concéntricas, fabricadas con material no corrosivo (acero o material plástico). Un modelo de filtro de malla y su funcionamiento se representa en la figura 10-8.

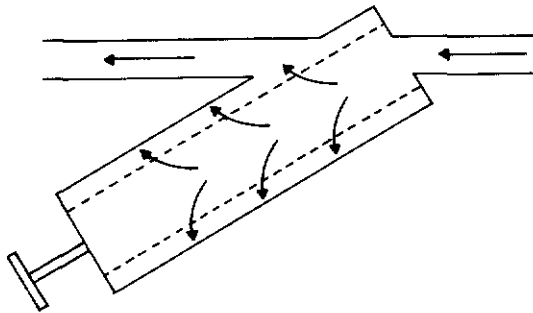


Fig. 10-8 Filtro de malla. El agua proveniente de la tubería penetra en el interior del cartucho de malla y se filtra a través de sus paredes, pasando a la periferia del filtro y posteriormente a la conducción de salida. Las partículas filtradas quedan en la cara interior del cartucho de malla.

El filtro de malla se satura o tapa con rapidez, por cuya razón se utilizan para retener partículas inorgánicas de aguas que no están muy contaminadas. Cuando existen algas en el agua hay que instalar aguas arriba un filtro de arena que las retenga, pues de otra forma tapan rápidamente la malla. La calidad del filtrado viene en función de la apertura de la malla. (Véase la foto 24).

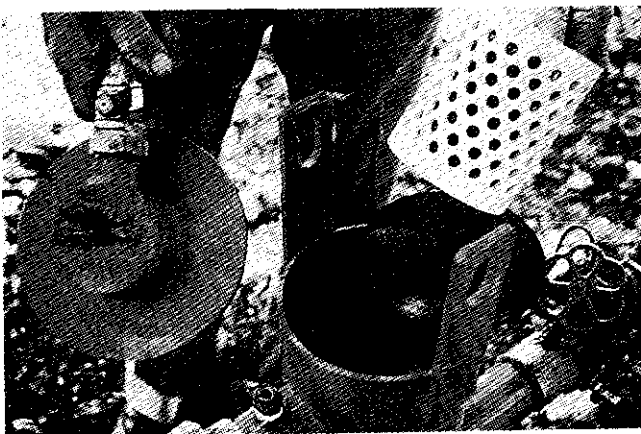


Foto 24.
Filtro de malla para riego por goteo.

El grosor de los hilos de la malla es distinto, según que ésta sea de acero o de plástico (son más finos los de acero que los de plástico), por cuyo motivo los orificios de malla de acero son mayores que los de malla de plástico. En la tabla siguiente se indica la relación entre el número de malla y el tamaño de los orificios de la malla de acero inoxidable.

Tabla 3: *Relación entre número de malla y tamaño de los orificios en malla de acero inoxidable*

Número de malla	Tamaño de orificio micras
60	250
80	180
100	150
120	130
150	106
170	90
200	75
250	63

En mallas de plástico cada fabricante debe suministrar la información correspondiente a su producto.

Se admite que el tamaño de los orificios de la malla debe ser 1/7 del tamaño del orificio del gotero. Las mallas más utilizadas para riego por goteo son las de 120, 150 y 200 mesh, aunque, por lo general, no es recomendable utilizar mallas con tamaño inferior a 200 mesh, porque se obstruyen continuamente.

La capacidad de filtrado viene dada por el caudal de agua que atraviesa la unidad de superficie filtrante (expresado en $m^3/h \cdot m^2$), o lo que es igual, por la velocidad del agua al atravesar la superficie filtrante (expresado en m/h). La velocidad que se recomienda en filtros de malla es de 0.4-0.6 m/seg (1,440 - 2,160 m/h).

La superficie filtrante efectiva es un porcentaje de la superficie total del filtro, cuyo dato debe suministrar el fabricante.

Ejemplo

Calcular el tipo de malla y la superficie filtrante de un filtro de malla de acero, para un caudal de 57 m^3/h y un diámetro mínimo del gotero de 0.9 mm. Se sabe que el área efectiva es 0.3 del área total.

Solución:

Se considera que el tamaño de los orificios de la malla debe ser de 1/7 del tamaño del orificio del gotero.

$$\text{Orificio de malla } \frac{0.9}{7} = 0.128 \text{ mm} = 128 \text{ micras.}$$

$$\text{Número de malla (según tabla 3)} = 120.$$

$$\text{Velocidad del agua dentro del filtro} = 0.4 \text{ m/seg} = 1,440 \text{ m}^3/\text{h.}$$

$$\text{Caudal de agua que atraviesa el filtro} = 1,440 \text{ m}^3/\text{h} \text{ y por m}^2 \text{ de superficie filtrante.}$$

Para calcular la superficie efectiva se incrementa el caudal de riego en un 20 %, como margen de seguridad.

$$57 + (0.2 \times 57) = 68.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Superficie efectiva} = \frac{68.4}{1.440} = 0.0475 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie total} = \frac{0.0475}{0.3} = 0.1583 \text{ m}^2 = 1,583 \text{ cm}^2$$

A medida que la malla se va llenando de impurezas aumenta la pérdida de carga. En un filtro limpio, la pérdida de carga es de 1 a 2 mca, dato que deben dar los fabricantes. La limpieza del filtro debe realizarse cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro sea superior a 2 mca con respecto a las condiciones de limpieza total.

La limpieza manual de los filtros se realiza sacando el cartucho y lavándolo con un cepillo y agua a presión. Al final de la temporada se realiza una limpieza más esmerada, para lo cual se sumerge el cartucho durante unos minutos en una disolución de ácido nítrico al 5-10%, lavándolo posteriormente con agua a presión. También se puede hacer esta limpieza sumergiendo el cartucho durante 12 horas en un baño de vinagre, lavándolo posteriormente con agua a presión y cepillo.

La operación de limpieza se puede automatizar mediante mecanismos adecuados que provocan la inversión del flujo cuando se alcanza una diferencia de presión prefijada entre la entrada y la salida del filtro.

Los filtros de malla se instalan en los cabezales de riego o en algún punto de la red de tubería. Cuando se instala filtro de arena, el filtro de malla se coloca aguas abajo de aquél, para que la arena que pudiera arrastrar el agua procedente del filtro de arena quede retenida en el filtro de malla.

El fertilizante se inyecta entre el filtro de arena y el de malla. De esta forma no se favorece la formación de algas en el filtro de arena, y el de malla retiene las impurezas de los fertilizantes y los precipitados que se puedan formar. Cuando los fertilizantes se inyectan en la red de tuberías, el filtro de malla se coloca aguas abajo de la inyección.

Los filtros autolimpiantes requieren una cierta presión de funcionamiento, lo que hay que tener en cuenta para su colocación en los puntos de la red que dispongan de esa presión.

Filtro de anillas

El elemento filtrante es un conjunto de discos o anillas con las caras asurcadas, que van montadas sobre un soporte central cilíndrico y con la superficie perforada. Las anillas se comprimen entre sí al roscar la carcasa. El agua se filtra al pasar por los pequeños conductos situados entre dos anillas consecutivas, pasando a continuación al interior del soporte central a través de sus orificios superficiales (figura 10-9).

La calidad del filtrado depende del número y profundidad de las ranuras, pudiendo conseguir un filtrado equivalente al de una malla de 200 mesh. Las pérdidas de carga con filtro limpio oscilan entre 1 y 3 mca.

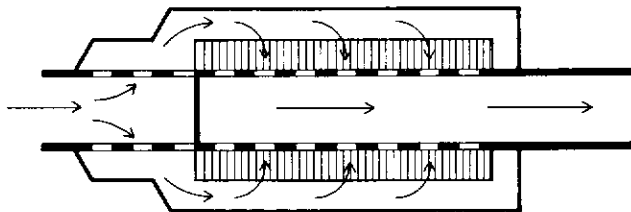


Fig. 10-9 Esquema de un filtro de anillas. Las anillas (rayado vertical) van montadas sobre un soporte central cilíndrico con orificios en la superficie. El agua se filtra por las ranuras de las anillas y pasa, a través de los orificios, al interior del soporte central.

El filtro de anillas tiene la misma aplicación que el filtro de malla, utilizándose uno y otro indistintamente. Ultimamente se utiliza mucho el primero, debido a su gran efectividad y facilidad de limpieza. Para hacer la limpieza manual se abre la carcasa, se separan las anillas y se limpian al chorro de agua. La limpieza automática también se hace con facilidad, sin necesidad de desmontar el filtro ni reducir la presión y el caudal de agua.

Conviene limpiar el filtro cuando la caída de presión sea igual o superior a 2 mca con respecto a la caída de presión característica del filtro limpio.

Tratamiento químico del agua

El tratamiento químico del agua consiste en incorporar algún producto químico, con la finalidad de prevenir o combatir las obstrucciones causadas por algas, bacterias o precipitados químicos.

Para solucionar un problema de obstrucción hay que conocer la causa que lo originó. Los tratamientos químicos más utilizados son: la cloración (para descomponer la materia orgánica) y la acidificación (para disolver los precipitados químicos).

En los tratamientos químicos hay que evitar la corriente de reflujo en dirección contraria a la normal, que se puede producir por efecto de sifón o contrapresión. Esta corriente de reflujo puede contaminar el agua de pozos, depósitos o tuberías de abas-

tecimiento de agua potable, por lo que cuando exista ese riesgo, se ha de incorporar al sistema una válvula de retención que evite esa corriente.

Algas en depósitos de agua

En muchas ocasiones el agua de riego se almacena en depósitos o embalses al aire libre, en donde se crea un medio favorable para el desarrollo de algas, cuyo problema más importante es que obstruyen con mucha frecuencia los filtros de arena, lo que obliga a lavados frecuentes.

El tratamiento más efectivo contra las algas es la aplicación de sulfato de cobre a la dosis de 0.05 a 2 g/m³, según la especie de algas a tratar. Como norma general se puede aplicar la dosis de 2 g/m³, con lo que se previene el desarrollo de cualquier clase de algas. Cuando las algas están ya desarrolladas hay que aplicar una dosis de 4-5 g/m³ de agua a tratar.

Para que la distribución sea uniforme, el sulfato de cobre se coloca en unos recipientes de plástico con agujeros, situados en la superficie del depósito.

El sulfato de cobre no se debe utilizar cuando haya tuberías de aluminio en la instalación. En este caso se pueden utilizar quelatos de cobre (más caros que el sulfato) u otros alguicidas no tóxicos para los cultivos.

A falta de otro tratamiento será conveniente vaciar el depósito, limpiarlo y pintar las paredes con pintura alguicida. También da buenos resultados incorporar al depósito peces como carpas o tencas, en cuyo caso habría que reducir la dosis de sulfato de cobre, en el supuesto de que se completase la acción de los peces con un tratamiento químico.

Microorganismos en el interior de la instalación

La causa más frecuente de obstrucciones es la proliferación de algas microscópicas y bacterias en el interior de la instalación. La mayor o menor proliferación de estos microorganismos es debida a factores tales como la calidad del agua, su temperatura, la transparencia de los materiales, etc.

En el interior de las tuberías más o menos transparentes a la luz se desarrollan unas algas filamentosas que pueden provocar obstrucciones. Para evitar este inconveniente, las tuberías deben estar enterradas o ser de colores oscuros.

Los residuos de algas muertas que atraviesan los filtros, junto con algunos iones (hierro, sulfuro y manganeso) contenidos en el agua son un buen alimento para ciertas bacterias que oxidan las formas solubles transformándolas en insolubles, que precipitan. Estos precipitados se unen a los cuerpos de las bacterias formando un mucílago o una masa gelatinosa que se adhiere a las conducciones y los goteros.

Los sedimentos de hierro son de color ocre y se pueden producir a partir de una concentración de 0.1 ppm. El riesgo es mucho mayor cuando la concentración sobrepasa 0.4 ppm y el pH está comprendido entre 7 y 8.

El agua de riego empieza a ser problemática a partir de una concentración de sulfuro de 0.1 ppm.

El manganeso está menos presente que los dos iones anteriormente citados. El problema se presenta a partir de una concentración de 0.2 ppm, y se agrava cuando sobrepasa de 0.4 ppm. El sedimento de manganeso es de color oscuro. El sedimento de mezcla de hierro y manganeso es de color marrón oscuro.

El tratamiento más eficaz y económico para destruir algas y bacterias (y en general, la materia orgánica) es la cloración, incorporación al agua de riego hipoclorito sódico o cloro gaseoso. El hipoclorito es de fácil manejo, pero resulta más caro que el cloro gaseoso, que, a su vez, tiene el inconveniente de que es muy peligroso y requiere personal especializado para su aplicación. En instalaciones pequeñas suele emplearse hipoclorito, y en instalaciones grandes, cloro gaseoso.

Para que se produzca la muerte de los microorganismos se requiere un tiempo de contacto de 30-60 minutos, por lo que los tratamientos preventivos suelen aplicarse al final del riego, dejando el agua tratada en las conducciones hasta el próximo riego. La acción biocida es más efectiva con pH bajo (comprendido entre 5 y 6) y temperaturas altas.

La inyección de cloro o productos clorados se realiza antes del sistema de filtrado, para evitar el crecimiento de algas y bacterias en los filtros. Por otra parte, los productos insolubles de hierro, manganeso y azufre que se hayan podido formar por la acción oxidante del cloro pueden ser retenidos por los filtros.

La cloración no debe realizarse al mismo tiempo que la fertirrigación con fertilizantes nitrogenados, ya que se producen unos compuestos (las cloraminas) muy estables, que permanecen en el agua durante bastante tiempo, pudiendo dañar a los cultivos.

Para tratamientos preventivos se utiliza:

- Hipoclorito sódico (de 100 gramos de cloro activo por litro de producto) en dosis de 10-20 cm³ por m³ de agua, aplicado al final de cada riego, en los últimos 10 minutos y dejando el agua en las conducciones hasta el próximo riego.
- Hipoclorito sódico (de 100 g/litro) en dosis de 100-200 cm³ por m³ de agua, aplicado cada 10-15 días; mantener la solución en la instalación durante 30-60 minutos y lavar posteriormente.
- Cloro gaseoso en dosis de 1-2 ppm en tratamiento continuo, y 10-20 ppm en tratamientos periódicos. Si la concentración de hierro es superior a 0.1 ppm la cloración debe hacerse de forma continua.

Cuando ya se han formado los mucílago (mezcla de microorganismos y precipitados) que obstruyen total o parcialmente los goteros se necesita un tratamiento de limpieza

con una concentración de cloro libre de 500-1,000 ppm (5-10 litros de hipoclorito sódico de 100 g/litro por m³ de agua). Se mantiene en la instalación durante 24 horas y a continuación se lava con agua a presión para arrastrar los sedimentos. No es recomendable el tratamiento con dosis inferiores, ya que las partículas y costras desprendidas de las paredes de las conducciones y no destruidas por completo ocasionan el taponamiento de los goteros.

Para destruir los mucílago de los filtros de arena se aplica hipoclorito sódico a dosis de 10-15 litros/m³ de agua; se mantiene durante 24 horas y se lava a continuación.

Las dosis altas de cloro causan daños a los cultivos, por lo que los tratamientos de limpieza deben hacerse cuando no hay cultivos o, en caso contrario, hacer un lavado abundante para diluir el cloro residual que sale por los goteros.

El cloro ataca al latón, por lo que se evitará su contacto con aquellos elementos que lo contengan (aparatos de medida, rotores de las bombas, etc.).

La cantidad de hipoclorito sódico necesario para los tratamientos se calcula mediante la fórmula:

$$q = \frac{Q \times c}{C}$$

q = Caudal de inyección, en l/h.

Q = Caudal de agua de riego a tratar, en l/h.

c = Concentración de cloro en el agua de riego, en mg/l (o ppm).

C = Concentración de cloro en el producto clorado, en mg/l.

Ejemplo

Calcular el caudal de inyección para mantener una concentración de cloro de 20 mg/l en un caudal de agua de riego de 30 m³/h. Se clora con hipoclorito sódico (ClONa) de concentración 60 g/l.

Solución:

$$q = \frac{Q \times c}{C} = \frac{30,000 \times 20}{60,000} = 10 \text{ l/h}$$

Si, por ejemplo, el tratamiento dura 15 minutos se necesitarían $10/4 = 2.5$ litros.

Precipitados químicos

Los precipitados químicos se producen cuando se modifican las cualidades del agua (temperatura, pH, aumento de la concentración de ciertos elementos debido a la incorporación de fertilizantes y otras sustancias químicas) y cuando se evapora el agua en los goteros después de cada riego, lo que hace aumentar la concentración de sales disueltas.

Las obstrucciones más frecuentes son las provocadas por carbonato cálcico, carbonato magnésico y sulfato cálcico, que se producen cuando el agua contiene iones de calcio, magnesio, bicarbonato y sulfato; en menor medida están las obstrucciones producidas por compuestos de hierro, azufre o manganeso, que en forma reducida son solubles, pero precipitan al oxidarse. Los valores elevados del pH favorecen la precipitación de sales.

Precipitados de calcio. Los precipitados de calcio, que son los de mayor consideración, se pueden prever con el *índice de saturación de Langelier*, según el cual el calcio precipita en forma de carbonato cuando alcanza su límite de saturación en presencia de bicarbonato. (Ver capítulo 3). Todas las aguas con valores del índice positivos requieren medidas preventivas.

El índice de saturación de Langelier indica el valor que debe tener el pH del agua de riego para que dicho índice sea cero, pero no indica la cantidad de ácido que se precisa aportar para conseguirlo. Para este fin se procede de la forma siguiente: a un volumen conocido de agua se van añadiendo cantidades crecientes de ácido de concentración conocida, valorando en cada caso el pH alcanzado mediante un papel medidor, hasta conseguir el pH deseado. A continuación se calcula, mediante una proporción, la cantidad de ácido necesaria para el caudal de riego.

El carbonato cálcico es muy soluble en un medio ácido, por lo que la forma más eficaz para combatir sus precipitados es controlar el pH del agua y limpiar periódicamente las conducciones con un ácido, seguido de un lavado con agua a presión.

Los ácidos comúnmente utilizados para estos tratamientos son: nítrico, sulfúrico y clorhídrico, grado industrial, cuyas características más importantes son:

	<i>Normalidad</i>	<i>Grados de acidez Beaume (°Be)</i>
Nítrico	14	40
Sulfúrico	36	66
Clorhídrico	12	22

El más utilizado es el ácido nítrico, que, además, es fertilizante.

Como norma general de tratamiento preventivo se puede proceder de la siguiente forma:

- Tratamiento diario con ácido nítrico, durante unos 10-15 minutos, al final del riego, manteniendo el pH del agua a la salida de los goteros entre 5.5 y 6.5. Para ello normalmente se necesitará una dosis de 100-300 cm³ por cada m³ de agua.
- Tratamiento con ácido nítrico cada 15-20 días, manteniendo el pH a la salida de los goteros entre 3 y 5. Se necesitará normalmente una dosis de 0.5-1 litros de ácido por m³ de agua.

El tratamiento con ácido se hace durante unos 30 minutos, a baja presión (0.5 atmósferas menor de la presión de trabajo). A continuación se hace un lavado con agua, a presión normal, durante 15 minutos, abriendo los extremos de los ramales portagoteros para que salgan los restos de precipitados no disueltos.

Cuando ya se han producido obstrucciones se hace un tratamiento de limpieza con ácido nítrico, procurando mantener el pH alrededor de 2, para lo cual se necesitará una dosis de 1-2 litros de ácido por m³ de agua. Cuando la solución ácida ha llegado al gotero más alejado se para el funcionamiento de la instalación durante 12 horas y, a continuación, se limpian las tuberías haciendo funcionar la instalación a la presión máxima y abriendo los extremos de los ramales portagoteros para que salgan los restos de precipitados no disueltos. Una vez terminada la limpieza se comprueban las presiones en la red y el caudal del gotero; si éstas no son las deseables se procede a una nueva inyección de ácido. Este tratamiento se hace por sub-unidades de riego.

Al final de la temporada cuando no hay cultivos se puede dar un tratamiento general con ácido nítrico, a dosis de 3-5 litros por m³ de agua, procediendo de forma análoga a como se ha indicado anteriormente.

Hay que tener la precaución de no mezclar los distintos ácidos y de incorporar siempre el ácido al agua y nunca el agua al ácido. La inyección del ácido se hace después del sistema de filtrado, para evitar corrosiones de los elementos metálicos.

Cuando la obstrucción es muy grande estos tratamientos son ineficaces, en cuyo caso se introducen los goteros en baños de ácido. En cualquier caso hay que calcular si resulta más barato hacer esta aplicación que sustituir los goteros por otros nuevos.

Cuando la arena de los filtros se contamina con precipitados de carbonatos conviene cambiar la arena, que resulta más barato que limpiarla.

El caudal que debe aportar la bomba inyectora en la red se calcula mediante la fórmula:

$$q = \frac{Q \times c}{1,000C}$$

q = Caudal de inyección, en l/h.

Q = Caudal de agua de riego a tratar, en l/h.

c = Concentración de ácido en el agua de riego (obtenido mediante el ensayo anterior), en l/m³.

C = Concentración de ácido grado industrial, expresado en tanto por uno.

Ejemplo

Calcular el caudal de inyección para mantener una concentración de ácido en el agua de riego de 3 l/m³, en un caudal de circulación de 60 m³/h. Se utiliza ácido nítrico concentrado industrial.

Solución:

$$q = \frac{Q \times c}{C} = \frac{60,000 \times 3}{1 \times 1,000} = 180 \text{ l/h}$$

Precipitados de hierro, azufre y manganeso. Los compuestos de hierro, azufre o manganeso son solubles en forma reducida, pero precipitan al oxidarse en contacto con el aire o con oxidantes. El tratamiento preventivo consiste en oxidar antes de los filtros de arena, para que los precipitados queden retenidos en esos filtros.

El hierro de las aguas subterráneas puede ser oxidado mediante pulverización de aire a la entrada del depósito de decantación o del embalse de regulación. Como elementos oxidantes se emplean:

- Cloro en la proporción de 1 ppm de cloro por cada 0.7 ppm de hierro. Conviene aumentar la proporción de cloro para el control de las bacterias que producen precipitados.
- Permanganato en la proporción de 0.6:1, con relación a la cantidad de hierro presente.
- Acidificación con un nivel de pH inferior a 4 durante un período de tiempo de 30 a 60 minutos.

En presencia de manganeso hay que tener precaución en la cloración, ya que la reacción es muy lenta y los precipitados se pueden formar después de pasar el filtro de arena.

En el caso de que la obstrucción ya se haya producido con compuestos de hierro, azufre o manganeso se hace un tratamiento análogo al descrito para obstrucciones calizas.

Precipitados provocados por incorporación de fertilizantes. Para evitar la formación de precipitados al incorporar fertilizantes (fertirrigación) u otros productos químicos (quimigación) hay que tener en cuenta los siguientes requisitos:

- Deben ser suficientemente solubles y muy puros, para que no se formen natas ni sedimentos.
- Hay que evitar la mezcla de sustancias que puedan reaccionar entre sí y producir precipitados.
- Compatibilidad con los elementos contenidos en el agua de riego.
- No deben corroer ni dañar el material de la instalación.

Para comprobar la compatibilidad del producto incorporado con el agua de riego se vierte una cantidad del producto en un recipiente con agua, en tal proporción que resulte una concentración ligeramente más alta a la que se ha de producir en el riego. Se agita bien y se deja en reposo durante 24 h. No se recomienda el empleo de esa sustancia cuando se forma sedimento en el fondo o espuma en la superficie.

Las soluciones amoniacales incorporadas al agua de riego que contenga cantidades apreciables de calcio y magnesio pueden provocar la precipitación de esos elementos cuando el pH es alto. Pero, en general, los problemas de obstrucción no están asociados a los fertilizantes nitrogenados, salvo en el caso que éstos quedaran estancados en la tubería entre dos riegos consecutivos, lo que favorece la proliferación de microorganismos. Para evitar este inconveniente se riega sólo con agua al final de la fertirrigación.

Los fertilizantes fosfatados pueden reaccionar con el calcio y magnesio presentes en el agua de riego provocando la formación de precipitados insolubles. Para evitar estos inconvenientes, que se producen con un pH elevado, se acidifica la solución fertilizante añadiendo ácido sulfúrico a la propia solución o inmediatamente después de la fertirrigación. Se da por supuesto que los fertilizantes fosfatados no pueden mezclarse con otros que contengan calcio o magnesio.

El empleo de fertilizantes acidificantes puede ser un buen método para mantener limpia la instalación. En algunos casos tan sólo es preciso utilizar ácido una vez al año para hacer una limpieza profunda de la instalación.

Cuando se fertirriga hay que tener la precaución de regar sin fertilizante al principio y al final de cada riego, pues en estas fases hay mayor riesgo de que se produzcan precipitados.

Cuando el zinc se suministra en forma de sulfato se pueden producir precipitaciones. Los quelatos no ofrecen esta dificultad, pero tienen un costo más elevado.

Las soluciones concentradas de fertilizantes o las que tienen un pH muy alto o muy bajo pueden producir corrosión en el cobre, zinc, bronce u otras partes metálicas, por lo que se recomienda que los componentes que entren en contacto con esos fertilizantes sean de plástico o de acero inoxidable.

Hay que tener la precaución de no utilizar nematocidas que reaccionen con el PVC ni emulsionantes que ataquen al polietileno.

Emisores

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

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

Un emisor debe reunir las siguientes características:

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

No es necesario que el emisor posea a la vez todas estas características, sino sólo aquellas que se precisan para cada caso concreto. Por ejemplo, un emisor debe ser poco sensible a la obstrucción cuando se utilizan aguas superficiales bastante contaminadas, pero no es tan necesaria esta cualidad cuando se utilizan aguas subterráneas limpias. En terrenos llanos no se necesitan emisores que compensen las diferencias de presión, pero sí se necesitan en terrenos ondulados.

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

Relación caudal-presión

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

$$q = kh^x$$

q = Caudal del emisor, en litros/hora.

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

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

x = Exponente de descarga característico de cada emisor.

Esta ecuación se puede representar gráficamente, tomando presiones en el eje de abscisas y caudales en el eje de ordenadas. La curva definida por esta ecuación se llama *curva característica* del emisor.

El exponente de descarga expresa la sensibilidad de un emisor a las variaciones de presión. Su valor varía de cero a uno. Cuando se aproxima a cero significa que el caudal varía muy poco con las variaciones de presión, en cuyo caso el emisor se llama *auto-compensante*; cuando el valor se aproxima a la unidad significa que el caudal varía mucho con las variaciones de presión (figura 10-10).

Cada curva característica corresponde a una determinada temperatura del agua.

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

Uniformidad de fabricación

En teoría todos los emisores de una misma marca y modelo deberían dar el mismo caudal cuando actúan a la misma presión y temperatura, pero en la práctica no ocurre así. Las variables de fabricación (tipo de material, temperatura, desgaste de la maqui-

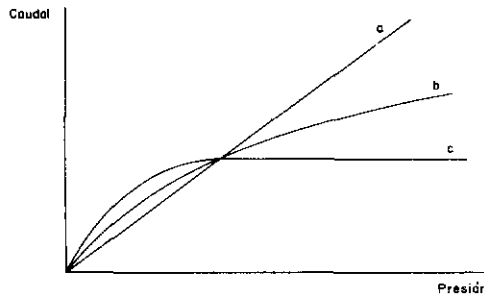


Fig. 10-10 Curva característica de emisores: a) Régimen laminar ($x = 1$). b) Emisores tipo orificio o boquilla ($x=0,5$). c) Autocompensante perfecto ($x=0$) en el intervalo donde la curva se convierte en una recta horizontal.

aria, etc.) afectan a las dimensiones del emisor y, por tanto, a su caudal. Para valorar la uniformidad de una muestra de emisores se ha establecido el *coeficiente de variación de fabricación (CV)*, según el cual se establecen dos categorías de emisores:

Categoría A. Coeficiente de variación inferior a 0.05.

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

Los emisores de categoría A dan una desviación pequeña con respecto al caudal nominal. Los de categoría B dan una desviación considerable, por lo que será deseable elegir los de categoría A, condición necesaria para conseguir una elevada uniformidad de distribución del agua.

Sensibilidad a las obstrucciones

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

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

Diámetro mínimo (mm)	Sensibilidad
Gotosos y tuberías emisoras	
≤ 0.7	Alta
0.7 - 1.5	Media
≥ 1.5	Baja
Difusores y microaspersores	
≤ 0.4	Alta
0.4 - 0.7	Media
≥ 0.7	Baja

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

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

Sensibilidad a los cambios de temperatura

Los laterales de las tuberías de riego localizado suelen experimentar unos incrementos muy notables de temperatura, debido a su exposición al sol, su color negro y la baja velocidad de circulación del agua. No es raro que la temperatura suba hasta 50 °C al final del lateral, o que la diferencia de temperatura a lo largo del mismo sea 20 °C.

Los emisores que trabajan a régimen laminar son muy sensibles a las variaciones de temperatura, ya que al aumentar ésta se incrementa el caudal, lo que origina una disminución de la eficiencia de riego o de la uniformidad en la distribución del agua en aquellas instalaciones en donde se riega a diferentes horas del día. Los emisores de régimen turbulento y los autocompensantes no presentan variaciones sensibles en el caudal al variar la temperatura. Un caso especial es el de los emisores tipo «vortex», en donde el caudal disminuye al aumentar la temperatura.

Aparte de estos inconvenientes, las variaciones de temperatura ocasionan un envejecimiento acelerado del material, que en el caso de los emisores autocompensantes ocasiona una pérdida de la autocompensación.

Goteros

El régimen hidráulico de los goteros repercute decisivamente sobre su funcionamiento. El régimen laminar se caracteriza en que las partículas de agua se mueven ordenadamente y a poca velocidad, disipándose la energía por fricción contra las paredes del conducto. Los goteros cuyo régimen se aproxima al laminar son sencillos y baratos, pero son sensibles a las obstrucciones, su caudal varía mucho con los cambios de presión (exponente de descarga próximo a la unidad) y, además, está influido por la temperatura del agua. Debido a estos inconvenientes, estos goteros están prácticamente en desuso.

En el régimen turbulento las partículas de agua se mueven desordenadamente y con rapidez, disipándose la energía por choque entre las partículas y por fricción contra las paredes del conducto. Los goteros de régimen turbulento más o menos perfecto son más resistentes a las obstrucciones, su caudal tiene una sensibilidad moderada con respecto a los cambios de presión (exponente de descarga alrededor de 0.5) y no son prácticamente afectados por la temperatura del agua.

Atendiendo a la configuración de su conducto, los goteros se pueden clasificar de la siguiente forma:

— *De largo conducto*. El gotero de *microtubo* consiste en un tubo de pequeño diámetro y gran longitud. Su exponente de descarga varía de 0.75 a 1. Debido a los inconvenientes de su régimen próximo al laminar, el microtubo ya no se utiliza como gotero, sino como elemento de conducción.

El gotero de conducto *helicoidal* tiene un exponente de descarga que varía de 0.65 a 0.85 (régimen parcialmente turbulento). Es bastante sensible a las obstrucciones y a los cambios de presión y temperatura, por lo que apenas se utiliza.

— *De laberinto*. El agua recorre una trayectoria en laberinto, por lo que aumenta la turbulencia del flujo (exponente de descarga comprendido entre 0.45 y 0.55). Es poco sensible a las obstrucciones y a los cambios de presión y temperatura.

— *De orificio*. El agua descarga a través de uno o varios orificios de pequeño diámetro. El régimen es turbulento (exponente de descarga próximo a 0.5). Es poco sensible a las variaciones de presión y temperatura, pero se obstruye con facilidad debido a pequeño diámetro de los orificios.

— *De remolino o «vortex»*. Este emisor tiene una cámara circular en donde se produce un remolino, en cuyo centro se localiza el punto de emisión. Debido a la pérdida de carga adicional que se origina, el diámetro del conducto puede ser mayor que en otros emisores, reduciéndose el riesgo de obstrucción. El exponente de descarga varía de 0.45 a 0.55, por lo que son poco sensibles a las variaciones de presión.

— *Autocompensante*. Este emisor tiene un dispositivo que permite variar el tamaño del conducto con relación a la presión de entrada. El dispositivo es, generalmente, una membrana flexible que se deforma bajo el efecto de la presión, limitando el caudal. El efecto *autocompensante* se consigue dentro de una determinada gama de presiones, que debe ser indicada por el fabricante.

Los goteros *autocompensantes* tienen un coeficiente de descarga que varía de cero a 0.3. Proporcionan un caudal correcto dentro de una amplia variación de presión, por lo que están especialmente indicados en terrenos accidentados, en donde se producen importantes diferencias de presión. Tienen el inconveniente de que las variaciones de temperatura afectan a la membrana flexible, por lo que al cabo de cierto tiempo de funcionamiento pierden su *autocompensación*. Son bastante sensibles a las obstrucciones.

Los goteros pueden tener una o varias salidas (normalmente 2, 4 ó 6). En este último caso, para que haya una mayor superficie mojada se amplía el radio de acción mediante unos microtubos que se acoplan a las distintas salidas. En goteros de una salida, el caudal más usual es de 4 litros/hora en frutales y de 2 litros/hora en horticultura.

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

— *Interlínea*. Se instala entre dos secciones transversales de la tubería lateral. Cuando el gotero se conecta a tubería de polietileno, el máximo incremento de diámetro ocasionado en la tubería como consecuencia de la instalación del gotero debe ser

del 13 %. Por ejemplo, si el diámetro interior de la tubería de polietileno es 12 mm, el máximo diámetro de la conexión del gotero interlínea debe ser:

$$12 + 12 \times 0.13 = 13,5 \text{ mm}$$

Los *sistemas integrados* están formados por goteros convencionales incorporados al interior de la tubería en el mismo proceso de fabricación, con una separación entre ellos de 30-80 cm, lo que hace al sistema muy apto para regar cultivos en línea.

- *En derivación o sobre línea.* Se instala sobre la pared de la tubería lateral mediante un orificio practicado con un sacabocados. El fabricante debe suministrar la herramienta adecuada para asegurar la fijación de la conexión con cada tipo de gotero. El gotero puede estar desplazado de la tubería mediante un microtubo que se introduce en la tubería.

La elección de un gotero adecuado influye decisivamente, tanto en la garantía de un buen funcionamiento de la instalación, como en la vida útil, lo que repercute en los costos de amortización. El fabricante debe suministrar al usuario los siguientes datos:

- Marca registrada o nombre del fabricante.
- Caudal nominal y presión de funcionamiento.
- Categoría del emisor (A ó B).
- Instrucciones para la conexión a la tubería.
- Tipo de tubería aconsejable y sus medidas.
- Dimensión mínima de paso del agua.
- Curva caudal-presión.
- Ecuación del emisor.
- Intervalo de presiones de funcionamiento.
- Intervalo de autocompensación (en caso de emisores autocompensantes).
- Instrucciones para la limpieza.
- Limitaciones de uso (fertilizantes, productos químicos).
- Longitud equivalente (en metros de tubería) de la pérdida de carga originada por la conexión del emisor a la tubería.

En caso de no suministrar datos de longitud equivalente, como norma general se puede tomar los siguientes valores:

Para conexión interlínea: Entre 0.1 y 0.3 m.

Para conexión en derivación:

Diámetro nominal (mm)	12	16	20	25	32	40	50	63
Longitud equivalente (m)	0.25	0.16	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03

Tuberías emisoras

Las tuberías emisoras conducen y, a la vez, aplican el agua, bien a través de unas perforaciones poco espaciadas o a través de la pared porosa. El caudal de descarga no sobrepasa de 16 litros/hora por metro lineal de conducción. Por lo general son bastante sensibles a las obstrucciones. Trabajan a presiones inferiores a 10 mca y el exponente de descarga varía de 0.5 a 0.9. Con frecuencia están fabricadas de polietileno y deberían colocarse enterradas a poca profundidad. Son de bajo costo y se utilizan para riego de cultivos en línea, tipo hortalizas, cuyo marco requeriría gran cantidad de goteros.

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

- *Manguera perforada*. Es una tubería de poco espesor, con perforaciones espaciadas uniformemente. A presiones muy pequeñas gotean, y a presiones mayores sale un chorro continuo. Son muy sensibles a las obstrucciones.
- *Manguera de doble pared*. Constan de dos tuberías concéntricas o adyacentes. El agua circula por una de ellas pasando a la otra a través de unos pequeños orificios, de donde sale el exterior por unas perforaciones. La manguera denominada «Bi-wall» tiene un exponente de descarga de 0.5, mientras que la denominada «T-tape» lo tiene de 0.9.

En las *cintas porosas o de exudación* el agua sale a través del material poroso del que están constituidas. Trabajan a presiones comprendidas entre 1 y 3 mca, con un caudal de 1 a 2 litros/hora y metro lineal de cinta. Su régimen es laminar, por cuya razón se han de utilizar en terrenos de poca pendiente, si se quiere conseguir una buena uniformidad de riego. Son muy sensibles a las obstrucciones provocadas por bacterias y algas microscópicas, por lo que se recomienda evitar la exposición a luz enterrándolas superficialmente. Su vida útil es corta.

Microaspersión

La microaspersión consiste en aplicar el agua en forma de lluvia fina, mediante dispositivos que la distribuyen en un radio no superior a los 3 metros. Los dispositivos que tienen boquillas fijas se llaman *difusores*, y los que tienen algún elemento con movimiento de rotación se llaman *microaspersores*. Trabajan a una presión comprendida entre 10 y 20 mca, con caudales desde 16 a 200 litros/hora. En los difusores el chorro de agua incide sobre un deflector que cambia la dirección del agua.

Atendiendo a su funcionamiento hidráulico, los dispositivos de microaspersión pueden ser: de largo conducto, de orificio, de remolino o autocompensante. Los más utilizados son los de orificio, que tienen un exponente de descarga de 0.5, característico del régimen turbulento.

En los suelos de textura gruesa, el riego por goteo forma unos bulbos estrechos y profundos, lo que puede dar lugar a que no se moje un área suficiente de suelo requerido para el desarrollo de un sistema radical. Además, el agua profundiza excesivamente, lo que puede dar lugar a pérdidas de agua y fertilizantes, al quedar fuera del alcance de las raíces.

El riego por microaspersión es una solución para resolver estos inconvenientes. Con respecto al riego por goteo presenta, además, estas ventajas:

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

En cambio, presenta el inconveniente de un mayor costo que el goteo, debido a que emplea mayor caudal (lo que obliga a incrementar el diámetro de los laterales) y una mayor presión de trabajo (lo que repercute desfavorablemente en el costo de la energía).

El fabricante debe suministrar al usuario los siguientes datos relativos a difusores y microaspersores:

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

Necesidades netas de riego

La estimación de las necesidades netas de agua en riego localizado tiene mayor importancia que en otros sistemas de riego, ya que es muy limitado el papel del suelo como almacén o reserva de agua. Esta estimación se hace por los mismos procedimientos empleados en los demás sistemas, pero se aplican después unos coeficientes correctores.

Cuando el agua se aplica en toda la superficie a regar, las necesidades netas vienen dadas por la ecuación:

$$N_n = ET_c - \text{Precipitación efectiva} - \text{Aporte capilar} - \text{Variación almacenamiento.}$$

A efectos de diseño, las aportaciones por precipitación efectiva no se consideran, ya que dada la gran frecuencia de riego (diaria, por lo general) resulta prácticamente imposible que llueva siempre entre dos intervalos de riego. Tampoco se consideran los aportes capilares, salvo casos especiales, ni las variaciones de almacenamiento. Por tanto:

$$Nn = ETc$$

Nn = Necesidades netas.

ETc = Evapotranspiración de cultivo.

Cuando el agua se aplica sólo a una fracción de la superficie del suelo, la evapotranspiración es distinta que cuando el agua se aplica a toda la superficie, por los siguientes motivos:

- La magnitud de la evaporación depende de la superficie de suelo mojado. Por tanto, en riego localizado disminuye el valor de la evaporación.
- Al mojarse sólo una fracción del suelo se produce un calentamiento de éste mayor que si se mojara toda la superficie. Este calentamiento da lugar a una mayor emisión de calor por radiación, que es captada, en parte, por el cultivo, lo que se traduce en un aumento de la transpiración.
- El suelo caliente origina un calentamiento del aire que se asienta sobre él, dando lugar a unos movimientos de advección, mediante los cuales el aire caliente se eleva y calienta las plantas, con el consiguiente aumento de la transpiración.
- En riegos de alta frecuencia, el suelo se mantiene siempre en unos valores de humedad próximos a la capacidad de campo, lo que facilita la absorción de agua y la transpiración. Esto supone un mejor aprovechamiento del agua y un mayor rendimiento del cultivo, aunque por este motivo se consuma mayor cantidad de agua.

En resumen, el efecto de la localización y la alta frecuencia de aplicación suponen, con respecto a otros sistemas de riego, una disminución de la evaporación y un aumento de la transpiración. El balance de necesidades netas será menor en plantaciones jóvenes de frutales y en marcos grandes de plantación, mientras que no habrá diferencia apreciable en cultivos hortícolas con gran densidad de plantas. En cualquier caso, las necesidades netas se corrigen mediante los siguientes coeficientes correctores:

$$Nn = ETc \times k_1 \times k_2 \times k_3$$

k_1 = Coeficiente corrector por localización

k_2 = Coeficiente corrector por variación climática

k_3 = Coeficiente corrector por advección

1) *Coeficiente corrector por localización (k_1)*

Se basa en considerar la fracción de área sombreada por la planta con relación a la superficie del marco de plantación (o superficie ocupada por cada planta).

$$\begin{aligned}
 \text{Fracción de área sombreada (FAS)} &= \frac{\text{Área sombreada}}{\text{Sup. marco plantación}} = \\
 &= \frac{\pi \cdot r^2}{\text{Sup. marco plantación}} = \\
 &= \frac{\text{Sup. proyección de la copa}}{\text{Sup. marco plantación}}
 \end{aligned}$$

La relación entre k_1 y FAS viene dada por diversas fórmulas:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 1.34 \text{ FAS} \\
 k_1 &= 0.1 + \text{FAS} \\
 k_1 &= \text{FAS} + 0.5 (1 - \text{FAS}) \\
 k_1 &= \text{FAS} + 0.15 (1 - \text{FAS})
 \end{aligned}$$

En la práctica se toma como valor de k_1 la media de los valores intermedios anteriores, después de eliminar los dos valores extremos.

2) Coeficiente corrector por variación climática (k_2)

Los valores de ET_c corresponden a la media de los valores climáticos de un determinado número de años, lo que implica que las necesidades calculadas son insuficientes en la mitad de ese período. Como en riego localizado se puede aplicar con mucha exactitud la cantidad de agua necesaria, conviene mejorar esas necesidades en un 15-20 %, por lo que $k_2 = 1.15 - 1.20$.

