

Fundamentos y diseño de
SISTEMAS
DE RIEGO

Luis A. Gurovich

Fundamentos y diseño de
**SISTEMAS
DE RIEGO**

Luis A. Gurovich



**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA
AGRICULTURA**

San José, Costa Rica 1985

© Luis Alberto Gurovich
© para esta primera edición, IICA. 1985

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin permiso del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Composición de texto: LEVANTEX, S.A.
Diseño de cubierta: Mario Loaiza

Editor de la obra: Tomás Saraví A.
Editor de la Serie: Julio Escoto B.

IICA
LME-59 Gurovich, Luis Alberto.
Fundamentos y diseño de sistemas de riego. — San José, Costa Rica : IICA, 1985.
433 p. — (IICA / Serie de libros y materiales educativos ; no. 59).

ISBN 92-9039-064-6

1. Ingeniería hidráulica. I. Título. II. Serie.

BIBLIOTECA P12

072192



DEWEY 620.72



Serie de Libros y Materiales Educativos No. 59

Este libro fue publicado por el Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola —CIDIA— del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura —IICA—. La Serie de Libros y Materiales Educativos tiene como fin contribuir al desarrollo agrícola del continente americano.

San José, Costa Rica, 1985

AGRADECIMIENTOS

Debo expresar mi agradecimiento al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA, que a través de su Serie de Libros y Materiales Educativos permitió que esta iniciativa de publicar un texto de Riego se hiciera realidad. Asimismo mi reconocimiento a la Facultad de Agronomía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, que me animó y facilitó recursos y tiempo para la preparación del manuscrito, como homenaje a los 75 años de su fundación.

Mi especial reconocimiento y homenaje para el Dr. D. Hillel, a quien nunca tuve por profesor pero siempre por maestro. A través de sus numerosas publicaciones científicas y en especial su libro Soil and Water: Physical Principles and Practices, debo la base de mi formación y especialización en los temas de Física de Suelos y Riego; ellos me han enseñado a considerar al suelo, el agua, la atmósfera y la planta como componentes de un sistema dinámico.

*a mi esposa e hijos, que
animaron este esfuerzo*

CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS	v
INDICE DE FIGURAS	ix
PROLOGO	xv
CAPITULO 1 CONCEPTOS DE RIEGO	7
CAPITULO 2 CICLO HIDROLOGICO Y CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	29
CAPITULO 3 EL AGUA EN EL SUELO	59
CAPITULO 4 MEDICION DEL AGUA EN EL SUELO	95
CAPITULO 5 FLUJO DE AGUA EN EL SUELO	119
CAPITULO 6 INFILTRACION DEL AGUA DURANTE EL RIEGO	143
CAPITULO 7 EVAPOTRANSPIRACION, DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA LOS CULTIVOS Y FRECUENCIA DE RIEGO	177
CAPITULO 8 EFICIENCIA DE RIEGO	203

CAPITULO 9	
ESTRUCTURAS DE RIEGO EN EL PREDIO AGRICOLA	231
CAPITULO 10	
ELECCION DEL METODO DE RIEGO	267
CAPITULO 11	
RIEGO POR TENDIDO Y RIEGO POR BORDES	289
CAPITULO 12	
RIEGO POR SURCOS	333
CAPITULO 13	
RIEGO POR ASPERSION	363
CAPITULO 14	
RIEGO POR GOTEO	397

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N°	Página
1 Incremento del área regada en el mundo.	9
2 Incremento del área regada en América.	10
3 Aumentos de rendimiento de cultivos de secano cuando son incorporados al riego.	18
4 Rendimientos obtenidos con una práctica mejorada de riego, basada en las condiciones de suelo-cultivo y clima, comparados con el riego tradicional.	19
5 Necesidad de lavado con relación a las conductividades eléctricas de agua para riego y aguas de drenaje.	46
6 Límites permisibles de Boro para aguas de riego.	49
7 Hoja de registros para la determinación de infiltración en el suelo mediante cilindros infiltrómetros.	161
8 Hoja para la determinación de infiltración de suelo mediante surcos.	167
9 Fórmulas y enfoques para estimar los requerimientos de agua de los cultivos.	182
10 Coeficientes estacionales de uso-consumo (K_c) para diferentes cultivos regados.	183
11 Términos utilizados para describir eficiencias de riego y eficiencias de uso del agua por los cultivos.	214

12	Eficiencia de riego, de rendimiento y de uso de agua.	216
13	Eficiencias posibles de alcanzar con diferentes métodos de riego, en una situación óptima de diseño y operación.	218
14	Tasas de riego actuales y potenciales para la temporada de riego en la zona central de Chile.	221
15	Caudal (litros/seg) para diferentes sifones y condiciones de operación.	243
16	Métodos de riego superficial y condiciones de uso.	272
17	Métodos de riego mecánico y sus condiciones de uso.	274
18	Velocidad de infiltración.	329
19	Curvas de avance y recesión.	330
20	Longitudes máximas propuestas de surcos cultivados para diferentes suelos, pendientes y profundidades de agua (metros de largo máximo del surco).	343
21	Relación entre gasto máximo no erosivo y pendientes críticas en surcos.	344
22	Caudal a través de pequeños sifones y tubos cortos (en litros por segundo).	346
23	Resultados obtenidos en experiencias de velocidades de infiltración por surcos.	350
24.	Tipos de aspersores según presión en libras/pulgadas.	380
25	Factor de disminución del diámetro de tiro de los aspersores de acuerdo con la velocidad del viento.	383
26	Factor de Christiansen por el cual hay que multiplicar H_1 en tuberías para obtener H_1 en las líneas laterales con aspersores.	386

- | | | |
|-----------|---|------------|
| 27 | Porcentaje de suelo humedecido por varias descargas y espaciamentos de una línea lateral única, con goteros uniformemente separados, al aplicarse 40 mm de agua. | 410 |
| 28 | Profundidad de enraizamiento y espaciamiento entre plantas, usada comúnmente en el diseño de sistemas de riego por goteo. | 412 |

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Perfil de mojado del suelo en relación con el desarrollo y producción de los cultivos.	16
2	Esquema del ciclo hidrológico.	33
3	Esquema del ciclo de escorrentía.	34
4	Esquema de los procesos hidrológicos de un suelo agrícola.	37
5	Esquema de los procesos hidrológicos de la zona radicular de un cultivo.	39
6	Esquema de los procesos hidrológicos de una región.	40
7	Esquema de los procesos hidrológicos de un embalse de acumulación.	42
8	Diagrama para la clasificación de las aguas de riego.	51
9	Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases.	63
10	Esquema del concepto de potencial de referencia del agua en el suelo.	71
11	Esquema de posibles potenciales de presión en el agua del suelo.	74

12	Fenómenos de adsorción y capilaridad en la retención de agua por el suelo.	76
13	Ilustración esquemática de las partes de un tensiómetro.	81
14	El efecto de la textura en la retención de agua del suelo.	85
15	El efecto de la estructura en la retención de agua del suelo.	87
16	Aparato de presión para curvas características de humedad.	88
17	Esquema de muestreo de suelo en terreno.	99
18	Diagrama esquemático de una instalación de bloques de "bouyoucos".	102
19	Diagrama esquemático de un aspersor de neutrones.	105
20	Curva de calibración típica de un aspersor de neutrones.	106
21	Curva de calibración de un tensiómetro.	108
22	Gráfica de lecturas de un tensiómetro a 30 cm durante la temporada de riego.	111
23	Flujo en una columna horizontal saturada.	122
24	Flujo descendente en una columna vertical saturada.	126
25	Flujo ascendente en una columna vertical saturada.	127
26	Modelo esquemático del flujo no saturado en una columna horizontal.	133
27	Relación entre gradiente hidráulica $\Delta H/\Delta X$ y flujo no saturado q en el suelo.	134

28	Dependencia de la conductividad sobre la succión en suelos de diferentes texturas (escala log/log).	135
29	Representación del perfil de humedad durante el proceso de infiltración.	146
30	Familias de curvas de contenidos de agua en el suelo durante la infiltración.	147
31	Medición del caudal de entrada y salida en el surco infiltrómetro.	164
32	Las tres hipótesis clásicas acerca de la disponibilidad de agua para las plantas.	187
33	Variación de la succión del agua en el suelo durante ciclos de riego sucesivos.	189
34	Relación entre velocidad de evapotranspiración del cultivo y contenido de agua en la zona radicular bajo diferentes condiciones de clima.	193
35	Curvas de tensión del agua en el suelo durante la estación de crecimiento del cultivo.	195
36	Perfiles esquemáticos que resultan de diferentes prácticas de riego, en relación con la eficiencia.	212
37	Eficiencia de aplicación del agua de riego en relación con el método de riego y la textura del suelo.	219
38	Salida de tubo de hormigón desde una acequia de conducción a una acequia alimentadora.	236
39	Salida de tubo de hormigón con obturador en un extremo.	236
40	Retenciones de agua en la acequia alimentadora.	238
41	Riego de cultivos en hileras con cajas derivadoras y tomas de madera.	240
42	Cajas de distribución de agua de riego.	241

43	Uso de sifones en riego por surcos.	244
44	Un tipo de canoa de conducción de agua en el predio.	247
45	Sifón invertido para conducción de agua bajo obstáculos.	247
46	Esquema de vertedero con contracción lateral y descarga libre.	252
47	Vertedero trapecial de descarga libre.	254
48	Conducción elevada de aforo tipo Parshall.	258
49	Curva de avance del frente de agua durante el riego por tendido.	305
50	Perfil mojado de suelo en el riego por bordes.	316
51	Diagrama de diseño para un sistema de riego por aspersión.	370
52	Ubicación de la línea principal en relación con la dirección del viento dominante.	376
53	Distribución de la aplicación de agua desde aspersores.	382
54	Ubicación de la línea principal y recorrido del agua para el caso de dos laterales.	389
55	Plano de un sistema de riego por goteo con la fuente de agua en el centro del campo.	398
56	Formas típicas en que se conecta los emisores (goteros) a los laterales.	400
57	Un típico cabezal de control de un equipo de riego por goteo.	401
58	Flujo de agua en el suelo a partir de un gotero.	403

59	Diseño del sistema de riego por goteo.	412
60	Descarga de diversos tipos de emisor para diferentes cargas de presión.	417
61	Cargas de presión en la red de cañerías en el sistema de riego por goteo (superficie con pendiente).	420

PRÓLOGO

El desarrollo económico y social de un país depende de sus posibilidades de alcanzar una producción agropecuaria adecuada a sus necesidades de alimento y tentativamente contar con una sobreproducción para exportar a otros países. Para lograr esos niveles de producción se requiere incorporar superficies a la agricultura a través de proyectos de riego y mejorar los sistemas y prácticas de riego existentes, con el fin de asegurar un uso eficiente de este recurso escaso y la continua productividad de los terrenos regados. Tanto el agua como el suelo son recursos fundamentales del medio ambiente y de la agricultura. La creciente presión de la población, asistida de su derecho a alimentarse adecuadamente, ha motivado que esos recursos se tornen cada vez más escasos o ha llevado a su abuso en muchas partes del mundo; la necesidad de manejar adecuadamente estos recursos en forma continua es una de las tareas vitales de nuestra época.

La aplicación del agua a suelos agrícolas con el propósito de regar los cultivos es uno de los usos alternativos que tiene en muchas zonas. Es esencial que se use efectiva y eficientemente con ese propósito, especialmente cuando su disponibilidad es limitada.

Un reciente informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que un manejo más adecuado de los recursos de agua —incluyendo las prácticas de riego y drenaje— puede representar un aumento más importante de los diferentes cultivos agrícolas en las áreas regadas del mundo que cualquier otra práctica agrícola. La ciencia y la tecnología de suelos, agua, cultivos e ingeniería agrícola, están hoy suficientemente avanzados; si son implementados adecuadamente pueden transformar la práctica del riego —un arte antiguo— en una técnica moderna de producción.

Las prácticas y las necesidades de riego varían considerablemente según las áreas. Esto complica el diseño y la planificación de nuevos proyectos y la operación de los sistemas actuales, tanto a nivel regional como en un predio determinado. La técnica más adecuada es la resultante de la combinación de las condiciones de suelo, clima, disponibilidad de agua y los cultivos que van a regarse; el conocimiento de los componentes de ese sistema y de las relaciones que entre ellos se establecen en la producción agrícola permite predecir el comportamiento futuro y diseñar el sistema de riego que en forma más económica aumente los rendimientos de los cultivos, al asegurar a las plantas una adecuada y oportuna disponibilidad de agua.

La profundización y difusión del conocimiento de las propiedades del sistema suelo-agua en relación con las condiciones de clima, crecimiento de las plantas, ciclo hidrológico y manejo del agua de riego es una actividad de significativa importancia; de allí que este libro sea el resultado de mi experiencia en la enseñanza de los principios fundamentales y de los métodos de riego que derivan de su correcta aplicación en situaciones específicas de campo. Esta experiencia docente se ha desarrollado en varios niveles, con agrónomos, productores agrícolas, estudiantes de Agronomía e Ingeniería, técnicos agrícolas, extensionistas, entre otros. Era evidente la necesidad de un texto básico, de lectura sencilla, razonablemente integrador de los modernos conocimientos del

sistema suelo-agua-planta-atmósfera y las interacciones físicas resultantes de la operación del riego, dirigido a los lectores de América Latina.

El objetivo central de este libro es profundizar los conocimientos de riego de los técnicos y profesionales del agro y cooperar al mejoramiento del uso del agua de riego en la agricultura. Aquellos lectores que completen los ejercicios y preguntas planteadas y estudien con profundidad las materias tratadas estarán en condiciones de comprender los principios físicos fundamentales de las relaciones entre el suelo, las plantas, el agua y el clima y aplicar estos principios en la selección, el diseño, la construcción, la operación y la evaluación de diferentes métodos de riego.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS DE RIEGO

BREVE HISTORIA DEL RIEGO Y SU ESTADO ACTUAL EN AMERICA LATINA

El riego agrícola es una de las prácticas más antiguas utilizadas por el hombre para producir sus alimentos. De acuerdo con la Biblia el riego se originó al mismo tiempo que el hombre y en el mismo lugar. El Génesis (2:10) indica: *De Edén salía un río que regaba el jardín; y desde allí se dividía y se formaban de él cuatro brazos.*

Durante la Edad de Bronce, iniciada alrededor de 3 500 años a.C., las primeras grandes obras de riego se desarrollaron en Egipto y Mesopotamia. Cuando el hombre descubrió algunos métodos para producir alimentos se hizo necesario su establecimiento en un lugar, por lo menos durante el tiempo que demora el desarrollo completo de un cultivo (desde el momento de la siembra hasta la cosecha.) Los descubrimientos arqueológicos indican que esto ocurrió alrededor de

5 000 años a.C. en los territorios hoy ocupados por Egipto, Irán, China, Turquía, España, Inglaterra, Perú, México y el Sur de los Estados Unidos.

Las comunidades que vivieron en zonas donde la lluvia era abundante y bien distribuida, y bajo otras condiciones favorables de la naturaleza, pudieron cultivar sus alimentos sin necesidad de preocuparse por el riego; en aquellas zonas en donde la cantidad y la distribución del agua no correspondían a los requerimientos de agua de los cultivos, los seres humanos debieron desde muy temprano preocuparse por asegurar el abastecimiento de agua para las superficies cultivadas.

Al principio eran inundados los terrenos más planos; luego se construyeron terrazas que también se regaron por inundación, con métodos que variaron en eficiencia de acuerdo con la habilidad, el ingenio y la necesidad del hombre de economizar agua. Con el fin de aumentar la producción de alimentos el hombre se vió forzado a variar el curso de pequeñas corrientes de agua, hacer diques de contención para almacenar y regular sus recursos, emparejar las superficies que quería regar, elevar agua desde el suelo hacia la superficie y poner en práctica varias técnicas sencillas que son los rudimentos de las técnicas modernas de riego y drenaje; eso le permitió mantener agua para realizar una agricultura menos riesgosa y más intensiva. Fukuda² hace una excelente revisión de la historia del riego en el mundo desde sus orígenes hasta la actualidad, señalando los sistemas que se desarrollaron en las civilizaciones de los ríos principales de la antigüedad: el Nilo, el Tigris, el Eufrates, el Amarillo y el Indo, y cómo hubo un intercambio constante de conocimientos de riego entre esas civilizaciones, principalmente desde aquellas de ambientes más áridos hacia las de climas más húmedos.

El incremento en la superficie regada del mundo se presenta en el Cuadro 1. En el siglo XIX los proyectos de riego a gran escala en la India, Egipto y otras áreas incrementaron el área de riego en seis veces; los progresos de la Hidráulica hicieron enorme impacto en la planificación, diseño y construcción de varios sistemas de riego. En el siglo XX el progreso del riego fue impresionante, sobre todo después de la segunda guerra mundial.

Ese desarrollo se dirigió a estructuras hidráulicas —embalses de acumulación o regulación, y canales principales de conducción— pero no se prestó suficiente atención a factores como el manejo de agua en

predios agrícolas o la relación entre el suelo, la planta, el agua y el clima. Se ha generado una descomposición que favoreció a enormes estructuras de riego cuyo aprovechamiento no siempre fue adecuado; en consecuencia muchos proyectos regionales de riego quedaron muy atrás en sus resultados en relación con las expectativas de incremento en la producción de alimentos planteadas durante la etapa de planificación y estudio de factibilidad.

CUADRO N° 1 Incremento del área regada en el mundo.