3) Coeficiente corrector por advección (k_3)

Los efectos del movimiento de aire por advección, mencionados anteriormente, tienen un efecto considerable en el microclima que afecta al cultivo, ya que este microclima depende, además del propio cultivo, de la extensión de la superficie regada y de las características de los terrenos colindantes. En caso de parcelas pequeñas, el microclima del cultivo será muy distinto según esté rodeado de una masa verde o de un terreno sin cultivar, lo que origina un aire más caliente en el segundo caso. Por consiguiente, el coeficiente k_3 vendrá en función de la naturaleza del cultivo y del tamaño de la superficie regada (figura 10-11). Se toma como superficie regada, no sólo la parcela considerada, sino también las que la rodean que también estén regadas.

Ejemplo

Una plantación de 10 hectáreas de durazno a marco 5×3 metros tiene un radio de copa de árbol de 1.70 m. Calcular las necesidades netas de riego sabiendo que la evapotranspiración diaria es de 4.8 mm y que el campo está rodeado de un terreno sin cultivar:

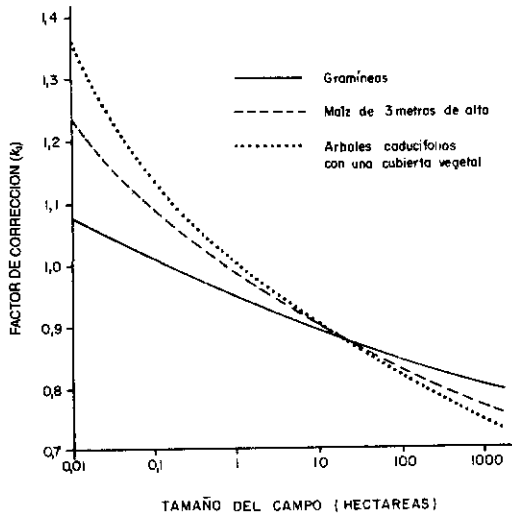


Fig. 10-11 Variación del factor de corrección por advección (k_3).

Solución:

$$Nn = ETc \times k_1 \times k_2 \times k_3$$

Cálculo de k_1 :

$$FAS = \frac{\text{Proyección copa}}{\text{Marco plantación}} = \frac{3.14 \times 1.70^2}{5 \times 3} = 0.60$$

$$k_1 = 1.34 FAS = 1.34 \times 0.60 = 0.80$$

$$k_1 = 0.1 + FAS = 0.1 + 0.60 = 0.70$$

$$k_1 = FAS + 0.50 (1 - FAS) = 0.60 + 0.50 \times 0.40 = 0.80$$

$$k_1 = FAS + 0.15 (1 - FAS) = 0.60 + 0.15 \times 0.40 = 0.60$$

$$\text{Valor de } k_1 = \frac{0.70 + 0.80}{2} = 0.75$$

$$k_2 = 1.2$$

$$k_3 = 0.9 \text{ (según figura 10-11)}$$

$$Nn = 4.8 \times 0.75 \times 1.2 \times 0.9 = 3.9 \text{ mm}$$

Necesidades totales de riego

Las necesidades totales son mayores que las necesidades netas, ya que es preciso aportar cantidades adicionales para compensar las pérdidas causadas por percolación profunda, por salinidad y por uniformidad de riego. (Véase capítulo 4).

$$N_t = \frac{N_n}{E_a} = \frac{N_n}{R_p \times (1-RL) \times CU}$$

N_t = Necesidades totales

N_n = Necesidades netas

E_a = Eficiencia de aplicación

R_p = Relación de percolación

RL = Requerimientos de lavado

CU = Coeficiente de uniformidad

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

$$\text{Si } R_p < 1 - RL \quad N_t = \frac{N_n}{R_p \times CU}$$

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

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

$$RL = \frac{CE_a}{2 \text{ máx } CE_e}$$

RL = Requerimientos por lixiviación, expresado en tanto por uno.

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

máx CE_e = Conductividad eléctrica del extracto de saturación para la cual el descenso de producción es el 100 %, expresado en dS/m. (Véase tabla 2 del capítulo 3.)

Ejemplo

Calcular las necesidades de riego en un cultivo de tomate, sabiendo que las necesidades netas diarias son de 5.2 mm y que el agua tiene una conductividad de 3.4 dS/m. El coeficiente de uniformidad es de 0.85, con suelo de textura media y clima árido. Se sabe que en el tomate, para una conductividad del extracto de saturación de 13 dS/m el descenso de producción es del 100 %. Se considera una eficiencia de lavado del 80 %.

$$RL = \frac{CE_a}{2 \text{ máx } CE_e} = \frac{3.4}{2 \times 13} = 0.13$$

$$RL \text{ real} = \frac{RL \text{ neto}}{\text{Eficiencia de lavado}} = \frac{0.13}{0.8} = 0.16$$

$$1 - RL = 1 - 0.16 = 0.84$$

$$R_p = 0.95$$

$1-RL < Rp$. Se aplica la fórmula:

$$Nt = \frac{Nn}{(1-RL) \times CU} = \frac{5.2}{0.84 \times 0.85} = 7.28 \text{ mm/día}$$

Coefficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad (CU) se utiliza para evaluar las instalaciones en funcionamiento y para el diseño de nuevas instalaciones. En el diseño, el CU es una condición que se impone y que viene determinada por factores económicos. Un CU elevado exige mayor costo inicial de la instalación (mayores diámetros de las tuberías, laterales más cortos, mayor número de reguladores de presión, etc.), mientras que un CU más bajo trae como consecuencia un mayor consumo de agua.

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

Un CU que incluye sólo factores hidráulicos es el siguiente:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a}$$

q_a = Caudal medio de todos los emisores considerados

q_{25} = Caudal medio de los emisores que constituyen el 25 % de caudal más bajo.

Obviamente este CU no sirve para el diseño.

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

$$CU = \left(1 - \frac{1.27 CV}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_m}{q_a}$$

CV = Coeficiente de variación de fabricación del emisor.

e = Número de emisores por cada planta.

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

q_a = Caudal medio de los emisores considerados.

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

e = Número de emisores por planta \times Número de salidas.

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

Ejemplo

En una instalación de riego por goteo con 4 goteros por planta y un coeficiente de variación de fabricación de 0.05 se pretende obtener un coeficiente de uniformidad de 0.9. Calcular el caudal del emisor de mínimo caudal sabiendo que el caudal medio es de 4.1 litros/hora.

Solución:

$$CU = \left(1 - \frac{1.27 CV}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_m}{q_a}$$

$$0.9 = \left(1 - \frac{1.27 \times 0.05}{\sqrt{4}} \right) \frac{q_m}{4.1}$$

$$q_m = 3.81 \text{ litros/hora}$$

Cuando la instalación está en funcionamiento hay que efectuar la comprobación del CU previsto en el diseño, para lo cual en cada subunidad se puede adoptar el siguiente criterio (figura 10-12):

- Dentro de la subunidad se eligen 4 laterales: el primero, el último y dos intermedios, situados, respectivamente, a 1/3 del primero y a 1/3 del último.
- Dentro del lateral se eligen 4 plantas: la primera, la última y dos intermedias escogidas con el mismo criterio anterior.
- Se mide el caudal que reciben las 16 plantas (suministrado por todos los emisores que abastecen a esa planta) y se aplica el CU .

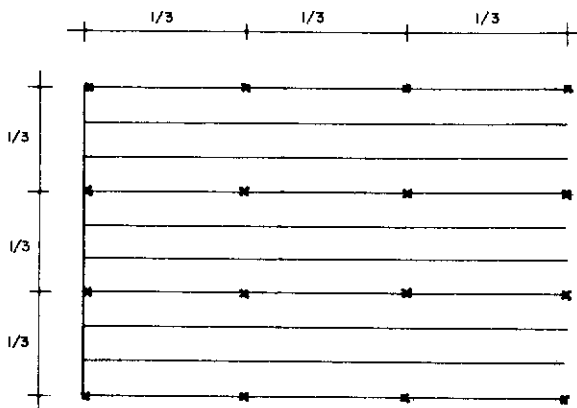


Fig. 10.12.

Los valores de *CU* que suelen recomendarse para el diseño de riego localizado se especifican en la tabla 4.

Tabla 4: *Valores de CU recomendables en riego localizado*

<i>Emisor</i>	<i>Emisores por planta</i>	<i>Topografía y pendiente (i)</i>	<i>CU</i>
Goteros espaciados más de 1 m	Más de 3	Uniforme ($i < 2\%$)	0.90-0.95
		Uniforme ($i > 2\%$) u ondulada	0.85-0.90
	Menos de 3	Uniforme ($i < 2\%$)	0.85-0.90
		Uniforme ($i > 2\%$) u ondulada	0.80-0.90
Goteros espaciados menos de 1 m, mangueras y cintas de exudación		Uniforme ($i < 2\%$)	0.80-0.90
		Uniforme ($i > 2\%$) u ondulada	0.70-0.85
Difusores y microaspersores		Uniforme ($i < 2\%$)	0.90-0.95
		Uniforme ($i > 2\%$) u ondulada	0.85-0.90

Los valores de *CU* se refieren a zonas áridas. En zonas húmedas se rebajan en un 10 %.

Diseño agronómico

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

Superficie mojada por emisor

La superficie mojada por un emisor es la proyección horizontal del bulbo húmedo que forma ese emisor. Se determina mediante pruebas de campo o mediante fórmulas o tablas. Dada la gran heterogeneidad de suelos, las fórmulas y las tablas sólo se deberán utilizar, con mucha prudencia, en el diseño o a título orientativo, siendo mucho más fiable la medición directa en el propio campo.

El diámetro de la superficie mojada se puede calcular mediante las fórmulas siguientes, que vienen en función del tipo de suelo y del caudal del emisor:

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

d = Diámetro de la superficie mojada, en metros.

q = Caudal del emisor, en litros/hora

Estas fórmulas deben usarse con prudencia, ya que la textura del suelo no informa adecuadamente del movimiento del agua en el mismo, puesto que influyen otros factores, tales como la estratificación o la presencia de piedras.

Dado que los caudales de 2 y 4 litros/hora son muy frecuentes en el riego por goteo, pueden servir de orientación los datos de las tablas siguientes:

Tabla 5: *Diámetro mojado por un emisor de 4 litros/hora (Keller)*

<i>Profundidad de raíces y textura del suelo</i>	<i>Grados de estratificación del suelo</i>		
	<i>Homogéneo</i>	<i>Estratificado</i>	<i>En capas</i>
	<i>Diámetro mojado (m)</i>		
<i>Profundidad = 0.80 m</i>			
Ligera	0.50	0.80	1.10
Media	1.00	1.25	1.70
Pesada	1.10	1.70	2.00
<i>Profundidad = 1.70 m</i>			
Ligera	0.80	1.50	2.00
Media	1.25	2.25	3.00
Pesada	1.70	2.00	2.50

Tabla 6: *Aproximación del diámetro mojado y espaciamiento con emisores de 2 y 4 litros/hora según el tipo de suelo para tiempos de riego de unas 3 h (Arviza)*

Emisor de 4 litros/hora

<i>Textura del suelo</i>	<i>Diámetro mojado (m)</i>	<i>Espaciamiento de emisores (m)</i>	
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Fina	1.50	0.95	1.50
Media	1.10	0.70	1.00
Gruesa	0.75	0.45	0.70

Emisor de 2 litros/hora

<i>Textura del suelo</i>	<i>Diámetro mojado (m)</i>	<i>Espaciamiento de emisores (m)</i>	
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Fina	1.30	0.80	1.20
Media	0.90	0.55	0.55
Gruesa	0.50	0.30	0.45

Para determinar con más exactitud el tamaño del bulbo húmedo (diámetro del área mojada y profundidad) se disponen varios emisores iguales a lo largo de una tubería de

polietileno de 12-16 mm de diámetro, abastecida por un depósito de agua de unos 100 litros de capacidad. El primer emisor se deja funcionar durante una hora; el segundo, durante 2 horas; y así sucesivamente. Hay que espaciar suficientemente los emisores para que no se traslapen los bulbos. Una vez aplicados los distintos volúmenes de agua, se abre una zanja y se miden las profundidades y los radios de los bulbos a 30 cm de profundidad (figura 10-13)

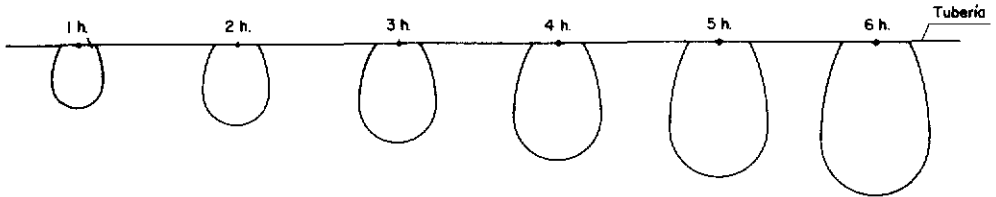


Fig. 10-13 Tamaño de los bulbos en la prueba de campo, según distintos tiempos de funcionamiento de los emisores.

Porcentaje de superficie mojada

Dado que en riego localizado se moja solamente una fracción del suelo, hay que prever un mínimo de superficie mojada para que el sistema radical se desarrolle normalmente. El porcentaje de superficie mojada (P) viene definido por:

$$P = 10 \times \frac{\text{Superficie mojada por planta}}{\text{Superficie ocupada por planta}}$$

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

Se recomiendan los siguientes valores de P :

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

Los valores altos de P dan mayor seguridad, sobre todo en situaciones de emergencia (averías, evapotranspiración extrema), pero encarecen la instalación, al exigir mayor número de emisores.

Número de emisores por planta

El número de emisores por planta (n) viene dado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{\text{Superf. mojada por planta}}{\text{Superf. mojada por emisor}} = \frac{\text{Superf. ocupada por planta} \times P}{100 \times \text{Superf. mojada por emisor}}$$

Profundidad del bulbo

La profundidad del bulbo debe estar comprendida entre el 90 y el 120 % de la profundidad de las raíces. A la menor profundidad del bulbo corresponde mayor número de emisores y mayor eficiencia desde el punto de vista agronómico, pero la instalación resulta más cara. La mayor profundidad del bulbo puede ser la adecuada para que actúe como fracción de lavado en el control de la salinidad, salvo que la calidad del agua aconseje mayor fracción de lavado, en cuyo caso no se considera la restricción de profundidad de bulbo expresada anteriormente.

Dosis, intervalo entre riegos y duración del riego

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

$$Dt = n \times q \times t$$

$$Dt = Nt \times I$$

- Dt = Dosis total, en litros
- n = Número de emisores
- q = Caudal de cada emisor, en litros/hora
- t = Tiempo de duración del riego, en horas
- Nt = Necesidades totales, en litros por día
- I = Intervalo entre riegos, en días

De ambas ecuaciones se deduce la siguiente:

$$n \times q \times t = Nt \times I$$

Ecuación con dos incógnitas, intervalo y tiempo, en donde hay que fijar una de ellas. En suelos de textura arenosa, en donde se originan bulbos estrechos y profundos, se tiende a intervalos muy cortos (uno o dos riegos diarios), tiempos breves y número elevado de emisores. En suelos de textura arcillosa se tiende a intervalos más largos (tres o cuatro días por semana), tiempos de riego más amplios y menor número de emisores. En suelos de textura franca se suele regar una vez por día.

El tiempo de riego vendrá dado por la expresión:

$$t = \frac{Nt \times I}{n \times q}$$

Disposición de los emisores

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

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

En la colocación de los goteros a lo largo de las tuberías portagoteros se pueden tomar dos criterios distintos:

- La zona húmeda forma una línea continua, a lo largo de la cual las plantas desarrollan su sistema radical. Este sistema ofrece la ventaja de facilitar las labores agrícolas, pero tiene el inconveniente de que puede producirse la caída de las plantas de porte alto. Se adapta bien a los cultivos en línea.
- Se forman una serie de puntos húmedos alrededor de las plantas, con lo cual las raíces se desarrollan en varias direcciones y es menor el riesgo de ser abatidas por el viento. Este sistema se adapta bien a los cultivos arbóreos.

En el caso de cultivos arbóreos el número de goteros se va incrementando a medida que la planta crece. Cuando la plantación es joven, los goteros se colocan próximos al pie del árbol (de 0,70 a 1,20 m), pues de otra forma las raíces podrían tener dificultad para atravesar los bordes salinos del bulbo húmedo.

En la figura 10-14 se muestran algunas disposiciones de los goteros en la tubería portagoteros.

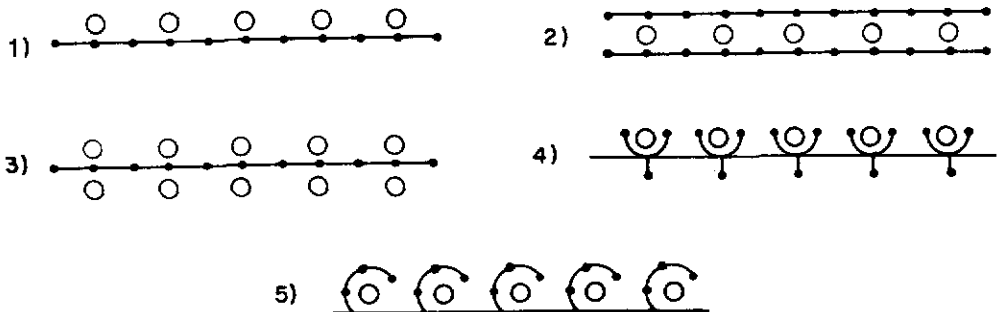


Fig. 10-14 Disposición de los goteros: 1) Una tubería por cada fila de plantas. 2) Dos tuberías por cada fila de plantas. 3) Una tubería entre cada dos filas de plantas. 4) Una tubería por cada fila de plantas con el gotero múltiple. 5) Una tubería por cada fila de plantas con los goteros dispuestos en anillo. (En cada caso particular se determina el número de goteros y la separación de los mismos.)

La disposición de una tubería por cada fila de plantas provista de goteros interlínea se utiliza en plantas herbáceas y en frutales. En el caso de frutales es necesario que los bulbos se traslapen pues de otra forma las raíces tendrían dificultad para atravesar la zona seca comprendida entre bulbos y el borde salino de los mismos (figura 10-15). También es necesario traslapar en cultivos herbáceos, porque de lo contrario las semillas que quedan entre los bulbos tendrían dificultades para germinar.

El traslape se define como el porcentaje de distancia recubierta por dos bulbos consecutivos con relación al radio del bulbo (figura 10-16).

$$S = \frac{a}{r} \times 100$$

S = Traslape expresado en tanto por ciento.
 a = Distancia recubierta por dos bulbos consecutivos.
 r = Radio del bulbo.

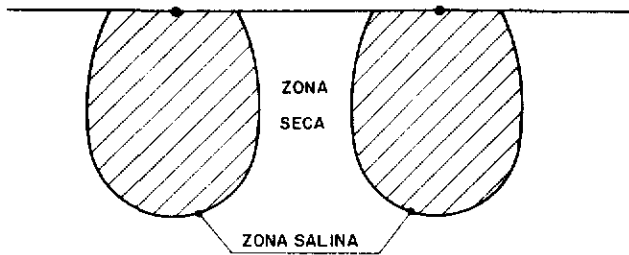


Fig. 10-15 Los emisores están colocados a una distancia excesiva. Las raíces que vayan de uno a otro bulbo tienen dificultad para atravesar la zona seca y la zona salina.

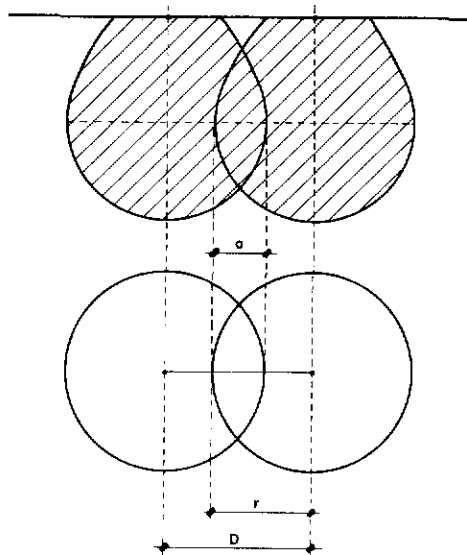


Fig. 10-16 Separación entre emisores que dan bulbos con traslape.

La distancia D entre goteros consecutivos debe ser:

$$D = r \left(2 - \frac{S}{100} \right)$$

El traslape debe estar comprendido entre el 15 y el 30%.

La disposición de dos tuberías por cada fila de plantas tiene el inconveniente de que se duplica la longitud de tubería. En muchos cultivos se instala una sola tubería por cada dos filas de plantas, lo que supone un gran ahorro de material. La disposición con goteros múltiples se instala en frutales.

Ejemplo

Calcular el diseño agronómico de una plantación de duraznos con los datos siguientes:

- Necesidades totales de agua: 48 litros/planta y día.
- Profundidad de las raíces: 95 cm.
- Marco de plantación: 5 × 4 m.
- Porcentaje de suelo mojado: 35 %.
- Caudal del emisor: 4 l/h.
- Intervalo entre riegos: de 1 a 3 días.

Las pruebas de campo del emisor son las siguientes:

<i>Tiempo</i> <i>h</i>	<i>Caudal</i> <i>l</i>	<i>Radio del bulbo</i> <i>cm</i>	<i>Profundidad del bulbo</i> <i>cm</i>
1	4	40	30
2	8	62	52
3	12	84	72
4	16	108	97
5	20	124	108
6	24	139	128

Solución:

1) Superficie mojada por emisor

La profundidad del bulbo debe estar comprendida entre el 90 y el 120 % de la profundidad de la raíz.

$$0.95 \times 0.90 = 0.80 \text{ m}$$

$$0.95 \times 1.20 = 1.14 \text{ m}$$

En las pruebas de campo se observa que a una profundidad de 97 cm corresponde un radio mojado de 108 cm y un caudal de 16 litros en 4 horas.

$$\text{Sup. mojada por emisor} = \pi r^2 = 3.1416 \times 1.08^2 = 3.66 \text{ m}^2$$

2) Número de emisores por planta

$$\text{Superficie mojada por planta} = 0.35 \times 5 \times 4 = 7 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}\text{Número de emisores} &= \frac{\text{Superficie mojada por planta}}{\text{Superficie mojada por emisor}} = \\ &= \frac{7}{3.66} = 1.91 = 2\end{aligned}$$

3) Intervalo entre riegos

$$\text{Dosis de riego} = 2 \text{ emisores} \times 16 \text{ litros/emisor} = 32 \text{ litros}$$

$$\text{Intervalo} = \frac{\text{Dosis de riego}}{\text{Necesidades diarias}} = \frac{32}{48} = 0.66 \text{ días}$$

Se fija el intervalo de un día y se tantean diversas opciones en cuanto al número de emisores y su caudal, procurando acomodarse al bulbo húmedo de las pruebas de campo.

$$48 \text{ litros} = 2 \text{ emisores} \times 24 \text{ litros/emisor}$$

$$48 \text{ litros} = 3 \text{ emisores} \times 16 \text{ litros/emisor}$$

$$48 \text{ litros} = 4 \text{ emisores} \times 12 \text{ litros/emisor}$$

En el caso de 2 emisores, cada uno debe aportar un caudal de 24 litros. Según las pruebas de campo, la profundidad del bulbo sería de 128 cm; superior a los 114 cm que deben tener como máximo.

En el caso de 3 emisores, cada uno aporta un caudal de 16 litros, al que corresponde una profundidad de 97 cm (que está dentro del límite permitido) y un radio de 108 cm.

Se comprueba si esos 3 emisores cumplen la condición de porcentaje de superficie mojada.

$$\text{Superficie mojada} = 3 \times \pi r^2 = 3 \times 3.1416 \times 1.08^2 = 11 \text{ m}^2$$

$$\text{Porcentaje de superf. mojada} = \frac{11}{5 \times 4} \times 100 = 55\%$$

Cumple con la condición, puesto que es superior al 35 %. Por tanto, es válida la solución de 3 emisores, con un caudal de 16 litros por emisor.

El tiempo de riego será:

$$\frac{\text{Caudal total del emisor}}{\text{Caudal por hora del emisor}} = \frac{16}{4} = 4 \text{ horas}$$

Diseño hidráulico

En el anexo 4 se incluye, de forma generalizada, el cálculo de las conducciones de sistemas de riego a presión, haciendo uso de las fórmulas de Blasius y de Hazen-Williams. A continuación se expone un cálculo más sencillo, en donde se hace uso de los nomogramas incluidos al final del capítulo.

Cálculo de laterales

Los laterales o portaemisores son las tuberías que distribuyen el agua a las plantas por medio de los emisores acoplados a ellas. En su cálculo hay que aplicar el factor de Christiansen, ya que las salidas del agua están uniformemente espaciadas a lo largo de la tubería.

En una subunidad de riego se admite una variación máxima de caudal entre los distintos emisores del 10 % del caudal medio. Con esta condición, las variaciones admisibles de presión vienen dadas por la fórmula:

$$dH = \frac{0.1}{x} H$$

dH = Variación máxima de la presión.

H = Presión de trabajo del emisor.

x = Exponente de descarga del emisor.

Ejemplo

Un gotero tiene un caudal medio de 3.5 litros/hora a una presión de 6 mca. Con la condición de que las variaciones de caudal de los goteros no sobrepasen el 10 % del caudal medio, calcular la variación máxima de presión para los siguientes valores del exponente de descarga: $x=1$, $x=0.5$.

Solución:

$$dH = \frac{0.1}{x} H$$

$$dH_1 = \frac{0.1 \times 6}{1} = 0.6 \text{ mca}$$

$$dH_2 = \frac{0.1 \times 6}{0.5} = 1.2 \text{ mca}$$

En todos los casos las variaciones máximas de caudal serán:

$$3.5 \times 0.10 = 0.35 \text{ litros/hora}$$

A la vista de los resultados obtenidos en el ejemplo anterior se sacan las siguientes conclusiones:

- Para $x=1$ las variaciones máximas de la presión deben ser pequeñas, lo que obliga a unas líneas cortas de laterales en cada subunidad o a un gran diámetro de las mismas.
- Para $x=0.5$ las variaciones de presión en los goteros pueden ser de mayor magnitud, lo que permite una mayor longitud y un menor diámetro de los laterales.

Se ha comprobado que el costo mínimo de la instalación ocurre cuando el 55 % de las pérdidas admisibles en la subunidad se producen en los laterales, mientras que el

45 % restante se produce en las tuberías terciarias o portalaterales. Con esta condición, las pérdidas de carga (ha) admisibles en un lateral horizontal vienen dadas por la fórmula:

$$ha = \frac{0.055}{x} H$$

Este valor admisible de las pérdidas de carga debe ser, como máximo, igual a las pérdidas de carga que se producen en el lateral.

$$h = J \cdot F \cdot Lf$$

h = Pérdidas de carga en el lateral, en mca

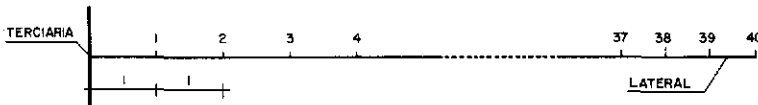
J = Pérdidas de carga unitaria, en mca/m lineal

F = Factor de Christiansen

Lf = Longitud ficticia, en m

Ejemplo 1

Calcular el diámetro de un lateral horizontal de una subunidad de riego por goteo con los datos siguientes:



- Longitud de lateral: 40 m.
- Separación de góteros: 1 m.
- Distancia del primer gotero al origen del lateral: 1 m.
- Caudal de los góteros: 4 litros/hora.
- Presión de trabajo de los góteros: 10 mca.
- Exponente de descarga: 0.70.
- Longitud equivalente de conexión del gotero: 0.20 m.

Solución:

Caudal en el origen del lateral:

$$Q = \text{Número de góteros} \times \text{Caudal de cada gotero} = \\ = 40 \times 4 = 160 \text{ litros/hora}$$

Longitud ficticia de lateral:

$$Lf = \text{Longitud real} + \text{Longitud equivalente} = \\ = 40 + (40 \times 0.2) = 48 \text{ m}$$

Se elige una tubería de polietileno de baja densidad y se comprueba si la pérdida de carga está dentro de los límites admisibles. Elegimos la tubería normalizada de diámetro exterior 16 mm (diámetro interior 13.2 mm y presión 2.5 atmósferas).

Pérdida de carga:

$$h = J \cdot F \cdot Lf$$

Para el cálculo de J se utiliza el nomograma 1. Para un caudal de 0.16 m³/hora, la tubería 16 (13.2) tiene una pérdida de carga de 1.6 mca/100 m. Por tanto, $J = 0.016$ mca/m.

Factor de Christiansen $F = 0.376$. Según tabla 2 del capítulo 9 para $l_0 = l$, $\beta = 1.75$ y $n = 40$.

Sustituyendo valores:

$$h = 0.016 \times 0.376 \times 48 = 0.28 \text{ mca}$$

Pérdidas de carga admisible en el lateral:

$$h_a = \frac{0.055}{x} \quad H = \frac{0.055 \times 10}{0.7} = 0.78 \text{ mca}$$

La pérdida de carga es inferior a la admisible. Luego la tubería elegida es válida. Ensayando la tubería de diámetro exterior 12 mm (diámetro interior 10.3 mm y presión 2.5 atmósferas) se comprobaría que no es válida.

Presión en el origen del lateral

La presión en el origen de laterales portagoteros viene dada por las fórmulas:

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

$P_o = P_m + 0.73 h \pm Hg/2$ si el lateral es ascendente (con signo +) o descendente (con signo -).

P_o = Presión en el origen del lateral

P_m = Presión de trabajo del gotero

h = Pérdida de carga en el lateral

Hg = Desnivel geométrico entre los extremos del lateral.

Ejemplo 2

En el ejemplo anterior, el final del lateral está a una cota 1.20 m más alta que el principio del mismo. Calcular la presión necesaria en el origen del lateral.

Solución:

$$P_o = P_m + 0.73 h + \frac{Hg}{2} = 10 + (0.73 \times 0.28) + \frac{1.20}{2} = 10.80 \text{ mca}$$

Cálculo de tuberías terciarias o portilaterales

Las pérdidas de carga producidas en un lateral son menores del 55 % de las producidas en la subunidad, debido a que se toma un diámetro comercial que, por lo general, tiene

una pérdida de carga inferior a la admitida. Por tanto, las pérdidas de carga admisibles en la terciaria serán igual a las pérdidas admisibles en la subunidad menos las pérdidas reales producidas en un lateral, y vienen dadas por la fórmula:

$$h'a = \frac{0.1}{x} H - h$$

$h'a$ = Pérdidas de carga admisibles en la terciaria

H = Presión de trabajo del emisor

x = Exponente de descarga del emisor

h = Pérdida de carga real en un lateral

Este valor admisible de la pérdida de carga debe ser, como máximo, igual a la pérdida de carga que se produce en la terciaria.

$$h' = J + F \cdot Lf$$

h' = Pérdida en la terciaria, en mca

J = Pérdida de carga unitaria, en mca/m lineal

F = Factor de Christiansen

Lf = Longitud ficticia, en m

La presión en el origen de la terciaria viene dada por la fórmula:

$$P'o = P_o + 0.73 h' \pm \frac{Hg}{2}$$

$P'o$ = Presión en el origen de la terciaria

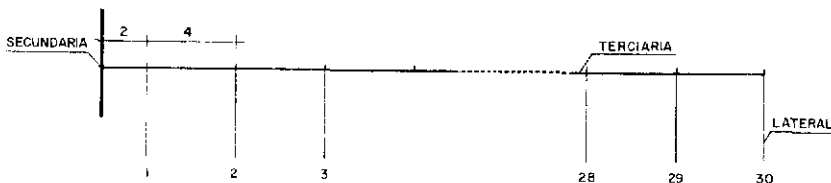
P_o = Presión en el origen del lateral

h' = Pérdida de carga en la terciaria

Hg = Desnivel geométrico entre los extremos de la terciaria (signo + cuando es ascendente y signo - cuando es descendente)

Ejemplo 3

De una conducción terciaria derivan 30 laterales portagoteros de las características del ejemplo 1. La separación de laterales es de 4 m y la distancia del primer lateral al origen es de 2 m. El final de la terciaria está 2 m más alto que el principio. Calcular el diámetro de la terciaria y la presión en el origen.



Solución:

Caudal en el origen de la terciaria:

$$Q = \text{Número de laterales} \times \text{Caudal de cada lateral} = 30 \times 160 = 4,800 \text{ litros/hora}$$

Longitud real de la terciaria:

$$(29 \times 4) + 2 = 118 \text{ m}$$

Longitud ficticia:

A falta de otros datos consideramos la longitud ficticia = 1.20 longitud real

$$L_f = 1.20 \times 118 = 141.6 \text{ m}$$

Se elige una tubería de polietileno de baja densidad y se comprueba si la pérdida de carga está dentro de los límites admisibles. Elegimos la tubería de 50 mm de diámetro exterior (43.8 mm de diámetro interior y 4 atmósferas de presión).

Pérdida de carga:

$$h' = J \cdot F \cdot L_f$$

Para el cálculo de J se utiliza el nomograma 2. Para un caudal de 4.8 m³/hora la tubería 50 (43.8) tiene una pérdida de carga de 2.1 mca/100 m. Por tanto: $J = 0.021$ mca/m.

Factor de Christiansen $F = 0.370$. Según tabla 2 del capítulo 9 para $l_0 = l/2$, $\beta = 1.75$ y $n = 30$.

Sustituyendo valores:

$$h' = 0.021 \times 0.370 \times 141.6 = 1.10 \text{ mca}$$

Pérdida de carga admisible en la terciaria:

$$h'a = \frac{0.1}{x} H - h = \frac{0.1}{0.7} 10 - 0.26 = 1.16 \text{ mca}$$

La pérdida de carga es inferior a la admisible. Luego la tubería elegida es válida.

Presión en el origen de la terciaria:

$$P'o = P_o + 0.73 h' + \frac{Hg}{2} = 10.80 + (0.73 \times 1.10) + \frac{2}{2} = 12.60 \text{ mca}$$

Cálculo de tuberías secundarias

Las tuberías secundarias son aquellas de las que derivan las terciarias. Conociendo los caudales y fijando la velocidad se calcula el diámetro con ayuda del nomograma correspondiente.

Ejemplo 4

De una tubería secundaria se derivan dos terciarias a unas distancias del origen de 20 y 60 m respectivamente. Los caudales y presiones en el origen de las terciarias son:

$$Q_B = 7,000 \text{ litros/hora}$$

$$Q_A = 7,500 \text{ litros/hora}$$

$$P_B = 13.30 \text{ mca.}$$

$$P_A = 14.20 \text{ mca.}$$

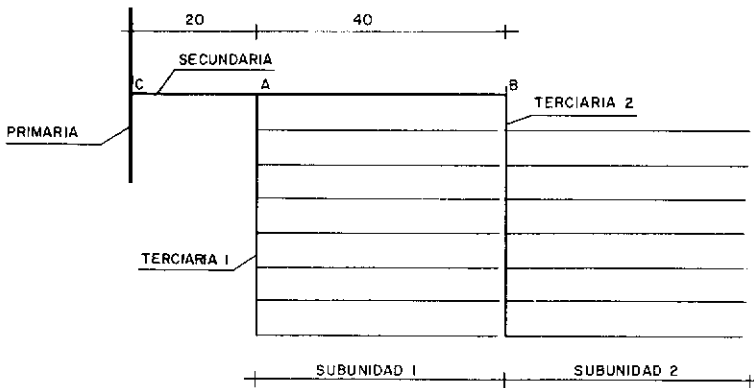
El tercero es horizontal. Cada una de las dos subunidades puede funcionar independientemente.

Calcular el diámetro de la secundaria y las presiones en el origen.

Solución:

1) *Cuando funciona sólo la subunidad 2*

Según el nomograma 2, la tubería de PE de baja densidad 40 (35), para un caudal de 7 m³/hora y una velocidad de 2 m/seg tiene una pérdida de carga de 12 mca/100 m. Luego $J = 0.12 \text{ mca/m}$.



No se consideran las pérdidas de carga en puntos singulares. Por tanto, la longitud ficticia es igual a la longitud real.

Pérdida de carga en el tramo CB:

$$h = J \cdot Lf = 0.12 \times 60 = 7.20 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el punto C:

$$P_o = 13.30 + 7.20 = 20.50 \text{ mca}$$

2) Cuando funciona sólo la subunidad 1

Según el nomograma 2, la tubería de PE de baja densidad 50 (43.8), para un caudal de 7.5 m³/hora y una velocidad cercana a 1.5 m/seg tiene una pérdida de carga de 4.5 mca/100 m. Luego $J = 0.045$ mca/m.

Longitud ficticia del tramo CA = Longitud real.

Pérdida de carga en el tramo CA:

$$h = J \cdot Lf = 0.045 \times 20 = 0.90 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el punto C:

$$P_o = 14.20 + 0.90 = 15.10 \text{ mca}$$

En el punto C se toma la mayor presión de los dos, o sea, 20.50 mca. Para el correcto funcionamiento se pone un reductor de presión en el punto A. (Véase también el ejemplo 4 del Anexo 4).

Presión necesaria en el origen del cabezal

A las pérdidas de carga producidas en las tuberías hay que añadir las pérdidas ocasionadas en las piezas especiales (si no se han incluido en el cálculo de pérdidas en tuberías) y en los componentes del cabezal. Las casas fabricantes deben suministrar los datos correspondientes. Si no se dispone de estos datos, a efectos de diseño pueden servir los siguientes:

Aparato	Pérdida de carga (mca)
Hidrociclón	2-6
Filtro de grava	2-4
Filtro de malla	1-3
Tanque de fertilización ...	1-4
Inyector hidráulico	4-5
Inyector venturi	5-20
Regulador de presión	4-6
Válvula	1-3

Velocidades recomendables

Como normal general no conviene sobrepasar la velocidad de 3 m/seg.

En ramales portaemisores, portlaterales y, en general, en las conducciones que tienen muchas salidas conviene una velocidad de alrededor de 1 m/seg. En el resto de las tuberías de riego se puede mantener una velocidad de alrededor de 2 m/seg.

En las tuberías de impulsión no se debe sobrepasar los 2 m/seg, siendo aconsejable un intervalo de 0.8 a 1.5 m/seg, que es lo correspondiente al mínimo costo.

La velocidad mínima se sitúa alrededor de 0.5 m/seg; si el agua lleva partículas en suspensión no se debe bajar de 0.6 m/seg.

Aparatos de control

Reguladores de caudal y de presión

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

— *Reguladores de caudal.* Mantienen un caudal constante dentro de una determinada variación de presión de entrada. Estos reguladores provocan la pérdida de carga mediante la variación de la sección del paso del agua. El mecanismo puede ser una membrana elástica que se deforma más o menos según la presión de entrada, de un modo análogo a como ocurre en los goteros autocompensantes.

Los reguladores de caudal se instalan en la cabecera de subunidades y unidades de riego. Provocan una pérdida de carga que varía de 0.3 a 1.2 atmósferas. En caso de caudales altos y variables, las pérdidas de carga son muy elevadas, por lo que estos reguladores se sustituyen por reguladores de presión.

— *Reguladores de presión.* Mantienen constante la presión a la salida, dentro de una determinada variación de la presión de entrada. Por lo general, el mecanismo consiste en un pistón en donde la cara superior está sometida a la presión de entrada, y la cara inferior, a la presión de salida. Cuando se eleva la presión de salida, el pistón se mueve y actúa sobre un obturador que estrangula el paso del agua, provocando un aumento de la pérdida de carga y una reducción de la presión de salida.

La pérdida de carga que provoca el aparato, sin considerar el efecto de regulación, varía de 0.1 a 1 atmósfera. Cuando la presión de entrada es muy elevada se colocan dos o más reguladores en serie.

Manómetro

La medida de la presión en varios puntos de la red garantiza el correcto funcionamiento de la instalación y detecta las averías. Generalmente se efectúa mediante manómetros metálicos, en donde la presión del agua se comunica a un tubo flexible curvado, cuya deformación provocada por la presión se comunica a una aguja indicadora.

Se suelen instalar tomas manométricas en puntos estratégicos para conectar un manómetro portátil. De este modo se evitan los errores de calibración de los diferentes

manómetros, aparte que, por lo general, interesa más la diferencia de presión entre dos puntos que la presión absoluta.

Rotámetro

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

Medidores de flujo

Los medidores se utilizan para controlar el volumen de agua. Los hay de dos tipos:

- *Woltmann*. Basado en el giro de un molinete helicoidal cuyo número de vueltas es función del caudal.
- *Proporcional*. Se basa en medir una parte del caudal derivado de la conducción y establecer la proporcionalidad correspondiente entre el caudal derivado y el total.

El medidor *Woltmann* es más caro que el proporcional, pero tiene, quizás, un grado de precisión mayor. Ambos provocan una pérdida de carga de 0.1 a 0.3 atmósferas.

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

Automatización

Con la automatización se pretende, sobre todo, reducir la mano de obra en las operaciones del riego. Se logra también una mayor flexibilidad en las labores agrícolas y se mejora la calidad de riego, debido a que se ejerce un mejor control sobre el mismo.

El riego por goteo se presta a la automatización mejor que otros sistemas de riego, por varios motivos:

- Las redes son fijas.
- Tiene caudales bajos.
- El viento no le afecta.
- El riego no interrumpe otras labores agrícolas.

Para el control automático se disponen una o varias válvulas, que accionadas por mecanismos hidráulicos, eléctricos o combinación de ambos, se abren o se cierran en

función de valores alcanzados por diversos parámetros indicadores. Según los parámetros utilizados la automatización puede hacerse de varias formas:

- *Por tiempos.* Las válvulas se cierran después de un determinado tiempo de funcionamiento. Este automatismo es sencillo, pero tiene el inconveniente de que se modifica la dosis de riego cuando se altera el caudal a consecuencia de varias circunstancias: roturas, obstrucciones, saturación de filtros, variaciones en la presión de entrada, etc.
- *Por volúmenes.* Este método se basa en medir el agua aplicada e interrumpir su paso cuando se alcanza el volumen preciso. Ofrece la ventaja de que se aplica siempre el caudal que se desea.
- *Por otros parámetros,* tales como la evaporación o el nivel de humedad del suelo. En el primer caso la información es suministrada por un tanque evaporímetro, y en el segundo, por tensiómetros. Estos parámetros sólo sirven para poner el riego en funcionamiento, y se para mediante un control de tiempo o de volumen de agua aplicada.

El automatismo hidráulico normalmente controla volumen de agua. Sus mecanismos actúan por influjo de la presión transmitida a través de un tubo de pequeño diámetro. Los más utilizados son: las válvulas hidráulicas (en donde el paso del agua se interrumpe mediante un pistón o diafragma que actúa por una orden hidráulica) y las válvulas volumétricas (compuestas de una válvula hidráulica y de un medidor tipo Woltmann).