Año	Area regada (10 ⁶ hectáreas)
1800	8
1900	48
1949	92
1959	149
1970	sobre 200

Fuente: Fukuda².

Sólo a partir de las últimas décadas se ha enfrentado el riego con un enfoque científico racional que permita utilizar el recurso agua con mayor eficiencia, minimizando efectos adversos como la erosión, el drenaje deficiente y la salinización de los suelos.

En América Latina las obras de riego y drenaje son comparativamente nuevas y han sido ejecutadas principalmente por el esfuerzo individual y por la empresa privada con el apoyo del Estado, acentuándose esta situación cada vez más en los últimos años. En muchos países se ha introducido la tecnología de riego más moderna, que coexiste en gran cantidad de casos con técnicas muy primitivas desarrolladas por los indígenas antes de la colonización española o introducidas por los conquistadores hace más de 400 años.

En general se requiere en toda América Latina una recolección y reordenamiento de elementos básicos necesarios para desarrollar en forma racional el riego y el drenaje: datos hidrológicos, características hidromecánicas de los suelos, intensificación y modernización

de la tecnología de aplicación del agua por los agricultores en sus predios y reorganización de la administración del agua por el Estado y los usuarios. Problemas como la falta de fondos, el deficiente manejo de la tierra y la baja rentabilidad de la agricultura han limitado el progreso del riego y el drenaje en nuestra región.

Los países con superficies regadas de mayor importancia en América Latina son México (4.48 millones de hectáreas), Argentina (1.86 millones de hectáreas), Chile (1.16 millones de hectáreas), Perú (1.12 millones de hectáreas), Brasil (950 000 hectáreas en 1970), Venezuela (314 000 hectáreas). En éstos y otros países del Continente el crecimiento de la superficie regada es altamente significativo como se aprecia en el Cuadro 2.

CUADRO N° 2 Incremento del área regada en América.

Año	México	Area regada América del Sur	(10 ⁶ hectáreas) Total
1961	3.70	5.4	9.1
1966	3.75	5.7	9.45
1970	3.95	6.1	10.05
1975	4.48	6.6	11.08

Fuente: FAO⁴

El incremento en las áreas regadas mostrado en el Cuadro 2 fue resultado de la puesta en marcha de obras de regadío de dimensiones y costos que significaron esfuerzos humanos y económicos de importancia. En la casi generalidad de los casos, sin embargo, no se han desarrollado esfuerzos significativos para aprovechar íntegramente las posibilidades de estas obras en su utilización a nivel predial, sobre todo porque se ha supuesto que dicha implementación —llamada tecnificación del riego— sería consecuencia natural de haber puesto el agua a disposición de los agricultores de la región. Los resultados económicos esperados para estos proyectos hidráulicos no se han alcanzado, incluso varias décadas después de la construcción de embalses o canales, debido especialmente a que no se ha previsto

inversiones y esfuerzos con el fin de implementar una aplicación racional del agua embalsada y conducida a nivel predial.

Por varias causas económicas y técnicas los agricultores no mejoraron sus sistemas y prácticas de riego en aquellas áreas en que se reguló el riego con algún embalse o canal matriz; tampoco se han desarrollado prácticas de riego adecuadas en aquellas áreas incorporadas al riego. Una de las principales causas detectadas de este deficiente uso del agua —o falta de tecnología de riego— es el desconocimiento por parte de los agricultores de alternativas diferentes y métodos de riego novedosos, más adaptados a sus condiciones específicas. Este desconocimiento proviene en gran medida del reducido número de profesionales que se dedican a la extensión en riego a nivel estatal, universitario o privado; no sucede lo mismo en otras tecnologías como la producción y uso de semillas adecuadas, el uso de maquinaria agrícola especializada, el uso de pesticidas, entre otras, en las cuales la agricultura latinoamericana está en una posición comparativamente moderna respecto al resto del mundo.

El reducido interés por aplicar una tecnología de riego adecuada, tanto por parte de los agricultores como de los profesionales relacionados con la agricultura, se debe a que no existe conciencia entre éstos de que el riego tiene una tecnología altamente rentable; no se advierte que es posible obtener significativos aumentos de rendimiento y notorias mejoras en calidad de los productos agrícolas con una tecnología de riego racional, adecuada a cada situación específica. A diferencia de otras tecnologías las inversiones en riego tienen la ventaja de poder ser escalonadas y progresivas en el tiempo; por pequeña que sea la tecnología de riego incorporada en la producción siempre habrá un aumento proporcional de rendimiento, si otro factor de la producción no pasa a ser limitante.

Merced a esfuerzos aislados y pioneros de algunas instituciones estatales y agricultores privados, en los últimos tiempos se ha podido conseguir aumentos sustanciales de rendimientos en diversas explotaciones agrícolas con la incorporación de una tecnología de riego de costo reducido. Los niveles de aumento logrados permiten alcanzar aquella productividad potencial de los cultivos que justifica la realización de proyectos de riego de gran envergadura, a diferencia de los rendimientos tradicionales que se obtienen sin tecnificar el riego y que motivan que cualquier proyecto quede muy por debajo de las expectativas económicas que pudieran haberlo justificado.

Las principales líneas de trabajo que deben desarrollarse para incrementar la producción agrícola por medio del riego pueden resumirse así:

1. Aumento de la eficiencia en el uso del agua disponible, o sea evitar las pérdidas de agua durante el riego. Estas pérdidas no sólo ocurren en la superficie agrícola que se riega; se producen además importantes pérdidas a través de la conducción de los canales de agua, en los que ocurren derrames o infiltraciones de tal magnitud que muchas veces ni siquiera la mitad del agua que entra a un canal llega a la superficie de riego a que está destinada. Debe aumentarse también la eficiencia en la utilización permanente de las aguas de riego; esa práctica no es habitual, ya que durante las horas de la noche el agua no es utilizada para el riego y corre por los canales hacia otras zonas.
2. Mejoramiento del abastecimiento de agua en las áreas de riego eventual; es necesario regular la disponibilidad total de una cierta zona para asegurar el riego de superficies agrícolas que actualmente son de riego eventual. Esto se consigue con la construcción de embalses de regulación y la ampliación y mejoramiento de otras obras hidráulicas.
3. Incorporación al regadío de suelos de secano; ello requiere también inversiones en grandes obras de infraestructura de riego.

Generalmente la primera línea de acción resulta más económica y factible, y tiene un retorno económico mayor y más rápido dada la baja eficiencia actual de utilización del agua de riego, a la que se hará referencia especialmente en un Capítulo posterior. El desarrollo de la primera línea de acción, que compete principalmente a ingenieros agrónomos, prácticos, técnicos agrícolas y productores o agricultores, requiere que se aplique en el riego criterios modernos, basados en el comportamiento del sistema físico que se debe regar.

CONCEPTO DEL RIEGO AGRICOLA

El agricultor de riego debe formularse cuatro preguntas fundamentales; las respuestas permiten el uso eficiente y racional del agua y son la esencia de este libro. Esas preguntas son:

- 1) Por qué regar, o sea cuál es el beneficio que se espera obtener incorporando al riego un suelo de secano.
- 2) Cuándo regar, o sea con qué frecuencia se debe repetir riegos consecutivos y cuál es el criterio para determinar esa frecuencia.
- 3) Cuánto regar, o sea durante cuánto tiempo o con cuánta agua debe regarse una superficie agrícola.
- 4) Cómo regar, o sea de qué forma aplicar el agua al suelo, lo que constituye el método de riego.

Para contestar a estas preguntas se estudiará los aspectos fundamentales del sistema suelo-agua-planta-atmósfera y cómo estos aspectos determinan exactamente para cada caso cuándo, cuánto y cómo regar.

Los principales problemas que pueden surgir de un riego deficiente son:

1. Pérdidas de agua, o sea una baja eficiencia en el aprovechamiento del recurso. Pueden deberse a dos procesos fundamentales: pérdidas por escurrimiento superficial al final del área que se riega, cuya causa principal es generalmente el uso de grandes caudales de agua o tiempos de riego exageradamente largos; las pérdidas pueden corresponder también al proceso de percolación profunda bajo las raíces de las plantas, proceso que se debe principalmente al uso de unidades de riego de superficies muy grandes asociadas con tiempos de riego también exagerados.
2. Lavado de nutrientes bajo la zona donde se desarrollan raíces, derivado principalmente de problemas de percolación profunda; asociado con este lavado de nutrientes se puede producir una concentración de sales en el área donde se desarrollan las raíces, como efecto de un drenaje deficiente.
3. Bajos rendimientos de los cultivos, por falta o exceso de agua en diferentes lugares de un mismo paño o unidad de riego; faltará en aquellos lugares en que no se aplique en forma adecuada el agua de riego por problemas de tiempo de riego muy cortos o riegos demasiado rápidos, y se producirán problemas de exceso en aquellas partes de la superficie del suelo en que el agua queda aposada durante un tiempo muy largo.