El automatismo eléctrico actúa por estímulos magnéticos, creados por solenoides al recibir impulsos eléctricos. Por lo general controla tiempos de riego. Los mecanismos más utilizados son las electroválvulas, los programadores de control por tiempo y los programadores de control por volumen.

Niveles de automatización

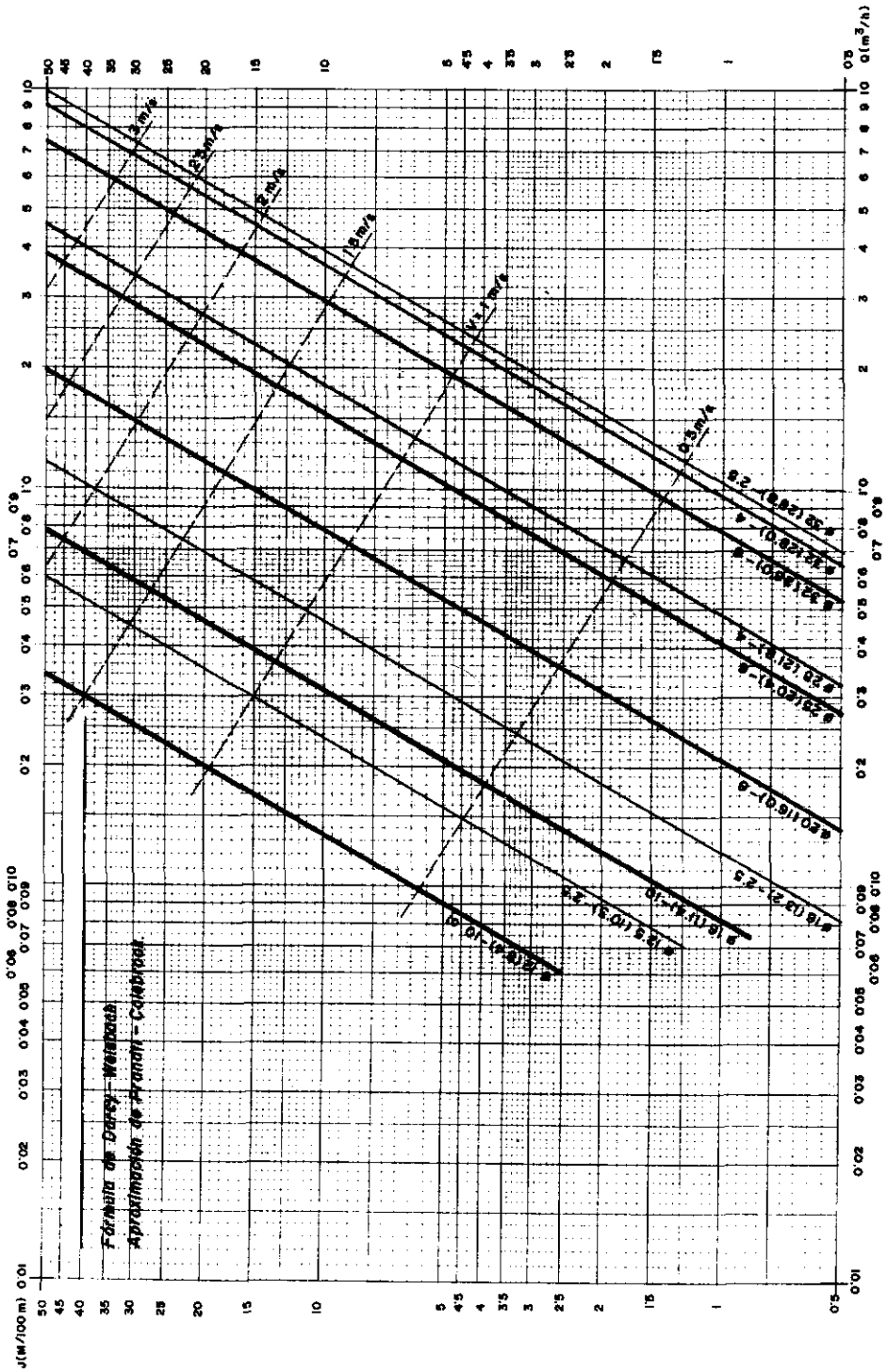
La automatización abarca una amplia gama de posibilidades, desde las más simples a las más sofisticadas, desde la apertura y cierre manual de las válvulas hasta la total automatización de las operaciones. Ello implica un incremento del costo de la instalación, que se justifica según diversas circunstancias: tamaño de la explotación, clase de cultivo, disponibilidad y costo de la mano de obra, nivel técnico de la misma, etc.

Un primer grado de automatización puede ser el empleo de válvulas volumétricas, que constan de una válvula hidráulica y un contador con un dial. Se selecciona manualmente con el dial el volumen de agua que se quiere aplicar en cada riego, y la válvula se cierra automáticamente cuando ha pasado a su través el volumen establecido. Estas válvulas operan en secuencia, de forma que el cierre de una válvula que riega un determinado sector acciona la apertura de la válvula que riega el sector siguiente. Sólo la primera válvula se acciona manualmente al principio de cada riego. La fertirrigación se hace de forma manual. Este sistema es adecuado para instalaciones que no disponen de energía eléctrica.

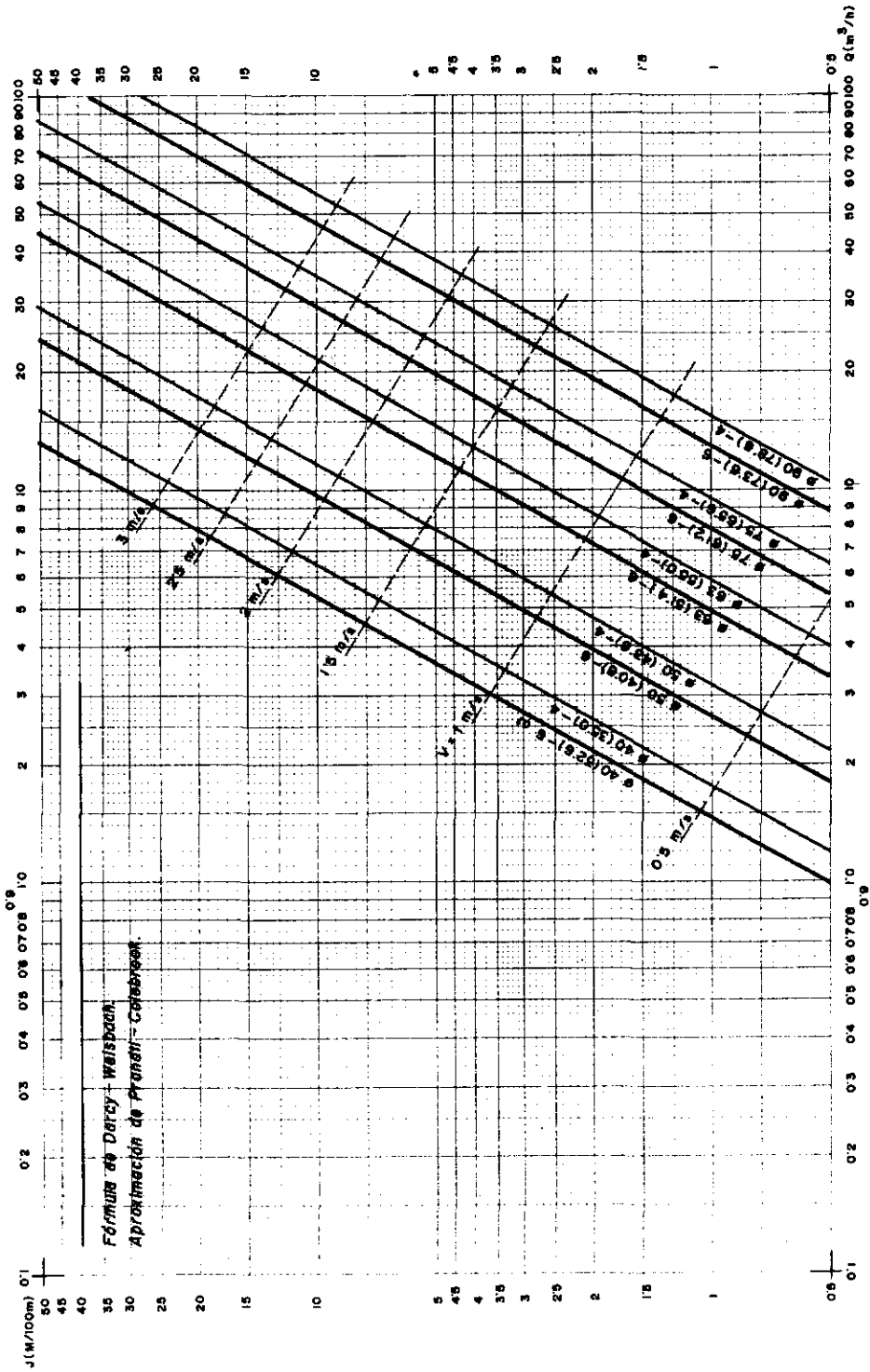
Un segundo nivel de automatización es el riego secuencial repetido mediante un reloj programador, accionado por corriente eléctrica de red o de batería, que controla la apertura y cierre de electroválvulas. La programación se efectúa estableciendo los días de riego y la duración de cada riego. A este nivel se pueden controlar las bombas dosificadoras para el aporte de productos químicos.

Un nivel más alto de automatización es el riego con microcomputadora. En el mercado existen programadores específicos para riego que abarcan todas las operaciones necesarias para la automatización completa: riego secuencial o independiente por sectores, limpieza de filtros, fertilización, detección de averías, elección de tarifa eléctrica más adecuada, etc. Este nivel de automatización permite la utilización de un gran número de sensores para controlar el riego.

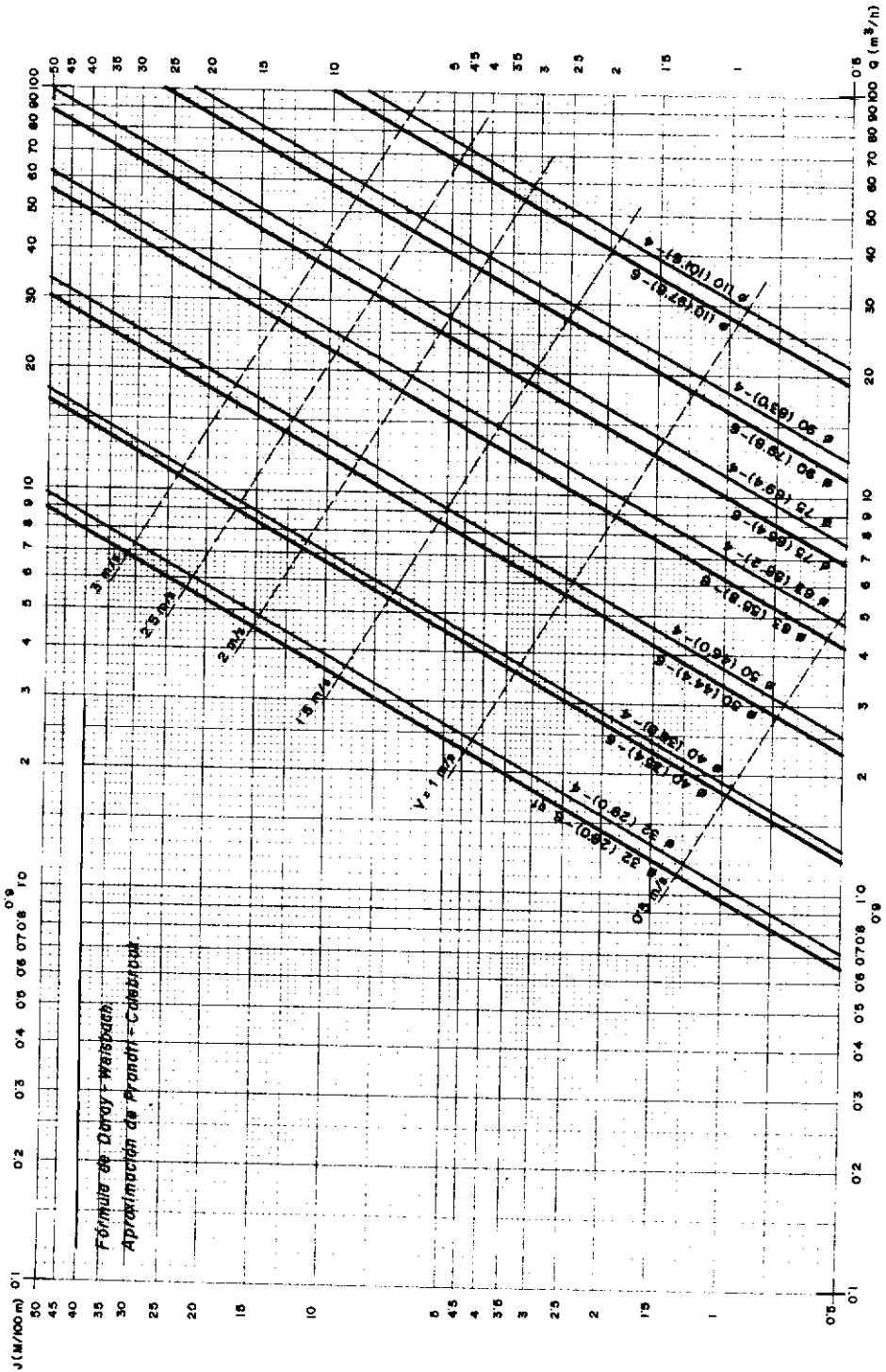
El nivel más alto de automatización consiste en una serie de casetas agrometeorológicas integradas, conectadas por teléfono mediante modem a una computadora, suministran los datos para el cálculo de los parámetros necesarios, que son reenviados por vía teléfono a los programadores de riego, con lo cual se establece un programa diario de riego conforme a las necesidades.



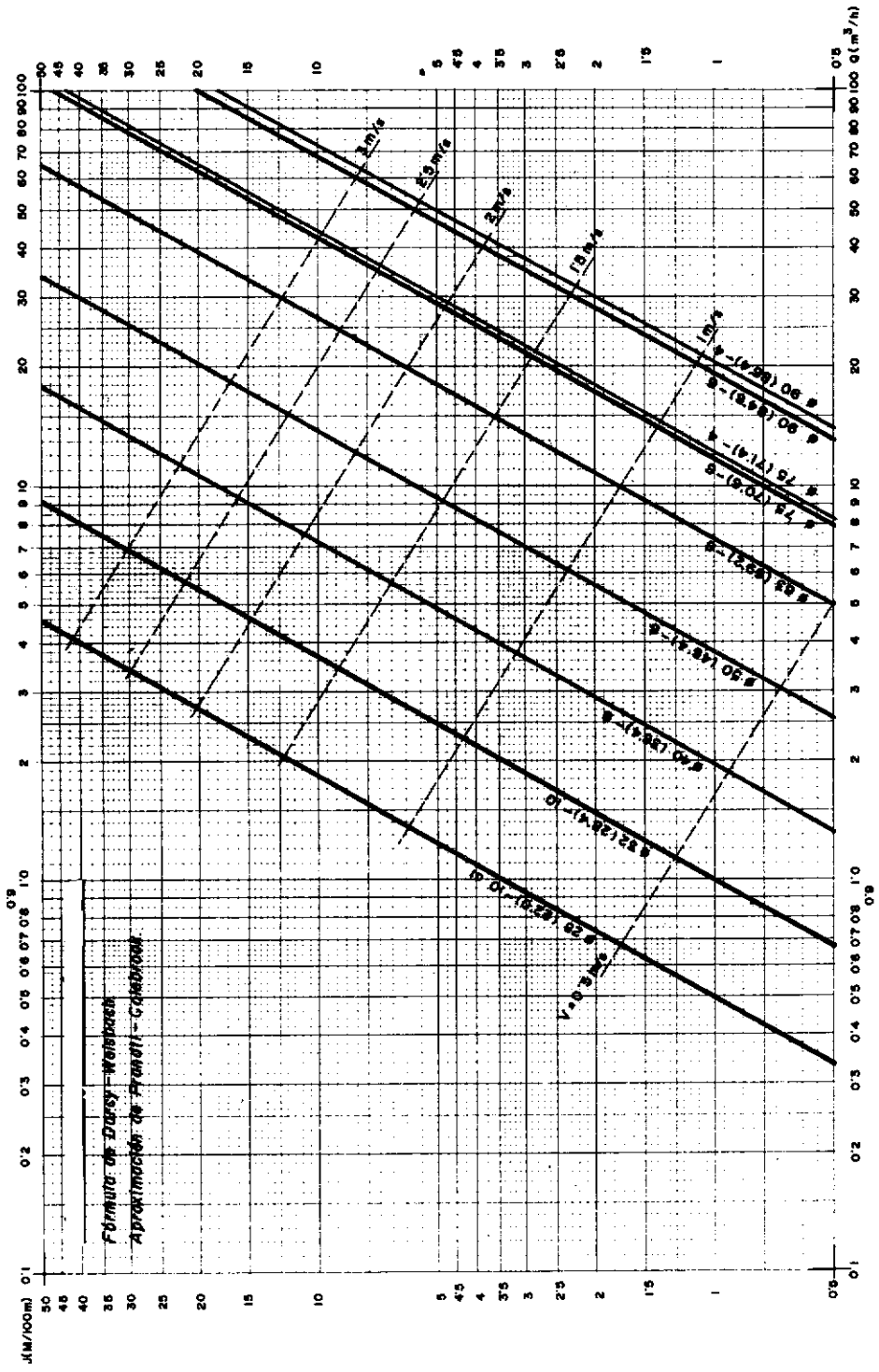
Nomograma 1. Pérdida de carga en tubería de polietileno baja densidad.



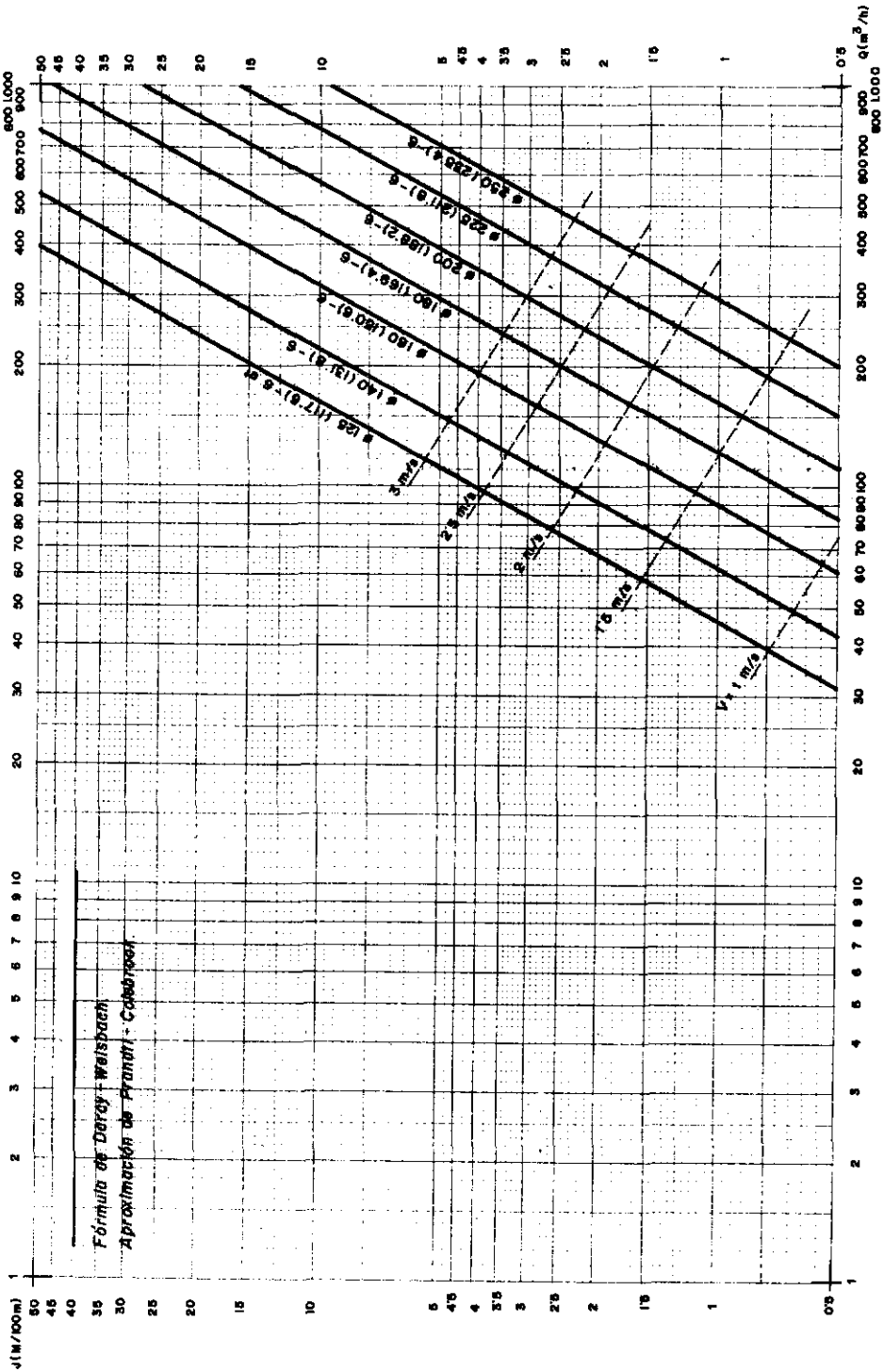
Nomograma 2. Pérdida de carga en tubería de polietileno baja densidad.



Nomograma 3. Pérdida de carga en tubería de polietileno alta densidad.



Nomograma 4. Pérdida de carga en tubería de PVC.



Nomograma 5. Pérdida de carga en tubería de PVC

CAPÍTULO 11

FERTIRRIGACIÓN

Se entiende por fertirrigación la aplicación de los fertilizantes disueltos en el agua de riego, de una forma continua o intermitente. La fertirrigación no se puede hacer con todos los sistemas de riego, ya que la principal exigencia es obtener la máxima uniformidad en la distribución de los fertilizantes. Por eso, esta práctica se asocia básicamente a los sistemas de riego localizado de alta frecuencia (goteo, microaspersión), pero también puede aplicarse al riego por aspersión.

Ventajas de la fertirrigación

La fertirrigación ofrece las siguientes ventajas con respecto a la fertilización tradicional:

- Los fertilizantes se localizan en la zona donde se desarrollan las raíces. Si se hiciera la fertilización tradicional, una parte del fertilizante caería fuera del bulbo húmedo y se desaprovecharía total o parcialmente. Por otra parte, en la fertirrigación los fertilizantes nitrogenados se distribuyen de una forma homogénea por todo el bulbo.
- En la fertilización y riego tradicionales, los fertilizantes fosfóricos y potásicos se quedan en la superficie, mientras que en la fertirrigación pueden alcanzar una profundidad de 50-60 cm, lo que facilita una mejor absorción por las plantas.
- Los fertilizantes se suministran a la planta conforme a sus necesidades en las distintas etapas de su desarrollo, aunque esta gran ventaja no se aprovecha más que parcialmente, debido al desconocimiento de las necesidades de muchos cultivos en sus distintas etapas. Por otra parte, cuando aparecen síntomas de deficiencia se puede actuar con mucha rapidez para corregirlos.
- En la fertilización tradicional se hacen aportaciones nitrogenadas cuantiosas, lo que puede dar lugar a pérdidas importantes por lavado y volatilización, sobre todo en suelos arenosos. La reducción de estas pérdidas en fertirrigación y el mejor

aprovechamiento de los fertilizantes por los cultivos suponen un ahorro que puede alcanzar el 30 %, y aún más, del producto.

- En la fertilización sin riego las aportaciones de fertilizantes se hacen con poca frecuencia, debido al costo de la operación y, a veces, a la dificultad de la distribución. En fertirrigación el costo de distribución es muy reducido, si bien se necesita un equipo más caro que el convencional.

Características de los fertilizantes utilizados en fertirrigación

Para emplear correctamente los fertilizantes hay que tener en cuenta aquellas características que pueden influir sobre el suelo, el cultivo o el manejo de la instalación. Las características a considerar son las siguientes:

Solubilidad

Todos los fertilizantes utilizados en fertirrigación deben tener un grado de solubilidad que impida las obturaciones con partículas sólidas sin disolver.

Para incorporar un fertilizante a un sistema de riego por goteo hay que preparar previamente una disolución concentrada (disolución madre), que es la que se inyecta en el sistema de riego. Interesa conocer el grado de solubilidad del fertilizante, con el fin de saber la cantidad máxima del mismo que se puede añadir a una determinada cantidad de agua. La solubilidad depende de la temperatura del agua: a mayor temperatura corresponde mayor solubilidad.

Hay que tener en cuenta que al disolver un sólido en agua se produce una reacción endotérmica, con descenso de la temperatura de la disolución, lo que reduce la solubilidad. Este descenso de temperatura es muy marcado en algunas ocasiones, como ocurre, por ejemplo, en el nitrato amónico y en la urea, por lo que se recomienda no pasar del 75 % de los límites de solubilidad.

Salinidad

La concentración de sales es uno de los criterios más influyentes para juzgar la calidad de las aguas de riego, puesto que la mayor o menor concentración de la disolución del suelo afecta al esfuerzo de succión que la planta tiene que ejercer para absorber el agua.

Al disolver un fertilizante en el agua de riego se modifican algunas características químicas de ésta. Así, aumenta su contenido salino y, por tanto, su conductividad eléctrica, empeorando su calidad desde el punto de vista de efecto osmótico. Por ello, en cada fertilizante hay que determinar la dosis máxima (en gramos por litro) de fertilizante que se puede incorporar al agua de riego.

Lo más conveniente es que la dosis de fertilizante no eleve la conductividad del agua en más de 1 dS/m, aunque, en todo caso, hay que tener en cuenta la conductividad inicial del agua. Cuando el agua es de buena calidad se pueden utilizar, sin peligro grave, concentraciones altas en la fertilización; pero cuando el agua es de mala calidad resulta imprescindible utilizar concentraciones bajas, lo que requiere aplicaciones frecuentes. De cualquier forma, aun con aguas buenas es preferible aplicar el fertilizante el mayor número posible de veces.

Acidez

Otro aspecto a tener en cuenta en la fertirrigación es la modificación del pH del agua al incorporar los fertilizantes. Al ser éstos sales muy disociables (salvo en el caso de la urea) influyen en el pH, aumentando en unos casos y disminuyendo en otros.

Las principales obstrucciones que ocurren en riego por goteo son debidas al exceso de calcio, que puede precipitar en presencia de sulfatos y bicarbonatos, dando lugar a compuestos insolubles que taponan los goteros. Lo más conveniente es mantener una reacción ácida, lo que facilita la solubilidad de los compuestos de calcio y evita, por tanto, los precipitados cálcicos en las conducciones. El empleo de fertilizantes acidificantes es la mejor forma de mantener limpia la instalación (véase tabla 4).

La cantidad de calcio que puede solubilizar el agua de riego en relación con su pH es la siguiente:

<i>pH</i>	<i>Ca meq/litro</i>	<i>pH</i>	<i>Ca meq/litro</i>
6	36.8	7	7
6.2	25.2	7.2	5.4
6.4	17.6	7.4	4.2
6.6	12.7	7.6	3.3
6.8	9.3	7.8	2.6

Si, por ejemplo, un agua de riego con pH = 6.6 contiene 14 meq/litro de Ca²⁺, precipitarán:

$$14 - 12.7 = 1.3 \text{ meq/litro}$$

Grado de pureza

Los fertilizantes utilizados en fertirrigación deben tener un alto grado de pureza, para evitar sedimentos o precipitaciones que obstruyen la instalación. Hay que evitar la incorporación de elementos tóxicos o no deseables (como Cl, Na o exceso de Mg), que añadidos a los ya existentes en el agua de riego pueden llegar a dosis perjudiciales para el cultivo.

Compatibilidad de las mezclas

Hay que evitar las reacciones químicas en donde se originen productos sólidos insolubles. Por ejemplo, se debe evitar la mezcla de productos que contienen sulfatos (sulfato amónico, sulfato potásico, sulfato magnésico, etc.) con los que contienen calcio (nitrato cálcico, cloruro cálcico, etc.). Hay que tener en cuenta, además, el antagonismo entre iones, como, por ejemplo, el existente entre potasio y magnesio, por cuyo motivo este último elemento debe portarse los días en que no se fertilice con potasio, o hacer la aportación por vía foliar en forma de quelato.

La compatibilidad entre los fertilizantes más utilizados en fertirrigación viene indicada en la tabla 1.

Tabla 1: *Compatibilidad de fertilizantes*

	Nitrato amónico	Sulfato amónico	Solución nitrogenada	Urea	Nitrato cálcico	Nitrato potásico	Fosfato monoamónico o diamónico	Acido fosfórico	Sulfato potásico	Cloruro potásico
Nitrato amónico		C	X	X	I	X	X	X	C	C
Sulfato amónico	C		C	X	I	C	I	I	C	C
Solución nitrogenada	X	X		X	X	X	X	X	C	C
Urea	X	X	X		X	X	X	X	C	C
Nitrato cálcico	I	I	X	X		X	I	I	I	C
Nitrato potásico	C	C	C	X	C		C	C	C	C
Fosfato monoamónico o diamónico	X	I	X	X	I	C		C	C	C
Acido fosfórico	X	I	X	X	I	C	C		C	C
Sulfato potásico	C	C	C	C	I	C	C	C		C
Cloruro potásico	C	C	C	C	C	C	C	C	C	

Comportamiento de los fertilizantes en el suelo

Los fertilizantes nitrogenados pueden contener el nitrógeno bajo tres formas: ureica o amídica, amoniacal y nítrica. Las plantas absorben mayoritariamente el nitrógeno bajo la forma nítrica y pequeñas cantidades bajo la forma amoniacal.

Mediante transformaciones llevadas a cabo por los microorganismos del suelo, la forma ureica pasa a amoniacal y ésta a nítrica. Para que se produzcan estas transformaciones, el suelo tiene que tener suficiente humedad y temperatura. Por consiguiente, en épocas frías no conviene utilizar nitrógeno ureico, ya que por falta de temperatura

no se transformará en formas asimilables. En estos casos las formas exclusivamente amoniacaes pueden tener problemas de asimilación.

De las tres formas del nitrógeno en el suelo, la ureica y la nítrica permanecen en la solución del suelo y pueden ser arrastradas a capas profundas por lavado, mientras que la forma amoniacaal es retenida por el complejo de intercambio del suelo. Sin embargo, en riego localizado, el contenido amoniacaal es suficientemente alto para saturar los lugares de fijación, lo que permite al amonio sobrante moverse hacia zonas más profundas. Este amonio se transforma en nitrato, y en el riego siguiente se desplaza con facilidad por toda la zona radical.

El fósforo y el potasio asimilables son retenidos por el complejo de intercambio, por lo que su movimiento en el suelo es muy limitado. Sin embargo, está demostrado que ambos elementos tienen una considerable movilidad en el suelo cuando se aplican en riego localizado. Ello se debe a que se origina una saturación de los lugares de fijación en las proximidades del gotero, lo que hace posible el arrastre del elemento con el agua hacia capas más profundas. El fósforo se mueve 5-10 veces más que en el sistema tradicional de fertilización y el potasio puede moverse 50-90 cm en una estación. De este modo, al haber mayor volumen de suelo con disponibilidad de estos nutrientes se facilita su absorción por las plantas y aumenta la eficacia de la fertilización.

Los suelos arenosos se caracterizan por su escaso poder retentivo del agua y de los fertilizantes y por su buena aireación, que facilita las transformaciones llevadas a cabo por los microorganismos. En estos suelos no conviene hacer grandes aportaciones de nitrógeno amoniacaal, pues debido a su escaso poder retentivo podría haber en la solución del suelo una saturación de amonio y escasez de nitrato, lo que acarrearía dificultades en la absorción de nutrientes por las plantas. Por otra parte, el nitrógeno ureico, al no ser retenido en el suelo ni asimilado por la planta, se puede perder arrastrado por el agua de lavado.

En suelos arenosos hay que hacer aportaciones frecuentes y con dosificaciones bajas de fertilizantes; las pérdidas pueden ser cuantiosas debido al escaso poder retentivo de agua y de fertilizantes y a la rápida circulación del agua.

Los suelos arcillosos se caracterizan por su gran poder retentivo de agua y de fertilizantes. El agua circula lentamente y la aireación es deficiente, por lo que las transformaciones microbianas son lentas. Como consecuencia de ello se pueden hacer aportaciones de fertilizantes espaciadas y con alta dosificación. En estos suelos las formas ureicas responden con lentitud, sobre todo en épocas de baja temperatura.

Fertilizantes nitrogenados

Los fertilizantes nitrogenados más utilizados en fertirrigación por riego localizado de alta frecuencia son: nitrato amónico, urea, solución del 32 % de N, solución del 20 % de N y sulfato amónico.

Nitrato amónico

En fertirrigación sólo se utiliza el nitrato amónico de más alta graduación (33.5 % N) y libre de productos insolubles. Contiene la mitad del nitrógeno en forma amoniacal y la otra mitad en forma nítrica.

El nitrato amónico es uno de los fertilizantes de mayor solubilidad. Para preparar la solución madre se recomienda disolver una proporción en peso de 1/3 de fertilizante en 2/3 de agua; por ejemplo, 50 kg de fertilizante en 100 litros de agua.

Para controlar la salinidad, la concentración en el agua de riego debe ser, como máximo, de un gramo por litro. A esta concentración, la conductividad eléctrica del agua de riego se incrementa, aproximadamente, en 1 dS/m. Concentraciones superiores a esta cifra podrían dar lugar a conductividades peligrosas (véase tabla 2).

Debido a su acidez este fertilizante reduce el pH del agua de riego, lo que atenúa la intensidad de las precipitaciones calcáreas. Utilizando agua de buena calidad, las líneas portagoteras requieren muy poca limpieza.

Urea

La urea es un producto orgánico con un contenido de nitrógeno del 46 %, todo en forma ureica. Tiene una solubilidad muy alta. La solución madre se prepara igual que con el nitrato amónico.

En cuanto a la salinidad, la urea presenta mayor ventaja que ningún otro fertilizante, ya que al ser un producto orgánico no se disocia en el agua, por lo que su salinidad a pequeñas concentraciones es prácticamente nula. Por tanto, es el fertilizante nitrogenado más recomendable cuando se utilizan aguas salinas.

Este fertilizante es acidificante a bajas concentraciones, por lo que, desde este punto de vista, no conviene sobrepasar la dosis de 2 gramos de urea por litro de agua (véase tabla 2).

Durante el proceso de fabricación de la urea se forma «biuret», cuya concentración a dosis altas puede causar toxicidad en algunos cultivos sensibles. La forma de urea cristalina contiene menos «biuret» que la forma granulada, por lo que se debe emplear la primera de ellas en fertirrigación, sobre todo si se aplica por aspersión, que moja la vegetación.

Solución del 32 % de N (N-32)

Este fertilizante nitrogenado líquido es una disolución saturada de nitrato amónico del 33.5 % y urea, aproximadamente al 50 %. Contiene 16 % de nitrógeno ureico, 8 % de nitrógeno amoniacal y 8 % de nitrógeno nítrico.

En el agua de riego conviene que la disolución sea de 0.25 a 0.50 gramos por litro, ya que a estas concentraciones el pH es ácido y la conductividad eléctrica del agua de riego se incrementa poco (véase tabla 2).

Por debajo de 0 °C comienza la cristalización, por lo que habrá de tenerse cuidado en el almacenamiento durante el invierno en lugares donde se alcancen esas temperaturas.

Solución del 20 % de N (N-20)

Esta solución está formada por nitrato amónico en agua, por lo que tiene unas características análogas al nitrato amónico en lo relativo a solubilidad, conductividad, acidez, etc. El pH es ligeramente ácido, pero puede acidificarse más en riego localizado añadiendo ácido nítrico. Con 4 litros/m³ se rebaja el pH hasta 3.5, aproximadamente.

Sulfato amónico

El sulfato amónico contiene nitrógeno amoniacal (21 % N) y azufre (23 % S). Por su contenido en ión sulfato puede presentar problemas cuando el agua es rica en contenido de calcio. Es un producto bastante soluble. La solución madre se prepara en la proporción de 1 a 4 (por ejemplo, 25 kg de fertilizante en 100 litros de agua). Su reacción es ligeramente acidificante.

Fertilizantes fosfóricos

En cultivos anuales se incorpora del 50 al 75% de las necesidades de fósforo en la fertilización de fondo efectuada antes de la siembra o el trasplante. El resto de las necesidades (del 25 al 50%) se aporta disuelto en el agua de riego. En frutales de hueso y semilla esta fertilización se hace a la salida del invierno, mientras que en cítricos toda la aportación se hace mediante fertirrigación, para evitar daño a las raíces.

Los fertilizantes fosfóricos más utilizados en fertirrigación por riego localizado de alta frecuencia son: ácido fosfórico, fosfato monoamónico, fosfato diamónico, fosfato-urea y polifosfato amónico.

Ácido fosfórico

El que se suele utilizar en riego por goteo es una solución al 75 % de ácido fosfórico, con lo que resulta una riqueza del 54 % de P₂O₅. El ácido fosfórico puro, aunque más caro, es preferido al impuro, obtenido por vía húmeda; este último se tiene que filtrar antes de su utilización, para evitar que las impurezas obstruyan los goteros.

La solución al 75 % de ácido fosfórico se puede utilizar como solución madre, pero es mejor diluirla para evitar corrosiones.

En la tabla 3 se indican las conductividades del agua de riego para distintas concentraciones de la solución. Conociendo la conductividad del agua empleada para regar, se puede elegir la dosificación más adecuada para no incrementar peligrosamente la salinidad.

Este fertilizante es muy acidificante, aun en soluciones bajas, lo que permite limpiar la instalación de obstrucciones calcáreas.

Fosfato monoamónico (MAP)

En fertirrigación se utiliza el de fórmula 12-61-0. Dado que la solubilidad varía bastante con la temperatura, para preparar la solución madre se emplearán, por cada 100 litros de agua, 20 kg de fertilizante durante el invierno ó 25 kg durante el verano. A concentraciones mayores se produce sobresaturación, con lo cual aparece fertilizante sólido, sin disolver, en el fondo del recipiente. Al hacer la solución conviene hacer una buena agitación.

La reacción de este fertilizante es muy ácida, incluso a dosis bajas, lo que evita las precipitaciones calcáreas.

Fosfato diamónico (DAP)

Se utiliza el de fórmula 21-53-0. Tiene una reacción ligeramente alcalina, por lo que debe utilizarse con un ácido, como, por ejemplo, ácido nítrico en la proporción de 1.3 kg de ácido nítrico por 1 kg de fosfato diamónico.

Fosfato-urea

Se obtiene haciendo reaccionar el ácido fosfórico con la urea, obteniéndose un fertilizante cuya fórmula es 17-44-0. Para preparar la solución madre se suelen utilizar, por cada 100 litros de agua, 30 kg de fertilizantes durante el invierno y 35 durante el verano.

Incluso a dosis muy bajas este fertilizante es acidificante, por lo que no se producen precipitaciones calcáreas.

Polifosfato amónico

Se obtiene haciendo reaccionar ácido fosfórico con amoníaco. Es un producto muy adecuado para fertirrigación, debido a su gran solubilidad y a que tiene mayor movilidad que los ortofosfatos normales.

Fertilizantes potásicos

En cultivos anuales se cubre el 50-75 % de las necesidades potásicas a través del agua de riego, haciendo el resto de las aportaciones con la fertilización de fondo efectuada antes de la siembra o de la plantación.

No conviene incorporar mayor cantidad con la fertilización de fondo, ya que el K^+ se mueve con bastante facilidad en el suelo y habría peligro de lixiviación. También pudiera ocurrir que el K^+ fuera desplazado hacia los bordes del bulbo húmedo formado en cada gotero, creando un frente salino de donde huyen las raíces de las plantas.

En cultivos arbóreos conviene incorporar todo el abonado potásico con el agua de riego.

Nitrato potásico

Este fertilizante es bastante soluble, pero al disolverse en agua se origina una disminución importante de temperatura y de solubilidad, por cuyo motivo la solución se prepara disolviendo no más de 15-20 kg de fertilizante en 100 litros de agua. La cifra más baja corresponde al invierno, y la más alta, al verano.

Si se incorpora ácido fosfórico a la solución de nitrato potásico se produce una reacción exotérmica, con incrementos de la temperatura y de la solubilidad. Esta práctica se realiza en cítricos y en frutales durante el invierno, con lo cual se hace una fertilización fosfo-potásica, a la vez que se eleva la solubilidad de la solución madre.

En el agua de riego no convendría sobrepasar la dosis de 0.5 kg/l de agua. En cualquier caso habrá que tener en cuenta la conductividad del agua para no llegar a dosis peligrosas.

Según se observa en la tabla 3, las concentraciones pequeñas no alteran prácticamente el pH inicial del agua de riego (el agua pura tiene un pH = 6.7). En caso de utilizar aguas con bicarbonatos o con exceso de calcio habría que emplear dosificaciones bajas o aciduladas con ácido fosfórico o ácido nítrico, para evitar precipitaciones peligrosas.

Sulfato potásico

En fertirrigación se utiliza sulfato potásico cristalino, que es más puro y más caro que el utilizado en fertilización normal.

Para preparar la solución se disuelven 10 kg de fertilizante en 10 litros de agua, ya que dosificaciones más altas dejan algo de producto sin disolver. La tabla 3 nos muestra las variaciones de conductividad y de pH a distintas dosificaciones. De ello se deduce que las dosificaciones bajas son las más convenientes en ambos aspectos. El comportamiento con respecto al pH es muy parecido al del nitrato potásico, por lo que sirven las recomendaciones dadas para aquél.

El sulfato potásico incorpora iones sulfato, además de los iones de potasio, por lo que no es recomendable utilizar este fertilizante cuando se utilizan aguas con alto contenido en sulfatos. En cambio se recomienda su uso con aguas de buena calidad, ya que incorpora azufre.

Solución del 10 % de K_2O

Esta solución contiene algo de nitrógeno (1.2 %), procedente del ácido nítrico utilizado en su fabricación. A cualquier dosificación presenta una fuerte reacción ácida. (Ver tabla 3). Se puede utilizar a dosis de 1-2 gramos/litro, según la conductividad del agua de riego.

Fertilizantes complejos y mezcla de fertilizantes

Los fertilizantes complejos líquidos son soluciones para incorporar directamente al agua de riego, como si fueran soluciones madres. Tienen una limitación en el contenido de nutrientes, que no supera el 30 % de riqueza, y se preparan a partir de productos simples: nitrato amónico, urea, ácido fosfórico, sulfato potásico, etc. De acuerdo con las características del agua de riego se utilizarán soluciones neutras o ácidas. Estas últimas son aconsejables para aguas duras o salinas. En todo caso conviene conocer las características de conductividad y acidez a distintas concentraciones, para aplicar la concentración más adecuada en cada caso.