Los problemas anteriormente mencionados (baja eficiencia o pérdidas de agua, lavado de nutrientes o salinización de suelos y bajos rendimientos de los cultivos por falta o exceso de agua en el suelo) se presentan frecuentemente en la agricultura regada.

Si el agricultor no tiene una buena respuesta para las preguntas que se han planteado, la productividad de la tierra no se incrementará apreciablemente y las inversiones en grandes obras hidráulicas no tendrán justificación económica.

El aumento de la eficiencia en el uso del agua de riego debe basarse en la aplicación de principios racionales y modernos al suelo que se está regando. El riego agrícola puede definirse como una técnica o práctica de producción:

El riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos.

Se examinará detalladamente esta definición, básica para el desarrollo del texto. En primer lugar se advierte que debe regarse el suelo y no las plantas. De esta forma, se repone en el suelo agua que ha sido consumida por las plantas; no debe utilizarse el erróneo concepto de que cuando se riega se está dando agua a las plantas en forma directa, sino que se está realmente reponiendo el agua en el suelo para que las plantas posteriormente la aprovechen a lo largo del período comprendido entre dos riegos consecutivos. Esto deriva de algunas propiedades del suelo que serán estudiadas más adelante, relacionadas con las características de almacenamiento de agua por parte de los suelos. Salvo en algunos sistemas de riego muy sofisticados que se verá oportunamente, no es posible regar el suelo en forma permanente sino a través de intervalos discretos de tiempo. Al regar se almacena agua en el suelo y las plantas la consumen permanentemente. Existen algunas prácticas de riego que no necesariamente requieren la existencia de plantas en la superficie del suelo, especialmente cuando se trata de riego de pre-siembra. Esto indica que es muy importante definir el concepto de 'riego del suelo' y no 'riego de las plantas'.

En la definición de riego se advierte que no se riega la superficie del suelo, sino que se está regando el perfil en profundidad; es dentro del perfil del suelo donde se encuentran las raíces de las plantas,

órganos encargados de absorber el agua que necesitan éstas para el desarrollo de sus funciones vitales, especialmente la transpiración. Un buen riego no es el que moja uniformemente la superficie del suelo, sino aquél que moja adecuadamente el perfil del suelo hasta donde se encuentra la gran masa de las raíces de un cultivo.

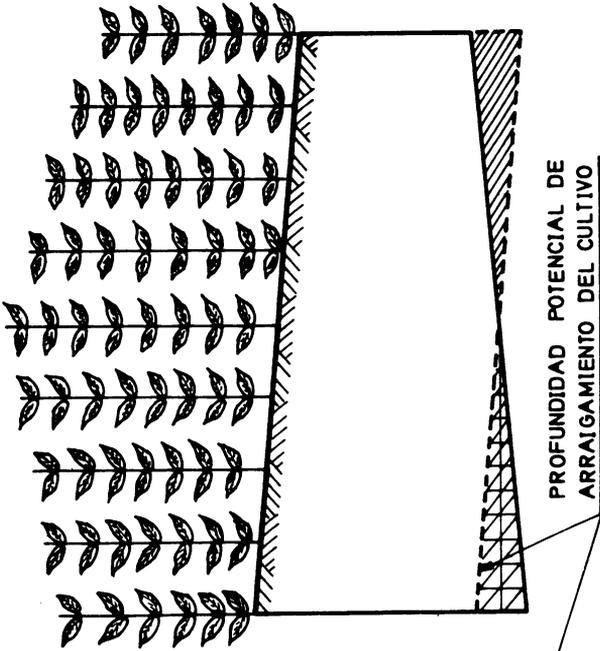
Se señala asimismo en la definición de riego que su aplicación debe ser oportuna, de tal manera que las plantas no se vean sometidas a la falta de agua por dejar pasar demasiado tiempo entre dos riegos consecutivos, ni se vean sometidas al exceso de agua en el perfil del suelo por regar demasiado frecuentemente una superficie agrícola.

El riego debe realizarse además con una determinada técnica que permite mojar uniformemente el perfil del suelo a lo largo de toda su extensión, de tal manera que no pueda suceder que las plantas sufran por exceso de agua al comienzo de la zona regada y por falta de agua al final de ésta, caso tan frecuente en la agricultura de riego latinoamericana. Los métodos de riego que se estudian en esta obra permitirán obtener un modelo de mojado del perfil del suelo como el que se presenta en la Fig. 1, en el que todas las plantas del cultivo tienen un desarrollo parejo; por ello el rendimiento del cultivo como un todo es mayor que cuando existen en una superficie agrícola exceso y falta de agua.

En la definición de riego se indica además que la cantidad de agua que debe incorporarse al perfil del suelo debe corresponder al agua consumida por el cultivo entre dos riegos consecutivos; los cultivos consumen agua debido al efecto de las condiciones ambientales o climáticas, que generan una diferencia o gradiente de potencial entre el agua que está en la planta y en el suelo, por una parte, y el vapor de agua que hay en la atmósfera. En consecuencia se está liberando permanentemente vapor de agua desde la planta hacia la atmósfera a través del proceso de transpiración, y desde la superficie del suelo a través del proceso de evaporación. La velocidad de estos procesos de pérdida de agua que en conjunto se conocen con el nombre de evapotranspiración está determinada no sólo por el clima, sino también por el tipo de suelo, su contenido inicial de agua y el tipo de cultivo.

La evapotranspiración ocurre permanentemente pero se repone el agua en el suelo, o sea se riega, sólo durante unas pocas horas cada cierto número de días; ello implica que el suelo debe comportarse como un reservorio o estanque que de alguna manera retenga esa agua y la entregue constantemente a las raíces de las plantas para no

b. RIEGO ADECUADO A LAS CARACTERISTICAS
HIDROMECANICAS DEL SUELO.



a. RIEGO POCO ADECUADO

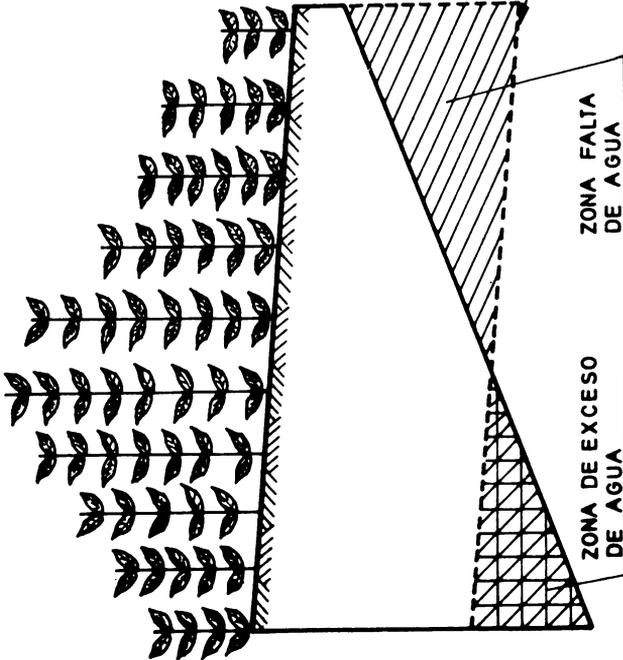


Fig. 1. Perfil de mojado del suelo en relación con el desarrollo y producción de los cultivos.

detener el proceso de evapotranspiración. El comportamiento del suelo como un reservorio de agua entre riegos consecutivos se estudiará más adelante; se ha mencionado aquí para señalar que el sistema que se está regando —el suelo— es de una cierta complejidad en relación a las plantas y a la atmósfera, ya que hay procesos que transcurren permanentemente pero con velocidades variables y otros que son discretos en el tiempo, o sea que no se desarrollan en forma continua sino esporádicamente, como es el caso del riego. Asimismo las plantas viven al mismo tiempo en dos medios totalmente diferentes (la atmósfera y el suelo); esa realidad determina que los requerimientos de agua de las plantas y la disponibilidad de agua por parte de los suelos deben estudiarse como un sistema completo, interpretando claramente cuáles son los procesos involucrados y de qué factores depende la importancia relativa de cada uno de ellos.

EL RIEGO, LOS RENDIMIENTOS Y LA CONSERVACION DE LOS SUELOS

Cuando se riega eficientemente un cultivo agrícola se producen aumentos de rendimientos de significativa importancia en relación a cultivos mal regados; al mismo tiempo se obtiene otros beneficios adicionales. Estos beneficios aseguran que las prácticas de riego basadas en el conocimiento de los aspectos fundamentales que gobiernan el comportamiento del sistema suelo-agua-planta-atmósfera sean altamente rentables y constituyan una inversión que rápidamente dé sus frutos para el productor individual y para su región.