En fertirrigación se utilizan poco los fertilizantes complejos sólidos, ya que es difícil ajustar las fórmulas existentes en el mercado a las necesidades de los cultivos. Para preparar la solución madre que incorpore de una sola vez los elementos nutritivos necesarios hay que tener en cuenta una serie de factores: compatibilidad de la mezcla, acidez resultante, antagonismo de iones, etc.

Como norma general se pueden dar las recomendaciones siguientes para la preparación de la solución madre:

- Se calcula la cantidad necesaria de nitrato potásico que ha de cubrir las necesidades de K_2O .
- Se calcula la cantidad necesaria de fosfato diamónico o monoamónico que haya de cubrir las necesidades de P_2O_5 .
- Si se utiliza fosfato diamónico se añaden 1.3 kg de ácido nítrico por cada kg de fosfato.
- Para calcular la cantidad necesaria de nitrógeno hay que tener en cuenta lo aportado por el nitrato potásico, el fosfato monoamónico o diamónico, y el ácido nítrico. La diferencia entre el nitrógeno necesario y el aportado anteriormente será lo que haya de aportarse con nitrato amónico.

Los pasos a seguir serán los siguientes:

- Añadir lentamente ácido nítrico, si fuera necesario, al agua.
- Añadir nitrato potásico.
- Añadir fosfato monoamónico o diamónico.
- Añadir nitrato amónico.
- Agitar la mezcla durante un cuarto de hora, por lo menos.

Para soluciones nitrogenadas y binarias o ternarias de carácter neutro se utilizan, en general, depósitos de poliéster. Para soluciones ácidas se utilizan depósitos de polietileno. El ácido nítrico se almacena en tanques de acero inoxidable.

Otros fertilizantes

En fertirrigación hay que tener cuidado en la incorporación de calcio, ya que precipita con algunos aniones y puede originar obstrucciones en los goteros. En caso de carencia de calcio se aporta nitrato cálcico o cloruro cálcico. Estos abonos no se deben mezclar con los que contienen sulfato o fosfato, dejando un intervalo de, al menos, dos días entre las aplicaciones de ambos. Además conviene añadir una cuarta parte de ácido nítrico con respecto al peso de fertilizante.

El nitrato de cal líquido contiene un 7 % de nitrógeno y un 10 % de calcio. Es un fertilizante que se utiliza para corregir las deficiencias de calcio, y no de nitrógeno, aunque hay que tener en cuenta la aportación de este elemento. Las características a distintas concentraciones se indican en la tabla 2. A diferencia del nitrato de cal sólido, no provoca obstrucciones, pese al calcio que contiene.

El nitrato de magnesio contiene nitrógeno (11 %) y magnesio (9.5 %). El sulfato de magnesio contiene el 16 % de magnesio y el 13 % de azufre. El nitrato de magnesio líquido tiene una riqueza de 6.6 % de nitrógeno y 5.7 % de magnesio. De la tabla 2 se deduce que este último fertilizante debe utilizarse a pequeñas dosis, para no elevar demasiado el pH del agua.

Tabla 2: Valores de pH y CE en soluciones de los fertilizantes nitrogenados más utilizados en fertirrigación

Concentración g/l	Nitrato amónico 33.5 % N		Urea		Solución 32 % N		Solución 20 % N		Sulfato amónico		Solución de nitrato de cal		Solución de nitrato de magnesio	
	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m
0.25	5.87	0.49	5.63	0.004	6.11	0.32	6.91	0.40	5.47	0.54	6.90	0.18	5.90	0.14
0.50	5.59	0.78	5.70	0.006	6.62	0.58	6.85	0.73	5.49	1.04	6.80	0.33	5.95	0.25
1.00	5.56	0.94	5.84	0.006	7.12	1.10	6.37	1.32	5.49	2.14	6.40	0.57	6.09	0.47
2.00	5.38	2.78	6.10	0.007	7.23	2.29	6.14	2.49	5.49	3.45	6.13	1.13	6.44	0.87

Tabla 3: Valores de pH y CE en soluciones de los fertilizantes fosfóricos y potásicos más utilizados en fertirrigación

Concentración g/l	Acido fosfórico del 75 %		Fosfato mo- noamónico (12-61-0)		Fosfato- urea (17-44-0)		Nitrato potásico (13-0-46)		Sulfato potásico		Solución 10 % K ₂ O	
	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m	pH	CE dS/m
0.25	5.34	0.21	3.22	0.48	6.53	0.34	6.55	0.32	3.06	0.51	3.10	0.27
0.50	5.04	0.42	2.92	0.84	6.56	0.64	6.63	0.76	2.81	0.95	2.98	0.49
1	4.94	0.80	2.70	1.47	7.02	1.27	7.14	1.41	2.62	1.67	2.78	0.84
2	4.72	1.57	2.51	2.43	7.53	2.44	7.47	2.58	2.44	2.74	2.50	1.59

En las tablas 2 y 3 se ha utilizado agua destilada (pH=0 y CE=0). El incremento de CE se puede aplicar a cualquier agua, pero la modificación del pH debe tomarse como orientativa, ya que las distintas aguas varían en su contenido de calcio, magnesio, etc., que actúan como amortiguadores. Lo ideal sería elaborar las tablas para el agua que se vaya a utilizar.

Tabla 4: Solubilidad y acidez de distintos fertilizantes

	Composición N-P ₂ O ₅ -K ₂ O-Otros	Solubilidad g/l a 20 °C	Equivalente ácido
Nitrato amónico	33.5-0-0	1,900	62
Urea	46-0-0	1,000	71
Solución N-32	32-0-0		
Solución N-20	20-0-0		36
Nitrato cálcico	15.5-0-0 (26 CaO)	1,200	-20
Sulfato amónico	21-0-0 (23 S)	730	110
Acido nítrico	13-0-0		
Acido fosfórico	0-54-0		110
Fosfato monoamónico	12-61-0	220	58
Fosfato diamónico	21-53-0	400	70
Fosfato urea	17-44-0		
Polifosfato amónico	10-34-0		
Nitrato potásico	13-0-46	310	-23
Sulfato potásico	0-0-50	110	0
Cloruro potásico	0-0-60	340	0
Fosfato monopotásico	0-51-34	230	
Nitrato magnésico	11-0-0 (9.5 Mg)		
Sulfato magnésico	(16 Mg- 13 S)	710	
Sulfato ferroso	(36 Fe)	260	
Sulfato de manganeso	(32 Mn)	500	
Bórax	(11 B)	50	
Sulfato de cinc	(23 Zn)	750	

El equivalente ácido es la cantidad de carbonato cálcico (expresada en kg) necesarios para neutralizar 100 kg de fertilizante.

En el mercado existen productos sólidos que contienen macroelementos y algunos microelementos, tales como el N-Solubisol, que tiene una concentración del 30 % de nitrógeno, 2 % de magnesio, 3 % de azufre y cantidades apropiadas de zinc, boro, magnesio y molibdeno.

Los micronutrientes pueden reaccionar con los aniones del agua de riego formando precipitados, por lo que se aconseja su incorporación en forma de quelatos.

La salinidad en fertirrigación

Los cultivos responden de distinta manera a la salinidad, ya que unos son más sensibles que otros. En cualquier cultivo ocurre que su rendimiento no se ve afectado conforme va aumentando la salinidad, hasta que se llega a un límite de la misma (*valor umbral*) a partir del cual su progresivo aumento provoca una progresiva disminución más o menos rápida de la productividad.

El valor umbral de la salinidad corresponde a los valores de la tabla 2 del capítulo 3, cuando todavía no hay disminución del rendimiento.

A la sal que aporta el agua del riego hay que añadir la aportada por los abonos, ya que todos ellos (excepto la urea) son sales que se disocian en el agua.

Además de estas aportaciones hay que tener en cuenta otros factores (tales como la propia salinidad del suelo, el régimen de lluvias, la frecuencia de riegos, etc.) que pueden influir en la concentración de sales en el extracto de saturación.

Resulta complicado medir la salinidad del extracto de saturación, por lo que se recomienda, como norma práctica, que la salinidad medida a la salida de los goteros no supere los valores de la tabla 5, cuyos valores vienen en función de la relación frecuencia de fertilización dividida entre la frecuencia de riego.

Tabla 5: Salinidad máxima del agua a la salida de los emisores (F. Pizarro)

<i>Frecuencia de fertilización</i>	<i>g/l</i>	<i>CE (dS/m)</i>
<i>Frecuencia de riego</i>		
1/1	1.5	2.3
1/2	2	3.1
1/3	2.5	4
1/7 o menos	4	6.3

La relación 1/3, por ejemplo, significa que se fertiliza uno de cada tres días de riego.

Como se observa en la tabla es deseable aumentar el tiempo de riego cuando hay riesgo de salinidad.

Otro método práctico de conocer la salinidad consiste en calcular la dosis de fertilización en la cual la suma de sales que aportan el agua y los fertilizantes no sobrepase el valor umbral del cultivo. Se aplica la fórmula:

$$A = \frac{R \times ta}{tr} (Sc - Sr)$$

A = Cantidad máxima de fertilizante en cada riego, expresado en kg.

R = Cantidad de agua aplicada en un riego, en m³.

ta = Tiempo de fertilización en h.

tr = Tiempo de riego, en h.

Sc = Valor umbral del cultivo, en g/l.

Sr = Salinidad del agua de riego, en g/l.

Ejemplo

Un invernadero con planta de tomate necesita un riego diario de 4 m³. El tiempo de riego es de 7 h y el tiempo de fertilización es de 6 h. Se sabe que la salinidad del agua de riego es 0.31 g/l y que el umbral de salinidad para el tomate es de 2.5 dS/m. Calcular la frecuencia de fertilización.

Solución:

$$ST = 0.64 CE = 0.64 \times 2.5 = 1.6 \text{ g/l}$$

Cantidad máxima de fertilizantes en cada riego:

$$A = \frac{R \times ta}{tr} (Sc - Sr) = \frac{4 \times 6}{7} (1.60 - 0.31) = 4.42 \text{ kg}$$

Supongamos que las necesidades nutritivas de las plantas de ese invernadero durante una determinada semana son las siguientes:

- 1.80 kg de N
- 0.50 kg de P₂O₅
- 1.60 kg de K₂O

Se fertiliza con nitrato amónico (33.5-0-0), fosfato monoamónico (12-61-0) y nitrato potásico (13-0-46).

Aportación de K₂O:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ kg de nitrato potásico aporta } 0.46 \text{ kg de K}_2\text{O} \\ x \text{ kg de nitrato potásico aportan } 1.60 \text{ kg de K}_2\text{O} \end{array} \right\}$$

$$x = \frac{1.60}{0.46} = 3.47 \text{ kg de nitrato potásico}$$

Aportación de P_2O_5 :

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ kg de fosfato monoamónico aporta } 0.61 \text{ kg de } P_2O_5 \\ x \text{ kg de fosfato monoamónico aportan } 0.50 \text{ kg de } P_2O_5 \end{array} \right\}$$

$$x = \frac{0.50}{0.61} = 0.82 \text{ kg de fosfato monoamónico}$$

Aportación de N:

Aportado por el nitrato potásico	$3.47 \times 0.13 =$	0.45 kg
Aportado por el fosfato monoamónico	$0.82 \times 0.12 =$	0.10 kg
Total		0.55 kg

El nitrato amónico debe aportar:

$$1.80 - 0.55 = 1.25 \text{ kg de N}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ kg de nitrato amónico aporta } 0.335 \text{ kg de N} \\ x \text{ kg de nitrato amónico aportan } 1.25 \text{ kg de N} \end{array} \right\}$$

$$x = \frac{1.25}{0.335} = 3.73 \text{ kg de nitrato amónico}$$

En la semana de referencia se aportan:

$$3.47 + 0.82 + 3.73 = 8.02 \text{ kg de fertilizantes}$$

En cada riego no se pueden aportar más de 4.42 kg. Por tanto, las aportaciones de fertilizante se hacen en:

$$\frac{8.02}{4.42} = 1.8 = 2 \text{ veces}$$

Se fertilizará 2 días por semana.

Equipos de fertirrigación

Tanque de presión diferencial

Consiste en un depósito cerrado herméticamente en donde se coloca el fertilizante en forma sólida o en solución líquida. Una tubería de entrada al depósito y otra de salida lo conectan a la tubería de riego en dos puntos próximos; entre ambos se instala una válvula de reducción de presión, cuya misión consiste en crear una diferencia de presión para que una parte del agua de la tubería se desvíe al depósito desplazando gradualmente el fertilizante que contiene, por lo que su concentración va disminuyendo progresivamente (figura 11-1).

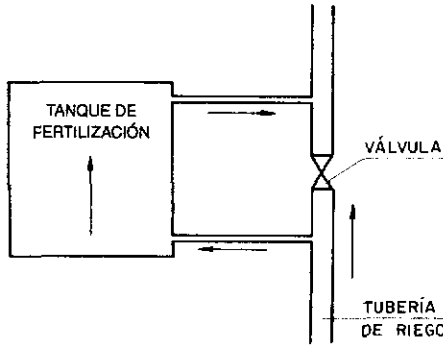


Fig. 11-1 Esquema de la instalación de un tanque de fertilización.

El tanque de presión diferencial es barato y adecuado cuando no se dispone de fuente de energía. Tiene el inconveniente de que la concentración de fertilizante no es uniforme a lo largo del riego.

Inyector venturi

La figura 11-2 muestra un esquema de inyector venturi, que consiste esencialmente en una tubería conectada en paralelo a la red y provista de un estrechamiento en donde se produce una depresión que provoca la succión de la solución fertilizante. Entre los dos puntos de conexión a la red se instala una válvula cuya misión consiste en producir una diferencia de presión para derivar una parte del agua de la red.

El depósito de fertilizante va provisto de un mecanismo de cierre para evitar que el aparato siga funcionando con el depósito vacío, lo que provocaría la inyección de aire en la red.

En este aparato la concentración de fertilizante en el agua de riego es constante durante todo el tiempo. Tiene el inconveniente de que produce una pérdida de carga importante, lo que se puede evitar instalando varios inyectores en serie, con una pequeña bomba centrífuga en un circuito en paralelo.

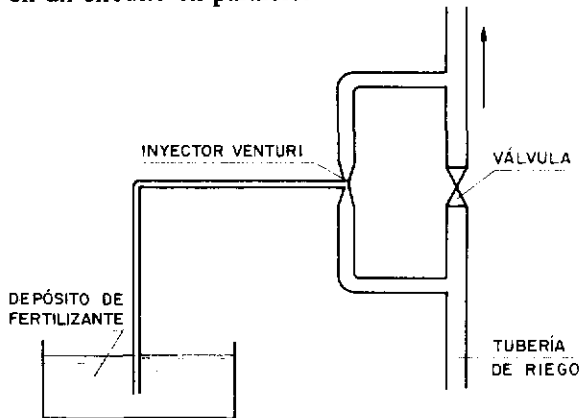


Fig. 11-2 Esquema de una instalación de inyector venturi.

Dosificador de fertilizante

Este aparato consiste en una bomba de pistón o de diafragma que toma el fertilizante líquido de un depósito sin presión y lo inyecta con presión a la red. Puede ser accionado por un motor eléctrico (dosificador eléctrico) o por la presión de la propia red (dosificador hidráulico). Algunos modelos de dosificadores hidráulicos necesitan una presión de 2 atmósferas, lo que puede ser un inconveniente en riegos de baja presión.

Los dosificadores mantienen la concentración de fertilizante constante durante todo el tiempo de riego. Son más caros que los tanques de presión diferencial y los inyectores venturi, pero resultan más precisos.

Para calcular el dosificador de fertilizante hay que tener en cuenta la máxima dosificación precisa, que será en el mes de mínimas necesidades de agua y las máximas de fertilización menos soluble. En algunos casos hay que comprobar si el dosificador calculado basta para efectuar la limpieza de las instalaciones a la dosificación precisa.

Ejemplo

Una plantación de limoneros de 1 ha de extensión tiene unas necesidades de agua de 850 litros/árbol · mes. Las necesidades de fertilizante potásico de ese mes son de 210 kg de sulfato potásico, cuya solubilidad a 20 °C es de 110 g/l. Cada árbol tiene 4 goteros de 4 l/h. Calcular el dosificador de fertilizante.

Solución:

Necesidades diarias de agua de riego:

$$\frac{850}{30} = 28.3 \text{ litros/árbol}$$

Tiempo de riego:

$$\frac{28.3}{4 \times 4} = 1.77 \text{ horas diarias}$$

Se riega cada dos días durante $1.77 \times 2 = 3.54$ h, ya que en plantaciones de árboles no es recomendable regar menos de 2 h diarias. De las 3.54 h se fertirriega durante 3 h, dejando 0.27 h iniciales para cargar las tuberías y 0.27 h finales para limpiarlas de los residuos de fertilizante.

En cada riego hay que incorporar:

$$\frac{210}{15} = 14 \text{ kg de sulfato potásico}$$

0.11 kg de sulfato potásico se disuelven en 1 litro de agua }
 14 kg de sulfato potásico se disuelven en x litro de agua }

$$x = \frac{14}{0.11} = 127.2 \text{ litros}$$

Dosificación por hora:

$$\frac{127.2 \cdot}{3} = 42.4 \text{ l/h}$$

Se elige el dosificador que dé un caudal más próximo, por exceso, a la cifra obtenida.

Supongamos que este dosificador se utiliza también para otra subunidad de doble superficie y 800 árboles, con las mismas necesidades unitarias de agua y de fertilizante. La limpieza de la instalación se hace con ácido nítrico al 3 % y una disolución al 50 %. Se comprobará si el dosificador basta para hacer la limpieza de la instalación durante 1/2 h.

Necesidades de agua de riego:

$$800 \text{ árboles} \times 4 \text{ goteros} \times 4 \text{ l/h} = 12,800 \text{ l/h}$$

Volumen de ácido nítrico diluido al 50 % inyectado durante 1/2 h:

$$\frac{12,800}{2} \times 0.003 \times 2 = 38.4 \text{ litros de solución diluida}$$

Caudal horario:

$$38.4 \times 2 = 76.8 \text{ l/h}$$

Quimigación

Se llama quimigación a la aplicación de sustancias químicas, sobre todo productos fitosanitarios, a través de la red de riego.

Con respecto al sistema tradicional de aplicación, la quimigación ofrece las siguientes ventajas:

- La aplicación se puede hacer con independencia de las condiciones atmosféricas.
- El producto se aplica a la profundidad deseada.
- No se producen daños mecánicos al suelo.
- No se produce compactación del suelo.
- Se reduce la dosis de producto, debido a que se requiere tratar una superficie menor.
- Se reducen las pérdidas por lixiviación.
- Menor riesgo de intoxicación.
- Se produce menor contaminación ambiental, debido a que no hay dispersión por el viento.
- Menor costo de aplicación.

Sin embargo, este sistema ofrece los siguientes inconvenientes:

- Se precisa un equipo adecuado.
- Existe mayor riesgo de fitotoxicidad, ya que aumenta la eficacia del producto.
- Se necesita personal cualificado.
- Sólo se controla la zona irrigada.

Con este sistema se aplican con éxito algunos productos (herbicidas, fungicidas, insecticidas, etc.). Sin embargo, no hay todavía experiencia suficiente para poder aplicar esta técnica de un modo general. En cuanto a herbicidas, los mejores resultados se obtienen con herbicidas de contacto o sistémicos, y mejor aún cuando se combinan con otros herbicidas persistentes.

CAPÍTULO 12

ESTUDIO ECONÓMICO

El costo de riego

El costo del riego incluye los costos fijos anuales y los costos variables.

1. Costos fijos anuales

Los costos fijos anuales son de dos tipos: los amortizables y los no amortizables.

Costos fijos amortizables. Estos costos comprenden:

- *Depreciación del equipo de riego*, debido al desgaste con el uso y a que se queda anticuado con el paso del tiempo. Por tanto, el valor de la inversión inicial debe amortizarse durante su vida útil, lo que equivale a ir acumulando un fondo de reserva para sustituir al equipo viejo cuando sea preciso. En la práctica se suele adoptar el sistema de depreciación anual constante, de tal forma que al final de la vida útil su valor coincida con el valor residual.
- *Interés del capital invertido.* Para la compra del equipo se puede recurrir a un préstamo o se puede utilizar el dinero propio. En el primer caso habría que pagar el interés del préstamo correspondiente. En el segundo caso, el agricultor hubiera tenido oportunidad de invertir ese dinero y, por consiguiente, los ingresos no percibidos en esa inversión deberán acumular como costo.

Dado que el valor del equipo se deprecia cada año, el costo de los intereses va disminuyendo progresivamente con el tiempo. Se suele tomar como interés fijo durante todo el período el interés correspondiente al valor medio del equipo. Si, por ejemplo, el valor inicial es \$800,000, y el valor residual es \$100,000, se toman los intereses anuales correspondientes a $(\$800,000 + \$100,000) \div 2 = \$450,000$:

$$\text{Interés fijo} = \frac{\text{Valor inicial} + \text{Valor residual}}{2}$$

Tabla 1: Factor de recuperación

$$\frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1}$$

Interés (i) (En %)	Años de vida útil (n)														
	4	6	8	10	15	20	25	30	35	40					
4	0.275490	0.190761	0.148527	0.123290	0.089941	0.073581	0.064011	0.057830	0.053577	0.050523					
5	0.282011	0.197017	0.154721	0.129504	0.096342	0.080242	0.070952	0.065051	0.061071	0.058278					
6	0.288591	0.203362	0.161035	0.135867	0.102962	0.087184	0.078226	0.072648	0.068973	0.066461					
7	0.295228	0.209795	0.167467	0.142377	0.109794	0.094392	0.085810	0.080586	0.077233	0.075009					
8	0.301920	0.216315	0.174014	0.149029	0.116829	0.101852	0.093678	0.088827	0.085803	0.083860					
9	0.308668	0.222919	0.180674	0.155820	0.124058	0.109546	0.101806	0.097336	0.094635	0.092959					
10	0.315470	0.229607	0.187444	0.162745	0.131473	0.117459	0.110168	0.106079	0.103689	0.102259					
11	0.322326	0.236376	0.194321	0.169801	0.139065	0.125575	0.118740	0.115024	0.112927	0.111718					
12	0.329234	0.243225	0.201302	0.176984	0.146824	0.133878	0.127499	0.124143	0.122316	0.121303					
13	0.336194	0.250153	0.208386	0.184289	0.154741	0.142353	0.136425	0.133410	0.131829	0.130986					
14	0.343204	0.257157	0.215570	0.191713	0.162808	0.150986	0.145498	0.142802	0.141441	0.140745					
15	0.350265	0.264236	0.222850	0.199252	0.171017	0.159761	0.154699	0.152300	0.151134	0.150562					
16	0.357375	0.271389	0.230224	0.206901	0.179357	0.168667	0.164012	0.161885	0.160892	0.160423					
17	0.364533	0.278614	0.237689	0.214656	0.187822	0.177690	0.173423	0.171544	0.170701	0.170319					
18	0.371738	0.285910	0.245244	0.222514	0.196402	0.186819	0.182918	0.181264	0.180550	0.180240					
19	0.378990	0.293274	0.252885	0.230471	0.205091	0.196045	0.192487	0.191034	0.190432	0.190180					
20	0.386289	0.300705	0.260609	0.238522	0.213882	0.205356	0.202118	0.200846	0.200339	0.200136					
21	0.393632	0.308202	0.268414	0.246665	0.222766	0.214744	0.211804	0.210691	0.210266	0.210102					
22	0.401020	0.315764	0.276298	0.254894	0.231738	0.224201	0.221536	0.220565	0.220209	0.220077					

El interés i está expresado en % en la tabla, mientras que en la fórmula está expresado en tanto por uno.

El procedimiento más utilizado para calcular los costos fijos amortizables (depreciación del equipo + interés del capital) consiste en determinar una anualidad constante que se abona al final de cada año de vida del proyecto. Al final del período, la suma de las anualidades y sus intereses será igual al capital inicial más sus intereses.

Este planteamiento es el mismo que se utiliza para las anualidades de amortización de una deuda.



El valor del capital C al final del año n , con un interés del i por uno, es:

$$C(1 + i)^n$$

Al final del año n , el valor de la suma de anualidades constantes a colocadas al final de cada año, con un interés del i por uno, es:

$$a(1 + i)^{n-1} + a(1 + i)^{n-2} + \dots + a(1 + i) + a = a \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

$$C(1 + i)^n = a \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

$$a = \frac{C(1 + i)^n \times i}{(1 + i)^n - 1} = C \times Fa$$

$$Fa = \frac{(1 + i)^n \times i}{(1 + i)^n - 1}$$

La tabla 1 da los valores del factor de recuperación (Fa) para distintos valores de la tasa de interés y del número de años de vida del proyecto.

Costos fijos no amortizables. Estos costos son los de mantenimiento, o sea, aquellos que se necesitan para mantener la instalación en buen estado de funcionamiento. Comprende los gastos de conservación, reparación y renovación de los elementos deteriorados. Estos gastos se estiman como un porcentaje medio anual de la inversión inicial.

En la tabla 2 se indican, a título orientativo, la vida útil, el valor residual y el costo de mantenimiento de diferentes elementos y sistemas de riego.

2. Costos anuales variables

Estos costos comprenden: la mano de obra, la energía, el agua y otros costos.

Tabla 2: *Vida útil, valor residual y costo de mantenimiento de diferentes elementos y sistemas de riego*

	Vida útil años	Valor residual % inversión	Mantenimiento % inversión
Ingeniería civil	40	—	—
Pozos y sondeos	15-20	—	—
Canales y acequias	40	—	—
Tubería enterrada	30	—	2
Tubería portátil de aluminio	15	10	2
Tubería portátil de PE	15-30	10	2
Pequeño equipo (válvulas, contadores, accesorios, etc.)	10	—	3
Aspersores	10	—	5
Bombas	10-20	10	5-10
Motor eléctrico	20	10	3
Motor diesel	10	5	6
Material de automatización y regulación	10	—	2
Cañón de riego	15	10	1
Lateral	15	10	1
Pivote	15-20	5-10	1
Aspersión cobertura total	25	10	1
Aspersión sistema móvil	15	10	2
Microaspersión	10	5	2
Riego por goteo	10	5	2

El costo de la mano de obra depende de muchos factores: sistema de riego, cultivo, grado de automatización, etc. A título orientativo se pueden dar las cifras siguientes:

Aspersión con ramales móviles	60 h/ha y año
Aspersión con cobertura total	6 h/ha y año
Pivote central	3 h/ha y año
Lateral de avance frontal	8 h/ha y año
Microaspersión	8 h/ha y año
Goteo	6 h/ha y año

El costo de la energía eléctrica consumida viene dado por la fórmula:

$$C = P_m \times t \times C_e$$

C = Costo de la energía, en \$.

P_m = Potencia del motor, en kw.

t = Tiempo de funcionamiento, en h.

C_e = Costo de la energía eléctrica, en \$/kw-h.

Ejemplo

Una tubería portátil de aluminio de acomplamiento rápido, de 180 m de longitud conduce 40 m³/h (11.11 litros/seg). Se estima el plazo de vida en 15 años y el manteni-

miento anual en el 2 % de la inversión. El interés es del 10 %, el precio medio del kw-hora es de 9.50 y el grupo motobomba funciona durante 1,400 h anuales con un rendimiento de 0.7. Calcular el diámetro más económico.

Solución:

Se supone que los diámetros disponibles y sus pérdidas de carga correspondientes son los que se indican a continuación.

Se tantea con distintos diámetros de tubería para ver cual resulta más económica. Se considera como capital inicial el valor de la tubería y se calculan los costos anuales fijos (amortizables y no amortizables) y variables.

- Gastos fijos amortizables = anualidad de amortización (*a*)
- Gastos fijos no amortizables = gastos de mantenimiento (2 % del valor de la inversión).

Diámetro (mm)	75	100	125	150
Precio unitario (tubo de 9 m)	4,795	7,075	9,880	12,650
Precio total <i>P</i>	95,900	141,500	197,600	253,000
Factor de recuperación <i>Fa</i>	0.131473	0.131473	0.131473	0.131473
Amortización anual <i>a</i> = <i>P</i> × <i>Fa</i>	12,608	18,603	25,979	33,262
Mantenimiento anual	1,918	2,830	3,952	5,060

- Gastos variables = gastos de la energía, que varían según las pérdidas de carga

Costo de energía:

$$C = Pm \times t \times Ce = \frac{0.0098 \times Q \times H}{rb \times rm} \times t \times Ce =$$

$$= \frac{0.0098 \times 11.11 \times H}{0.7} \times 1,400 \times 9.50 = 2,068.68H$$

rb = Rendimiento de la bomba, en tanto por uno.

rm = Rendimiento del motor, en tanto por uno.

Diámetro (mm)	75	100	125	150
Pérdida de carga (m/100 m)	9.31	2.18	0.70	0.29
Pérdida de carga total <i>H</i> (m)	16.75	3.92	1.26	0.52
Energía 2,068.68 <i>H</i>	34,650	8,109	2,606	1,075
Total (amortizaciones + mantenimiento + energía)	49,176	29,542	32,537	39,397

El diámetro más económico es de 100 mm.

Ejemplo

Para transformar en regadío una zona se pretende realizar unos sondeos cuya inversión inicial y vida útil son los siguientes:

	<i>Inversión</i> (<i>\$</i>)	<i>Vida útil</i> (<i>años</i>)
Estudio hidrogeológico	10,500,000	40
Obras de captación:		20
Perforación	12,300,000	
Entubación	9,400,000	
Desarrollo y aforo	2,500,000	
Varios	1,500,000	
Electrificación	2,500,000	25
Maquinaria de bombeo	3,800,000	15
Obra civil	1,900,000	40
Total	44,400,000	

Se estima en \$1,800,000 el costo del mantenimiento y conservación anual, y en \$1,700,000 el costo de la mano de obra. Se prevé un caudal de 260 l/seg durante 3,000 h anuales de funcionamiento. La altura manométrica es de 40 m y el costo medio anual de la energía es de \$10.50/kw-h. El rendimiento del grupo motobomba es del 70% y el interés del capital, del 12%. Calcular el costo del agua.

Solución:

Se valoran todos los costos al final del primer año.

1. Costos fijos amortizables.

La amortización anual se calcula mediante la fórmula:

$$a = \frac{C(1 + i)^n \times i}{(1 + i)^n - 1} = C \times Fa$$

Los valores de *Fa* vienen en la tabla 1.

	<i>Importe</i> (<i>\$</i>)	<i>Vida útil</i> (<i>años</i>)	<i>Interés</i> (<i>%</i>)	<i>Fa</i>	<i>Amortización</i> (<i>\$</i>)
Estudio hidrogeológico	10,500,000	40	12	$10,500,000 \times 0.121303 =$	1,273,688
Obras de captación	25,700,000	20	12	$25,700,000 \times 0.133878 =$	3,440,684
Electrificación	2,500,000	25	12	$2,500,000 \times 0.127499 =$	318,750
Maquinaria de bombeo	3,800,000	15	12	$3,800,000 \times 0.146824 =$	557,932
Obra civil	1,900,000	40	12	$1,900,000 \times 0.121303 =$	230,476
Total amortización anual					5,821,530

2. Costos fijos no amortizables.

Mantenimiento y conservación = \$1,800,000

3. Mano de obra = \$1,700,000

4. Costo de la energía.

$$C = Pm \times t \times Ce$$

$$Pm = 0.0098 \frac{Q \times H}{rb \times rm} = \frac{0.0098 \times 260 \times 40}{0.7} = 145.6 \text{ kw}$$

$$C = Pm \times t \times Ce = 145.6 \times 3,000 \times 10.50 = \$4,586,400$$

5. Volumen del agua sacada

$$0.26 \times 3,600 \times 3,000 = 2,808,000 \text{ m}^3$$

6. Costo del m³ del agua a pie de pozo

$$C = \frac{5,821,530 + 1,800,000 + 1,700,000 + 4,586,400}{2,808,000} = \$4.95/\text{m}^3$$

Ejemplo:

Algunos autores han hecho estudios comparativos de los costos de diferentes sistemas de riego. F. J. Cavero y J. Hernández estudiaron en 1987 los costos para diferentes sistemas de riego en la comarca de Los Monegros de Aragón, en España. Con el fin de que los diseños fueran operativos se eligió una explotación tipo de 25 ha, de dimensiones 500 × 500 m y con el agua a pie de finca. El consumo de agua era de 7,120 m³/ha y los costos de agua y de energía era, respectivamente, de 0.50 pesetas/m³ y de 0.65 pesetas/m³. La mano de obra se valoró a 400 pesetas/h. Las inversiones y los costos para los diferentes sistemas de riego fueron los siguientes.

<i>Sistema de riego</i>	<i>Inversión inicial pts./ha</i>	<i>Costo anual fijo pts./ha</i>	<i>Costo anual variable pts./ha</i>	<i>Mano de obra h/ha y año</i>
Aspersión cobertura total	352,950	12,707	14,118	6
Aspersión semi-fija	118,827	5,653	33,962	60
Micro-aspersión	209,453	9,949	15,209	8
Pivote	241,611	11,765	14,694	3
Lateral	375,061	18,203	18,029	8
Goteo	165,910	7,881	13,538	6

Viabilidad económica de una inversión

Para estudiar la viabilidad económica de una inversión se utilizan diversos métodos de análisis. El método del *valor actual neto (VAN)* compara el valor de una inversión

que se hace ahora con el valor actualizado de los ahorros que esa inversión genera en el futuro.

La inversión puede efectuarse de una sola vez al comienzo del proyecto o en varias anualidades a lo largo de la vida del mismo. En muchos casos la inversión total se compone de diversos elementos que tienen distintos años de vida útil.

Se llama *flujo de caja* a la diferencia entre los cobros recibidos con la inversión y los pagos generados para su funcionamiento.

$$F_c = C_c - P_c$$

F_c = Flujo de caja correspondiente al año c .

C_c = Cobros recibidos en el año c .

P_c = Pagos efectuados en el año c .

El valor de los flujos de caja obtenidos a lo largo de la vida del proyecto se actualiza al inicio del proyecto. Por tanto, el valor actualizado (al año cero), del flujo de caja correspondiente al año c es:

$$\frac{F_c}{(1+i)^c}$$

Siendo i el tanto por uno del interés de la inversión.

El valor actualizado (al año cero) de la suma de los flujos de caja correspondientes a los n años de vida del proyecto es:

$$\sum_{c=1}^{c=n} \frac{F_c}{(1+i)^c}$$

El valor actual neto (VAN) es la diferencia entre la suma de los flujos de caja actualizados al año cero y la inversión realizada en el momento inicial.

$$\text{VAN} = \sum_{c=1}^{c=n} \frac{F_c}{(1+i)^c} - K$$

Siendo K la inversión inicial.

Cuando la inversión se realiza escalonadamente a lo largo de la vida del proyecto, en el cálculo del VAN se actualiza al año cero cada una de esas inversiones.

Cuando el flujo de caja es el mismo durante todos los años, el cálculo del VAN se simplifica introduciendo el concepto de *factor de valor actual (FVA)*, que viene dado por la fórmula:

$$\text{FVA} = \sum_{c=1}^{c=n} \frac{1}{(1+i)^c}$$

Tabla 3: Factor de valor actual $\sum_{c=1}^{c=n} \frac{1}{(1+i)^c}$

Interés (i) (En %)	Valor del proyecto (c) en años																			
	4	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50									
3	3.717098	5.417191	7.019692	8.530202	9.954003	11.937935	14.877475	17.413148	19.600441	23.114772	25.729764									
4	3.629895	5.242136	6.732744	8.110895	0.385073	11.118387	13.590326	15.6220780	17.292033	19.792774	21.482185									
5	3.545950	5.075692	6.463212	7.721734	8.863251	10.379658	12.462210	14.093945	15.372451	17.159086	18.255925									
6	3.465105	4.917324	6.209793	7.360087	8.383843	9.712248	11.469921	12.783356	13.764831	15.046297	15.761861									
7	3.387211	4.766539	5.971298	7.023581	7.942686	9.107914	10.594014	11.653583	12.409041	13.331709	13.800746									
8	3.312126	4.622879	5.746638	6.710081	7.536078	8.559478	9.818147	10.674776	11.257783	11.924613	12.233485									
9	3.239719	4.485918	5.534819	6.417657	7.160725	8.060688	9.128545	9.822579	10.273654	10.757360	10.961683									
10	3.169865	4.355260	5.334926	6.144567	6.813691	7.606079	8.513563	9.077040	9.426914	9.779050	9.914814									
11	3.102445	4.230537	5.146122	5.889232	6.492356	7.190869	7.963328	8.421744	8.693792	8.951050	9.041653									
12	3.037349	4.111407	4.967639	5.650223	6.194374	6.810864	7.469443	7.843139	8.055183	8.243776	8.304498									
13	2.974471	3.997549	4.798770	5.426243	5.917647	6.462378	7.024751	7.329984	7.495653	7.634375	7.675241									
14	2.913712	3.888667	4.638863	5.216115	5.660292	6.142167	6.623130	6.872927	7.002664	7.105040	7.132656									
15	2.854978	3.784482	4.487321	5.018768	5.420618	5.847370	6.259331	6.464149	6.565979	6.641778	6.660514									
16	2.798180	3.684735	4.343590	4.833227	5.197107	5.575456	5.928840	6.097091	6.177198	6.233497	6.246259									
17	2.743235	3.589184	4.207162	4.658603	4.988387	5.324187	5.627767	5.766233	5.829389	5.871334	5.880060									
18	2.690061	3.497602	4.077565	4.494086	4.793224	5.091577	5.352746	5.466905	5.516805	5.548151	5.554140									
19	2.638585	3.409777	3.954365	4.338934	4.610504	4.875862	5.100862	5.195147	5.234658	5.258153	5.262279									
20	2.588734	3.325510	3.837159	4.192472	4.439216	4.675472	4.869579	4.947587	4.978936	4.996598	4.999450									

El interés *i* está expresado en la tabla en %, mientras que en la fórmula está expresado en tanto por uno.

La tabla 3 indica el FVA para distintos valores del interés i y de los años de vida del proyecto.

$$VAN = FVA \times Fc - K$$

Para que una inversión sea rentable, el VAN debe ser positivo.

Se llama *plazo de recuperación* de una inversión al número de años que se precisan para que el VAN sea cero.

La *tasa interna del rendimiento (TIR)* es el valor del interés para el cual el VAN es cero, o sea que:

$$\sum_{c=1}^{c=n} \frac{Fc}{(1 + \lambda)^c} = K$$

λ = Tasa interna de rendimiento.

La tasa interna de rendimiento es un índice que nos indica la rentabilidad de una inversión K a un interés i durante n años.

Si $\lambda > i$ la inversión es rentable.

Si $\lambda < i$ la inversión no es rentable.

Ejemplo

Una tubería de PVC de clase 6 y 400 m de longitud conduce 30 l/seg. El agua es impulsada por un grupo electrobomba que trabaja 2,000 h anuales con un rendimiento del 80 % en la bomba y del 93 % en el motor. Se estima en 20 años la duración de la tubería. El interés es del 12%, la inflación del costo de la energía es del 7.5% y el costo medio de la electricidad es \$9/kw-h. Se trata de seleccionar la tubería que resulte más rentable, haciendo el análisis mediante el método VAN.

Solución:

$$VAN = FVA \times Fc - K$$

A medida que aumenta el diámetro disminuye la pérdida de carga, pero se incrementa el precio de la tubería. Se considera como inversión K el incremento del costo de la tubería de un diámetro determinado con respecto al diámetro comercial inmediatamente inferior.

1. Cálculo del factor de valor actual FVA

Como en el flujo de caja no interviene más que la energía, se puede considerar la siguiente fórmula del FVA.

$$FVA = \sum_{c=1}^{c=n} \frac{(1 + D)^{c-1}}{(1 + i)^c}$$

Siendo I la inflación del costo de la energía.

El cálculo de esta ecuación es muy laborioso sin ayuda de una calculadora o una computadora. En la tabla 4 se dan los valores del FVA en función de diversos valores de interés (i) y de la inflación del costo de la energía (I).

Para las condiciones dadas $FVA = 12.43$ (según tabla 4).

2. Cálculo del flujo de caja F_c

Los cobros en el flujo de caja son los ahorros del costo de la energía al utilizar un determinado diámetro, con respecto a la utilización del diámetro inferior. No hay gasto suplementario al utilizar tubería de mayor diámetro, por lo que no se consideran los pagos en el flujo de caja.

$$\begin{aligned} \text{Ahorro anual de energía } C_c &= Pm \times t \times C_e = \frac{0.0098 \times Q \times H}{rb \times rm} \times t \times C_e = \\ &= \frac{0.0098 \times 30 \times H \times 2,000 \times 9}{0.80 \times 0.93} = 7,112.9H \\ F_c &= C_c - P_c = 7,112.9H \\ P_c &= 0 \end{aligned}$$

Haciendo uso del nomograma correspondiente a la tubería de PVC (en el capítulo 10) se encuentran las siguientes pérdidas de carga para distintos diámetros nominales:

	125 mm	140 mm	160 mm	180 mm	200 mm
Pérdida de carga (m/100 m)	5	2.9	1.45	0.85	0.5
Pérdida de carga total (m)	20	11.6	5.8	3.4	2

3. Análisis de la inversión

	125	140	160	180	200
Diámetro nominal (mm)	125	140	160	180	200
Pérdida de carga total (m)	20	11.6	5.8	2.4	2
Diferencia de pérdida de carga con relación al diámetro anterior. H (m)	—	8.4	5.8	3.4	0.4
Flujo de caja $F_c = 7,112.9H$	—	59,748.3	41,254.8	24,183.8	2,845.1
Suma de flujos de caja actualizados año cero $FVA \times F_c$	—	742,671	512,797	300,605	35,364.5
Costo tubería (\$/m)	1,373	1,698	2,221	2,821	3,520
Costo total tubería (\$)	549,200	679,200	888,400	1,128,400	1,408,000
Incremento costo tubería con relación al diámetro anterior. K (\$)	—	130,000	209,200	240,000	279,600
$VAN = FVA \times F_c - K$ (\$)	—	612,671	303,597	80,605	-244,235

La inversión deja de ser rentable para un diámetro de 200 mm. La comparación de cada diámetro con el precedente demuestra que la tubería más rentable es la de 180 mm.

GLOSARIO

Agua capilar. Agua del suelo retenida por capilaridad.

Agua de constitución. Agua combinada químicamente con los minerales del suelo.

Agua disponible. Es el agua comprendida entre la capacidad del campo y el punto de marchitamiento.

Agua fácilmente disponible. El agua que pueden absorber las plantas sin que haya disminución de su rendimiento.

Agua gravitacional. Agua que sale del suelo por la acción de la gravedad.

Agua higroscópica. Agua del suelo que se puede eliminar por secado en la estufa a 110-115° C.

Agua libre. Agua gravitacional.

Altura manométrica. Es igual a la altura geométrica sumada a las pérdidas de carga.

Altura neta positiva de aspiración disponible. Es la presión absoluta disponible en la entrada de aspiración de una bomba.

Altura neta positiva de aspiración requerida. Es la presión de entrada requerida por la bomba para que ésta funcione correctamente.

Aspiración. Elevación del agua desde su nivel hasta el eje de la bomba.

Bulbo húmedo. Volumen de suelo humedecido por un emisor de riego localizado.

Cabezal de riego. Conjunto de aparatos que sirven para tratar, medir y filtrar el agua, controlar la presión e incorporar los fertilizantes en sistemas de riego presurizados.

Capacidad de campo. Fase del agua en el suelo en la cual se ha eliminado por gravedad el exceso de agua.

Caudal. Cantidad de agua que pasa por una sección de la conducción durante un tiempo determinado.

Coefficiente de cultivo. Relación entre la evapotranspiración de un cultivo determinado y la evapotranspiración del cultivo de referencia. Varía con el tipo de cultivo y con su período vegetativo.

Coefficiente de uniformidad. Hace referencia al reparto más o menos uniforme del agua infiltrada en el suelo.

Coefficiente de variación de fabricación. Cociente entre la desviación típica y el caudal medio de una muestra de emisores de la misma marca.

Curva característica de retención de humedad. Expresión gráfica de la relación entre el contenido de humedad y la tensión matricial del agua de un suelo.

Curva característica de una bomba. Gráfico que relaciona las características de esa bomba, y que están en función de su diseño, tamaño y construcción.

Curva característica de un emisor. Gráfico que relaciona el caudal emitido con la presión del agua.

Densidad aparente del suelo. Es igual al peso de una muestra de suelo seco dividido por el volumen total que ocupa.

Densidad real del suelo. Es igual al peso del suelo seco dividido por el volumen ocupado por las partículas sólidas.

Dosis de riego. Cantidad de agua que se aplica en cada riego por cada unidad de superficie.

Dosis neta de riego. Cantidad de agua correspondiente a la reserva fácilmente disponible.

Dosis total de riego. Cantidad de agua que realmente se suministra en el riego. Es igual a la dosis neta dividida por la eficiencia de aplicación.

Drenaje. Eliminación del agua sobrante que no puede retener el suelo.

Eficiencia de aplicación del agua. Proporción entre la cantidad de agua almacenada en la zona del sistema radical y la cantidad de agua aplicada por el sistema de riego.

Emisor. Mecanismo, boquilla u orificio por donde el agua fluye desde una tubería a la atmósfera.

Esgurrimiento. Movimiento del agua por la superficie del suelo.

Estructura del suelo. Disposición de las partículas de arena, limo y arcilla para formar otras unidades de mayor tamaño, llamadas agregados.

Evapotranspiración. Cantidad de agua que consume un cultivo debido a la evaporación en la superficie del suelo y a la transpiración de las plantas.

- Evapotranspiración potencial.* Cantidad de agua consumida por un cultivo homogéneo, denso, en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua, durante un determinado período de tiempo.
- Evapotranspiración real.* Cantidad de agua realmente consumida por un cultivo durante un período de tiempo considerado.
- Exponente de descarga de un emisor.* Expresa la sensibilidad de un emisor a las variaciones de presión.
- Factor de potencia.* Razón entre la energía activa o real (consumida por el motor) y la energía teórica o nominal (suministrada por la empresa suministradora).
- Factor de rociado.* Fracción de agua perdida por evaporación directa desde el agua del chorro de los aspersores y desde el agua que moja la parte aérea de las plantas.
- Fertirrigación.* Incorporación de fertilizantes al agua de riego.
- Flujo laminar.* La trayectoria de las partículas del líquido son paralelas al eje de la tubería, permaneciendo así a lo largo del tiempo y en todo el tramo de la conducción.
- Flujo turbulento.* La trayectoria de las partículas del líquido no son paralelas al eje de la tubería, sino que describen líneas aleatorias a lo largo del tiempo y del tramo de la conducción.
- Fracción de abatimiento del agua disponible.* Relación entre el agua fácilmente disponible y el agua disponible.
- Golpe de ariete.* Sobrepresión o depresión instantáneas producidas cuando se altera el régimen de circulación de agua en una tubería.
- Gradiente hidráulico entre dos puntos.* Parámetro adimensional que se define como el cociente entre la diferencia de carga entre esos dos puntos y la distancia entre ellos.
- Hidrante.* Toma de agua en donde el usuario conecta su equipo de riego.
- Histéresis.* Fenómeno mediante el cual, a una determinada tensión del agua en el suelo, el contenido del agua en ese suelo es mayor cuando está secándose que cuando se está humedeciendo.
- Humedad equivalente.* Corresponde a la capacidad del campo en suelos de textura media.
- Humedad gravimétrica.* Es el porcentaje de agua que contiene el suelo con relación al peso de suelo seco.
- Humedad volumétrica.* Es el porcentaje de agua que contiene el suelo con relación al volumen.
- Impulsión.* Conducción del agua desde la bomba hasta su destino.

- Infiltración.* Movimiento del agua desde la superficie del suelo hacia abajo.
- Infiltración acumulada.* Cantidad de agua que pasa a través de la superficie del suelo en un tiempo determinado.
- Índice de saturación de Langelier.* Índice que valora el riesgo de precipitación del calcio contenido en el agua de riego.
- Lavado.* Lixiviación.
- Lisímetro.* Recipiente de gran tamaño en donde se cultiva la planta de referencia de la forma más parecida a como se efectúa en el campo.
- Lixiviación.* Arrastre de sales y elementos nutritivos disueltos en el agua a estratos más profundos de la zona radical.
- Longitud equivalente de tubería.* Forma de expresar las pérdidas de carga en un elemento singular. Es la longitud de tubería recta que con el mismo caudal y diámetro produce la misma pérdida de carga que el elemento singular.
- Marco de aspersión.* Las distancias que existen entre dos líneas continuas de aspersores y entre dos aspersores contiguos de la misma línea.
- Módulo de aplicación.* Cantidad de agua aplicada en la unidad de tiempo.
- Número de Reynolds.* Parámetro adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las de viscosidad o rozamiento en el interior de una conducción forzada.
- Percolación.* Paso del agua a zonas profundas del suelo.
- Pérdida de carga.* Pérdida de presión originada dentro de una tubería, como consecuencia del rozamiento del agua contra las paredes de la tubería o debido a torbellinos que se forman dentro de ella.
- Permeabilidad.* Propiedad de un suelo saturado de agua para permitir el paso de una corriente de agua libre.
- Peso específico.* Es el peso de la unidad de volumen.
- Porosidad.* Es la relación entre el volumen total de poros de un suelo y el volumen total de ese suelo.
- Potencial hídrico.* Magnitud que expresa la energía libre del agua cuando ésta entre a formar parte de diversos sistemas (suelo, planta, atmósfera, etc.). Hace referencia a la magnitud del trabajo que se precisa realizar para extraer el agua del suelo.
- Precipitación efectiva.* Fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas.
- Punto de marchitamiento.* Fase del agua en el suelo en la cual las plantas no pueden absorber la cantidad de agua que necesitan, debido a que el agua está fuertemente retenida por las partículas del suelo.

- Radio hidráulico.* Es el cociente entre el área de la sección mojada y el perímetro mojado.
- Relación de adsorción del sodio. (RAS).* Índice que valora la proporción relativa de sodio con relación al calcio y magnesio contenidos en el agua de riego o en la solución del suelo.
- Relación de transpiración.* Proporción entre la cantidad de agua evapotranspirada y la cantidad de agua puesta a disposición de la planta.
- Requerimiento de lixiviación.* Fracción de agua de riego que debe percolar a través del suelo para arrastrar el exceso de sales.
- Reserva de agua disponible.* Agua disponible contenida en la profundidad del suelo que alcanzan las raíces.
- Reserva de agua fácilmente disponible.* Cantidad de agua que pueden absorber las plantas sin que haya disminución del rendimiento.
- Riego localizado.* Aplicación del agua en una zona más o menos restringida del volumen radical.
- Riego por aspersión.* El agua se aplica en forma de lluvia sobre la superficie que se pretende regar.
- Riego por goteo.* Riego localizado en donde el agua se aplica gota a gota.
- Riego por superficie.* El agua fluye por gravedad, utilizándose la superficie del suelo como parte del sistema de distribución del agua. Riego por gravedad.
- Subunidad de riego (en riego localizado).* Superficie que se riega simultáneamente desde un mismo punto en donde se regula la presión de entrada del agua.
- Suelo saturado.* Suelo con todos sus poros saturados de agua.
- Tanque evaporímetro.* Recipiente de unas determinadas características que sirve para medir la evaporación y determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia.
- Tensiómetro.* Aparato que mide el potencial matricial del suelo.
- Tensión del agua en el suelo.* Esfuerzo de succión que se necesita para liberar el agua del suelo.
- Textura del suelo.* Proporción relativa de arena, limo y arcilla que contiene.
- Traslape.* Porcentaje de sobreposición que se da entre los marcos de aspersión o bulbos húmedos.
- Velocidad de infiltración.* Volumen de agua que entra en el perfil del suelo por unidad de tiempo.
- Velocidad media.* Aquella que llevarían todas las partículas de la vena líquida para conducir el mismo caudal.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Aguilera, C. M. y R. Martínez. *Relación Agua Suelo Planta Atmósfera*. Publicado por Patronato Universitario de la Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Arviza, J. *Curso de Riego*. Ed. Generalitat Valenciana. Valencia.
- Avidán, A. *Determinación de Régimen de Riego de los Cultivos*. Ed. CINADCO. Israel.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drain. Paper No. 29 Rev. 1. FAO. Roma.
- Baver, L. D., Gardner, W. H. y Gardner, W. R. *Física de Suelos*. Ed. Uteha. México.
- Berenjena, J. *Necesidades de Agua y Programación de Riego*. Ed. IRYDA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Blair, E. *Manual de Riegos y Avenamientos*. Ed. Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Caracas. Venezuela.
- Booher, L. *El Riego Superficial*. Ed. FAO. Roma.
- Boswell, M. J. *Manual de Diseño y Manejo de Sistemas de Microirrigación*. Ed. James Hardie Irrigation. Iberia.
- Burt, C., K. O'Connor y T. Ruehr. *Fertigation*. Publicado por Irrigation Training and Research Center. San Luis Obispo, California.
- Cabeza, A. *Riego por Aspersión*. Ed. Facultad de Agronomía. Montevideo.
- Castañón, G. *Riego por Aspersión*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Clemen, R. y A. Galand. *El Riego por Aspersión*. Ed. Editores Técnicos Asociados. Barcelona.
- Coneza, V. *Riegos a Presión Media y Alta Frecuencia*. Ed. Prensa XXI. Barcelona.
- Chow, Ven Te. *Hidráulica de los Canales Abiertos*. Ed. McGraw Hill. Bogotá.
- De la Peña, I. *El Buen Uso y Manejo del Agua de Riego*. Boletín Técnico No. 8. Comité Directivo del Distrito de Riego No. 28-41. Oficina de Riego y Drenaje. SARH. Cd. Obregón, Son. México.
- Domínguez, V. A. *Fertirrigación*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. *Necesidades de Agua de los Cultivos*. Estudio FAO. Riego y drenaje No. 24, Roma.

- Doorenbos, J. y A. H. Kasam. *Efectos del Agua sobre el Rendimiento de los Cultivos*. Estudio FAO. Riego y drenaje No. 29. Roma.
- Duart, J. y M. C. Bañó. *Vademecum de Materiales de Riego*. Ed. Edipublic. Valencia.
- Ducrocq, M. *Sistemas de Irrigación*, Ed. CEAC. Barcelona.
- Faci, J. M. *Determinación de las Necesidades de Riego*. Ed. IRYDA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Ferrer, P. *Riego Localizado*. Ed. SEA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- García, C. I. y G. Briones S. *Sistemas de Riego por Aspersión y Goteo*. Ed. Trillas. México.
- García, L. F. *Método de Riego*. Ed. ETS de Ingenieros Agrónomos. Madrid.
- Gavande, S. A. *Física de Suelos*. Ed. Limusa. México.
- Ghiggia, R. *Riego por Surcos*. Ed. Facultad de Agronomía. Montevideo.
- Grassi, C. *Métodos de Riego*. Ed. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Gurovich, R. L. A. *Fundamentos y Diseño de Sistemas de Riego*. Ed. IICA. Lima.
- Gurovich, R. L. A. *Riego Superficial Tecnificado*. Ed. Alfaomega. México.
- Guzmán, R., F. González y E. Arencibia. *Riego y Saneamiento Agrícola*. Ed. Pueblo y Educación. La Habana.
- Hidalgo, G. A. *Métodos de Riego de Superficie*. Ed. Aguilar. Madrid.
- Israelsen, O. y V. Hansen. *Principios y Aplicaciones del Riego*. Ed. Reverté. Barcelona.
- Jensen, M. E. (ed.). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. ASAE Monograph No. 3. Publicado por American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan.
- Jensen, M. E., R. D. Burman y R. G. Allen (eds.). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. Publicado por American Society of Civil Engineers. Nueva York.
- Keller, J. y R. Bliesner. *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Publicado por AVI-Van Nostran Reinhold. New York.
- Kramer, P. J. *Relaciones Hídricas de Suelos y Plantas. Una síntesis moderna*. Ed. Edumex. México.
- Martín de Santa, O. F. *Agronomía del Riego*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Martínez, H. E. *Sistemas de Riego por Aspersión*. Ed. IRYDA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Medina, J. A. *Riego por Goteo*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Mc Naughton, K. *Bombas. Selección, Uso y Mantenimiento*. Ed. Mc Graw Hill. México.
- Pérez, G. F. y J. B. Martínez. *Introducción a la Fisiología Vegetal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Pizarro, C. F. *Riegos Localizados de Alta Frecuencia*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Playan, E. *Riego por Superficie. Conceptos Básicos*. Ed. IRYDA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Poireé, M. y Ch. Ollier. *El Regadío: Redes, Teoría Técnica y Economía de los Riegos*. Ed. Editores Técnicos Asociados. Barcelona.
- Rázuri, L. *Diseño de Riego por Goteo*. Ed. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Rebosio, A. *Elevación de Agua por Medios Mecánicos*. Ed. Facultad de Agronomía. Montevideo.

- Rebosio, A., R. Hofstadter y P. Durán. *Manual de Prácticas de Riego*. Ed. Facultad de Agronomía. Montevideo.
- Rodrigo, J., J. M. Hernández, A. Pérez y J. F. González. *El Riego Localizado*. Ed. IRYDA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- SEP. *Riego y Drenaje*. Manuales para Educación Agropecuaria. Área: Suelos y Agua 35. DGETA-SEP. Ed. Trillas. México.
- Servicio de Conservación de Suelos. Manuales de Ingeniería de Suelos.
- No. 1. *Relación entre Suelo-Planta-Agua*.
 - No. 2. *Planeamiento de Sistemas de Riego para Granjas*.
 - No. 3. *Riego por Diques de Contorno*.
 - No. 4. *Plantas de Bombeo para Riego*.
 - No. 5. *Medición del Agua de Riego*.
 - No. 6. *Riego por Aspersión*.
- Depto. de Agricultura de los E.U.A. Sección 15 Riego. Ed. Diana. México.
- Sotelo, A. G. *Hidráulica General*. Vol. 1 Fundamentos. Ed. Limusa. México.
- Tanji, K. K. (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Publicado por la American Society of Civil Engineers. Nueva York.
- Tarjuelo, J. Ma. *Fundamentos de hidráulica*. Ed. Iryda. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Tarjuelo, J. Ma. *El Riego por Aspersión y su Tecnología*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Torres, R. E. *Agrometeorología*. Ed. Diana. México.
- Trueba, C. S. *Hidráulica*. Ed. Cecsá. México.
- Withers, B. y Vipond, S. *El Riego. Diseño y Práctica*. Ed. Diana. México.
- Warring, R. H. *Selección de Bombas, Sistemas y Aplicaciones*. Ed. Labor. Barcelona.
- Zimmerman, J. D. *El Riego*. Ed. Cecsá. México.
- *La Aspiración en las Bombas Centrífugas*. Ed. Worthington. Madrid.
- *Manual General de Uralita*. Ed. Paraninfo. Madrid.

Publicaciones periódicas:

- Giménez, M., A. Flores, C. Cadahía, L. Rincón y R. Valverde. *Fertilización*. Ed. FESA. Madrid.
- Abbott, S. S. et al. *Riegos y Drenajes XXI*. Ed. Prensa XXI. Barcelona.
- Manejo del Riego. Fichas Agronómicas*. Programa de asesoramiento de riegos. Ed. Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Comunidad Autónoma de Murcia. España.
- Surcos*. Ed. Diputación General de Aragón, Zaragoza. España.

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- UNE = Una Norma Española.
MOP = Normas del Ministerio de Obras Públicas de España.
NOM = Norma Oficial Mexicana.
ANSI = American National Standards Institute.
ASTM = American Society for Testing Materials.
ISO = International Organization for Standardization.
Q = Caudal o descarga de agua.
MPa = Megapascales.
mca = metros de columna de agua.
CV = Caballos de Vapor.
HP = Caballos de Fuerza.
kw = kilowatts.
rpm = revoluciones por minuto.
tm/m³ = toneladas métricas por metro cúbico.
ppm = partes por millón.
dS/m = decisiemens por metro.
meq/l = miliequivalentes por litro.
RAS = Relación de Adsorción de Sodio.
CE = Conductividad Eléctrica.
pts = Pesetas.
\$ = Precio en moneda nacional.
h = horas.
ha = hectárea.

ANEXO 2

MÉTODO DE HARGREAVES PARA EL CÁLCULO DE ET (CULTIVO)

La fórmula siguiente fue desarrollada por Hargreaves, a base de mediciones realizadas con lisímetro en la Universidad de California:

$$ET_o = 0.0023 Ra (T_m + 17.8) \sqrt{T_{máx} - T_{mín}}$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia, en mm/día.

Ra = Radiación extraterrestre, expresada en equivalente de evaporación de agua, en mm/día.

$T_{máx}$ = Temperatura máxima media del período considerado, en °C.

$T_{mín}$ = Temperatura mínima del período considerado, en °C.

T_m = Temperatura media del período considerado, en °C.

$$T_m = \frac{T_{máx} + T_{mín}}{2}$$

$$ET \text{ (cultivo)} = ET_o \times K_c(H)$$

Los coeficientes de cultivo $K_c(H)$ que se deben emplear son los de la tabla 1.

Ejemplo

Calcular ET (cultivo) de un cultivo de maíz grano, durante el mes de agosto, por el método de Hargreaves, con los datos siguientes:

Situación: 40° latitud N

Temperatura máxima media de agosto: 35.6 °C

Temperatura mínima media de agosto: 22.3 °C

Fecha de siembra: 15 de junio

Solución:

$$ET_o = 0.0023 Ra (T_m + 17.8) \sqrt{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}}$$

$$Ra = 15.2 \text{ mm/día (según tabla 3 del capítulo 2)}$$

$$T_m = \frac{35.6 + 22.3}{2} = 28.9 \text{ °C}$$

Sustituyendo valores en la fórmula

$$ET_o = 0.0023 \times 15.2 \times (28.9 + 17.8) \sqrt{35.6 - 22.3} = 5.94 \text{ mm/día}$$

$$ET \text{ (cultivo)} = ET_o \times K_c(H) = 5.94 \times 1.20 = 7.13 \text{ mm/día}$$

Tabla 1: *Coficiente Kc (Hargreaves)*

Cultivo	Fase inicial	Mediados de temporada	Fin de temporada
Aceituna	0.60	0.8	0.80
Alcachofa	0.90-1.00	0.95-1.05	0.90-1.00
Alfalfa	0.40-0.50	1.00-1.40	0.95-1.35
Algodón	0.20-0.50	1.05-1.30	0.30-0.60
Apio	0.25-0.35	1.00-1.15	0.90-1.05
Arroz	1.10-1.15	1.10-1.30	1.10
Avena	0.20-0.40	1.00-1.20	0.20-0.25
Berenjena	0.20-0.50	0.95-1.10	0.80-0.90
Cacahuete (maní)	0.30-0.50	0.95-1.00	0.50-0.60
Calabacita	0.20-0.40	0.90-1.00	0.70-0.80
Caña de azúcar	0.40-0.50	1.00-1.30	0.50-0.60
Cártamo	0.30-0.40	1.05-1.20	0.20-0.25
Cebada	0.25-0.30	1.00-1.10	0.10-0.20
Cebolla seca	0.40-0.60	0.95-1.10	0.75-0.85
Cebolla verde	0.40-0.60	0.95-1.05	0.95-1.05
Cereales pequeños	0.20-0.40	1.10-1.30	0.20-0.35
Chícharo	0.40-0.50	1.05-1.20	0.95-1.10
Cítricos	0.65	0.65-0.75	0.65
Espárrago	0.25-0.30	0.95	0.25
Espinaca	0.20-0.30	0.95-1.05	0.90-1.00
Frijol seco	0.30-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
Frijol verde	0.30-0.40	0.95-1.05	0.85-0.95
Frutales de hoja caduca	0.50	0.85-1.20	0.50-0.85
Frutales con cultivo	0.75-0.85	1.10-1.25	0.70-1.10
Girasol	0.30-0.40	1.05-1.20	0.35-0.45
Kiwi	0.30	1.05	1.05
Lechuga	0.20-0.30	0.85-1.05	0.45
Legumbres	0.20-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
Lenteja	0.20-0.30	1.05-1.20	0.25-0.30

Tabla 1: *Coficiente Kc (Hargreaves)*. (Continuación)

<i>Cultivo</i>	<i>Fase inicial</i>	<i>Mediados de temporada</i>	<i>Fin de temporada</i>
Linaza	0.20-0.40	1.00-1.15	0.20-0.25
Maíz de grano	0.20-0.50	1.05-1.20	0.35-0.60
Maíz dulce	0.20-0.50	1.05-1.20	0.95-1.10
Melón	0.15-0.40	1.00-1.10	0.30-0.90
Mijo	0.20-0.40	1.00-1.15	0.25-0.30
Papa	0.40-0.55	1.10-1.20	0.40-0.75
Plátano (banano)	0.40-0.65	1.00-1.20	0.75-1.15
Pepino	0.20-0.40	0.90-1.00	0.70-0.80
Pimiento	0.30-0.40	0.95-1.10	0.80-0.90
Pistacho	0.10	1.05	0.35
Rábano	0.20-0.30	0.80-0.90	0.75-0.85
Remolacha	0.25-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
Remolacha de azúcar	0.20-0.40	1.05-1.20	0.70-1.00
Repollo	0.30-0.50	0.95-1.10	0.80-0.95
Sandía	0.25-0.50	1.00-1.10	0.20-0.70
Sorgo	0.15-0.40	1.05-1.20	0.30-0.50
Soya	0.30-0.40	1.00-1.15	0.45-0.55
Tabaco	0.30-0.40	1.00-1.20	0.75-0.85
Tomate	0.25-0.50	1.05-1.25	0.60-0.85
Trigo	0.20-0.40	1.00-1.25	0.20-0.30
Uva	0.20-0.50	0.75-0.85	0.20-0.45
Zanahoria	0.40-0.50	1.05	0.75

ANEXO 3

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO

La evapotranspiración comprende el agua transpirada por el cultivo y la evaporada desde la superficie del suelo donde se asienta el cultivo. La transpiración depende del tipo de planta y de su estado fenológico, mientras que la evaporación depende del grado de humedad del suelo y de la superficie del mismo sombreada por la planta.

Cuando la superficie del suelo está húmeda y poco sombreada, la tasa de evaporación es alta, pero disminuye rápidamente cuando el suelo se seca; también disminuye a medida que el cultivo se desarrolla y sombrea mayor superficie del suelo, a la vez que va aumentando progresivamente la transpiración. Por consiguiente, en la etapa inicial, en donde el cultivo transpira poco, la evapotranspiración depende, en gran medida, del grado de humedad de la superficie del suelo, o lo que es igual, de la frecuencia de lluvia o de riego.

El efecto de las características propias del cultivo sobre las necesidades hídricas viene dado por el coeficiente de cultivo, que varía según el tipo de cultivo, su estado vegetativo y el clima.

A continuación se describe el método de FAO para determinar el coeficiente de cultivo durante las cuatro etapas que abarca su período vegetativo.

En la etapa inicial, el coeficiente de cultivo puede variar mucho conforme varía la humedad de la superficie del suelo, salvo en el caso de riego localizado, en que la superficie mojada es pequeña. Se determina gráficamente en función del nivel medio de ET_0 durante dicha etapa inicial y la frecuencia de riegos o lluvias apreciables en dicho período (fig. I₃-1).

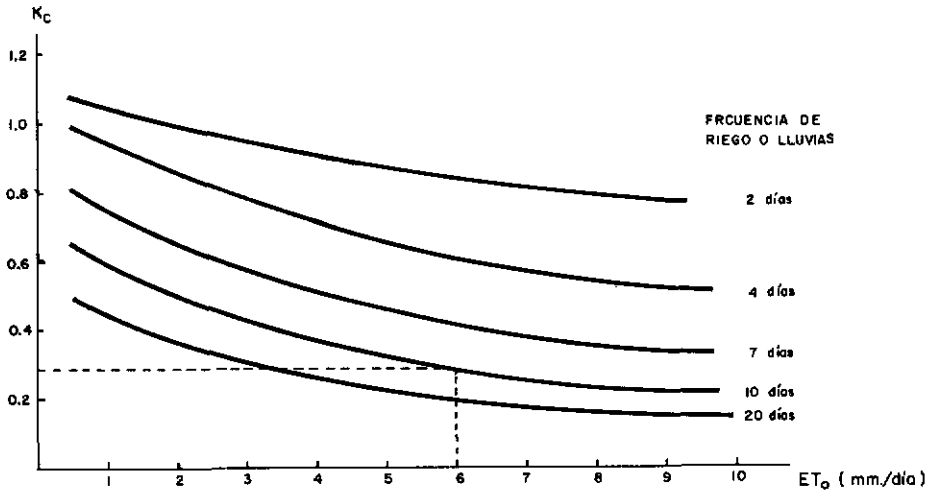


Fig. 1.3-1 Obtención del coeficiente de cultivo en la fase inicial en función de ET_0 y la frecuencia de riegos o lluvias (FAO). Suponiendo una frecuencia de riego de 10 días, para $ET_0 = 6$ le corresponde un $K_c = 0.3$.

El coeficiente de cultivo para las etapas tercera y cuarta se obtiene, para cada cultivo, según tablas publicadas, a condición de que sean empleadas en las mismas condiciones en que fueron elaboradas. Para el cálculo de ET (cultivo) por un determinado método, nunca se deben utilizar valores de K_c estimados por otro método diferente. Por ejemplo, para el cálculo de ET (cultivo) por los métodos de FAO se deben emplear los valores de K_c tabulados por FAO; si se emplea el método de Hargreaves se emplearán los valores de K_c tabulados por Hargreaves.

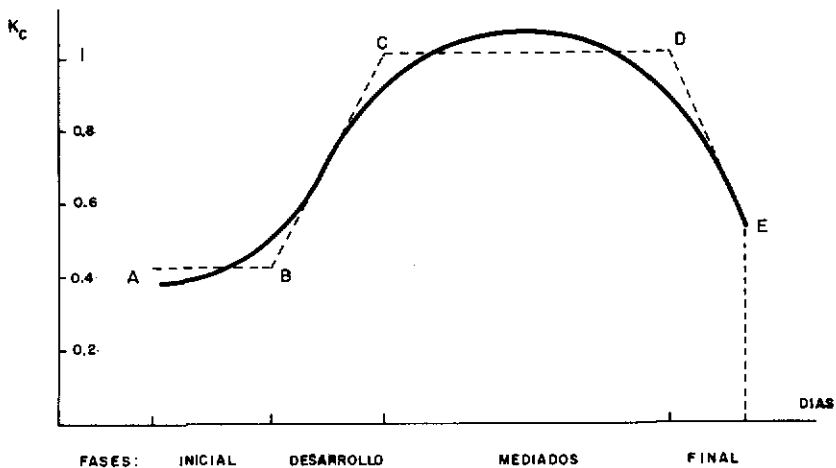


Fig. 1.3-2 Curva de coeficiente de cultivo. Los puntos A, C y E corresponden, respectivamente, a los valores del coeficiente de cultivo de la primera, tercera y cuarta etapas.

Una vez conocidos la fecha de siembra, la duración de las cuatro etapas y los coeficientes de cultivo correspondientes a las etapas 1.^a, 3.^a y 4.^a, se representa, en el eje de abscisas, el número de días de cada etapa, y en el eje de ordenadas, los valores de K_c . La línea quebrada ABCDE (fig. I₃-2) corresponde a los valores K_c en las distintas etapas:

- De A a B el coeficiente de cultivo K_{c1} , se mantiene constante.
- De C a D el coeficiente de cultivo correspondiente K_{c3} , se mantiene constante.
- De B a C el coeficiente K_{c2} crece progresivamente desde K_{c1} a K_{c3} . El valor de K_{c2} en cualquier día de la etapa se obtiene por interpolación.
- De D a E el coeficiente K_{c4} decrece progresivamente, obteniéndose los valores correspondientes por interpolación.

Finalmente con los valores correspondientes a los coeficientes de cultivo de cada etapa se obtiene la curva de evolución del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo.

Tabla 1: *Coefficiente K_c para cultivos de campo (anuales) (según la FAO)*

Cultivo	Tercera Fase				Cuarta Fase			
	HRmin > 70 %		HRmin < 20 %		HRmin > 70 %		HRmin < 20 %	
	vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)	
	0-5	5-8	0-5	5-8	0-5	5-8	0-5	5-8
Algodón	1.05	1.15	1.20	1.25	0.65	0.65	0.65	0.70
Avena	1.05	1.10	1.15	1.20	0.25	0.25	0.20	0.20
Cacahuete (maní)	0.95	1.00	1.05	1.10	0.55	0.55	0.60	0.60
Cártamo	1.05	1.10	1.15	1.20	0.25	0.25	0.20	0.20
Cebada	1.05	1.10	1.15	1.20	0.25	0.25	0.20	0.20
Frijol seco	1.05	1.10	1.15	1.20	0.30	0.30	0.25	0.25
Girasol	1.05	1.10	1.15	1.20	0.40	0.40	0.35	0.35
Granos	1.05	1.10	1.15	1.20	0.30	0.30	0.25	0.25
Leguminosas	1.05	1.10	1.15	1.20	0.30	0.30	0.25	0.25
Lentejas	1.05	1.10	1.15	1.20	0.30	0.30	0.25	0.25
Lino	1.00	1.05	1.10	1.15	0.25	0.25	0.20	0.20
Maíz dulce	1.05	1.10	1.15	1.20	0.95	1.00	1.05	1.10
Maíz grano	1.05	1.10	1.15	1.20	0.55	0.55	0.60	0.60
Melón	0.95	0.95	1.00	1.05	0.65	0.65	0.75	0.75
Mijo	1.00	1.05	1.10	1.15	0.30	0.30	0.25	0.25
Remolacha azucarera	1.05	1.10	1.15	1.20	0.90	0.95	1.00	1.00
Ricino	1.05	1.10	1.15	1.20	0.50	0.50	0.50	0.50
Soja, soya	1.00	1.05	1.10	1.15	0.45	0.45	0.45	0.45
Sorgo	1.00	1.05	1.10	1.15	0.50	0.50	0.55	0.55
Trigo	1.05	1.10	1.15	1.20	0.25	0.25	0.20	0.20

Tabla 2: Coeficiente K_c para cultivos de huerta (anuales) (según la FAO)

Cultivo	Tercera Fase				Cuarta Fase			
	$HR_{min} > 70 \%$		$HR_{min} < 20 \%$		$HR_{min} > 70 \%$		$HR_{min} < 20 \%$	
	vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)		vel. viento (m/s)	
	0-5	5-8	0-5	5-8	0-5	5-8	0-5	5-8
Alcachofa	0.95	0.95	1.00	1.05	0.90	0.90	0.95	1.00
Apio	1.00	1.05	1.10	1.15	0.90	0.95	1.00	1.05
Arveja	1.05	1.10	1.15	1.20	0.95	1.00	1.05	1.10
Berenjena	0.95	1.00	1.05	1.10	0.80	0.85	0.85	0.90
Calabaza	0.90	0.90	0.95	1.00	0.70	0.70	0.75	0.80
Cebolla seca	0.95	0.95	1.05	1.10	0.75	0.75	0.80	0.85
Cebolla verde	0.95	0.95	1.00	1.05	0.95	0.95	1.00	1.05
Col, coliflor	0.95	1.00	1.05	1.10	0.80	0.85	0.90	0.95
Chícharo	1.05	1.10	1.15	1.20	0.95	1.00	1.05	1.10
Espinaca	0.95	0.95	1.00	1.05	0.90	0.90	0.95	1.00
Frijol verde	0.95	0.95	1.00	1.05	0.85	0.85	0.90	0.90
Lechuga	0.95	0.95	1.00	1.05	0.90	0.90	0.90	1.00
Papa	1.05	1.10	1.15	1.20	0.70	0.70	0.75	0.75
Pepino verde	0.90	0.90	0.95	1.00	0.70	0.70	0.75	0.80
Pimiento fresco	0.95	1.00	1.05	1.10	0.80	0.85	0.85	0.90
Rábano	0.80	0.80	0.85	0.90	0.75	0.75	0.80	0.85
Remolacha de mesa	1.00	1.00	1.05	1.10	0.90	0.90	0.95	1.00
Tomate	1.05	1.10	1.20	1.25	0.60	0.60	0.65	0.65
Zanahoria	1.00	1.05	1.10	1.15	0.70	0.75	0.80	0.85

Tabla 3: Coeficiente K_c para cultivos forrajeros (según FAO)

Cultivo	$HR_{min} > 70 \%$	$HR_{min} < 20 \%$		$HR_{min} > 70 \%$	$HR_{min} < 20 \%$		$HR_{min} > 70 \%$	$HR_{min} < 20 \%$	
	velocidad del viento (m/s)			velocidad del viento (m/s)			velocidad del viento (m/s)		
	0-5	0-5	5-8	0-5	0-5	5-8	0-5	0-5	5-8
	Antes del corte			Máximo desarrollo			Después del Corte		
Alfalfa	0.85	0.95	1.05	1.05	1.15	1.25	0.50	0.40	0.30
Pastizal	0.95	1.00	1.05	1.05	1.10	1.10	0.55	0.50	0.50
Gramíneas para forraje	0.80	0.95	1.05	1.05	1.10	1.15	0.60	0.55	0.50
Trébol y leguminosas	1.00	1.05	1.10	1.05	1.15	1.20	0.55	0.55	0.55

Tabla 4: Coeficientes Kc para manzano, cerezo y nogal (según FAO)

Heladas	Cobertura vegetal	HR. (%)	velocidad viento (m/s)	Hemisferio Norte											
				En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
				Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
con	verde	alta	débil				0.50	0.75	1.00	1.10	1.10	1.10	1.10	0.85	
			fuerte				0.50	0.75	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90		
		baja	débil				0.45	0.85	1.15	1.25	1.25	1.20	0.95		
			fuerte				0.45	0.85	1.20	1.35	1.35	1.25	1.00		
con	secano	alta	débil				0.45	0.55	0.75	0.85	0.85	0.80	0.60		
			fuerte				0.45	0.55	0.80	0.90	0.90	0.85	0.65		
		baja	débil				0.40	0.60	0.85	1.00	1.00	0.95	0.70		
			fuerte				0.40	0.65	0.90	1.05	1.05	1.00	0.75		
sin	verde	alta	débil	0.80	0.90	1.00	1.10	1.10	1.10	1.10	1.05	0.85	0.80		
			fuerte	0.80	0.95	1.10	1.15	1.20	1.20	1.15	1.15	0.90	0.80		
		baja	débil	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85		
			fuerte	0.85	1.05	1.20	1.35	1.35	1.35	1.30	1.00	0.85			
sin	secano	alta	débil	0.60	0.70	0.80	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80	0.75	0.65		
			fuerte	0.60	0.75	0.85	0.90	0.90	0.85	0.90	0.80	0.80	0.70		
		baja	débil	0.50	0.75	0.95	1.00	1.00	0.95	0.90	0.90	0.85	0.70		
			fuerte	0.50	0.80	1.00	1.05	1.05	1.00	0.95	0.90	0.90	0.75		

Tabla 5: Coeficientes Kc para durazno, chabacano, peral, ciruelo y almendro (según FAO)

Heladas	Cobertura vegetal	HR. (%)	velocidad viento (m/s)	Hemisferio Norte											
				En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
				Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
con	verde	alta	débil				0.50	0.70	0.90	1.00	1.00	0.95	0.75		
			fuerte				0.50	0.70	1.00	1.05	1.10	1.00	0.80		
		baja	débil				0.45	0.80	1.05	1.15	1.15	1.10	0.85		
			fuerte				0.45	0.80	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90		
con	secano	alta	débil				0.45	0.50	0.65	0.75	0.75	0.70	0.55		
			fuerte				0.45	0.55	0.70	0.80	0.80	0.75	0.60		
		baja	débil				0.40	0.55	0.75	0.90	0.90	0.70	0.65		
			fuerte				0.40	0.60	0.80	0.95	0.95	0.90	0.65		
sin	verde	alta	débil	0.80	0.85	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.80	0.80		
			fuerte	0.80	0.90	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	0.80		
		baja	débil	0.85	0.95	1.05	1.15	1.15	1.15	1.15	1.10	0.90	0.85		
			fuerte	0.85	1.00	1.10	1.20	1.20	1.20	1.20	1.15	0.95	0.85		
sin	secano	alta	débil	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.70	0.70	0.70	0.65	0.55		
			fuerte	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.75	0.75	0.70	0.70	0.60		
		baja	débil	0.50	0.70	0.85	0.90	0.90	0.80	0.80	0.80	0.75	0.65		
			fuerte	0.50	0.75	0.90	0.95	0.95	0.85	0.80	0.80	0.80	0.70		

Tabla 6: Coeficientes Kc para cítricos (según FAO)

% del área sombreada	Cobertura vegetal	HR. (%)	velocidad viento (m/s)	Hemisferio Norte											
				En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
				Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
> 70 %	seca	baja	débil	0.50	0.50	0.55	0.55	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.55	0.55
> 70 %	verde			0.75	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80
± 50 %	seca	baja	débil	0.45	0.45	0.50	0.50	0.50	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.50	0.50
± 50 %	verde			0.75	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80
< 20 %	seca	baja	débil	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40
< 20 %	verde			0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90

Tabla 7: Coeficientes Kc para uva (según FAO)

Heladas	Cobertura vegetal	HR. (%)	velocidad viento (m/s)	Hemisferio Norte												
				En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
				Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	
fuertes	seca	alta	débil					0.50	0.60	0.70	0.70	0.60	0.50			
			fuerte					0.50	0.60	0.75	0.75	0.65	0.55			
	sin	baja	débil					0.45	0.65	0.80	0.85	0.75	0.60			
			fuerte					0.50	0.70	0.85	0.90	0.85	0.65			
moderadas	seca	alta	débil					0.50	0.55	0.60	0.60	0.60	0.55	0.40	0.35	
			fuerte					0.50	0.55	0.65	0.65	0.65	0.60	0.45	0.35	
	sin	baja	débil					0.45	0.60	0.70	0.70	0.70	0.65	0.50	0.30	
			fuerte					0.45	0.65	0.75	0.75	0.75	0.70	0.55	0.30	
sin	seca	baja	débil					0.25	0.45	0.60	0.70	0.70	0.65	0.55	0.45	0.35
			fuerte					0.25	0.45	0.65	0.75	0.75	0.70	0.55	0.45	0.35

Tabla 8: Coeficientes Kc para plátano (banano) (según FAO)

Año	Cobertura vegetal	HR. (%)	velocidad viento (m/s)	Hemisferio Norte													
				En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		
				Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.		
1.º	verde	alta	débil					0.65	0.60	0.55	0.60	0.70	0.85	0.95	1.00	1.00	1.00
			fuerte					0.65	0.60	0.55	0.60	0.75	0.90	1.00	1.05	1.05	1.05
			débil					0.50	0.45	0.50	0.60	0.75	0.95	1.10	1.15	1.10	1.10
			fuerte					0.50	0.45	0.50	0.65	0.80	1.00	1.15	1.20	1.15	1.15
2.º	verde	alta	débil	1.00	0.80	0.75	0.70	0.70	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	1.00	1.00		
			fuerte	1.05	0.80	0.75	0.70	0.70	0.80	0.95	1.10	1.10	1.10	1.05	1.05		
			débil	1.10	0.70	0.75	0.70	0.75	0.85	1.05	1.20	1.20	1.20	1.15	1.15		
			fuerte	1.15	0.70	0.75	0.70	0.75	0.90	1.10	1.25	1.25	1.25	1.20	1.20		

Tabla 9: Coeficiente Kc para el arroz (según FAO)

	Primer mes	Segundo mes	Mediados del período	Tercera y cuarta semanas últimas
<i>España</i>				
Siembra: mayo-junio				
Cosecha: sep.-octubre				
Vientos débiles a moderados	1.10	1.10	1.20	0.95
Vientos fuertes	1.15	1.15	1.30	1.00
<i>América del Sur húmeda</i>				
Siembra: nov.-dic.				
Cosecha: abril-mayo				
Vientos débiles a moderados	1.10	1.10	1.05	0.95
Vientos fuertes	1.15	1.15	1.10	1.00

Tabla 10: Coeficiente Kc para la caña de azúcar (según FAO)

Edad del cultivo		Fases de crecimiento	HR mín > 70 %		HR mín < 20 %	
12 meses	24 meses		Vientos de ligeros a moderados	Vientos fuertes	Vientos de ligeros a moderados	Vientos fuertes
0-1	0-2.5	De la plantación a un 0.25 de la cubierta completa	0.55	0.6	0.4	0.45
1-2	2.5-3.5	De 0.25 a 0.5 de la cubierta completa	0.8	0.85	0.75	0.8
2-2.5	3.5-4.5	De 0.5 a 0.75 de la cubierta completa	0.9	0.95	0.95	1.0
2.5-4	4.5-6	De 0.75 a la cubierta completa	1.0	1.1	1.1	1.2
4-10	6-17	Utilización máxima	1.05	1.15	1.25	1.3
10-11	17-22	Senescencia precoz	0.8	0.85	0.95	1.05
11-12	22-24	Maduración	0.6	0.65	0.7	0.75

ANEXO 4

HIDRÁULICA APLICADA AL RIEGO

Régimen laminar y régimen turbulento

Una *conducción abierta o con superficie libre* es aquella cuyo cauce tiene una parte de su sección transversal en contacto con la atmósfera, como es el caso de los canales y las tuberías parcialmente llenas. Una *conducción a presión o forzada* es aquella cuyo cauce tiene la sección transversal totalmente rodeada por la conducción, ejerciendo sobre ésta una cierta presión.