En el Cuadro N° 3 se presenta algunos datos sobre los aumentos de rendimiento que es posible esperar en cultivos de secano incorporados al riego.

Los datos del Cuadro 3 son sólo una muestra del efecto que puede esperarse de la incorporación del riego como práctica de producción adicional en los cultivos agrícolas. Sin embargo la generalidad de los países latinoamericanos estas comparaciones no son posibles porque en la mayoría de los cultivos sólo puede obtenerse algún rendimiento si se usa el riego. Las condiciones de aridez o semi-aridez, que implican una escasa o mal distribuida pluviosidad o condiciones de poca retención de agua por los suelos, hacen indispensable el aporte de agua a los suelos cultivados durante su etapa de desarrollo y producción.

CUADRO N°3 Aumentos de rendimiento de cultivos de secano cuando son incorporados al riego.

Cultivo	País	Rendimiento (kg por hectárea ⁻¹)	
		regado	secano
Remolacha	México	67553	51 655
Papas	México	8 170	5 087
Arroz	Venezuela	3 000	2 100
Mandioca	Venezuela	14 000	4 950
Tomates	Venezuela	15 500	3 935
Arroz	México	2 839	1 736
Trigo	México	1 972	1 037
Maíz	México	1 512	913
Porotos	México	1 077	430
Maíz	Venezuela	3 000	1 540
Algodón	Venezuela	1 200	694

Fuente: CEPAL¹

De mucha mayor importancia resulta contar con datos acerca del efecto que tiene el mejoramiento o tecnificación del riego en un mismo predio agrícola sobre los rendimientos de los cultivos. El Cuadro N° 4 indica que ese impacto puede ser significativamente importante.

Puede preguntarse a qué se debe específicamente el aumento de rendimientos que experimentan los cultivos al mejorar la técnica del riego, adecuando éste a las condiciones de suelos, clima y cultivo de cada situación. Un análisis detallado de la Figura 1 proporciona la respuesta, que explica en gran parte este aumento de rendimiento. El rendimiento potencial del cultivo, de acuerdo con todas las tecnologías y recursos productivos empleados en esa situación específica, está representado por la zona en que el riego cubre todos los requerimientos de agua del cultivo, sin dejar plantas sometidas a falta o exceso de agua. En general esta zona de campo —regada adecuadamente, en el caso del riego tradicional— puede representar alrededor de un tercio del campo total. En los dos tercios restantes, a pesar de tratarse del mismo cultivo, sometido a igual fertilización, control de plagas y enfermedades, y otros, no se obtiene el rendimiento potencial por falta o exceso de agua.

CUADRO N° 4 Rendimientos obtenidos con una práctica mejorada de riego, basada en las condiciones de suelo-cultivo y clima, comparados con el riego tradicional.

Cultivo	Rendimiento (kg hectárea ⁻¹)	
	Tradicional	Mejorado
Manzanos	12400	15600
Duraznos	11300	12100
Aguacate	3400	4300
Uva de mesa	9300	10000
Maíz	4900	6400
Papas	9900	10500
Trigo	2800	5500
Porotos	1900	2300
Tomates	28400	31400
Trébol	2500	3400
Alfalfa	5000	6700

Fuente: Gurovich³.

Se observa, entonces, la situación paradójica de que en la agricultura regada tradicional el factor limitante en la obtención de los rendimientos es la práctica del riego, que impide reponer uniformemente en todo el perfil del suelo el agua consumida por los cultivos por efecto del clima. La tecnificación consiste en lograr esta reposición uniforme del agua a lo largo de toda la unidad de riego, permitiendo así a todas las plantas del cultivo alcanzar un rendimiento potencial uniforme; de ese modo se incrementa el rendimiento total del campo, como aparece esquemáticamente en la Figura 1.

Una oportuna frecuencia de riego asociada con la uniformidad en la reposición de agua determina la posibilidad de alcanzar no sólo el rendimiento potencial del cultivo sino además el rendimiento máximo que permite otro factor de la producción que pase a ser limitante; el riego oportuno y uniforme no será más un factor limitante para ese cultivo. Resulta de tanta importancia este efecto positivo de una frecuencia adecuada del riego que sólo adaptando esta práctica a las condiciones del clima, el suelo y el cultivo sin modificar ninguna

técnica de riego se han obtenido aumentos de rendimiento y ahorros de agua de significativa importancia en varios cultivos. Como se verá en el Capítulo 7 existen criterios muy claros y de sencilla aplicación en condiciones de campo para establecer una frecuencia de riego óptima; en ciertas oportunidades el agricultor debe adaptarse a condiciones de turnos de agua, escasos caudales de riego u otras situaciones que lo hacen alejarse en el tiempo de esta frecuencia de riego, disminuyendo así las posibilidades de alcanzar el rendimiento potencial de su cultivo. En muchos casos una adecuación de la organización administrativa que regula el agua de riego a nivel regional o zonal puede significar la diferencia entre rendimientos económicamente rentables y una agricultura ruinosa, como ha podido comprobarse en muchos países de América en que se han operado sistemas de riego con diversos grados de adaptación a los requerimientos hídricos de los cultivos.

Existen dos problemas graves, derivados de prácticas de riego inadecuadas, en relación con otro recurso tan importante como el agua de riego: el suelo. Estos problemas son la erosión y la salinización de los suelos. Deben mejorarse las prácticas de riego no sólo para obtener los beneficios señalados anteriormente sino para evitar la erosión, que en el caso del riego es el resultado de utilizar caudales muy grandes de agua en suelos con pendiente, con lo que se produce un arrastre de partículas del suelo fuera de los terrenos agrícolas; esta erosión arrastra las partículas hasta los cauces mayores, provocando incluso grandes barras erosivas en sus desembocaduras al mar.

El problema de la erosión por riego es de gran magnitud; en muchas referencias bibliográficas recientes se encuentra valores de 10 a 15 toneladas de suelo removido anualmente por hectárea regada, lo que representa alrededor de 1 a 1.5 cm de suelo agrícola de la mayor fertilidad perdido por año. Infortunadamente los agricultores no visualizan fácilmente el deterioro causado al suelo por un riego deficiente hasta que se hace difícil regar adecuadamente debido a la ondulación muy marcada que se ha producido en todo el campo regado y que dificulta el flujo del agua sobre la superficie; otra situación que llama la atención del agricultor se produce cuando en las cabeceras de sus campos regados comienzan a aparecer en la superficie, después que el riego defectuoso ha erosionado las estratas superiores, estratas más pedregosas ubicadas normalmente a ciertas profundidades en el perfil del suelo. Sin embargo cuando esas situaciones ocurren se ha dañado el sistema productivo y resulta muy oneroso renivelar o rellenar el terreno erosionado.

Asociado al arrastre erosivo de partículas de suelo desde los campos regados, por efecto de riegos con caudales de magnitud exagerada en relación a las características del terreno, se presenta el problema del depósito o embancamiento de los sedimentos erosionados sobre los sistemas de drenaje o desagüe naturales o artificiales, que deben ser limpiados frecuentemente, a un alto costo, con el fin de evitar además problemas de drenaje en los suelos agrícolas. Estos problemas de drenaje debidos a sistemas deficientes de evacuación del agua en exceso pueden causar graves consecuencias tanto a los suelos como a los cultivos que se desarrollan sobre éstos, por depósito de los sedimentos erosionados. Cuando el riego es exagerado en frecuencia o duración, o en cantidad, se provoca otro problema en el suelo; el de un drenaje ineficiente que no sólo afecta a las raíces de las plantas sino que además favorece una acumulación de sales en la superficie. En muchos casos los terrenos agrícolas deben abandonarse, ya que dejan de ser productivos; para recuperarlos se requieren grandes inversiones en rehabilitación.

El riego y el drenaje son técnicas cuyo objetivo es mantener la humedad del suelo en un nivel óptimo para el crecimiento de las plantas. El drenaje natural o artificial de los suelos debe servir para remover el exceso de agua que pueda producirse en forma temporal o permanente en un suelo agrícola, debido a condiciones topográficas o al sistema de riego empleado. El agua almacenada en el perfil del suelo no es agua pura; en realidad es una solución salina que contiene diferentes proporciones y concentraciones de diversas sales, en una zona o campo específico. El flujo de esta solución hacia las raíces de las plantas en el perfil del suelo y la posterior absorción de agua por las raíces en respuesta a la demanda evaporativa de la atmósfera, así como la pérdida de agua en forma de vapor desde la superficie del suelo a través del proceso de evaporación, van dejando en el suelo una concentración creciente de sales que, si no es removida oportunamente, puede alcanzar un nivel tal que impida el crecimiento o afecte severamente la producción de las plantas. Esta remoción de las sales desde el perfil del suelo puede ser natural, a través de las lluvias que lavan el perfil en profundidad, o artificial regando el suelo con una cantidad un poco superior al requerimiento de los cultivos, de tal forma que el exceso de agua lave el perfil del suelo bajo la zona de las raíces. Estos procesos de lavado o eliminación de sales son posibles sólo si el perfil del suelo presenta condiciones adecuadas para el drenaje; sin embargo, si a cierta profundidad de la superficie del suelo se encuentra una estrata de baja conductividad hidráulica o una napa freática, el problema de la salinización se agudiza al transcurrir el

tiempo porque no se produce un lavado efectivo de las sales, que tienden a volver a la zona de las raíces y eventualmente alcanzan la superficie del suelo, junto con el flujo ascendente de agua en el perfil.

Esta situación se ha presentado muchas veces a lo largo de la historia del hombre; las florecientes civilizaciones de Mesopotamia en los valles de los ríos Tigris y Eufrates desaparecieron en la antigüedad en un período de tiempo muy corto, al alcanzar sus suelos agrícolas niveles de salinidad tales que ninguno de los cultivos por ellos conocidos fue capaz de tolerar. La rehabilitación de suelos afectados por problemas de salinidad o drenaje deficiente es generalmente de alto costo; esa inversión no siempre es posible de realizar, especialmente en países en desarrollo. Por eso deben evitarse los problemas derivados de un riego poco adecuado que pueden producirse en un suelo agrícola, y que han sido comentados brevemente en este Capítulo; sólo un enfoque racional basado en los principios físicos que gobiernan las relaciones entre el suelo, el agua, el clima y las plantas puede servir de garantía para que dichos problemas no surjan en una región o campo determinado.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Enumere tres líneas de trabajo que permitan mejorar la producción agrícola por medio del riego. ¿Cuál es a su juicio aquella que puede provocar mayor impacto en el corto plazo en su región y por qué?
2. Reseñe la evolución histórica del riego en su país, resumiendo la situación actual y las proyecciones futuras en cuanto a superficies a regar, rendimientos de los cultivos principales, costo de las inversiones que habría que realizar. Enumere en orden decreciente de importancia los problemas a solucionar para hacer realidad sus proyecciones.
3. Señale tres consideraciones relevantes mediante las cuales puede enfocarse una tecnificación del riego a nivel predial y a nivel regional.
4. Comente la definición del riego agrícola para los siguientes casos:
 - a. una agricultura tropical con lluvias en el verano;
 - b. cultivo del arroz en pretilos inundados permanentemente;
 - c. riego por goteo.
5. Analice en detalle un proyecto regional de regadío realizado en su país, desde sus etapas de planificación y factibilidad hasta su operación rutinaria, con los resultados esperados y obtenidos en la realidad.

6. ¿Qué relación se establece entre el riego, definido de acuerdo con este libro, y su implementación en condiciones de campo? Recuerde que toda técnica involucra simultáneamente una cierta eficiencia y un cierto costo.
7. ¿Qué elementos deben conocerse para evaluar económicamente la tecnificación del regadío? ¿Con cuáles de estos elementos se cuenta en su región y cuáles deben ser objeto de investigación?
8. Indique la posible causa de situaciones de falta de uniformidad en la reposición de agua en el perfil de suelo de un campo regado, diferentes a la esquematizada en la Figura 1.
9. Enumere en orden de importancia aquellas regiones de su país que hayan sido afectadas por problemas erosivos. ¿En cuáles de estas regiones el riego ha jugado un papel importante en la erosión?
10. Comente un caso discutido en las lecturas complementarias u ocurrido en su país en que, por efecto del riego y en condiciones de deficiente drenaje el suelo se haya salinizado y sea necesario rehabilitarlo.
11. Señale la macroestructura de riego y principales embalses de su país, así como la superficie beneficiada con los embalses y los criterios adoptados para la elección de las tasas de riego.
12. Infórmese de la superficie de riego seguro, eventual y posible de utilizar en su país para las distintas provincias o regiones. Para provincias de la zona central señale los principales cultivos considerados en las rotaciones y los valores máximos promedios de rendimiento en los diferentes rubros. ¿Qué conclusiones relacionadas con el riego se obtienen de estos antecedentes?

13. Comente en no más de 50 líneas cada uno de los elementos de la definición del riego.
14. Con base en qué consideraciones (nombre tres) indicaría un programa de tecnificación en regadío:
 - a. a nivel de área;
 - b. a nivel predial.

BIBLIOGRAFIA

1. COMISION ECONOMICA PARA LA AMERICA LATINA (CEPAL). Boletín Económico para la América Latina VII (2): 1963.
2. FUKUDA, H. Irrigation in the World. Comparative Developments. University of Tokio Press, Tokio 1976. 330 p.
3. GUROVICH, L. Effects of improved field practice on crop yield, water use and profitability of irrigation. Irrigation Science, Vol 1(2): 77-90, 1978.
4. ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA. Anuario de la Producción. 1976.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

1. DONEEN, L.D. Irrigation Practice and Water Management. Cuadernos de Riego y Drenaje N° 1. F.A.O., Roma, 1971. 84 p.
2. HAGAN, R.M. Irrigation of Agricultural Lands. Agronomy N° 11. U.S.A. Section I. Introduction: 1-54. 1967.
3. ISRAELSEN, O.W. y HANSEN, V.E. Irrigation Principles and Practices. John Wiley and Sons Inc. U.S.A. Cap. 1: 1-12. 1962.
4. ROVDA, V.A. Internacional Source-Book on Irrigation and Drainage of Arid Lands in Relation to Salinity and Alkalinity. Cap. 1, Introduction: 1-33. F.A.O., Roma 1967.
5. OLIVER, H. Riego y Clima. Compañía Editorial Continental S.A. 1963. México, 252 p.

CAPÍTULO 2

CICLO HIDROLÓGICO Y CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

INTRODUCCION

La Hidrología estudia los componentes del ciclo hidrológico y los procesos naturales en que intervienen; desde el punto de vista del riego esta ciencia es importante porque guarda relación con el origen o fuentes del agua. El agua tiene además ciertas características que pueden hacerla más o menos adecuada para regar determinados suelos o cultivos y que, en conjunto, se conocen como la calidad del agua de riego.

En una forma u otra el agua se encuentra prácticamente en todas partes; varía en cantidad y en calidad, desde una cantidad prácticamente ilimitada en los océanos hasta casi ninguna en las áreas desérticas. En la atmósfera se presenta como vapor de agua, nubes y lluvias, y en la superficie de la tierra se encuentra en lagos, cauces (ríos) y en los océanos; bajo la superficie de la tierra puede encontrarse retenida por el material sólido del suelo con diversos niveles de energía,

como se verá en el siguiente Capítulo, o saturando todo el espacio poroso del suelo en las napas freáticas.

Aunque siempre la mayor proporción del agua total se encuentra en los océanos, existe una situación de circulación permanente. Constantemente se está evaporando agua desde la superficie del océano; este vapor de agua eventualmente se condensa y cae sobre el océano o sobre los continentes en forma de lluvia, granizo, rocío o nieve. El rocío condensado sobre el suelo o las plantas se evapora nuevamente a la atmósfera, pero el agua que cae como precipitación sólida o líquida experimenta las más variadas transformaciones y transportes; puede ser reevaporada incluso antes de caer sobre la superficie, o ser interceptada por la vegetación, las construcciones y otros objetos; desde allí es reevaporada y una parte escurre hasta el suelo. La proporción de la precipitación que llega hasta el suelo puede infiltrarse en el perfil del suelo o escurrir por los cauces y eventualmente llegar al mar. El agua infiltrada en el suelo tiene diferentes destinos: parte es retenida por el material sólido del suelo, parte se distribuye hacia la superficie, nuevamente se evapora desde allí) y hacia la profundidad del suelo (pasando eventualmente a una napa freática y de allí hacia las corrientes que terminan en el mar); también puede ser absorbida por las raíces de las plantas y transpirada por éstas en forma de vapor, hacia la atmósfera. Esta secuencia descriptiva constituye el ciclo hidrológico del agua. El riego agrícola, como fue definido en el Capítulo 1, es una parte pequeña del ciclo hidrológico; el agua que ha alcanzado la superficie terrestre por precipitación sobre una cierta área, conocida como hoya hidrográfica, puede ser almacenada y/o canalizada de tal forma que al llegar hasta un campo sea distribuida lo más uniformemente posible sobre la superficie del suelo cultivado por la acción del hombre. En este sentido el riego es una modificación artificial de los cauces naturales del agua que escurre sobre la superficie terrestre y cuya fuente de origen es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico, la precipitación.