El movimiento de los líquidos dentro de una conducción forzada puede ser de dos formas:

- *Régimen laminar*. Las partículas de líquido se mueven en capas o láminas que se deslizan unas sobre otras en la dirección del eje del tubo sin acercarse ni alejarse de dicho eje, formando unas superficies o filetes líquidos concéntricos con velocidades crecientes conforme se alejan de las paredes del tubo. Estas diferencias de velocidad son debidas al efecto del rozamiento del líquido sobre las paredes del tubo (fig. 1₄-1). Existe una velocidad media de las partículas que es la que se considera en los cálculos.

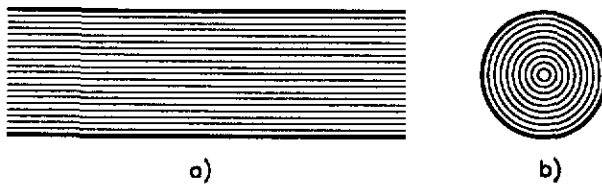


Fig. 1₄-1 En el flujo de líquidos por tubería en régimen laminar se forman unos filetes líquidos cuya velocidad disminuye progresivamente a medida que se alejan de las paredes del tubo. a) Sección longitudinal. b) Sección transversal.

— *Régimen turbulento.* Las partículas del líquido se mueven con trayectoria irregular, no paralela al eje de la tubería. Aunque una partícula presenta velocidad variable a lo largo del tiempo y del tramo de la conducción, el flujo presenta una velocidad máxima, en el eje de la tubería, y una velocidad media, que es la que se considera en los cálculos.

No es posible hacer un estudio matemático de este régimen, mucho más frecuente que el anterior, por lo que se precisa recurrir a la experimentación.

Consideremos una tubería por donde circula agua cuya velocidad se puede variar. Cuando la velocidad es muy pequeña, el régimen es laminar; pero a medida que aumenta progresivamente la velocidad llega un momento en que el régimen se hace turbulento. La velocidad a la cual el régimen pasa de laminar a turbulento se llama *velocidad crítica alta*.

Supongamos ahora que el régimen es turbulento y que disminuye progresivamente la velocidad hasta que llega un momento en que el régimen se hace laminar. La velocidad a la cual el régimen pasa de turbulento a laminar se llama *velocidad crítica baja*.

Los valores de las velocidades crítica alta y crítica baja son distintos. Es mayor el primero que el segundo.

Para determinar las velocidades críticas, Reynolds ideó un aparato, cuyo esquema se representa en la fig. 1₄-2. El depósito A contiene agua coloreada, que se inyecta en un tubo de vidrio V contenido en un depósito B de agua clara. La llave M permite controlar la adición de líquido coloreado, y la llave N permite modificar el caudal y, por lo tanto, la velocidad del líquido que circula por el tubo V. Abriendo convenientemente las llaves se observa que el agua coloreada forma una línea recta dentro del tubo cuando el régimen es laminar, y una línea sinuosa cuando el régimen es turbulento.

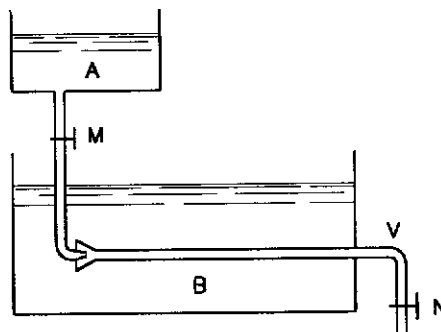


Fig. 1₄-2 Esquema del aparato de Reynolds para medir las velocidades críticas.

Para determinar la velocidad crítica alta se abre progresivamente la llave N hasta que se observa que el régimen pasa de laminar a turbulento. Para determinar la velocidad crítica baja se cierra progresivamente dicha llave hasta que se observa que el régimen pasa de turbulento a laminar.

Número de Reynolds

En el régimen laminar predominan las fuerzas de viscosidad sobre las de inercia. En el régimen turbulento predominan las fuerzas de inercia sobre las de viscosidad. El número de Reynolds es un parámetro adimensional que expresa la relación existente entre las fuerzas de inercia y las de viscosidad o rozamiento en el interior de una conducción forzada. En caso de tuberías a presión se expresa así:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de rozamiento}} = \frac{D \times V}{\gamma}$$

D = Diámetro interior de la conducción, en m.

V = Velocidad del líquido, en m/seg.

γ = Viscosidad cinemática, en m^2/seg , que sólo depende de la temperatura.

Un Re elevado indica que predominan las fuerzas de inercia, dando lugar a régimen turbulento. Un Re bajo indica que predominan las fuerzas de rozamiento, dando lugar a régimen laminar. Existe un Re crítico que corresponde al paso de régimen laminar a turbulento.

En las tuberías comerciales resulta:

Si $Re < 2,000$, el régimen es laminar.

Si $Re > 4,000$, el régimen es turbulento.

Si $2,000 < Re < 4,000$, hay incertidumbre en el régimen.

Tabla 1: Variación de la viscosidad cinemática (γ) en función de la temperatura

Temperatura °C	γ (m^2/seg)	Temperatura °C	γ (m^2/seg)
5	1.52×10^{-6}	30	0.83×10^{-6}
10	1.31×10^{-6}	40	0.66×10^{-6}
15	1.14×10^{-6}	50	0.55×10^{-6}
20	1.01×10^{-6}	60	0.46×10^{-6}
25	0.90×10^{-6}	80	0.37×10^{-6}

Comportamiento hidrodinámico de las tuberías

La superficie interior de las tuberías presenta cierta rugosidad. La *rugosidad absoluta* (K) se refiere a la longitud de las protuberancias que forman la rugosidad, y se mide experimentalmente. El grado de rugosidad de una tubería se determina con la *rugosidad relativa*, que es el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro interior de la tubería (K/D).

El régimen laminar se consigue únicamente cuando la tubería no presenta prácticamente rugosidad y la velocidad es muy pequeña, cosa que normalmente no sucede.

Dentro del régimen turbulento, el comportamiento hidrodinámico de las tuberías con relación a la rugosidad puede ser de tres formas:

- *Flujo turbulento liso*. Los salientes de la pared interior del tubo se encuentran recubiertas de una subcapa viscosa de agua, predominando los efectos de la viscosidad. Este tipo de flujo se produce en las tuberías de polietileno y PVC con diámetros inferiores a 125 mm y velocidades moderadas (inferiores a 2 – 2.5 m/seg).
- *Flujo turbulento rugoso*. Los salientes de la pared interior del tubo atraviesan la subcapa viscosa de agua y penetran en la zona turbulenta de la corriente, acentuando la turbulencia, que anula los efectos de la viscosidad.
- *Flujo turbulento intermedio*. El espesor de la subcapa viscosa cubre parcialmente los salientes de la rugosidad del tubo.

Pérdidas de carga por fricción en tuberías a presión

Las pérdidas por fricción (hf) se pueden calcular mediante la fórmula fundamental de Darcy-Weisbach:

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

De la fórmula anterior se deduce:

$$hf = 0.0826 f \cdot D^{-5} \cdot Q^2 \cdot L$$

hf = Pérdidas de carga por fricción, en m.

f = Factor de fricción, adimensional.

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

D = Diámetro interior de la tubería, en m.

L = Longitud de la tubería, en m.

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg²).

Q = Caudal, en m³/seg.

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

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

Las pérdidas de carga por fricción se pueden calcular, con sencillez y suficiente aproximación, mediante fórmulas empíricas, a condición de que se utilicen dentro de

las condiciones en que fueron deducidas. Estas fórmulas empíricas tienen la expresión general:

$$J = C \cdot D^{-\alpha} \cdot Q^{\beta}$$

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

D = Diámetro interior, en m.

Q = Caudal, en m³/seg.

C , α y β son constantes características de cada fórmula (el valor de β está comprendido entre 1.75 y 2).

Las fórmulas más utilizadas son las siguientes:

1) *Para régimen turbulento liso* ($\beta = 1.75$)

— BLASIUS. Indicada para tubería de plástico en riego localizado, para $3,000 < Re < 10^5$.

$$J = 0.00083 D^{-4.75} \cdot Q^{1.75}$$

— CRUCIANI-MARGARITORA. Para polietileno.

$$J = 0.00099 D^{-4.75} \cdot Q^{1.75}$$

2) *Para régimen turbulento intermedio* ($1.75 < \beta < 2$)

— SCIMENI. Indicada para tubería de fibrocemento

$$J = 0.000984 D^{-4.786} \cdot Q^{1.785}$$

— VERONESE-DATEI. Para PVC y $40,000 < Re < 10^6$

$$J = 0.00092 D^{-4.8} \cdot Q^{1.8}$$

— HAZEN-WILLIAMS. Para diámetros ≥ 50 mm.

$$J = 10.373 D^{-4.87} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852}$$

$C = 150$ plástico

$C = 140$ fibrocemento

$C = 130$ hierro

$C = 128$ hormigón

$C = 120$ acero nuevo

$C = 110$ acero usado

— SCOBAY. Para tubería de aspersión con acoples

$$J = 0.004098 K \cdot D^{-4.9} \cdot Q^{1.9}$$

$K = 0.40$ aluminio con acoples.

$K = 0.32$ PVC, PE, fibrocemento.

Esta fórmula proporciona directamente el valor $h = 1.20 hf$, ya que incrementa un 20% de hf correspondiente a las pérdidas singulares.

3) Para régimen turbulento rugoso $\beta = 2$

— MANING.

$$J = 10.3 n^2 \cdot D^{-5.33} \cdot Q^2$$

$n = 0.006 - 0.007$	polietileno
$n = 0.007 - 0.009$	PVC
$n = 0.010 - 0.012$	fibrocemento
$n = 0.013 - 0.015$	hormigón
$n = 0.015$	acero comercial

Pérdidas de carga en elementos singulares

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

$$hs = Ks \frac{V^2}{2g}$$

hs = Pérdida de carga por singularidad, en m.

Ks = Coeficiente de resistencia del elemento singular.

V = Velocidad media, en m/seg.

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg²)

Un método práctico de calcular las pérdidas de carga localizadas consiste en expresarlas en la forma de *longitud equivalente*.

Las pérdidas de carga localizadas se calculan aplicando la fórmula de Darcy-Weisbach para una longitud equivalente (Le).

$$hs = f \frac{Le}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Igualando las dos fórmulas:

$$hs = Ks \frac{V^2}{2g} = f \frac{Le}{D} \frac{V^2}{2g}$$

De donde se deduce:

$$Le = \frac{Ks \cdot D}{f}$$

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

$$Le = n \cdot D$$

lo que supone determinar n para cada elemento singular

$$n = \frac{Le}{D} = \frac{Ks}{f}$$

Los valores de Ks y Le se obtienen experimentalmente y se dan tabulados o en nomogramas. En la práctica y para cálculos rápidos se pueden utilizar los valores de la tabla 6 del capítulo 6.

Las pérdidas de carga en elementos singulares se pueden estimar como un % de las pérdidas por fricción.

$$hs = \% \text{ de } hf$$

$$h = hf + hs = a \cdot hf$$

siendo h las pérdidas de carga totales y a un coeficiente que depende de ese %.

En laterales de riego por aspersión y localizado a varía de 1.05 a 1.20.

Si se utiliza la fórmula de Scobey para tubería de aluminio, hay que tener en cuenta que esta fórmula ya incluye las pérdidas singulares, proporcionando directamente el valor de h . Si se utilizan otras fórmulas hay que considerar el valor de a .

Tuberías con salidas uniformemente espaciadas (con distribución uniforme y discreta de caudal)

Supongamos una tubería horizontal, de diámetro constante y longitud L , con n salidas ($S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$) distribuidas a lo largo de ella, espaciadas entre sí la misma distancia l , y por las que descarga un caudal q (fig. I₄-3).

$$L = n \cdot l$$

$$Q = n \cdot q$$

Siendo Q el caudal que circula al comienzo de la tubería.

Se desprecian las alturas cinéticas, por lo que coinciden la línea piezométrica y la línea de energía.

En cada uno de los tramos va disminuyendo progresivamente el caudal:

En el tramo	1	pasa un caudal	$Q = n \cdot q$
En el tramo	2	pasa un caudal	$(n-1) q$
En el tramo	3	pasa un caudal	$(n-2) q$
En el tramo	$n-1$	pasa un caudal	$2 q$
En el tramo	n	pasa un caudal	q

Por tanto, van disminuyendo también progresivamente las pérdidas por fricción en cada tramo ($h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$), con lo cual la representación de la línea de energía es una línea quebrada $A_0 A_1 A_2 A_3 \dots A_n$.

La pérdida de carga total por fricción (hf) es igual a la suma de las pérdidas en cada tramo.

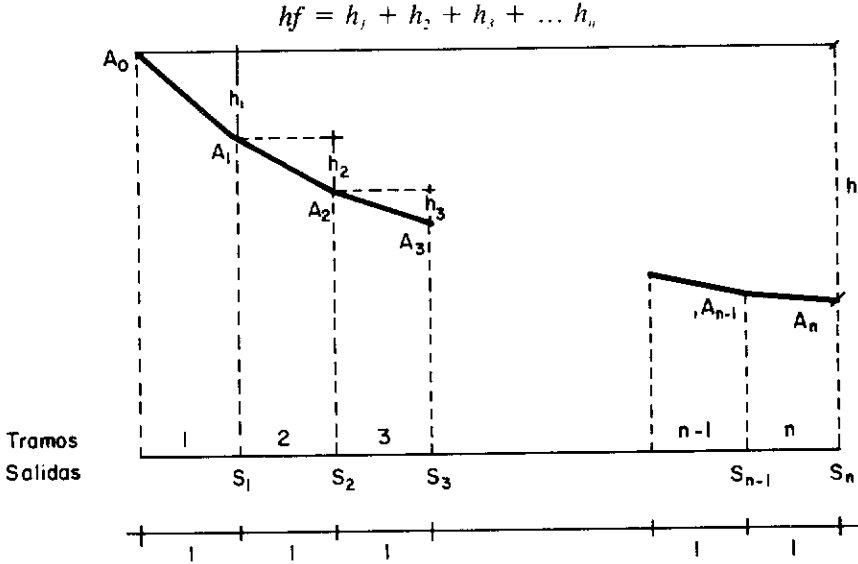


Fig. 1-3 Línea de pérdidas de carga en una tubería con salidas uniformemente espaciadas.

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

El factor F de Christiansen es un coeficiente reductor que depende de n, β, lo .

n = Número de salidas.

β = Constante característica de cada fórmula.

lo = Distancia del origen emisor.

En la tabla 2 del capítulo 9 se dan los valores del factor de Christiansen F para $lo = l$ (la distancia del origen a la primera salida es igual a la distancia entre salidas consecutivas) y para $lo = l/2$ (la distancia del origen a la primera salida es igual a la mitad de la distancia entre salidas consecutivas).

Cálculo de conducciones en sistemas de riego a presión

El esquema general de la distribución de las conducciones viene indicado en la figura 1-4.

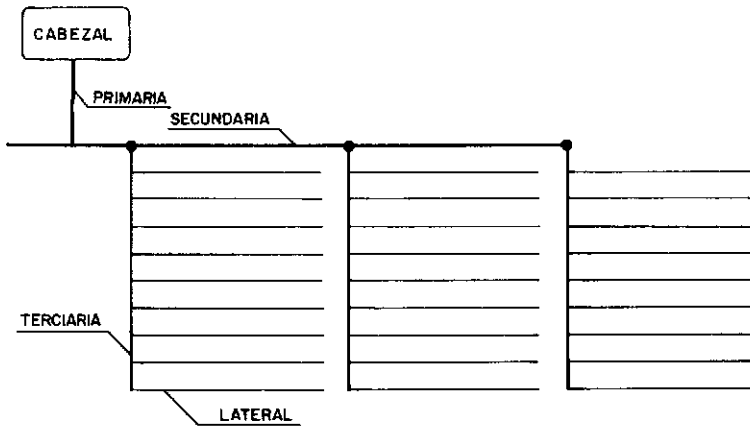


Fig. 1_r-4 Esquema de distribución de conducciones.

Cálculo de tuberías laterales

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

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

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

$$Q = n \cdot q$$

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

n = Número de emisores del lateral.

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

- Longitud ficticia del lateral

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

L_f = Longitud ficticia, en m.

L = Longitud real, en m.

n = Número de emisores del lateral.

l_e = Longitud equivalente del emisor, en m.

Se suele utilizar la fórmula de Blasius (para régimen turbulento liso) y la Hazen-Williams (para régimen turbulento intermedio). En riego por aspersión también se suele utilizar la fórmula de Scobey en tubos metálicos con acoples.

Variaciones de caudal y de presión

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

$$dH = \frac{0.1}{x} H$$

dH = Pérdida de carga admisible en la subunidad.

H = Presión de trabajo del emisor, en mca.

x = Exponente de descarga del emisor.

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

Las pérdidas de carga admisibles en un lateral serían:

$$ha = \frac{0.1}{x} H \cdot 0.55$$

ha = Pérdidas de carga admisibles en el lateral, en mca.

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

$$h = J \cdot F \cdot Lf$$

h = Pérdidas de carga en el lateral, en mca.

J = Pérdida de carga unitaria, en mca/m lineal.

F = Factor de Christiansen.

Lf = Longitud ficticia, en m.

Igualando las dos ecuaciones

$$ha = h$$

$$\frac{0.1}{x} H \cdot 0.55 = J \cdot F \cdot Lf$$

$$J = \frac{0.055 h}{x \cdot F \cdot Lf}$$

Sustituyendo en la fórmula de Blasius

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

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

- D = Diámetro del lateral, en m.
 Q = Caudal, en m³/seg.
 L_f = Longitud ficticia, en m.
 H = Presión de trabajo del emisor, en mca.

Cambiando de unidades

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

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

Se elige el mayor diámetro comercial más próximo al que sale en el cálculo, con lo cual la pérdida de carga real en el lateral es algo menor del 55 %. Esta pérdida de carga real se calcula según Blasius, mediante la fórmula:

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

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

Presión necesaria en el origen del lateral

El gradiente de presión entre dos emisores consecutivos es mayor en los primeros tramos del lateral que en los últimos. Se ha comprobado experimentalmente que en un lateral horizontal la presión media corresponde a una distancia del origen de 0.33 L en portaaspersores, y de 0.39 L en portagoteros. En este tramo inicial se produce el 75 % de la pérdida total ocurrida en el lateral si los emisores son aspersores, y el 73 % si los emisores son goteros (véase capítulos 9 y 10).

Ejemplo 1

Un lateral portagoteros tiene una longitud de 40 m, con los goteros en línea espaciados a 1 m. La distancia desde el primer gotero al origen es de 1 m, el caudal de los goteros es 4 litros/hora, el exponente de descarga vale 0.60 y la presión de trabajo es de 10 mca. El final del lateral está a una cota 1.20 m más alta que el principio, y la longitud equivalente del gotero es de 0.20 m. Calcular el diámetro, la pérdida de carga y la presión necesaria en el origen.

Solución

Caudal en el origen

$$Q = n \cdot q = 40 \times 4 = 160 \text{ litros/hora}$$

Longitud ficticia

$$L_f = L + n \cdot l_e = 40 + 40 \times 0.2 = 48 \text{ m}$$

Factor de Christiansen $F = 0.376$ (según tabla 2 del capítulo 9 para $l_0 = l$, $\beta = 1.75$ y $n = 40$).

Cálculo del diámetro, según Blasius

$$\begin{aligned} D &= \left(\frac{0.496 Q^{1.75} \cdot x \cdot F \cdot L_f}{0.055 H} \right)^{1/4.75} = \\ &= \left(\frac{0.496 \times 160^{1.75} \times 0.60 \times 0.376 \times 48}{0.055 \times 10} \right)^{1/4.75} = 10.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Se selecciona la tubería de polietileno de diámetro interior 13.2 mm y diámetro exterior 16 mm.

Pérdida de carga real

$$h = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot F \cdot L_f}{D^{4.75}} = \frac{0.496 \times 160^{1.75} \times 0.376 \times 48}{13.2^{4.75}} = 0.30 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el origen del lateral

$$P_o = P_m + 0.73 h + Hg/2 = 10 + 0.73 \times 0.30 + 1.20/2 = 10.9 \text{ mca}$$

Ejemplo 2

Un lateral portaaspersores tiene instalados 10 aspersores distanciados 12 m, estando el primer aspersor a una distancia de 6 m del origen. El caudal del aspersor es de 1.2 m³/hora, la presión de trabajo es 2.5 kg/cm² y la altura del tubo portaaspersor es de 0.80 m. El final del lateral está a una cota 1.10 m más baja que el principio del mismo. Calcular el diámetro, la pérdida de carga y la presión necesaria en el origen del lateral. (El coeficiente de descarga del aspersor de $x=0.5$).

Solución:

Caudal en el origen

$$Q = n \cdot q = 10 \times 1.2 = 12 \text{ m}^3/\text{hora} = 12,000 \text{ litros/hora}$$

Longitud real

$$L = 9 \times 12 + 6 = 114 \text{ m}$$

Longitud ficticia. Se supone que las pérdidas de carga singulares son el 20 % de las pérdidas por fricción.

$$L_f = 1.20 L = 1.2 \times 114 = 136.8 \text{ m}$$

Factor de Christiansen $F = 0.384$ (según tabla 2 del capítulo 9 para $l_0 = l/2$, $\beta = 1.75$ y $n=10$).

Cálculo del diámetro, según Blasius

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

$$= \left(\frac{0.496 \times 12,000^{1.75} \times 0.50 \times 0.384 \times 136.8}{0.055 \times 25} \right)^{1/4.75} = 51.10 \text{ mm}$$

Se selecciona la tubería de PVC de diámetro interior 59.4 mm y diámetro exterior 63 mm.

Pérdida de carga real

$$h = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf}{D^{4.75}} = \frac{0.496 \times 12,000^{1.75} \times 0.384 \times 136.8}{59.4^{4.75}} = 1.34 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el origen del lateral

$$P_o = P_m + 0.75 h - Hg/2 + H_a = 25 + 0.75 \times 1.34 - 1.10/2 + 0.80 = 26.25 \text{ mca}$$

Cálculo de tuberías terciarias o portallaterales

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

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

$$Lf = a L$$

a varía de 1.05 a 1.20

- Pérdida de carga admisible en la terciaria (véase capítulo 10):

$$h'a = \frac{0.1}{x} H - h$$

$h'a$ = Pérdidas de carga admisibles en la terciaria.

H = Presión de trabajo del emisor.

x = Exponente de descarga del emisor.

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

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

$$\begin{aligned} h' &= J \cdot F \cdot Lf \\ h'a &= h' = J \cdot F \cdot Lf \\ J &= \frac{h'a}{F \cdot Lf} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la fórmula de Blasius

$$\begin{aligned} J &= 0.00083 D^{-4.75} \cdot Q^{1.75} = \frac{h'a}{F \cdot Lf} \\ D &= \left(\frac{0.00083 Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf}{h'a} \right)^{1/4.75} \end{aligned}$$

D = Diámetro de la terciaria, en m.

Q = Caudal, en m³seg.

Lf = Longitud ficticia, en m.

$h'a$ = Pérdidas de carga admisibles, en mca.

Cambiando de unidades

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

D = Diámetro de la terciaria, en mm.

Q = Caudal, en litros/hora.

Lf = Longitud ficticia, en m.

$h'a$ = Pérdidas de carga admisibles, en mca.

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

Las pérdidas de carga producidas en la terciaria se calculan, según Blasius, mediante la fórmula:

$$h' = J \cdot F \cdot Lf = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf}{D^{4.75}}$$

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

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

Q = Caudal, en litros/hora.

Lf = Longitud ficticia, en m.

Esta fórmula se aplica cuando los laterales se distribuyen por toda la longitud L de la tubería terciaria. En el supuesto de que hubiera un tramo inicial (Lo) sin laterales (fig. I₄-5), la pérdida de carga sería:

$$h' = J (F \cdot Lf + Lo)$$

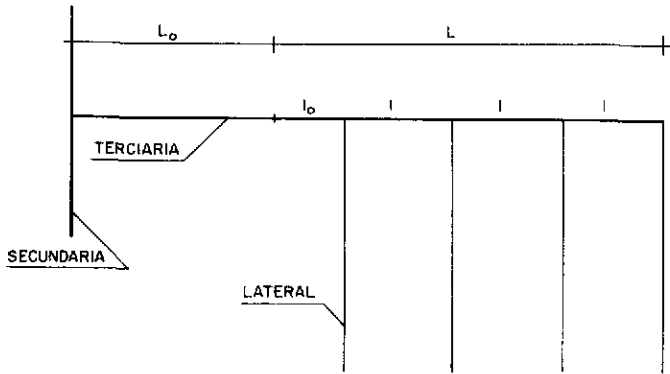


Fig. 1r-5

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

En riego por aspersión:

$$P'o = P_o + 0.75 \cdot h' \pm \frac{Hg}{2}$$

En riego localizado

$$P'o = P_o + 0.73 \cdot h' \pm \frac{Hg}{2}$$

$P'o$ = Presión en el origen de la terciaria.

P_o = Presión en el origen del lateral.

h' = Pérdida de carga en la terciaria.

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

Ejemplo 3

De una conducción terciaria o portalaterales derivan 30 laterales portagoteros de las características del ejemplo 1. La separación de laterales es de 4 m y la distancia del primer lateral a la terciaria es de 2 m. El origen de la terciaria está a una cota de 20 m, y el final a una cota de 22 m. Calcular el diámetro, la pérdida de carga y la presión necesaria en el origen.

Solución:

Caudal en el origen de la terciaria

$$Q = n \cdot q = 30 \times 160 = 4,800 \text{ litros/hora}$$

Longitud real

$$L = 29 \times 4 + 2 = 118 \text{ m}$$

Longitud ficticia

$$L' = 1.20 L = 1.20 \times 110 = 141.6 \text{ m}$$

Factor de Christiansen

$$F = 0.370 \text{ (según tabla 2 de capítulo 9 para } l_0 = l/2, \beta = 1.75 \text{ y } n = 30)$$

Pérdida de carga admisible en la terciaria

$$h'a = \frac{0.1}{x} H - h = \frac{0.1}{0.6} 10 - 0.30 = 1.30 \text{ mca}$$

Cálculo del diámetro, según Blasius

$$D = \left(\frac{4.96 Q^{1.75} \cdot F \cdot L}{h'a} \right)^{1/4.75} = \left(\frac{0.49 \times 4,800^{1.75} \times 0.370 \times 141.6}{1.30} \right)^{1/4.75} = 42.13 \text{ mm}$$

Se elige la tubería de PE de 44 mm de diámetro interior y 50 mm de diámetro exterior.

Pérdida de carga producida en la terciaria

$$h' = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot F \cdot Lf}{D^{4.75}} = \frac{0.496 \times 4,800^{1.75} \times 0.370 \times 141.6}{44^{4.75}} = 1.12 \text{ mca}$$

Presión en el origen de la terciaria

$$P'o = P_o + 0.73 h' + Hg/2 = 10.83 \times 0.73 \times 1.12 + 2/2 = 12.64 \text{ mca}$$

Cálculo de tuberías secundarias

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

D = Diámetro, en m.

Q = Caudal, en m^3/seg .

v = Velocidad, en m/seg .

$$Q = v \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi \cdot v}}$$

Cambiando de unidades

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

- D = Diámetro, en mm.
- Q = Caudal, en litros/hora.
- v = Velocidad, en m/seg.

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

La pérdida de carga se puede calcular con la fórmula de Blasius (en régimen turbulento liso) o de Hazen-Williams (en régimen turbulento intermedio).

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

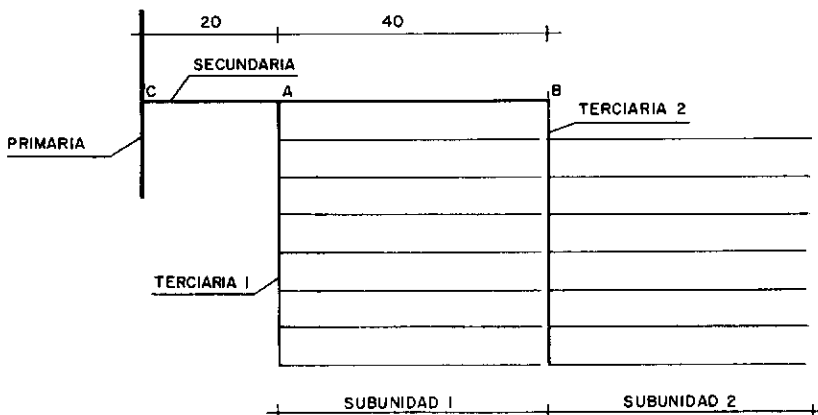
Ejemplo 4

De una tubería secundaria se derivan dos terciarias a unas distancias del origen de 20 y 60 m respectivamente. Los caudales y presiones en el origen de las terciarias son:

- $Q^B = 7,000$ litros/hora.
- $Q^A = 7,500$ litros/hora.
- $P_B = 13.30$ mca.
- $P_A = 14.20$ mca.

El terreno es horizontal. Cada una de las subunidades puede funcionar independientemente.

Calcular el diámetro de la secundaria y las presiones en el origen.



Solución:

1) Cuando funciona sólo la subunidad 2.

Se fija una velocidad de 2 m/seg.

$$D = 0.5947 \sqrt{\frac{Q}{V}} = 0.5947 \sqrt{\frac{7,000}{2}} = 35.18 \text{ mm}$$

Se elige la tubería de PE de diámetro interior 35.20 mm y diámetro exterior 40 mm.

Longitud ficticia del tramo CB.

$$L_f = 1.20 L = 1.20 \times 60 = 72 \text{ m}$$

Pérdida de carga, según Blasius

$$h = J \cdot L_f = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot L_f}{D^{4.75}} = \frac{0.496 \times 7,000^{1.75} \times 72}{35.2^{4.75}} = 8.62 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el origen (punto C)

$$P_o = 13.30 \times 8.62 = 21.92 \text{ mca}$$

2) Cuando funciona sólo la subunidad 1.

Se fija la velocidad de 2 m/seg.

$$D = 0.5947 \sqrt{\frac{Q}{V}} = 0.5947 \sqrt{\frac{7,500}{2}} = 36.41 \text{ mm}$$

Se selecciona la tubería de PE de diámetro interior 44 mm y diámetro exterior 50 mm.

Longitud ficticia del tramo CA.

$$L_f = 1.20 L = 1.20 \times 20 = 24 \text{ m}$$

Pérdida de carga, según Blasius

$$h = J \cdot L_f = \frac{0.496 Q^{1.75} \cdot L_f}{D^{4.75}} = \frac{0.496 \times 7,500^{1.75} \times 24}{44^{4.75}} = 1.12 \text{ mca}$$

Presión necesaria en el origen (punto C)

$$P_o = 14.20 + 1.12 = 15.32 \text{ mca}$$

Se toma como presión en el punto C la mayor de las dos, o sea, 21.92 mca.

Se pone un reductor de presión en el origen de la subunidad 1, ya que para su correcto funcionamiento sólo es necesaria una presión de 14.20 mca, y la presión que hay en ese punto (si no se pone dicho reductor) sería de $21.92 - 1.12 = 20.80$ mca.

Ecuación de continuidad

Se llama *caudal o gasto* a la cantidad de líquido que pasa por una sección transversal de una conducción durante la unidad de tiempo. Generalmente se mide en m³ por segundo o en litros por segundo. Se expresa mediante la fórmula:

$$Q = S \times V$$

Q = Caudal, en m³/seg.

S = Sección transversal de la vena líquida, en m².

V = Velocidad media, en m/seg.

Si la conducción es una tubería y el diámetro del tubo es D (en m), el caudal viene dado por la expresión:

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

Se dice que el régimen es permanente cuando el caudal permanece constante en todas las secciones de la conducción. Considerando dos secciones transversales distintas S_1 y S_2 , y sus velocidades medias respectivas V_1 y V_2 , se cumple que:

$$Q = S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2$$

A esta relación se le llama *ecuación de continuidad*. Evidentemente, las velocidades son inversamente proporcionales a las secciones respectivas.

Ecuación de Bernoulli

En el caso de líquidos perfectos (es decir, incomprensibles y sin viscosidad), la ecuación de Bernoulli dice que «en la circulación de un líquido en régimen permanente, la suma de las cargas de posición, de presión y de velocidad es constante en cualquier sección de la vena líquida». Se expresa así:

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{Constante}$$

Z = Cota.

P = Presión.

V = Velocidad.

γ = Peso específico (peso de la unidad de volumen).

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg²).

Los tres términos del primer miembro de la ecuación son, respectivamente, la carga de posición, de presión y de velocidad. Cada uno de ellos viene medido en unidades de longitud (m).

$$Z \doteq m$$

$$\frac{P}{\gamma} \doteq \frac{\frac{kg}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = m$$

$$\frac{V^2}{2g} \doteq \frac{\frac{m^2}{seg^2}}{\frac{m}{seg^2}} = m$$

Como estos términos son lineales se les suele denominar, respectivamente: altura de posición, altura de presión y altura de velocidad.

La ecuación de Bernoulli es un caso particular del principio de conservación de la energía. Aplicada a una partícula de un líquido perfecto en movimiento permanente entre dos posiciones 1 y 2, indica que esa partícula tiene una energía específica (energía de la unidad de peso) invariable a lo largo de su trayectoria.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Z_1 y Z_2 = Cotas de la partícula líquida en las posiciones 1 y 2, respectivamente.

P_1 y P_2 = Presiones de la partícula líquida en las posiciones 1 y 2, respectivamente.

V_1 y V_2 = Velocidades de la partícula líquida en las posiciones 1 y 2, respectivamente.

En la práctica el agua se comporta como un líquido incomprensible (salvo en el fenómeno del golpe de ariete); pero, a diferencia de los líquidos perfectos, tiene viscosidad. La ecuación de Bernoulli se puede generalizar para un líquido real, con movimiento permanente, entre dos secciones de la conducción, a condición que se tengan en cuenta las transformaciones de energía en forma de calor debidas al rozamiento entre las partículas. Estas transformaciones de energía se conocen con el nombre de *pérdidas de carga*.

La ecuación de Bernoulli generalizada queda así:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

siendo h_{1-2} las pérdidas de carga debidas al rozamiento o fricción.

La representación gráfica de la ecuación de Bernoulli viene dada en la figura I₄-6. A partir del eje de la tubería, situado a una altura Z del plano de referencia o de comparación, se lleva una altura igual a P/γ , y a continuación se lleva una altura igual a $V^2/2g$.

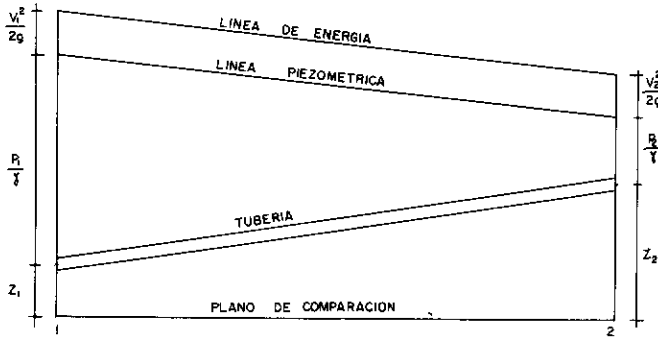


Fig. 1.-6 Representación gráfica de la ecuación de Bernoulli. Se ha considerado la tubería de diámetro constante, por lo que la velocidad es la misma a lo largo de la conducción, y la línea de energía es paralela a la línea piezométrica.

La línea correspondiente a la altura $Z + P/\gamma$ es la *línea piezométrica*, puesto que mide la altura marcada por los *piezómetros* (tubos abiertos en posición vertical) colocados a lo largo de la tubería.

La línea correspondiente a la altura $Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$ es la *línea de energía*.

Los valores de la velocidad recomendados en la práctica varían entre 1 y 1.5 m/seg, por lo que las alturas correspondientes a la velocidad son muy pequeñas y no se consideran, coincidiendo la línea piezométrica con la línea de energía.

Importa destacar que a lo largo de la conducción disminuye la altura total

$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$, pero no puede decirse lo mismo de cada uno de sus componentes.

Ejemplo n.º 1

Una tubería tiene un diámetro de 0.40 m en la sección que pasa por el punto A y de 0.30 m en la sección que pasa por el punto B. La diferencia de cotas entre los puntos A y B es de 6 m. La presión del agua en A es de 1 kg/cm², y en B, de 0.5 kg/cm². Calcular el caudal suponiendo despreciables las pérdidas de carga.

Solución:

$$D_A = 0.40 \text{ m} \quad S_A = \frac{\pi}{4} D_A^2 = 0.7854 \times 0.40^2 = 0.1257 \text{ m}^2$$

$$D_B = 0.30 \text{ m} \quad S_B = \frac{\pi}{4} D_B^2 = 0.7854 \times 0.30^2 = 0.0707 \text{ m}^2$$

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

$$Z_B = 0 \text{ m}$$

$$P_A = 1 \text{ kg/cm}^2 = 10,000 \text{ kg/m}^2$$

$$P_B = 0.5 \text{ kg/cm}^2 = 5,000 \text{ kg/m}^2$$

$$\gamma = 1,000 \text{ kg/m}^3$$

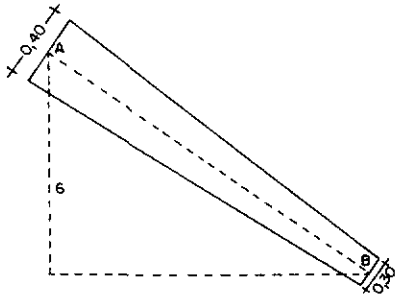
$$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$$

Partimos de la ecuación de continuidad:

$$Q = S_A \times V_A = S_B \times V_B$$

$$V_A = \frac{Q}{S_A} = \frac{Q}{0.1257}$$

$$V_B = \frac{Q}{S_B} = \frac{Q}{0.0707}$$



Sustituyendo estos valores en la ecuación de Bernoulli:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g}$$

$$6 + \frac{10,000}{1,000} + \frac{\left(\frac{Q}{0.1257}\right)^2}{2 \times 9.8} = 0 + \frac{5,000}{1,000} + \frac{\left(\frac{Q}{0.0707}\right)^2}{2 \times 9.8}$$

$$16 + \frac{Q^2}{0.3097} = 5 + \frac{Q^2}{0.098}$$

$$Q = 1.26 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Ejemplo n.º 2

En la tubería del ejemplo anterior se supone la misma posición de la tubería y la misma presión en los puntos A y B. Suponiendo que el caudal sea de 100 l/seg, determinar el sentido de la circulación y las pérdidas de cargas ocurridas entre ambos puntos.

Solución:

Considerando los mismos datos del ejemplo anterior, pero en $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El sentido de la circulación será desde el punto de mayor energía hacia el de menor energía.

Partimos de la ecuación de continuidad:

$$Q = S_A \times V_A = S_B \times V_B$$

$$V_A = \frac{Q}{S_A} = \frac{0.1}{0.1257} = 0.79 \text{ m/seg}$$

$$V_B = \frac{Q}{S_B} = \frac{0.1}{0.0707} = 1.41 \text{ m/seg}$$

Energía en el punto A:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = 6 + \frac{10,000}{1,000} + \frac{0.79^2}{2 \times 9.8} = 16.03 \text{ m}$$

Energía en el punto B:

$$Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} = 0 + \frac{5,000}{1,000} + \frac{1.41^2}{2 \times 9.8} = 5.10 \text{ m}$$

La circulación va desde A hacia B.

La pérdida entre A y B es:

$$16.03 - 5.10 = 10.93 \text{ m}$$

Ejemplo n.º 3

En la tubería del ejemplo anterior se supone la misma posición de la tubería y un caudal de 0.2 m³/seg. Calcular la diferencia de presiones entre los puntos A y B suponiendo despreciables las pérdidas de carga.

Partimos de la ecuación de continuidad:

$$Q = S_A \times V_A = S_B \times V_B$$

$$V_A = \frac{Q}{S_A} = \frac{0.2}{0.1257} = 1.59 \text{ m/seg}$$

$$V_B = \frac{Q}{S_B} = \frac{0.2}{0.0707} = 2.83 \text{ m/seg}$$

Sustituyendo valores en la ecuación de Bernoulli:

$$\begin{aligned} Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} &= Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} \\ 6 + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{1.59^2}{2 \times 9.8} &= 0 + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{2.83^2}{2 \times 9.8} \\ \frac{P_B - P_A}{\gamma} &= 5.721 \text{ m} \end{aligned}$$

Ejemplo n.º 4

Un depósito descarga por medio de un sifón en donde previamente se ha hecho el vacío o se ha llenado de agua. La diferencia de nivel entre la superficie libre del agua del depósito (A) y el eje del sifón en su punto más alto (B) es de 0.80 m, y el desnivel existente entre este último punto y la salida del sifón (C) es de 6 m. El diámetro interior

del tubo es 0.10 m, y las pérdidas de carga son: 0.30 m entre A y B y 0.50 m entre B y C. Calcular la velocidad del agua dentro del sifón, la presión absoluta en el punto B y el caudal. La presión atmosférica en el lugar es de 0.8 kg/cm².

Solución:

1) *Cálculo de la velocidad del agua dentro del sifón.* Aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y C, haciendo pasar el plano de comparación por el punto C.

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_C + \frac{P_C}{\gamma} + \frac{V_C^2}{2g} + h_{AC}$$

$$Z_A = 6 - 0.8 = 5.2 \text{ m}$$

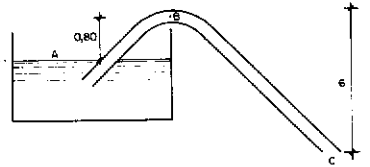
$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{P_C}{\gamma} \text{ (Los puntos A y C están a la presión atmosférica).}$$

$$V_A = 0 \text{ (El punto A está prácticamente inmóvil).}$$

$$Z_C = 0$$

$$h_{AC} = 0.30 + 0.50 = 0.80 \text{ m}$$

$$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$$



Sustituyendo valores en la fórmula:

$$5.2 = \frac{V_C^2}{2 \times 9.8} + 0.80$$

$$V_C = \sqrt{19.6 \times 4.4} = 9.28 \text{ m/seg}$$

2) *Cálculo de la presión en el punto B.*

Aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y B, haciendo pasar el plano de comparación por el punto A.