En su escurrimiento, infiltración, percolación y eventual recuperación en puntos de cota inferior en los cauces naturales, e incluso en su reutilización en el riego, el agua se va degradando en calidad en relación al riego. En primer lugar el agua que precipita es prácticamente pura, ya que resulta de la condensación del vapor de agua y aquella proporción que se utiliza para el riego cae generalmente en los puntos más altos de la hoya hidrográfica; así reúne dos características positivas de calidad: la pureza y la cota o energía potencial. A

medida que va siendo utilizada el agua de riego va incorporando sales, sedimentos semillas de malezas, e incluso esporas de hongos o huevos y larvas de insectos dañinos para la agricultura; al mismo tiempo va perdiendo cota, lo que implica que va perdiendo energía potencial para su flujo sobre la superficie, de tal manera que no puede regarse puntos del suelo que se encuentren a mayor altura. En este Capítulo se verá en detalle estos aspectos de origen y destino del agua de riego y de su calidad.

EL CICLO HIDROLOGICO

El ciclo hidrológico es un concepto más bien teórico pero útil; corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra. De acuerdo a este concepto el ciclo hidrológico abarca no sólo el movimiento y distribución del agua dentro de las masas continentales (escorrentía, infiltración, percolación, entre otros), sino también el movimiento y circulación desde la hidrosfera a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la litosfera (precipitación) y desde esta última nuevamente a la hidrosfera y la atmósfera (escorrentía, evaporación, transpiración).

Desde un punto de vista global el ciclo hidrológico es un proceso continuo pero que contiene elementos de azar y variaciones no continuas o discretas al considerar extensiones o territorios más reducidos. Por ejemplo, en el caso de una cuenca hidrográfica la precipitación no puede ser considerada como un proceso continuo sino discreto en el tiempo. Sin embargo subsisten procesos continuos como la evaporación y evapotranspiración, que ocurren en todo momento aunque con cambios graduales de sus tasas de acuerdo a las variaciones de la energía solar; lo que constituye una función o proceso continuo desde el punto de vista global no lo es desde el punto de vista local. Este hecho es importante porque al mismo tiempo que hace diferente el estudio hidrológico desde el punto de vista local, lo facilita desde el punto de vista del análisis estadístico.

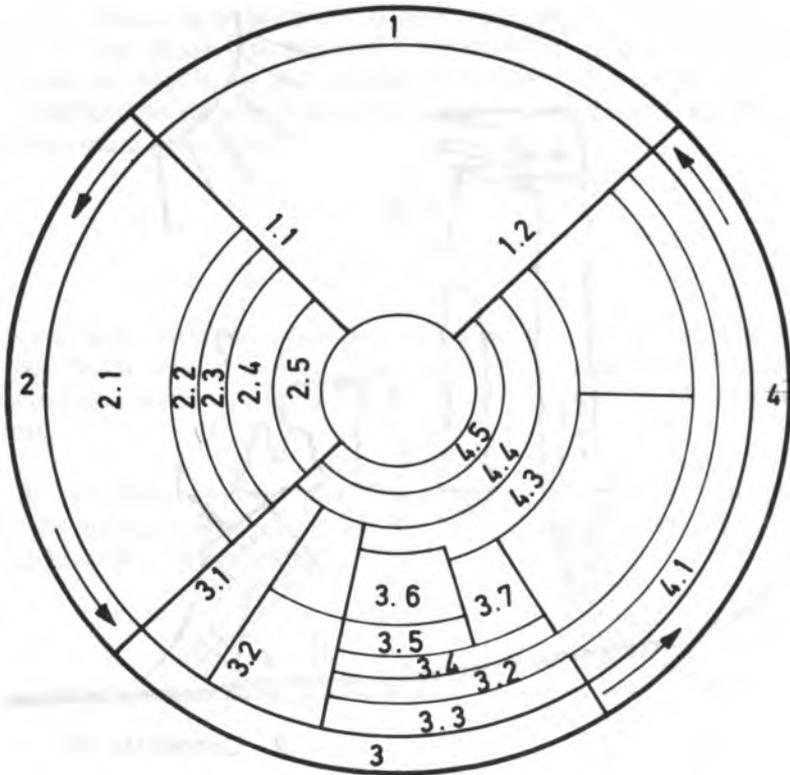
La Figura 2 es una representación esquemática del ciclo hidrológico que debe ser leída en dirección contraria al movimiento de las agujas del reloj; indica cómo el vapor de agua almacenado en la atmósfera puede condensarse e incorporarse a la superficie de la Tierra a través del proceso de precipitación pluvial o nival. Esta precipitación cae sobre los océanos, ríos, lagos, vegetación, montañas y superficies del suelo. Parte de la precipitación que cae sobre el suelo

puede escurrir superficialmente hasta incorporarse a los ríos y lagos y de allí eventualmente llegar al mar, o bien quedar almacenada en las depresiones superficiales del terreno. Otra parte de la precipitación se infiltra, pudiendo quedar retenida en la zona de raíces de las plantas, percolar más profundamente para incorporarse a las napas subterráneas o bien escurrir a través de grietas en los estratos profundos de rocas. Esta agua infiltrada puede también escurrirse e incorporarse a lagos y ríos hasta llegar directa o indirectamente al mar.

Finalmente se observan los procesos de evaporación desde las superficies de agua libre (lagos, ríos, océanos), la evaporación del agua almacenada por el follaje de las plantas (intercepción), la sublimación de la nieve y la transpiración de las plantas provenientes de parte del agua absorbida por sus sistemas radiculares. Debido a estos últimos procesos el vapor de agua se genera, se incorpora a la atmósfera y de esta manera se cierra el ciclo. Nótese también en el diagrama los procesos de evaporación de la precipitación antes que ésta alcance la superficie de la Tierra, y la interconexión entre los escurrimientos superficiales y subterráneos. Esta imagen gráfica del ciclo permite efectuar en forma limitada una especie de inventario de los fenómenos que ocurren, con el objeto de poder identificar cada uno de los elementos o fenómenos que estudia la Hidrología.

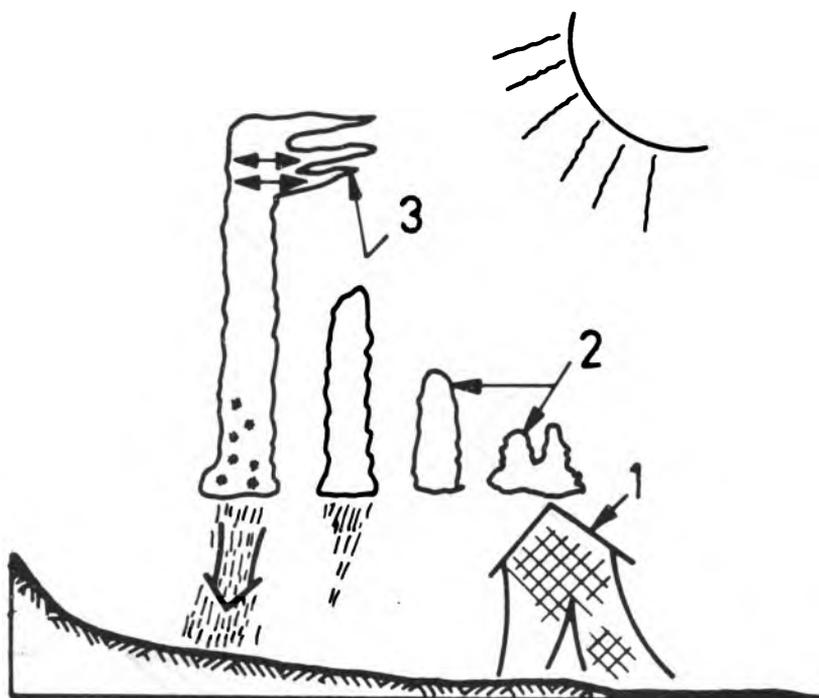
Las relaciones cuantitativas y las relaciones dinámicas (en el campo) entre los componentes del ciclo hidrológico, descrito en la Fig. 2, son más complejas que las expresiones cualitativas dadas hasta este momento. La comprensión de estas relaciones requiere estudiar el ciclo hidrológico desde un punto de vista conceptual, incluyendo elementos de embalse o acumulación y elementos de transporte o flujo, que son los procesos fundamentales para descubrir el sistema hidrológico; así el hidrólogo puede, a través de expresiones matemáticas (ecuaciones), explicar el comportamiento del sistema hidrológico, ya sea éste regional o local. En el estudio del movimiento y almacenamiento de agua puede dejarse de lado el concepto de ciclo hidrológico completo y se estudia sólo aquellos componentes —y sus interrelaciones— que son posibles y de interés cuantificar en una región determinada; se habla aquí del “ciclo de escorrentía”, cuyo diagrama esquemático se presenta en la Fig. 3.