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + h_{AB}$$

$$Z_A = 0$$

$$P_A = 0.8 \text{ kg/cm}^2 = 8,000 \text{ kg/m}^2$$

$$V_A = 0$$

$$Z_B = 0.80 \text{ m}$$

$$V_B = V_C = 9.28 \text{ m/seg}$$

$$g = 9.8 \text{ m/seg}^2$$

$$h_{AB} = 0.30 \text{ m}$$

Sustituyendo valores en la fórmula:

$$\frac{8.000}{1.000} = 0.80 + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{9.28^2}{2 \times 9.8} + 0.30$$

$$\frac{P_B}{\gamma} = 3.51 \text{ m}$$

3) Cálculo del caudal

$$Q = S \times V = \frac{\pi}{4} D^2 \times V = \frac{\pi}{4} 0.1^2 \times 9.28 = 0.023 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Ejemplo n.º 5

Representar gráficamente la línea piezométrica en una tubería horizontal de diámetro constante.

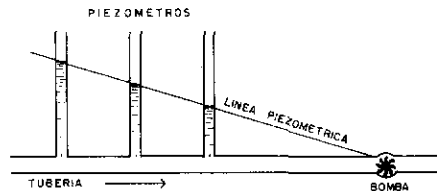
Solución:

Colocando piezómetros a lo largo de la tubería el agua asciende hasta un determinado nivel. A medida que el agua circula por la tubería en la dirección de la flecha va disminuyendo su energía total, debido a las pérdidas por fricción.

Considerando como plano de comparación el que pasa por el eje de la tubería, la energía de posición es nula en todos los puntos de la tubería.

El nivel del agua en cada piezómetro corresponde a la energía de presión del agua en los puntos donde se insertan los piezómetros. Como la presión va disminuyendo de una forma lineal a lo largo de la tubería, el nivel del agua en los sucesivos piezómetros forma una línea recta, que es la línea piezométrica.

Como la tubería tiene un diámetro constante, la velocidad a lo largo de la tubería también lo es. Por tanto, la energía cinética o de velocidad es constante. Además su magnitud es muy pequeña, por lo que no se suele considerar, coincidiendo, en este caso, la línea piezométrica con la línea de energía (altura de posición + altura de presión + altura de velocidad).



La línea piezométrica corta a la tubería en un punto, en donde el agua ya no tiene energía. Si queremos que siga circulando habría que poner una bomba hidráulica.

Emisores de agua

Un emisor de agua es un mecanismo, boquilla o simple orificio por donde el agua fluye desde una tubería a la atmósfera.

Curva característica

La curva característica de un emisor relaciona el caudal aportado por el mismo y la presión del agua existente a la entrada. Viene definida por la ecuación:

$$q = k \cdot H^x$$

q = Caudal del emisor, en litros/hora.

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

H = Presión de entrada del emisor, en mca.

x = Exponente de descarga del emisor.

El exponente de descarga del emisor depende del tipo de flujo que se origina en el emisor y del grado de autocompensación del mismo. Su valor varía de 0 a 1.

— Flujo laminar: $x=1$.

— Emisores de largo recorrido: x varía de 0.6 a 1.

— Emisores tipo orificio y boquilla (aspersores): x alrededor de 0.5.

— Emisores autocompensantes: x varía de 0.5 a 0.

La representación gráfica de esta ecuación da la curva característica del emisor, que debe ser facilitada por el fabricante. Cuando no es así se puede calcular sometiendo al emisor a dos presiones distintas (h_1 y h_2) y aforando sus respectivos caudales (q_1 y q_2).

$$q_1 = k \cdot H_1^x$$

$$q_2 = k \cdot H_2^x$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^x \quad \frac{q_1}{q_2} = x + \log \frac{H_1}{H_2}$$

$$x = \frac{\log \frac{q_1}{q_2}}{\log \frac{H_1}{H_2}}$$

Las curvas características de los emisores deben venir acotadas, con el fin de que los emisores no descarguen caudales muy distintos al variar la presión.

Cuando el emisor es un orificio o una boquilla (tuberías perforadas, aspersores, etc.) el caudal se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$q = Cv \cdot S \sqrt{2g \cdot H}$$

q = Caudal del emisor, en m³/seg.

Cv = Coeficiente de velocidad (varía entre 0.95 y 0.99).

s = Superficie del orificio, en m^2 .

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg^2).

H = Presión en la boquilla, en mca.

Sensibilidad

Sensibilidad de un emisor es el cociente entre la variación relativa de caudal y la variación relativa de presión.

$$q = k \cdot H^x$$

$$dq = k \cdot x \cdot H^{x-1} \cdot dH = \frac{x \cdot q \cdot dH}{H}$$

$$\frac{dq}{q} = x \frac{dH}{H}$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{dH}{H}} = x$$

La sensibilidad de un emisor viene determinada por el exponente de descarga del mismo. Varía, por lo tanto, desde $x=1$ (la variación relativa del caudal sería igual a la variación relativa de presión) hasta $x=0$ (aporta un caudal constante con independencia de la presión).

Para el cálculo de ramales laterales en aspersión y en riego localizado se toma un valor máximo de variación del caudal del 10 % sobre el caudal medio del emisor, o sea,

$$\frac{dq}{q} = 0.1$$

En caso de aspersores $x = 0.5$. Sustituyendo valores en la fórmula anterior:

$$0.1 = 0.5 \frac{dH}{H}$$

$$\frac{dH}{H} = 0.2$$

En este caso la diferencia máxima de presión ha de ser del 20 %.

En caso de riego localizado:

$$0.1 = x \frac{dH}{H}$$

$$\frac{dH}{H} = \frac{0.1}{x}$$

Las variaciones de presión admisibles, según el valor de x , son:

x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
dH										
h	1	0.5	0.33	0.25	0.20	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10

Según este criterio, los goteros de largo recorrido admiten una variación de presión del 10 al 16 %; los de orificio, del 20 %; y los autocompensantes, superior al 20 %.

Coefficiente de variación

La uniformidad en el reparto de agua depende, entre otras causas, de la uniformidad de los emisores, cuya fabricación está sujeta a variaciones en cuanto a tamaño, forma, peso, rugosidad, etc. Como consecuencia de ello, dos emisores teóricamente iguales pueden dar, en las mismas condiciones, caudales muy diferentes.

Para valorar la uniformidad de una muestra de emisores se ha establecido el *coeficiente de variación de fabricación* (CV), que viene definido por la fórmula:

$$CV = \frac{\sigma}{qm}$$

CV = Coeficiente de variación, expresado en tanto por uno.

σ = Desviación típica de la muestra.

qm = Caudal medio de la muestra.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (qe - qm)^2}{n}} \quad ; \quad qm = \frac{\sum qe}{n}$$

qe = Caudal de cada emisor.

n = Número de emisores.

Para la determinación del coeficiente de variación se han de probar 25 emisores como mínimo.

Según el coeficiente de variación se establecen dos categorías de emisores.

Categoría A. Coeficiente de variación inferior a 0.05.

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

Ejemplo

Se han medido los caudales de 25 goteros a la presión nominal, dando los siguientes resultados:

Gotero	Caudal (l/h)	Gotero	Caudal (l/h)
1	3.10	14	3.33
2	3.12	15	3.35
3	3.13	16	3.36
4	3.15	17	3.38
5	3.16	18	3.40
6	3.17	19	3.42
7	3.20	20	3.45
8	3.21	21	3.46
9	3.22	22	3.48
10	3.24	23	3.50
11	3.26	24	3.51
12	3.30	25	3.54
13	3.31	—	—

$$qm = \frac{\sum qe}{n} = \frac{82.75}{25} = 3.31$$

$(qe - qm)$	$(qe - qm)^2$	$(qe - qm)$	$(qe - qm)^2$
0.21	0.0441	-0.02	0.0004
0.19	0.0361	-0.04	0.0016
0.18	0.0324	-0.05	0.0025
0.16	0.0256	-0.07	0.0049
0.15	0.0225	-0.09	0.0081
0.14	0.0196	-0.11	0.0121
0.11	0.0121	-0.14	0.0196
0.10	0.0100	-0.15	0.0225
0.09	0.0081	-0.17	0.0289
0.07	0.0049	-0.19	0.0361
0.03	0.0009	-0.20	0.0400
0.01	0.0001	-0.23	0.0529
0	0	—	—

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (qe - qm)^2}{n}} = \sqrt{\frac{0.4460}{25}} = 0.13$$

$$CV = \frac{\sigma}{qm} = \frac{0.13}{3.31} = 0.039 \quad ; \quad \text{Categoría A}$$

Corrección por temperatura

La curva característica y el coeficiente de variación de fabricación de un emisor dependen de la temperatura a que se ha obtenido, que suele ser 20 °C. Cuando las

temperaturas son sensiblemente distintas se hace preciso una corrección de caudal. En la tabla 2 se dan los factores de corrección para distintas temperaturas y distintos valores de x .

Tabla 2: *Factores de corrección del caudal, para goteros de largo recorrido*

Temperatura °C	$x=1$	$x=0.8$	$x=0.6$
5	0.63	0.87	0.94
10	0.75	0.92	0.95
15	0.87	0.95	0.98
20	1.00	1.00	1.00
25	1.13	1.05	1.02
30	1.28	1.10	1.04
35	1.43	1.14	1.06
40	1.56	1.19	1.08
45	1.70	1.24	1.10
50	1.85	1.29	1.12

Bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas son máquinas que transforman la energía mecánica en energía hidráulica, incrementando la energía específica (energía de la unidad de peso) de la corriente en donde se intercalan.

En una tubería donde se intercala una bomba, sean 1 y 2 los puntos situados en el eje de la tubería a la entrada y salida de la bomba (fig. I₄-7).

$$H_B = H_2 - H_1$$

H_1 = Energía específica del punto 1.

H_2 = Energía específica del punto 2.

H_B = Incremento de la energía específica debido a la bomba.

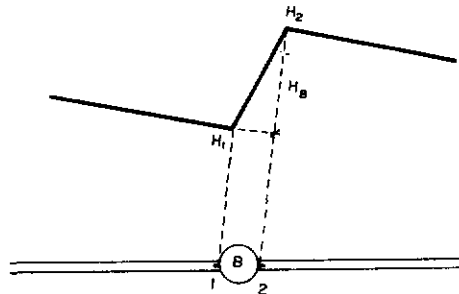


Fig. I₄-7 Variación de la línea de energía a lo largo de una tubería en donde se intercala una bomba.

Aplicando Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

$$H_B = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) =$$

$$= (Z_2 - Z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

En general, la energía, específica aportada por una bomba viene en forma de altura de cota + altura de presión + altura de velocidad, lo que permite clasificar las bombas según el tipo de energía que proporcionan:

- *Bombas rotodinámicas*. Transforman la energía mecánica en energía hidráulica de presión y de velocidad.
- *Bombas volumétricas*. Transforman la energía mecánica en energía hidráulica de presión.
- *Bombas gravimétricas*. Transforman la energía mecánica en energía hidráulica de cota o de posición.

ANEXO 5

Tabla 1: *Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de PVC (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 4 atm*

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	22.6	29.6	37.2	47.2	59.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.10	5.44	1.53	—	—	—
0.20	18.02	5.01	1.70	0.56	—
0.30	36.63	10.13	3.42	1.11	0.38
0.40	60.85	16.75	5.64	1.83	0.62
0.50	90.41	24.81	8.34	2.69	0.91
0.60	125.12	34.24	11.48	3.70	1.24
0.70	164.86	45.01	15.07	4.84	1.62
0.80	209.53	57.08	19.08	6.12	2.05
0.90	259.05	70.42	23.50	7.53	2.52
1.00	313.34	85.02	28.34	9.07	3.03
1.25	469.63	126.90	42.18	13.46	4.49
1.50	—	176.29	58.45	18.61	6.19
1.75	—	233.05	77.09	24.49	8.13
2.00	—	297.01	98.05	31.10	10.31
2.25	—	368.11	121.29	38.41	12.72
2.50	—	446.27	146.79	46.41	15.35
2.75	—	—	174.51	55.10	18.20
3.00	—	—	204.43	64.46	21.27
3.25	—	—	236.53	74.49	24.56
3.50	—	—	270.80	85.18	28.06
3.75	—	—	307.22	96.53	31.76
4.00	—	—	345.78	108.53	35.68
5.00	—	—	—	162.93	53.40
6.00	—	—	—	227.43	74.33
7.00	—	—	—	301.86	98.42
8.00	—	—	—	386.09	125.60
9.00	—	—	—	—	155.84
10.00	—	—	—	—	189.10
11.00	—	—	—	—	225.35
12.00	—	—	—	—	264.57
13.00	—	—	—	—	306.75

Tabla 1: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	75	90	110	125	140
Diámetro interior (mm)	71.4	86.4	105.6	120	134.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	1.26	0.51	0.20	—	—
2.00	4.28	1.72	0.66	0.36	0.21
3.00	8.79	3.53	1.35	0.74	0.43
4.00	14.70	5.88	2.25	1.22	0.71
5.00	21.96	8.77	3.35	1.82	1.06
6.00	30.51	12.16	4.64	2.51	1.46
7.00	40.32	16.05	6.11	3.31	1.92
8.00	51.38	20.43	7.77	4.20	2.44
9.00	63.67	25.28	9.60	5.19	3.01
10.00	77.15	30.60	11.61	6.27	3.64
11.00	91.84	36.38	13.79	7.45	4.32
12.00	107.70	42.63	16.14	8.71	5.05
13.00	124.73	49.32	18.66	10.06	5.83
14.00	142.93	56.47	21.34	11.51	6.66
15.00	162.28	64.06	24.19	13.04	7.55
16.00	182.79	72.09	27.21	14.66	8.48
17.00	204.43	80.56	30.38	16.36	9.46
18.00	227.21	89.47	33.72	18.15	10.49
19.00	251.13	98.81	37.22	20.02	11.57
20.00	276.17	108.59	40.87	21.98	12.70
22.00	—	129.43	48.66	26.15	15.10
24.00	—	151.98	57.07	30.66	17.70
26.00	—	176.23	66.10	35.49	20.47
28.00	—	202.17	75.75	40.64	23.44
29.00	—	215.77	80.81	43.34	24.99
30.00	—	—	86.02	46.13	26.59
32.00	—	—	96.89	51.93	29.92
34.00	—	—	108.36	58.05	33.43
36.00	—	—	120.44	64.49	37.13
38.00	—	—	133.12	71.24	41.00
40.00	—	—	146.40	78.31	45.05
50.00	—	—	—	118.33	67.96
60.00	—	—	—	—	95.23
70.00	—	—	—	—	126.78

Tabla 1: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	160	180	200	250	315
Diámetro interior (mm)	153.6	172.8	192	240.2	302.6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
2.00	0.12	—	—	—	—
5.00	0.56	0.32	0.20	0.07	—
10.00	1.92	1.09	0.66	0.23	0.08
15.00	3.97	2.25	1.36	0.47	0.16
20.00	6.67	3.78	2.28	0.78	0.26
25.00	9.99	5.66	3.40	1.16	0.39
30.00	13.92	7.87	4.73	1.61	0.53
35.00	18.43	10.42	6.26	2.13	0.70
40.00	25.53	13.29	7.98	2.71	0.89
45.00	29.20	16.48	9.89	3.35	1.10
50.00	35.43	19.98	11.98	4.06	1.33
55.00	42.23	23.80	14.26	4.82	1.58
60.00	49.57	27.92	16.73	5.65	1.85
65.00	57.47	32.35	19.37	6.54	2.14
70.00	65.91	37.08	22.20	7.48	2.45
75.00	74.89	42.11	25.20	8.49	2.78
80.00	84.41	47.44	28.37	9.55	3.12
85.00	94.47	53.07	31.73	10.67	3.49
90.00	105.06	58.99	35.26	11.85	3.87
100.00	—	71.72	42.83	14.38	4.69
110.00	—	85.62	51.10	17.13	5.58
120.00	—	—	60.05	20.11	6.55
130.00	—	—	69.67	23.31	7.58
140.00	—	—	79.98	26.73	8.68
150.00	—	—	—	30.36	9.86
160.00	—	—	—	34.22	11.10
170.00	—	—	—	38.29	12.41
180.00	—	—	—	42.57	13.79
190.00	—	—	—	47.07	15.23
200.00	—	—	—	51.78	16.75
220.00	—	—	—	61.84	19.97
240.00	—	—	—	—	23.46
260.00	—	—	—	—	27.22
280.00	—	—	—	—	31.23
300.00	—	—	—	—	35.51
350.00	—	—	—	—	47.32

Tabla 2: Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de PVC (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 6 atm

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	22.6	29.2	36.4	46.4	59.2
Caudal (l/seg)	J	J	J	J	J
0.10	5.44	1.63	—	—	—
0.20	18.02	5.34	1.89	0.60	—
0.30	36.63	10.80	3.79	1.20	0.38
0.40	60.85	17.88	6.26	1.98	0.63
0.50	90.41	26.48	9.25	2.92	0.92
0.60	125.12	36.55	12.74	4.01	1.26
0.70	164.86	48.04	16.72	5.25	1.65
0.80	209.53	60.93	21.17	6.64	2.08
0.90	259.05	75.18	26.09	8.17	2.56
1.00	313.34	90.78	31.46	9.84	3.08
1.25	469.63	135.52	46.83	14.61	4.56
1.50	—	188.30	64.90	20.20	6.29
1.75	—	248.95	85.62	26.59	8.27
2.00	—	317.35	108.92	33.76	10.48
2.25	—	393.36	134.76	41.71	12.93
2.50	—	476.92	163.11	50.40	15.60
2.75	—	—	193.94	59.84	18.50
3.00	—	—	227.23	70.02	21.62
3.25	—	—	262.95	80.92	24.96
3.50	—	—	301.08	92.54	28.51
3.75	—	—	341.61	104.87	32.28
4.00	—	—	384.53	117.91	36.27
5.00	—	—	—	177.07	54.28
6.00	—	—	—	247.22	75.56
7.00	—	—	—	328.19	100.04
8.00	—	—	—	419.84	127.68
9.00	—	—	—	—	158.42
10.00	—	—	—	—	192.24
11.00	—	—	—	—	229.10
12.00	—	—	—	—	268.98
13.00	—	—	—	—	311.87

Tabla 2: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	75	90	110	125	140
Diámetro interior (mm)	70.6	84.6	103.6	117.6	131.8
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	1.33	0.57	0.22	—	—
2.00	4.51	1.90	0.73	0.40	0.23
3.00	9.28	3.90	1.48	0.81	0.47
4.00	15.52	6.51	2.47	1.35	0.78
5.00	23.18	9.70	3.67	2.00	1.16
6.00	32.21	13.46	5.08	2.77	1.60
7.00	42.58	17.77	6.70	3.65	2.11
8.00	54.27	22.61	8.51	4.63	2.68
9.00	67.25	27.99	10.53	5.72	3.31
10.00	81.50	33.88	12.73	6.91	4.00
11.00	97.01	40.29	15.12	8.21	4.74
12.00	113.78	47.21	17.70	9.60	5.54
13.00	131.78	54.63	20.46	11.09	6.40
14.00	151.02	62.55	23.41	12.69	7.32
15.00	171.47	70.96	26.54	14.37	8.29
16.00	193.15	79.87	29.85	16.16	9.32
17.00	216.03	89.26	33.33	18.04	10.40
18.00	240.11	99.14	37.00	20.01	11.53
19.00	265.40	109.50	40.84	22.08	12.72
20.00	—	120.35	44.85	24.24	13.96
22.00	—	143.47	53.40	28.85	16.60
24.00	—	168.49	62.64	33.82	19.45
26.00	—	195.39	72.56	39.15	22.51
28.00	—	224.17	83.16	44.84	25.77
30.00	—	—	94.44	50.89	29.23
32.00	—	—	106.38	57.30	32.90
34.00	—	—	118.99	64.06	36.77
36.00	—	—	132.27	71.17	40.83
38.00	—	—	146.20	78.63	45.09
40.00	—	—	160.79	86.44	49.55
50.00	—	—	—	130.65	74.77
60.00	—	—	—	—	104.79

Tabla 2: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	160	180	200	250	315
Diámetro interior (mm)	150.6	169.4	188.2	235.4	299.6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
2.00	0.13	—	—	—	—
5.00	0.62	0.35	0.22	0.08	—
10.00	2.11	1.20	0.73	0.25	0.08
15.00	4.36	2.48	1.50	0.51	0.17
20.00	7.33	4.16	2.51	0.86	0.27
25.00	10.99	6.23	3.75	1.28	0.41
30.00	15.31	8.67	5.21	1.78	0.56
35.00	20.28	11.47	6.89	2.34	0.74
40.00	25.90	14.63	8.79	2.98	0.94
45.00	32.14	18.15	10.89	3.69	1.16
50.00	39.01	22.01	13.20	4.47	1.40
55.00	46.49	26.21	15.72	5.32	1.66
60.00	54.58	30.76	18.43	6.23	1.95
65.00	63.28	35.64	21.35	7.21	2.25
70.00	72.58	40.85	24.46	8.25	2.57
75.00	82.48	46.40	27.77	9.36	2.92
80.00	92.98	52.28	31.28	10.53	3.28
85.00	104.06	58.48	34.98	11.77	3.66
90.00	—	65.02	38.87	13.07	4.06
100.00	—	79.06	47.23	15.86	4.92
120.00	—	—	66.23	22.19	6.87
130.00	—	—	76.85	25.72	7.96
140.00	—	—	—	29.50	9.12
150.00	—	—	—	33.51	10.35
160.00	—	—	—	37.77	11.65
170.00	—	—	—	42.26	13.03
180.00	—	—	—	47.00	14.47
190.00	—	—	—	51.97	15.99
200.00	—	—	—	57.17	17.58
220.00	—	—	—	—	20.97
240.00	—	—	—	—	24.63
260.00	—	—	—	—	28.58
280.00	—	—	—	—	32.79
300.00	—	—	—	—	37.28
350.00	—	—	—	—	49.70

Tabla 3: Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de PVC (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 10 atm

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	22	28.4	36	45.2	57
Caudal (l/seg)	J	J	J	J	J
0.10	6.18	1.85	—	—	—
0.20	20.48	6.09	1.99	0.68	—
0.30	41.66	12.33	4.00	1.36	0.46
0.40	69.25	20.41	6.60	2.24	0.75
0.50	102.90	30.24	9.75	3.30	1.10
0.60	142.44	41.75	13.43	4.54	1.51
0.70	187.73	54.90	17.62	5.95	1.98
0.80	238.65	69.64	22.32	7.52	2.49
0.90	295.12	85.94	27.50	9.26	3.06
1.00	357.06	103.79	33.17	11.15	3.69
1.25	—	155.01	49.38	16.56	5.46
1.50	—	215.47	68.45	22.90	7.54
1.75	—	284.95	90.31	30.16	9.91
2.00	—	363.30	114.90	38.30	12.57
2.25	—	450.44	142.18	47.32	15.50
2.50	—	—	172.10	57.20	18.71
2.75	—	—	204.64	67.92	22.20
3.00	—	—	239.78	79.48	25.94
3.25	—	—	277.50	91.86	29.96
3.50	—	—	317.75	105.07	34.23
3.75	—	—	360.55	119.09	38.76
4.00	—	—	405.87	133.91	43.54
5.00	—	—	—	201.17	65.20
6.00	—	—	—	280.97	90.80
7.00	—	—	—	373.11	120.27
8.00	—	—	—	477.45	153.55
9.00	—	—	—	—	190.58
10.00	—	—	—	—	231.32
11.00	—	—	—	—	275.75
12.00	—	—	—	—	323.84

Tabla 3: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	75	90	110	125	140
Diámetro interior (mm)	67.8	81.4	99.4	113	126.6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	1.62	0.68	2.27	—	—
2.00	5.47	2.29	0.88	0.48	0.28
3.00	11.26	4.69	1.81	0.98	0.57
4.00	18.86	7.83	3.01	1.63	0.95
5.00	28.18	11.68	4.47	2.42	1.41
6.00	39.17	16.21	6.20	3.35	1.95
7.00	51.80	21.40	8.17	4.41	2.56
8.00	66.04	27.25	10.39	5.61	3.25
9.00	81.85	33.73	12.85	6.93	4.01
10.00	99.23	40.84	15.54	8.38	4.85
11.00	118.15	48.58	18.47	9.95	5.75
12.00	138.60	56.93	21.62	11.64	6.73
13.00	160.56	65.89	25.00	13.45	7.77
14.00	184.04	75.45	28.61	15.38	8.89
15.00	209.01	85.61	32.43	17.43	10.07
16.00	235.48	96.37	36.48	19.60	11.32
17.00	263.42	107.73	40.75	21.88	12.63
18.00	292.84	119.67	45.23	24.28	14.01
19.00	—	132.19	49.93	26.79	15.45
20.00	—	145.30	54.85	29.42	16.96
22.00	—	173.26	65.32	35.01	20.18
24.00	—	203.53	76.64	41.05	23.64
26.00	—	236.09	88.80	47.53	27.36
28.00	—	—	101.79	54.45	31.33
30.00	—	—	115.61	61.81	35.55
32.00	—	—	130.26	69.61	40.01
34.00	—	—	145.72	77.83	44.72
36.00	—	—	162.01	86.48	49.67
38.00	—	—	179.10	95.56	54.87
40.00	—	—	—	105.07	60.30
50.00	—	—	—	158.90	91.04
60.00	—	—	—	—	127.66

Tabla 3: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	160	180	200	250	315
Diámetro interior (mm)	144.6	162.8	180.8	226.2	285
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
2.00	0.15	—	—	—	—
5.00	0.75	0.43	0.26	0.09	—
10.00	2.56	1.45	0.88	0.30	0.10
15.00	5.30	3.00	1.81	0.62	0.21
20.00	8.92	5.04	3.04	1.04	0.35
25.00	13.38	7.54	4.55	1.55	0.51
30.00	18.64	10.50	6.33	2.15	0.71
35.00	24.71	13.90	8.37	2.84	0.94
40.00	31.56	17.74	10.67	3.62	1.19
45.00	39.17	22.01	13.23	4.48	1.47
50.00	47.56	26.70	16.04	5.42	1.78
55.00	56.69	31.80	19.10	6.45	2.11
60.00	66.58	37.33	22.40	7.56	2.47
65.00	77.20	43.26	25.95	8.74	2.86
70.00	88.57	49.60	29.74	10.01	3.27
75.00	100.67	56.34	33.77	11.36	3.71
80.00	113.50	63.49	38.04	12.78	4.17
85.00	—	71.04	42.54	14.29	4.66
90.00	—	78.98	47.28	15.87	5.17
100.00	—	96.07	57.47	19.26	6.27
120.00	—	—	80.62	26.95	8.76
130.00	—	—	—	31.25	10.14
140.00	—	—	—	35.84	11.62
150.00	—	—	—	40.72	13.19
160.00	—	—	—	45.90	14.86
170.00	—	—	—	51.37	16.61
180.00	—	—	—	57.14	18.46
190.00	—	—	—	63.19	20.40
200.00	—	—	—	69.52	22.43
220.00	—	—	—	—	26.76
240.00	—	—	—	—	31.45
260.00	—	—	—	—	36.49
280.00	—	—	—	—	41.89
300.00	—	—	—	—	47.63

Tabla 4: *Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de PVC (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 16 atm*

Diámetro nominal (mm)	16	20	25	32	40
Diámetro interior (mm)	13.6	17	21.2	27.2	34
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.02	3.90	—	—	—	—
0.08	40.99	14.26	5.02	1.56	—
0.14	108.77	37.51	13.15	4.04	1.41
0.20	203.96	70.07	24.43	7.48	2.60
0.26	325.14	111.20	38.67	11.80	4.09
0.32	471.43	160.74	55.73	16.95	5.87
0.38	—	218.28	75.51	22.92	7.92
0.44	—	283.71	97.93	29.67	10.23
0.50	—	356.85	122.98	37.18	12.80
0.56	—	437.68	150.55	45.44	15.62
0.62	—	—	180.59	54.43	18.70
0.68	—	—	213.17	64.15	22.01
0.74	—	—	248.12	74.58	25.56
0.80	—	—	285.57	85.72	29.35
0.86	—	—	325.34	97.55	33.37
0.92	—	—	367.54	110.07	37.62
1.00	—	—	427.44	127.83	43.65
1.10	—	—	—	151.72	51.74
1.20	—	—	—	177.46	60.44
1.30	—	—	—	205.05	69.76
1.40	—	—	—	234.45	79.68
1.50	—	—	—	265.66	90.19
1.60	—	—	—	298.67	101.30
1.70	—	—	—	333.46	112.99
1.80	—	—	—	370.00	125.26
1.90	—	—	—	408.32	138.12
2.00	—	—	—	448.41	151.54
2.20	—	—	—	—	180.11
2.40	—	—	—	—	210.93
2.60	—	—	—	—	243.99
2.80	—	—	—	—	279.28
3.00	—	—	—	—	316.77
3.50	—	—	—	—	420.06

Tabla 4: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	50	63	75	90	110
Diámetro interior (mm)	42.6	53.6	63.8	76.6	93.6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.50	4.38	1.47	0.65	0.28	—
1.00	14.80	4.94	2.16	0.91	0.35
1.50	30.44	10.12	4.40	1.84	0.71
2.00	50.96	16.88	7.32	3.06	1.18
2.50	76.15	25.15	10.89	4.54	1.74
3.00	105.88	34.89	15.09	6.27	2.41
3.50	140.06	46.06	19.89	8.26	3.16
4.00	178.60	58.62	25.28	10.45	4.01
4.50	221.45	72.55	31.25	12.95	4.95
5.00	268.55	87.84	37.80	15.65	5.97
5.50	319.88	104.47	44.91	18.57	7.08
6.00	375.40	122.43	52.58	21.73	8.28
6.50	435.06	141.69	60.80	25.10	9.55
7.00	498.87	162.26	69.56	28.70	10.92
8.00	—	207.27	88.72	36.56	13.88
9.00	—	257.39	110.02	45.57	17.17
10.00	—	312.58	133.43	54.84	20.78
11.00	—	372.79	158.94	65.25	24.70
12.00	—	—	186.51	76.49	28.92
13.00	—	—	216.15	88.55	33.45
14.00	—	—	247.84	101.44	38.28
15.00	—	—	281.56	115.13	43.42
16.00	—	—	317.30	129.64	48.85
17.00	—	—	—	144.94	54.57
18.00	—	—	—	161.05	60.59
19.00	—	—	—	177.95	66.90
20.00	—	—	—	195.64	73.50
22.00	—	—	—	233.39	87.56
24.00	—	—	—	—	102.77
26.00	—	—	—	—	119.11
28.00	—	—	—	—	136.58
30.00	—	—	—	—	155.17
32.00	—	—	—	—	174.88
34.00	—	—	—	—	195.69

Tabla 4: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	125	140	160	180	200
Diámetro interior (mm)	106.4	119.2	136.2	153.2	170.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	0.19	—	—	—	—
2.00	0.64	0.38	0.20	0.12	—
3.00	1.31	0.76	0.41	0.23	0.14
4.00	2.17	1.26	0.67	0.38	0.23
5.00	3.23	1.88	0.99	0.57	0.34
6.00	4.47	2.59	1.37	0.78	0.47
7.00	5.89	3.42	1.80	1.03	0.62
8.00	7.49	4.34	2.29	1.30	0.79
9.00	9.26	5.36	2.83	1.61	0.97
10.00	11.19	6.48	3.41	1.94	1.17
11.00	13.30	7.69	4.05	2.30	1.38
12.00	15.56	9.00	4.73	2.69	1.62
13.00	17.99	10.39	5.47	3.11	1.86
14.00	20.58	11.88	6.25	3.55	2.13
15.00	23.32	13.47	7.08	4.02	2.41
16.00	26.23	15.14	7.95	4.51	2.71
17.00	29.29	16.90	8.87	5.03	3.02
18.00	32.51	18.75	9.84	5.58	3.34
19.00	35.88	20.68	10.85	6.15	3.69
20.00	39.40	22.71	11.91	6.75	4.04
25.00	59.29	34.12	17.87	10.12	6.05
30.00	82.90	47.65	24.92	14.09	8.42
35.00	110.18	63.26	33.05	18.67	11.15
40.00	141.08	80.91	42.23	23.83	14.22
45.00	—	100.59	52.44	29.57	17.63
50.00	—	122.27	63.69	35.89	21.39
55.00	—	145.94	75.95	42.77	25.47
60.00	—	—	89.22	50.21	29.89
65.00	—	—	103.50	58.20	34.63
70.00	—	—	118.77	66.75	39.70
80.00	—	—	—	85.49	50.80
90.00	—	—	—	106.41	63.17
100.00	—	—	—	—	76.81
110.00	—	—	—	—	91.70

Tabla 5: *Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno alta densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 6 atm*

Díámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Díámetro interior (mm)	21	28	35.2	44	55.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.10	7.69	1.98	0.68	—	—
0.20	25.55	6.52	2.21	0.77	—
0.30	52.06	13.19	4.45	1.55	0.52
0.40	86.54	21.84	7.34	2.55	0.86
0.50	128.69	32.36	10.85	3.75	1.26
0.60	178.26	44.69	14.95	5.16	1.73
0.70	235.07	58.77	19.62	6.76	2.26
0.80	298.95	74.56	24.86	8.55	2.85
0.90	369.85	92.03	30.63	10.53	3.51
1.00	447.63	111.14	36.95	12.68	4.22
1.20	—	154.24	51.15	17.52	5.82
1.40	—	203.71	67.41	23.05	7.64
1.60	—	259.43	85.67	29.25	9.69
1.80	—	321.32	105.92	36.10	11.94
2.00	—	389.29	128.10	43.60	14.40
2.20	—	463.33	152.22	51.75	17.07
2.40	—	—	178.23	60.51	19.95
2.60	—	—	206.13	69.91	23.02
2.80	—	—	235.89	79.91	26.29
3.00	—	—	267.51	90.53	29.76
3.50	—	—	354.59	119.71	39.27
4.00	—	—	453.02	152.61	49.97
4.50	—	—	—	189.18	61.83
5.00	—	—	—	229.36	74.84
5.50	—	—	—	273.14	88.99
6.00	—	—	—	320.47	104.27
7.00	—	—	—	425.70	138.15
8.00	—	—	—	—	176.41
9.00	—	—	—	—	219.01
10.00	—	—	—	—	265.90
11.00	—	—	—	—	317.03
12.00	—	—	—	—	372.39

Tabla 5: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	75	90	110	125	140
Diámetro interior (mm)	66	79.2	96.8	110.2	123.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	1.84	0.77	0.30	0.17	—
2.00	6.23	2.61	1.00	0.54	0.32
3.00	12.82	5.35	2.05	1.11	0.65
4.00	21.47	8.93	3.41	1.84	1.07
5.00	32.09	13.32	5.08	2.73	1.59
6.00	44.62	18.50	7.04	3.78	2.20
7.00	59.02	24.43	9.29	4.98	2.89
8.00	75.25	31.11	11.81	6.33	3.67
9.00	93.29	38.51	14.60	7.82	4.54
10.00	113.12	46.64	17.66	9.45	5.48
11.00	134.71	55.48	20.99	11.22	6.51
12.00	158.05	65.03	24.58	13.14	7.61
13.00	183.13	75.28	28.43	15.18	8.80
14.00	209.93	86.22	32.53	17.37	10.06
15.00	238.45	97.84	36.88	19.68	11.39
16.00	268.68	110.15	41.49	22.13	12.80
17.00	300.60	123.14	46.35	24.71	14.29
18.00	—	136.80	51.45	27.42	15.85
19.00	—	151.14	56.80	30.26	17.49
20.00	—	166.14	62.40	33.23	19.20
22.00	—	198.15	74.32	39.55	22.84
24.00	—	232.81	87.21	46.38	26.77
26.00	—	—	101.06	53.71	30.98
28.00	—	—	115.87	61.53	35.48
30.00	—	—	131.62	69.86	40.26
32.00	—	—	148.31	78.67	45.32
34.00	—	—	165.94	87.98	50.66
36.00	—	—	184.50	97.77	56.27
38.00	—	—	—	108.04	62.16
40.00	—	—	—	118.80	68.32
50.00	—	—	—	—	103.19

Tabla 6: *Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno alta densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 10 atm*

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	20.4	26.2	32.6	40.8	51.4
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.10	8.82	2.71	0.97	—	—
0.20	29.34	8.93	3.17	1.10	—
0.30	59.78	18.10	6.40	2.21	0.74
0.40	99.46	30.00	10.58	3.64	1.22
0.50	147.97	44.48	15.64	5.37	1.80
0.60	205.08	61.47	21.57	7.39	2.47
0.70	270.48	80.88	28.33	9.69	3.23
0.80	344.09	102.66	35.91	12.27	4.08
0.90	425.75	126.77	44.27	15.10	5.01
1.00	—	153.18	53.42	18.20	6.04
1.20	—	212.76	74.01	25.16	8.33
1.40	—	281.19	97.60	33.12	10.94
1.60	—	358.37	124.13	42.05	13.87
1.80	—	444.08	153.55	51.93	17.10
2.00	—	—	185.82	62.76	20.64
2.20	—	—	220.90	74.50	24.48
2.40	—	—	258.78	87.16	28.60
2.60	—	—	299.41	100.73	33.02
2.80	—	—	342.79	115.18	37.72
3.00	—	—	388.89	130.53	42.71
3.50	—	—	—	172.74	56.39
4.00	—	—	—	220.36	71.80
4.50	—	—	—	273.33	88.89
5.00	—	—	—	331.59	107.66
5.50	—	—	—	395.10	128.07
6.00	—	—	—	463.80	150.12
7.00	—	—	—	—	199.05
8.00	—	—	—	—	254.37
9.00	—	—	—	—	316.00
10.00	—	—	—	—	383.88

Tabla 6: (Continuación)

Diámetro nominal (mm)	75	90	110	125	140
Diámetro interior (mm)	61.4	73.6	90	102.2	114.6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
1.00	2.59	1.10	0.42	0.23	—
2.00	8.80	3.70	1.42	0.78	0.45
3.00	18.14	7.60	2.90	1.58	0.92
4.00	30.41	12.71	4.84	2.63	1.52
5.00	45.49	18.97	7.21	3.92	2.26
6.00	63.31	26.35	9.99	5.43	3.13
7.00	83.79	34.82	13.19	7.15	4.13
8.00	106.91	44.36	16.78	9.09	5.24
9.00	132.61	54.95	20.75	11.24	6.48
10.00	160.87	66.58	25.12	13.59	7.83
11.00	191.67	79.23	29.86	16.15	9.29
12.00	224.98	92.90	34.97	18.90	10.87
13.00	260.79	107.58	40.46	21.86	12.57
14.00	299.08	123.25	46.31	25.01	14.37
15.00	—	139.92	52.53	28.35	16.29
16.00	—	157.58	59.10	31.88	18.31
17.00	—	176.21	66.04	35.61	20.44
18.00	—	195.82	73.33	39.52	22.68
19.00	—	216.41	80.98	43.63	25.03
20.00	—	237.96	88.98	47.92	27.48
22.00	—	—	106.03	57.06	32.70
24.00	—	—	124.47	66.93	38.34
26.00	—	—	144.30	77.54	44.39
28.00	—	—	165.50	88.87	50.85
30.00	—	—	188.06	100.93	57.72
32.00	—	—	—	113.70	64.99
34.00	—	—	—	127.19	72.67
36.00	—	—	—	141.38	80.74
38.00	—	—	—	156.28	89.21
40.00	—	—	—	171.89	98.08
50.00	—	—	—	—	148.31

Tabla 7: Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno baja densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 4 atm

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	21	28	35.2	44	55.4
Caudal (l/seg)	J	J	J	J	J
0.10	7.69	1.98	0.68	—	—
0.20	25.55	6.52	2.21	0.77	—
0.30	52.06	13.19	4.45	1.55	0.52
0.40	86.54	21.84	7.34	2.55	0.86
0.50	128.69	32.36	10.85	3.75	1.26
0.60	178.26	44.69	14.95	5.16	1.73
0.70	235.07	58.77	19.62	6.76	2.26
0.80	298.95	74.56	24.86	8.55	2.85
0.90	369.85	92.03	30.63	10.53	3.51
1.00	447.63	111.14	36.95	12.68	4.22
1.20	—	154.24	51.15	17.52	5.82
1.40	—	203.71	67.41	23.05	7.64
1.60	—	259.43	85.67	29.25	9.69
1.80	—	321.32	105.92	36.10	11.94
2.00	—	389.29	128.10	43.60	14.40
2.20	—	463.33	152.22	51.75	17.07
2.40	—	—	178.23	60.51	19.95
2.60	—	—	206.13	69.91	23.02
2.80	—	—	235.89	79.91	26.29
3.00	—	—	267.51	90.53	29.76
3.50	—	—	354.59	119.71	39.27
4.00	—	—	453.02	152.61	49.97
4.50	—	—	—	189.18	61.83
5.00	—	—	—	229.36	74.84
5.50	—	—	—	273.14	88.99
6.00	—	—	—	320.47	104.27
7.00	—	—	—	425.70	138.15
8.00	—	—	—	—	176.41
9.00	—	—	—	—	219.01
10.00	—	—	—	—	265.90
11.00	—	—	—	—	317.03
12.00	—	—	—	—	372.39

Tabla 8: Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno baja densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 6 atm

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	20.4	26.2	32.6	40.8	51.4
Caudal (l/seg)	J	J	J	J	J
0.10	8.82	2.71	0.97	—	—
0.20	29.34	8.93	3.17	1.10	—
0.30	59.78	18.10	6.40	2.21	0.74
0.40	99.46	30.00	10.58	3.64	1.22
0.50	147.97	44.48	15.64	5.37	1.80
0.60	205.08	61.47	21.57	7.39	2.47
0.70	270.48	80.88	28.33	9.69	3.23
0.80	344.09	102.66	35.91	12.27	4.08
0.90	425.75	126.77	44.27	15.10	5.01
1.00	—	153.18	53.42	18.20	6.04
1.20	—	212.76	74.01	25.16	8.33
1.40	—	281.19	97.60	33.12	10.94
1.60	—	358.37	124.13	42.05	13.87
1.80	—	444.08	153.55	51.93	17.10
2.00	—	—	185.82	62.76	20.64
2.20	—	—	220.90	74.50	24.48
2.40	—	—	258.78	87.16	28.60
2.60	—	—	299.41	100.73	33.02
2.80	—	—	342.79	115.18	37.72
3.00	—	—	388.89	130.53	42.71
3.50	—	—	—	172.74	56.39
4.00	—	—	—	220.36	71.80
4.50	—	—	—	273.33	88.89
5.00	—	—	—	331.59	107.66
5.50	—	—	—	395.10	128.07
6.00	—	—	—	463.80	150.12
6.50	—	—	—	—	173.78
7.00	—	—	—	—	199.05

Tabla 9: Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno baja densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Presión 10 atm

Diámetro nominal (mm)	25	32	40	50	63
Diámetro interior (mm)	17.8	22.8	28.4	35.6	45
Caudal (l/seg)	J	J	J	J	J
0.10	16.82	5.22	1.85	0.64	—
0.20	56.24	17.28	6.09	2.09	0.70
0.30	114.93	35.13	12.33	4.22	1.39
0.40	191.63	58.34	20.41	6.96	2.29
0.50	285.68	86.66	30.24	10.28	3.37
0.60	396.58	119.92	41.75	14.17	4.64
0.70	—	158.00	54.90	18.59	6.08
0.80	—	200.80	69.44	23.55	7.68
0.90	—	248.22	85.94	29.02	9.46
1.00	—	300.27	103.79	35.00	11.39
1.20	—	417.75	144.02	48.44	15.73
1.40	—	—	190.18	63.83	20.69
1.60	—	—	242.17	81.13	26.25
1.80	—	—	299.91	100.28	32.40
2.00	—	—	363.30	121.29	39.13
2.20	—	—	432.31	144.10	46.43
2.40	—	—	—	168.72	54.29
2.60	—	—	—	195.11	62.71
2.80	—	—	—	223.27	71.68
3.00	—	—	—	253.19	81.20
3.50	—	—	—	335.56	107.35
4.00	—	—	—	428.66	136.83
4.50	—	—	—	—	169.58
5.00	—	—	—	—	205.56
5.50	—	—	—	—	244.76
6.00	—	—	—	—	287.13
6.50	—	—	—	—	332.65
7.00	—	—	—	—	381.31

Tabla 10: *Pérdida de carga por fricción (J) en tubería de polietileno baja densidad (Prandtl-Colebrook, $K = 0.007$), en m por km. Pequeños diámetros diámetros*

Diámetro nominal	12.5	16	16	20	20
Diámetro interior	10.3	11.6	13.6	14.4	16
Presión (atm)	2.5	10	2.5	10	6
<i>Caudal (l/seg)</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>J</i>
0.02	14.30	8.20	4.47	2.98	—
0.04	46.40	26.50	14.40	9.53	5.81
0.06	93.29	53.09	28.76	19.07	11.58
0.08	153.99	87.49	47.29	31.25	19.00
0.10	227.68	129.08	69.65	46.06	27.89
0.12	313.98	177.58	95.78	63.24	38.29
0.14	412.67	233.07	125.44	82.75	50.08
0.16	—	295.07	158.77	104.63	63.28
0.18	—	363.66	195.43	128.74	77.77
0.20	—	438.66	235.46	155.02	93.57
0.22	—	—	278.92	183.53	110.76
0.24	—	—	325.55	214.21	129.16
0.26	—	—	375.51	246.92	148.75
0.28	—	—	428.74	281.70	169.65
0.30	—	—	485.10	318.61	191.84
0.32	—	—	—	357.69	215.14
0.34	—	—	—	398.60	239.73
0.36	—	—	—	441.68	265.53
0.38	—	—	—	486.69	292.42
0.40	—	—	—	—	320.52
0.42	—	—	—	—	349.81
0.44	—	—	—	—	380.31
0.46	—	—	—	—	412.00
0.48	—	—	—	—	444.70
0.50	—	—	—	—	478.69

Tabla 11: Pérdida de carga por fricción en tubo de acero soldado (Hazen- Williams)
(en m por 100 m).

Caudal l/seg	Diámetro interior del tubo							
	5 cm	7.5 cm	10 cm	12.5 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
0.6	0.3	0.1						
1.3	1.1	0.2						
1.9	2.4	0.3	0.1					
2.5	4.1	0.6	0.2					
3.2	6.3	0.9	0.2	0.1				
4.4	13.1	1.9	0.5	0.2				
6.3	22.5	3.2	0.9	0.3	0.1			
7.9	34.0	4.8	1.3	0.4	0.2			
9.5	47.5	6.7	1.8	0.6	0.2			
11.0		8.9	2.4	0.8	0.3	0.1		
12.6		11.5	3.1	1.0	0.4	0.1		
15.8		17.3	4.7	1.5	0.6	0.2		
19.0		24.3	6.5	2.2	0.9	0.2		
22.0		32.3	8.7	2.9	1.2	0.3	0.1	
25.2		41.4	11.1	3.7	1.5	0.4	0.1	
28.4			13.9	4.6	1.9	0.5	0.2	
31.6			16.8	5.6	2.3	0.6	0.2	0.1
37.9			23.6	7.8	3.2	0.8	0.3	0.1
44.2			31.4	10.4	4.3	1.1	0.4	0.2
50.5			40.2	13.3	5.5	1.4	0.5	0.2
56.9				16.5	6.8	1.8	0.6	0.3
63.2				20.1	8.3	2.2	0.7	0.3
76.0				28.1	11.6	3.0	1.0	0.4
88.5				37.5	15.4	4.0	1.3	0.6
101.0					19.7	5.2	1.7	0.7
113.8					24.6	6.5	2.1	0.9
126.0					29.8	7.8	2.6	1.1

Tabla 12: Pérdida de carga por fricción en tubo de hormigón (Hazen- Williams)
(en m por 100 m).

Caudal l/seg	Diámetro interior del tubo										
	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	40 cm	45 cm	50 cm	60 cm	75 cm	90 cm	105 cm
2.8	0.01										
5.7	0.03										
8.5	0.07										
11.3	0.12	0.04									
14.2	0.19	0.06									
17.0	0.26	0.09	0.04								
22.7	0.45	0.15	0.06								
28.3	0.68	0.23	0.09	0.04							
34.0	0.95	0.32	0.13	0.06							
39.6	1.23	0.43	0.18	0.08	0.04						
45.3	1.62	0.55	0.22	0.11	0.06						
51.0	2.02	0.68	0.28	0.13	0.07						
57.0	2.45	0.83	0.34	0.16	0.08	0.05					
68.0	3.43	1.16	0.48	0.22	0.12	0.07					
79.0	4.57	1.54	0.63	0.30	0.16	0.09	0.05				
91.0	5.85	1.97	0.81	0.38	0.20	0.11	0.07				
102.0	7.27	2.46	1.01	0.48	0.25	0.14	0.08	0.04			
113.0	8.84	2.98	1.23	0.58	0.30	0.17	0.10	0.04			
127.0		3.71	1.53	0.72	0.38	0.21	0.13	0.05			
142.0		4.51	1.86	0.88	0.46	0.26	0.15	0.06			
156.0		5.38	2.21	1.05	0.55	0.31	0.18	0.08	0.03		
170.0		6.32	2.60	1.23	0.64	0.36	0.22	0.09	0.03		
184.0		7.33	3.02	1.42	0.74	0.42	0.25	0.10	0.04		
198.0		8.41	3.46	1.63	0.85	0.48	0.29	0.12	0.04		
227.0			4.43	2.09	1.09	0.62	0.37	0.15	0.05		
255.0			5.51	2.60	1.36	0.76	0.46	0.19	0.06		
283.0			6.69	3.16	1.65	0.93	0.56	0.23	0.08		
340.0			9.38	4.43	2.31	1.30	0.78	0.32	0.11	0.04	
396.0				5.89	3.08	1.73	1.04	0.43	0.14	0.06	
453.0				7.54	3.94	2.22	1.33	0.55	0.18	0.08	
510.0					4.90	2.76	1.65	0.68	0.23	0.09	
566.0					5.95	3.35	2.01	0.83	0.28	0.12	0.05

ANEXO 6

Unidades de presión

Presión es la fuerza ejercida por unidad de superficie.

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Superficie}}$$

En el sistema internacional las unidades de presión, de fuerza y de superficie son, respectivamente: pascal (Pa), newton (N) y m^2 .

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

Otra unidad de presión es la atmósfera (atm), que vale 76 cm de altura de mercurio. Como el peso específico del mercurio es 13.5951 g/cm^3 , se deduce:

$$1 \text{ atm} = 13.5951 \text{ g/cm}^3 \times 76 \text{ cm} = 1,033 \text{ g/cm}^2 = 1.03333 \text{ kg/cm}^2$$

Otra unidad de presión es el bar = $10^5 Pa$.

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.03333 \text{ kg/cm}^2 = 1.03333 \times 9.8 \text{ N/cm}^2 = \\ &= 10,333.3 \times 9.8 \text{ N/m}^2 = 1.013 \times 10^5 Pa = 1.013 \text{ bar} \end{aligned}$$

Otra forma de medir la presión es hacerla equivalente a una columna de agua (h) cuya base es 1 cm^2 y cuya altura es h .

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1,033 \text{ g/cm}^2 = 1,033 \text{ cm}^3 = 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times h \text{ cm} \\ h &= 1,033 \text{ cm} = 10.33 \text{ m de columna de agua (mca)} \end{aligned}$$

En la práctica se considera:

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ mca} = 1 \text{ bar} = 10^5 Pa = 100 \text{ kPa} = 0.1 \text{ MPa}$$

Equivalencias de Potencia:

$$\begin{aligned} 1 \text{ CV} &= 0.987 \text{ HP} = 75 \text{ kg m/seg.} \\ 1 \text{ HP} &= 0.7457 \text{ kw} = 76 \text{ kg m/seg.} \end{aligned}$$

Conversión de unidades

En ocasiones se necesita convertir una cantidad medida en una unidad en la cantidad equivalente medida en otra unidad. Por ejemplo, el diámetro de un tubo mide 2.20 pulgadas y queremos saber la medida de ese diámetro en mm.

Se procede de la forma siguiente; mediante una regla de tres simple:

— La relación entre ambas unidades es:

$$\begin{aligned} &1 \text{ pulgada} \text{ — } 25.4 \text{ mm} \\ &2.2 \text{ pulgadas} \text{ — } x \text{ mm} \\ x &= \frac{2.2 \text{ pulgadas} \times 25.4 \text{ mm}}{1 \text{ pulgada}} = 55.88 \text{ mm} \end{aligned}$$

El mismo procedimiento se sigue cuando se trata de convertir unidades múltiples.

Ejemplo

Convertir un caudal de m³/seg en litros/hora.

$$1 \text{ m}^3/\text{seg} = \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \times \frac{\frac{1,000 \text{ litros}}{1 \text{ m}^3}}{\frac{1 \text{ hora}}{3,600 \text{ seg}}} = 1,000 \times 3,600 \text{ litros/hora}$$

Cambio de unidades en una fórmula

Ejemplo

Sea la fórmula:

$$V = \frac{4 Q}{\pi D^2}$$

V = Velocidad, en m/seg.

Q = Caudal, en m³/seg.

D = Diámetro, en m.

Se desea convertir esta fórmula en otra donde:

- V = Velocidad, en m/seg.
- Q' = Caudal, en litros/hora.
- D' = Diámetro, en mm.

Se procede de la siguiente forma:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ m}^3/\text{seg} \dots\dots 1,000 \times 3,600 \text{ litros/hora} \\ Q \gg \dots\dots\dots Q' \quad \gg \quad \gg \end{array} \right\} Q = \frac{Q'}{1,000 \times 3,600}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ m} \dots\dots\dots 1,000 \text{ mm} \\ D \gg \dots\dots\dots D' \quad \gg \end{array} \right\} D = \frac{D'}{1,000}$$

Sustituyendo en la fórmula primitiva:

$$V = \frac{\frac{4 Q'}{1,000 \times 3,600}}{\frac{\pi D'^2}{1,000^2}} = 0.35368 \frac{Q'}{D'^2}$$

Ejemplo

Sea la fórmula:

$$J = \frac{0.00083 Q^{1.75}}{D^{4.75}}$$

- J = Pérdida de carga, en mca/m de tubería.
- Q = Caudal, en m³/seg.
- D = Diámetro, en m.

Convertir esta fórmula en otra donde:

- J = Pérdida de carga, en mca/m de tubería.
- Q' = Caudal, en litros/hora.
- D' = Diámetro, en mm.

Se procede como en el ejemplo anterior:

$$Q = \frac{Q'}{1,000 \times 3,600} \quad D = \frac{D'}{1,000}$$

Sustituyendo valores en la fórmula primitiva:

$$J = \frac{0.00083 \times 1,000^{4.75} \times Q^{1.75}}{1,000^{1.75} \times 3,600^{1.75} \times D'^{4.75}} = 0.496 \frac{Q^{1.75}}{D'^{4.75}}$$

EJERCICIOS SIN RESOLVER

CAPÍTULO 1

1. Calcular la densidad aparente y la porosidad de una muestra de suelo que después de secado pesa 92 g y cuyo volumen es de 76 cm³. Se supone que la densidad real del suelo es 2.60 g/cm³.

Solución: 1.21 g/cm³, porosidad = 53.46%

2. Calcular la humedad gravimétrica de una muestra de suelo que pesa 81 g y después de secado a estufa pesa 63 g.

Solución: 28.57%

3. Calcular la humedad volumétrica de una muestra de suelo que pesa 520 g y tiene un volumen de 360 cm³. Después de secado a estufa el peso se reduce a 476 g.

Solución: 12.22%

4. Un suelo cuya humedad gravimétrica es del 23% tiene una densidad aparente de 1.4. Averiguar su humedad volumétrica.

Solución: 32.2%

5. Una muestra de suelo húmedo pesa 40 gramos y su humedad gravimétrica es del 25%. Averiguar el peso del suelo seco.

Solución: 32 g

6. Calcular la altura de agua que contiene un suelo de 1 m de profundidad, sabiendo que el contenido gravimétrico de humedad de los 40 cm más superficiales es del 15%, y el de los 60 cm restantes es del 25%. Las densidades aparentes respectivas son 1.2 y 1.4 g/cm³.

Solución: 72 + 210 = 282 mm

7. Un suelo franco-arenoso tiene una humedad gravimétrica del 14.3% a la capacidad de campo y del 6.3% en el punto de marchitamiento. La densidad aparente es de 1.50 tm/m^3 . Calcular el volumen de agua disponible en una superficie de un ha y en una profundidad de 80 cm.

Solución: 960 m^3

8. Calcular la reserva de agua fácilmente disponible, expresada en m^3/ha en un suelo con los siguientes datos:

- Capacidad de campo: 250 mm de altura de agua por m de profundidad.
- Punto de marchitamiento: 140 mm de altura de agua por m de profundidad.
- Profundidad del suelo explorado por las raíces: 0.80 m.
- Fracción de abatimiento del agua disponible: 0.65.

Solución: 572 m^3

9. Calcular la reserva de agua fácilmente disponible en un suelo franco en donde se han tomado los datos siguientes:

- Capacidad de campo: 19% en peso de suelo seco.
- Punto de marchitamiento: 10.2% en peso de suelo seco.
- Densidad aparente: 1.40 kg/dm^3 .
- Profundidad del suelo: 0.60 m.

La fracción de abatimiento del agua disponible es 0.7.

Solución: $517.44 \text{ m}^3/\text{ha}$.

10. Se cultiva alfalfa en un suelo franco-arcilloso con profundidad suficiente para que se pueda desarrollar bien el sistema radical. Calcular la reserva de agua fácilmente disponible en un ha. Se tomarán los datos de las tablas 1, 2 y 3 del capítulo 1.

Solución: $1,026 \text{ m}^3$ (Datos: humedad disponible = 19 cm/m , $f = 0.6$, profundidad de las raíces = 0.9 m).

11. Un suelo contiene el 25% en peso de agua y el punto de marchitamiento es del 12% en peso. La densidad aparente es 1.4. Calcular los mm de agua que pueden aprovechar las plantas en una profundidad de 1.20 m.

Solución: 218 mm.

12. En un suelo la capacidad de campo y el punto de marchitamiento son, respectivamente, 23 y 12% de humedad gravimétrica. La densidad aparente es 1.3. Cuando el suelo está en el punto de marchitamiento cae una lluvia de 25 mm. ¿Hasta qué profundidad se humedecerá el suelo a la capacidad de campo?

Solución: 17.4 cm.

CAPÍTULO 2

1. Calcular la ETo media diaria en el mes de julio con los datos siguientes:

- Latitud: 30° N.
- Media de las temperaturas máximas: 25° C.
- Media de las temperaturas mínimas: 22° C.
- Humedad relativa mínima: 30%.
- Humedad relativa máxima: 80%.
- Altitud: 95 m.
- Insolación fuerte media: 11.5 horas.
- Velocidad viento día: 3.3 m/seg.
- Velocidad viento noche: 2.1 m/seg.

Tomar los datos que se precisen para hacer el cálculo, respectivamente, por los métodos de Blaney-Criddle, radiación y Penman.

Solución: Blaney-Criddle ETo = 8.5 mm/día. Radiación ETo = 8.4 mm/día. Penman ETo = 8.8 mm/día.

2. Determinar la ETo mediante un tanque evaporímetro clase A, con los datos siguientes:

- Evaporación media del tanque durante el período considerado: 11.1 mm/día.
- Humedad relativa media. Valoración: media.
- Viento: moderado.
- La cubeta está situada en una parcela de barbecho.
- Distancia a barlovento del barbecho: 10 m.

Solución: ETo = 7.2 mm/día.

CAPÍTULO 3

1. Se riega por goteo un cultivo de durazneros con agua cuya conductividad eléctrica es de 1.5 dS/m. Calcular los requerimientos de lavado sabiendo que la eficiencia de lavado del suelo es del 100%.

Solución: RL = 0.11.

2. Determinar la salinidad del agua de drenaje sabiendo que el agua de riego tiene una conductividad de 1.5 dS/m y que la fracción de lavado es de 0.2.

Solución: CE = 7.5 dS/m.

3. Evaluar los problemas de infiltración que se pueden presentar con un agua cuyo análisis ha dado los siguientes resultados:

- Conductividad a 25° C: 1.5 dS/m.
- Calcio: 5.2 meq/litro
- Magnesio: 2.1 meq/litro.
- Sodio: 7.3 meq/litro.
- Bicarbonato: 5.7 meq/litro.

Solución: RAS corregido = 5.06. Ninguna restricción de uso.

4. Un cultivo de maíz se riega por aspersión con agua cuya conductividad eléctrica es de 1.2 dS/m. Calcular el requerimiento de lavado para que no haya descenso en la producción. El suelo es arenoso con una eficiencia de lavado del 100%.

Solución: RL = 0.16.

5. Se desea regar un cultivo de papa con agua cuya conductividad eléctrica es de 1.8 dS/m. Calcular el requerimiento de lavado para que el descenso de la producción no sobrepase el 10%. El suelo es arcilloso con una eficiencia de lavado del 40%.

Solución: RL real = 0.45.

6. El análisis de un agua de riego da un RAS alto y una conductividad baja. Para mejorar la infiltración del suelo se desea aumentar el contenido de calcio en 3 meq/litro. Calcular la cantidad de yeso que se precisa añadir sabiendo que su pureza es del 80% y que la dosis de riego es de 3,000 m³ por ha.

Solución: 967.5 kg.

7. Se riega un cultivo con agua cuyo contenido en potasio es de 0.2 meq/litro. Calcular la cantidad de potasio que se incorpora al suelo con una dosis anual de riego de 5,000 m³/ha, sabiendo que la eficiencia de riego es del 80%.

Solución: 31.28 kg.

8. Calcular el riesgo de obstrucción en riego localizado con un agua que ha dado el siguiente análisis:

- pH: 6.8.
- Calcio: 13.2 meq/litro.
- Magnesio: 4.3 meq/litro.
- Sodio: 11.5 meq/litro.
- Carbonato: 0.1 meq/litro.
- Bicarbonato: 5.2 meq/litro.

Solución: IL = 0.08. Riesgo: medio.

CAPÍTULO 4

1. En el último decenio se han registrado en una localidad, durante el mes de mayo, las siguientes precipitaciones, en mm: 112 - 83 - 57 - 94 - 90 - 82 - 79 - 68 - 70 - 81. Calcular la probabilidad de que ocurran estas precipitaciones.

Solución: (En %) 9.09 - 18.18 - 27.27 - 36.36 - 45.45 - 54.54 - 63.63 - 72.72 - 81.81 - 90.90.

2. En una determinada localidad durante el período 1971-1990 se han registrado las siguientes precipitaciones mensuales durante el mes de junio: 70 - 61 - 57 - 21 - 58 - 66 - 17 - 72 - 51 - 40 - 28 - 33 - 64 - 97 - 68 - 80 - 71 - 25 - 60 - 77. Calcular la precipitación que tendrá lugar con una probabilidad del 80%, es decir, que 4 de cada 5 años se tengan precipitaciones iguales o mayores que la pedida.

Solución: 28.96 mm.

3. Un cultivo de papa se riega por aspersión con una dosis de 50.2 mm de altura de agua. Las pérdidas por percolación son del 10% y la eficiencia de lavado del 100%. La salinidad del agua es de 1.2 dS/m. Calcular las necesidades totales de agua si deseamos que el rendimiento de la cosecha no se vea afectado por la salinidad. Se considera un coeficiente de uniformidad en el reparto de agua del 80%. No se tienen en cuenta ni la lluvia, ni el escurrimiento, ni la evaporación del agua del chorro.

Solución: 73.82 mm.

4. Supongamos todos los datos del caso anterior, salvo que las pérdidas por percolación son del 25% y la eficiencia de lavado es del 70%. Calcular las necesidades totales de agua.

Solución: 83.66 mm.

5. Calcular la dosis neta de riego sabiendo que la capacidad de campo y el punto de marchitamiento son, respectivamente, 0.27 y 0.11 cm de altura de agua por cada cm de profundidad. La profundidad del suelo es de 70 cm y la fracción de abatimiento del agua disponible vale 0.7.

Solución: 78.4 mm.

6. Calcular la dosis neta de riego sabiendo que la humedad gravimétrica a la capacidad de campo y en el punto de marchitamiento es, respectivamente, del 21.5% y 12.2%. La densidad aparente del suelo seco es 1.25, la profundidad del suelo explorado por las raíces es 0.50 m y la fracción de abatimiento del agua disponible vale 0.6.

Solución: 348.75 m³/ha.

7. Con los datos del ejercicio anterior calcular el intervalo entre riegos sabiendo que las necesidades netas diarias son 7 mm de altura de agua.

Solución: 5 días.

8. La humedad gravimétrica de un suelo en la capacidad de campo y en el punto de marchitamiento es, respectivamente, de 24% y 8%. La densidad aparente es de 1.4, la profundidad es 0.90 m y la fracción de abatimiento del agua disponible vale 0.3. Calcular el intervalo entre riegos sabiendo que las necesidades netas diarias son de 8 mm. El intervalo se ajustará a un número entero de días por exceso con relación al resultado de los cálculos. Calcular también el caudal necesario para una ha, sabiendo que durante el intervalo se deja de regar un día, que la eficiencia de riego es 0.8 y que se riega durante 16 horas al día.

Solución: 8 días, 7.14 m³/hora.

9. En un determinado cultivo se dan los siguientes datos:

<i>Etapa</i>	<i>Necesidades hídricas (ETm)</i>	<i>Factor de respuesta del cultivo (ky)</i>
Período vegetativo	420	0.5
Período de floración	280	1.20
Período formación de cosecha	210	0.80
Período maduración	120	0.20
Total ciclo	1,030	1.05

Se dispone de una reserva de agua que cubre el 80% de sus necesidades. Calcular el rendimiento obtenido (con respecto al rendimiento máximo) cuando el déficit de agua se aplica, respectivamente, a todo el ciclo o al período vegetativo.

Solución: 0.79%, 0.76%.

CAPÍTULO 5

1. En una acequia de sección trapezoidal la base inferior es de 0.40 m y la base superior (medida en la superficie del agua) es de 0.80 m. La pared lateral mojada por el agua tiene una longitud de 0.40 m. Calcular el radio hidráulico.

Solución: 0.172 m.

2. Calcular el radio hidráulico de una acequia semicircular en donde $\alpha = 150^\circ$ y el radio mide 0.50 m.

Solución: 0.202 m.

3. Calcular la velocidad del agua en una acequia de hormigón enlucido, sabiendo que el radio hidráulico es de 0.15 m y que la pendiente es de 0.001 m/m. Hacer el cálculo por las fórmulas de Bazín y Koechlin, respectivamente, y hacer la comprobación con los nomogramas correspondientes.

Solución: Bazín 0.92 m/seg. Koechlin 0.78 m/seg.

4. Calcular el caudal de una acequia rectangular de hormigón enlucido que tiene de base 0.70 m y cuya pendiente es de 0.0009 m/m. La altura del agua es de 0.35 m. (Utilícese la fórmula de Koechlin).

Solución: 0.198 m³/seg.

5. Una acequia de hormigón enlucido tiene un radio hidráulico de 0.15 y una pendiente de 0.001 m/m. Calcular la sección de la acequia sabiendo que el caudal es de 0.605 m³/seg. (Emplear la fórmula de Bazin).

Solución: 0.657 m².

6. Calcular el caudal de una acequia semicircular de hormigón, cuya sección mojada es de 0.395 m², sabiendo que un flotador tarda 12 segundos en recorrer una longitud de 15 m.

Solución: 395 litros/seg.

CAPÍTULO 6

1. Calcular la pérdida de carga en una tubería de fibrocemento de 100 mm de diámetro y 1,200 m de longitud, para un caudal de 15 litros/segundo.

Solución: 39.9 mca.

2. En una tubería de fibrocemento de 200 mm de diámetro y 1,500 m de longitud se admite una pérdida de carga de 30 mca. Calcular el caudal que puede transportar.

Solución: 72.28 litros/segundo.

3. Haciendo uso de la tabla 6, calcular la longitud equivalente de una válvula de retención abierta de 300 mm de diámetro.

Solución: 40.5 m.

4. Calcular la velocidad del agua que discurre por una tubería de 50 mm de diámetro cuando el caudal es de 6 m³ por hora.

Solución: 0.84 m/seg.

5. Una tubería de fibrocemento de 150 mm de diámetro toma agua de una acequia y lo vierte 1.6 km más abajo. Calcular el caudal sabiendo que la diferencia de presión entre los dos extremos de la tubería es de 20 m.

Solución: 25.70 litros/seg.

6. Una tubería de fibrocemento de 500 m de longitud transporta un caudal de 15 litros/seg. con una diferencia de presión entre el origen y el final de 10 mca. Calcular el diámetro, sabiendo que se admite un solo diámetro para toda la conducción.

Solución: 125 mm.

7. En el ejemplo anterior, con el fin de economizar la instalación se ponen dos diámetros de tubería. Calcular esos diámetros y la longitud de tubería en cada caso.
Solución: 197 m de 100 mm y 303 m de 125 mm.
8. Calcular el diámetro de una tubería de fibrocemento que conduce un caudal de 10 litros/seg. a una velocidad de 1.1 m/seg.
Solución: 125 mm (Velocidad a este diámetro comercial: 0.8 m/seg.).
9. Calcular la presión en una tubería de fibrocemento de 100 mm de diámetro cuando se cierra una válvula de paso en 5 segundos. Se sabe que la longitud de la tubería por encima de la válvula es de 200 m, su caudal de 12 litros/seg y la presión de funcionamiento de 2.5 bares.
Solución: 5.74 bares.

CAPÍTULO 7

1. Una bomba centrífuga, situada a una altura de 1,000 m sobre el nivel del mar, eleva agua de un pozo a una temperatura de 10 °C. La altura geométrica entre el nivel del agua y el eje de la bomba es de 3.5 m y las pérdidas de carga en la tubería de la aspiración se estiman en 0.9 mca. La bomba está situada sobre el nivel del agua. Calcular NPSHd.
Solución: 4.7 mca.
2. En una bomba centrífuga cuyas características se reflejan en la figura 7 D, qué velocidad se requiere y qué rendimiento se obtiene para un caudal de 150 litros/seg y una altura manométrica total de 20 mca.
Solución: 720 rpm y 76%.
3. Una bomba centrífuga trabaja a 1,450 revoluciones por minuto, elevando un caudal de 40 litros/segundo a una altura manométrica de 30 m, con un rendimiento del 75%. Calcular el caudal, la altura manométrica y la potencia cuando la bomba trabaja a doble número de revoluciones.
Solución: 80 litros/seg., 120 mca y 170.54 kw.
4. Una bomba centrífuga se instala a 3 m sobre la superficie del agua, en un lugar situado a 500 m de altitud y con una temperatura del agua de 20 °C. Esta bomba requiere una NPSHr de 5.2 mca. ¿Cuál debe ser la máxima pérdida de carga en la tubería de aspiración?
Solución: 1.3 mca.
5. Una bomba centrífuga que trabaja a 1,400 rpm eleva un caudal de 15 litros/seg a una altura manométrica de 40 mca. Calcular la velocidad específica con uno o dos impulsores. ¿Cuál de las dos opciones es la más conveniente?
Solución: 14.89 rpm, 25.04 rpm. La segunda opción es la más conveniente.

6. Se trata de elevar un caudal de 20 litros/seg a una altura manométrica de 24 mca, con una bomba centrífuga accionada con motor eléctrico. Calcular las potencias de la bomba, del motor y del transformador, con los datos siguientes:

- Rendimiento de la bomba: 65%
- Rendimiento del motor: 87%
- Factor de potencia: 0.85

Solución: 7.23 kw, 8.31 kw, 11.25 kva.

7. Se desea elevar un caudal de 100 litros/seg a una altura manométrica de 40 mca. Elegimos la bomba que cumpla esas condiciones con el mejor rendimiento posible, y resulta, según catálogo, que esa bomba necesita una potencia que varía de 35 a 65 CV. Calcular la potencia del motor de diesel, suponiendo que éste tiene un rendimiento del 65%.

Solución: 100 CV.

8. Una bomba centrífuga eleva un caudal de 50 litros/seg a una altura manométrica de 70 mca. Calcular la potencia que se requiere en un motor de diesel sabiendo los siguientes datos:

- Altitud sobre el nivel del mar: 900 m
- Temperatura ambiente: 35 °C
- Pérdidas debidas a transmisiones y servicios: 10%
- Factor de servicio: 15%
- Rendimiento de la bomba: 68%

Solución: 94.23 CV.

CAPÍTULO 8

1. En un tramo de surco de 50 m de longitud y 0.80 m de anchura se hace un ensayo de infiltración. El caudal de entrada al principio del surco es de 55 litros/minuto, y el caudal de salida al final del surco (una vez estabilizado este caudal de salida) es de 35 litros/minuto. Calcular la velocidad de infiltración.

Solución: 30 mm/hora.

2. En el ejemplo anterior calcular el tiempo de riego y el tiempo de mojado, sabiendo los datos siguientes:

- Capacidad de campo: 150 mm de altura de agua por m de profundidad.
- Punto de marchitamiento: 70 mm de altura de agua por m de profundidad.
- Profundidad del suelo explorado por las raíces: 0.80 m.
- Fracción de abatimiento del agua disponible: 0.70 m.
- Tiempo de mojado = 1/4 del tiempo de riego.

Solución: 1.5 horas, 0.37 horas.

3. Calcular la unidad de riego y el número de unidades de riego regadas de una sola vez cuando se tienen los datos siguientes:

- Longitud de los surcos: 120 m.
- Pendiente de los surcos: 0.25%.
- Velocidad de infiltración: 70 litros/minuto y por 100 m.
- Caudal de abastecimiento: 720 litros/minuto.

Solución: 5 surcos, 2 unidades de riego.

4. Para el abastecimiento de agua a cada surco se necesita un caudal de 3 litros/seg durante el tiempo de mojado y de 1 litro/seg durante el tiempo de riego. Calcular el número y diámetro de los sifones necesarios para cada surco, sabiendo que la carga hidrostática de los sifones es de 10 cm.

Solución: Tiempo de mojado: 3 sifones de 4 cm de diámetro. Tiempo de riego: 1 sifón de 4 cm de diámetro.

5. Calcular el tiempo de riego y el caudal necesario para el riego de una faja, sabiendo los datos siguientes:

- Longitud de la faja: 60 m.
- Anchura de la faja: 12 m.
- Lámina de agua aplicada: 70 mm.
- Velocidad de infiltración: 25 mm/hora.
- Pendiente: 0.2%.

Solución: 31 litros/seg, 0.45 horas.

CAPÍTULO 9

1. Calcular la pluviometría de un aspersor sabiendo que el caudal de ese aspersor es de 1,600 litros/hora, que la separación de los ramales laterales es de 18 m y que la separación de aspersores dentro de cada ramal es de 12 m.

Solución: 7.40 mm/hora.

2. En un diseño de riego por aspersión calcular las necesidades totales de riego con los datos siguientes:

- Demanda de agua diaria: 6 mm.
- Intervalo entre riegos: 7 días.
- Conductividad del agua: 1.1 dS/m.
- Conductividad del extracto de saturación del suelo: 1.7 dS/m.
- Eficacia de aplicación que incluye: pérdidas por percolación, evaporación en el chorro y falta de uniformidad de aplicación: 0.80.

Solución: 54.94 mm.

3. Una parcela se riega por aspersión cada 5 días con una dosis de 32 mm. Calcular la duración del riego sabiendo que la pluviometría de los aspersores es de 5.5 mm/hora.

Solución: 5.8 horas.

4. Calcular el diámetro de un lateral horizontal de aluminio en riego por aspersión, con los datos siguientes:

- Número de aspersores: 10.
- Caudal del aspersor: 4 m³/hora.
- Presión de trabajo: 3 kg/cm² (30 mca).
- Separación de aspersores: 12 m.
- Distancia del primer aspersor al origen: 6 m.

Solución: 2³/₄ pulgadas.

5. Calcular el diámetro del lateral del ejemplo anterior en los siguientes casos:

- 1) El lateral es ascendente, con un desnivel de 4 m entre ambos extremos.
- 2) El lateral es descendente, con un desnivel de 4 m entre ambos extremos.

Solución: Ascendente: 3¹/₂ pulgadas. Descendente: 2¹/₂ pulgadas.

6. Calcular la presión necesaria en el origen en el ejemplo anterior, caso de ramal descendente, suponiendo que la altura del tubo portaaspersor es de 0.80 m.

Solución: 35.40 mca.

CAPÍTULO 10

1. Calcular la longitud de un depósito decantador para eliminar partículas minerales mayores de 75 micras. Se dan los datos siguientes:

- Caudal de entrada: 50 litros/segundo.
- Velocidad de sedimentación: 0.45 cm/seg.
- Factor de almacenaje: 2
- Longitud del depósito = 5 veces su anchura.

Solución: 10.50 m.

2. Calcular el diámetro de cada uno de los dos filtros de arena que se instalan en un cabezal de riego por goteo, sabiendo que el diámetro del gotero es de 0.85 mm y que el caudal es de 90 m³/hora.

Solución: 0.97 m.

3. Calcular el tamaño del orificio y la superficie filtrante de un filtro de malla de acero, con los datos siguientes:
- Caudal: $60 \text{ m}^3/\text{hora}$.
 - Diámetro del gotero: 0.95 mm .
 - Se aumenta un 20% el caudal, como margen de seguridad.
 - Area efectiva de filtrado = 0.3% del área total.
 - Caudal recomendable: $1,800 \text{ m}^3/\text{hora}$.

Solución: 135 micras, $1,333 \text{ cm}^2$.

4. En una plantación de 5 hectáreas de duraznero el marco es de $5 \times 5 \text{ m}$ y el diámetro de los árboles 3 m . Calcular las necesidades netas de riego sabiendo que la evapotranspiración diaria es 5.1 mm y que la plantación está rodeada por un terreno sin cultivo.

Solución: $k_1 = 0.38$. $k_2 = 1.2$. $k_3 = 0.93$, $N_n = 2.16 \text{ mm}$.

5. Calcular las necesidades totales de riego de un cultivo con los datos siguientes:
- Necesidades netas: 6.1 mm .
 - Conductividad del agua: 1.5 dS/m .
 - Conductividad del extracto de saturación para el cual el descenso de producción es del 100%: 7.3 dS/m .
 - Coeficiente de uniformidad de riego: 0.80 .
 - Se considera una eficiencia de lavado del 100%.

Solución: $N_t = 8.47 \text{ mm}$.

6. En una instalación de riego por goteo, con 8 goteros por planta y un coeficiente de variación de 0.07 , se pretende conseguir un coeficiente de uniformidad de 0.9 . Calcular el caudal del emisor de mínimo caudal sabiendo que el caudal medio de los goteros es 4.20 litros/hora .

Solución: 3.9 litros/hora .

7. Una instalación de riego por goteo tiene un caudal medio de 4.4 litros/hora por emisor y un caudal mínimo de 4 litros/hora . El coeficiente de variación de los emisores es de 0.05 y el coeficiente de uniformidad igual a 0.9 . Calcular el número de emisores por planta.

Solución: 4.

8. Calcular el número de emisores por planta en una plantación de frutales, en donde se dan los siguientes datos:

- Marco de plantación: $5 \times 3 \text{ m}$.
- Porcentaje de suelo mojado: 30% .
- Caudal del emisor: 4 litros/hora .
- Suelo de textura media.
- Hacer uso de los datos de la tabla 5.

Solución: 5 emisores.

9. Con los datos del ejercicio anterior calcular el tiempo de riego sabiendo que cada árbol necesita 50 litros/día y que se riega una vez por día.

Solución: 2.5 horas.

10. Calcular el diámetro de un lateral horizontal de PE de baja densidad y presión de 2.5 atmósferas, con los datos siguientes:

- Longitud del lateral: 40 m.
- Separación de goteros: 1 m.
- Distancia del primer gotero al origen del lateral: 1 m.
- Caudal de los goteros: 4 litros/hora.
- Presión de trabajo de los goteros: 10 mca.
- Exponente de descarga de los goteros 0.6.
- Las pérdidas singulares en las conexiones de los emisores representan el 20% de las pérdidas por fricción.

Solución: 12.5 mm (diámetro interior 10.3 mm).

11. De una tubería terciaria derivan 40 laterales (portagoteros) de las características del ejercicio anterior. La separación de laterales es de 3 m y la distancia del primer lateral al origen es de 3 m. Calcular el diámetro de la tubería terciaria en polietileno de baja densidad y 4 atmósferas de presión. Se supone que las pérdidas en las conexiones de los laterales son el 20% de las pérdidas por fricción.

Solución: 63 mm (diámetro interior 55 mm).

CAPÍTULO 11

1. Un cultivo de pimiento en invernadero necesita un riego diario de 6 m^3 . El tiempo de riego es de 5 horas y el de fertilización es de 4 horas. El umbral de salinidad del pimiento es de 0.96 gramos/litro y la salinidad del agua es de 0.3 gramos/litro. Calcular la cantidad máxima de fertilizante que se puede agregar en cada riego.

Solución: 3.16 kg.

2. En el cultivo del ejemplo anterior calcular la frecuencia de fertilización sabiendo que las necesidades semanales del cultivo son las siguientes:

2.5 kg de N.

1.1 kg de $\text{P}_2 \text{O}_5$

2.2 kg de $\text{K}_2 \text{O}$

Se fertiliza con nitrato amónico (35.5 - 0 - 0), fosfato monoamónico (12 - 61 - 0) y nitrato potásico (3 - 0 - 46).

Solución: 4 días por semana.

3. Una plantación de frutales se riega cada 2 días durante 3 horas. En cada riego se incorporan 15 kg de sulfato potásico, cuya solubilidad es de 110 gramos/litro. Calcular la capacidad del dosificador de fertilizante.

Solución: 45.4 litros/hora.

CAPÍTULO 12

1. Para regar una parcela se ha comprado un equipo de riego por aspersión que ha costado 2,200,000 pts. Se supone una vida útil de 15 años y un costo de mantenimiento del 2% de la inversión. Calcular los costos fijos anuales, suponiendo un interés del 10%.

Solución: 333,240 pesetas.

2. Un pozo suministra un caudal de 80 litros por segundo durante 3,300 horas de funcionamiento. La altura manométrica de elevación es de 37 m y el costo de la energía es de 11.50 pts el kw/hora. El rendimiento del grupo es del 67%. Calcular cómo influye el costo de la energía en el precio del agua.

Solución: 1.72 pts/m³.

3. Para suministrar agua a unos regantes se dispone de una instalación cuya inversión anual fue de 12,500,000 pts. Los cobros anuales ascienden a 7,235,000 pts y los gastos a 4,720,000 pts. Se considera una duración de la instalación de 25 años y un interés del capital del 10%. Calcular el valor actual neto.

Solución: 10,328,756 pesetas.

ANEXOS

1. El diámetro de una tubería varía gradualmente de 0.40 m en B a 0.20 m en A. El punto A está 4.50 m más bajo que el B. Calcular la diferencia de presiones en A y B cuando circula un caudal de 0.2 m/seg. Se supone despreciable la pérdida de carga.

Solución: 2.56 m.

2. El diámetro de una tubería varía gradualmente de 0.40 m en B a 0.20 m en A. El punto A está 4.50 m más bajo que el B. Si la presión en A es 0.7 kg/cm² y en B es de 0.6 kg/cm², calcular el caudal suponiendo despreciable la pérdida de carga.

Solución: 269 litros/seg.

3. El diámetro de una tubería varía gradualmente de 0.40 m en B a 0.20 m en A. El punto A está 4.50 m más bajo que el B. Determinar el caudal suponiendo que existe la misma presión en los puntos A y B y que se desprecia la pérdida de carga.

Solución: 304 litros/seg.

4. El diámetro de una tubería varía gradualmente de 0.40 m en B a 0.20 m en A. La presión en A es 0.8 kg/cm^2 y la presión en B es de 0.6 kg/cm^2 . Suponiendo un caudal de 220 litros/seg., calcular la diferencia de nivel entre los puntos B y A. Despréciese la pérdida de carga.

Solución: 4.34 m.

Programas Educativos, S.A. de C.V.
Calz. de Chabacano No. 65, Local A
Col. Asturias, C.P. 06850, México, D.F.
Fecha: Diciembre de 1999
Empresa Certificada por el
Instituto Mexicano de Normalización
y Certificación A.C., bajo la Norma
ISO-9002: 1994/NMX-CC-004: 1995
con el No. de Registro RSC-048



La práctica del riego consiste esencialmente en reponer al suelo el agua que en cultivo necesita para su crecimiento, desarrollo y para mejorar su rendimiento, supliendo total o parcialmente la insuficiencia de lluvias. ¿Cuándo, cuánto, cómo regar? La respuesta a estas preguntas es el objetivo del riego, que se fundamenta en el conocimiento de la relaciones suelo/agua/planta y en calcular las necesidades del agua a partir de datos del suelo, el clima y el cultivo. Para que el riego sea rentable se necesita una tecnología eficiente, ya que, por lo general, se requiere de inversiones elevadas. Por otra parte, el uso irracional del agua puede generar problemas o agravar los ya existentes en lo relativo a erosión, drenaje, salinización, contaminación de mantos acuíferos, disminución en la calidad y cantidad de agua disponible, etc.

En esta publicación se explican los principios básicos para el manejo del agua, teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente citadas. Se incorporan diversos ejemplos de cálculos sencillos y se dan recomendaciones para conseguir la máxima eficiencia de riego en los sistemas de riego superficial, aspersión y goteo. Se incluyen también datos de gran utilidad para la práctica cotidiana, dando preferencia, en numerosas ocasiones, a los datos y métodos recomendados por la FAO, necesarios para la operación y selección adecuada del sistema de riego.

El libro está escrito en un lenguaje sencillo, y cuenta con numerosas figuras que facilitan la comprensión de los temas.



www.mundiprensa.com



SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
CENTRO DE PUBLICACIONES
CALLE DE TOLUCA, 100, CDMX, MEXICO