En la Fig. 3 se distingue la precipitación incidente como elemento alimentador de los procesos del ciclo de escorrentía y la escorrentía superficial, evaporación y evapotranspiración y flujo subterráneo como elementos de salida, resultados o productos de la opera-



1. Humedad atmosférica
 - 1.1 Nubes
 - 1.2 Vapor atmosférico
2. Precipitación
 - 2.1 Lluvia
 - 2.2 Granizo
 - 2.3 Agua - nieve
 - 2.4 Nieve
 - 2.5 Rocío y helada
3. Destino superficial de la precipitación
 - 3.1 Precipitación que alcanza la superficie del suelo
 - 3.2 Infiltración
 - 3.2.1 Agua almacenada temporalmente en la superficie
 - 3.3 Agua aportada a la vegetación
 - 3.4 Agua aportada a los océanos
 - 3.5 Agua aportada a las corrientes
 - 3.6 Escorrentamiento superficial a los cauces
 - 3.7 Salida de agua de los cauces
4. Evaporación
 - 4.1 Transpiración
 - 4.2 Evaporación desde los suelos
 - 4.3 Evaporación desde superficies de agua libre
 - 4.4 Precipitación interceptada y evaporada desde la vegetación
 - 4.5 Evaporación del agua al caer.

Fig. 2. Esquema del ciclo hidrológico.



1 Evaporación

2 Condensación

3 Precipitación

Fig. 3. Esquema del ciclo de escorrentía.

ción de los diferentes componentes del ciclo. Debido a que los procesos de evaporación y evapotranspiración se deben principalmente a la influencia de la energía solar y a que la posibilidad de flujo del agua se debe principalmente a la existencia de un potencial o campo gravitacional, se hace necesario considerar también la energía solar y el campo gravitacional como elementos de entrada o alimentación del sistema.

El sistema natural fundamental con que trabaja el hidrólogo es la cuenca u hoya hidrográfica. Una cuenca es una unidad básicamente definida topográficamente y drenada por un sistema de cauces superficiales (ríos, esteros, quebradas), de tal manera que toda la escorrentía que se genera en la superficie encerrada por la línea divisoria de las aguas se descarga a través de una salida única e identificable.

Una cuenca (y en general cualquier subsistema hidrológico: sub-cuenca, tramo de un río, subregión, entre otros) puede describirse y analizarse por medio de un balance hidrológico, que no es otra cosa que la aplicación detallada de la ecuación general de balance de masa cuya expresión general es:

$$x = Y + (ds/dt)$$

Ecuación 2.1

en que x representa los insumos o entradas al sistema por unidad de tiempo, Y las salidas por unidades de tiempo y ds/dt es la tasa de variación con el tiempo del almacenamiento de masa o volumen en el sistema.

En su acepción más general la ecuación de balance hidrológico para una cuenca queda expresada por la siguiente ecuación, referida a un cierto intervalo de tiempo:

$$P + Q_{sa} + Q_{za} = E + ET + I + Q_{sa} + Q_{ze} \pm \Delta S_L \pm \Delta S_S + \Delta S_Z + \Delta S_N$$

Ecuación 2.2

en que:

- P = precipitación media
- Q_{sa} = gastos superficiales afluentes a la cuenca o subsistema (naturales y/o artificiales)
- Q_{za} = gastos subterráneos afluentes
- E = Evaporación media desde superficies de agua libre
- ET = Evapotranspiración media
- I = retención por intercepción de la precipitación en la vegetación
- Q_{se} = gastos superficiales efluentes de la cuenca

Q_{ze} = gastos subterráneos efluentes

ΔS_L = variación en el período, de los volúmenes de agua almacenada superficialmente (lagos, embalses, lagunas, depresiones superficiales del terreno, otros)

ΔS_S = variación del volumen de agua almacenada en los suelos no saturados (en forma de humedad del suelo)

ΔS_Z = variación del almacenamiento subterráneo en los acuíferos

ΔS_N = variación del agua almacenada en nieves y glaciares

Las unidades de cada término pueden expresarse en milímetros sobre el área de la cuenca o en metros cúbicos. La ecuación anterior no sólo permite comprobar la consistencia y compatibilidad de las mediciones y/o estimaciones de cada uno de los componentes medidos del ciclo hidrológico o de escorrentía, sino también estimar cualquier variable conociendo cada una de las demás. La ecuación es teóricamente exacta pero existen problemas y dificultades de medición y estimación de las variables componentes que pueden dificultar su aplicación práctica e inducir a graves errores.

La ecuación general del balance hidrológico (Ecuación 2.2) puede expresarse en forma diferencial, como las velocidades de los procesos que en ella están implícitos, o en forma integral en un cierto intervalo de tiempo, como la cuantificación del volumen de agua involucrado en cada proceso durante un tiempo determinado. Estas expresiones alternativas (Ecuaciones 2.3 y 2.4) de la ecuación general del ciclo hidrológico tienen aplicaciones diversas en problemas relacionados con el riego o con estudios hidrológicos específicos, que son discutidos a continuación.

Expresión diferencial de la ecuación general del balance hidrológico.

$$\frac{d}{dt} [dP + dQSA + dQ_{ZA}] = \frac{d}{dt} [dE + dET + dI + dQ_{sE} + dS_L + dS_s + dS_Z + dS_N]$$

Ecuación 2.3

Expresión integral de la ecuación general del balance hidrológico.

$$\int_0^{t_i} (P + Q_{SA} + Q_{ZA}) dt = \int_0^{t_i} (E + ET + I + Q_{SE} \pm SL \pm S_s + S_z + S_N) dt$$

Ecuación 2.4

APLICACIONES DE LA ECUACION GENERAL DEL BALANCE HIDROLOGICO

La Ecuación 2.2, en sus expresiones alternativas diferencial (Ecuación 2.3) o integral (Ecuación 2.4), puede aplicarse en el estudio de muchas situaciones de importancia para el riego.

Caso 1: Balance hidrológico del suelo

Supóngase que desde el punto de vista hidrológico el sistema suelo-agua-plantas-atmósfera puede esquematizarse de acuerdo a la Fig. 4.

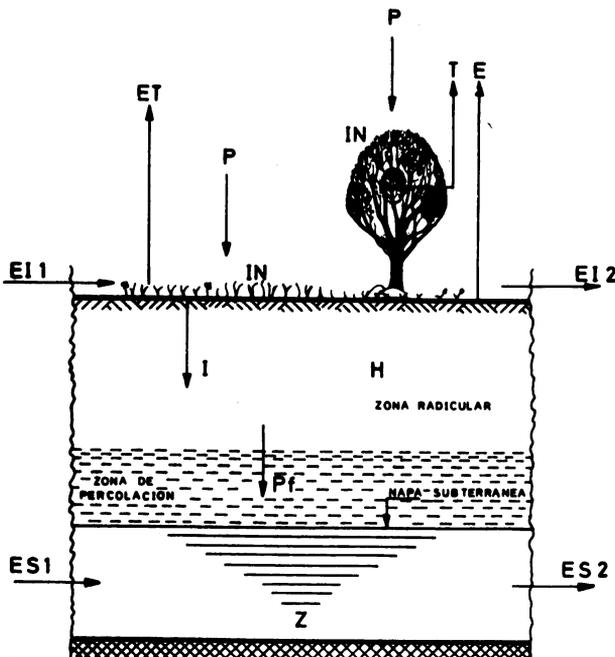


Fig. 4. Esquema de los procesos hidrológicos de un suelo agrícola.

En que para un cierto período de tiempo Δt :

- P = precipitación
 ET = evapotranspiración
 EI = escorrentía superficial inmediata
 I = infiltración
 H = humedad del suelo
 P_f = percolación profunda
 ES = escorrentía subterránea
 I_N = intercepción
 Z = almacenamiento subterráneo

Aplicando la ecuación de continuidad básica se puede establecer el siguiente balance hidrológico para este sistema durante un período Δt .

$$P + EI_1 + ES_1 = I_N + ET + EI_2 + ES_2 + ES_2 + \Delta H + \Delta Z$$

Ecuación 2.5

donde ΔH y ΔZ son los cambios en la humedad del suelo y las variaciones del almacenamiento subterráneo, respectivamente.

A través de esta expresión (Ecuación 2.5) normalmente se hacen estimaciones de uso-consumo de los cultivos (Capítulo 7), de percolación profunda y necesidades de drenaje, de disponibilidad de agua para las plantas y de infiltración y escurrimiento superficial. Así, por ejemplo, se puede despejar la variable ET (evapotranspiración o uso consumo), transformando la Ecuación 2.5 en

$$ET = (P + EI_1 + EI_2) - (I_N + EI_2 + ES_2 + \Delta H + \Delta Z)$$

Ecuación 2.6

Si se conoce los valores de precipitación efectiva ($P - I_N$), escorrentía superficial y subterránea, humedad inicial del suelo y aporte a la napa freática, es posible definir el uso-consumo del cultivo. Debe notarse que algunos de estos términos pueden ser en la realidad nulos, o con un artificio experimental anularse o disminuirse significativamente. Por ejemplo, al rodear una parcela de un pretil de tierra, el término EI_1 puede hacerse igual a cero; si no hay napa freática, sino que el perfil del suelo es semi-infinito y la precipitación (o riego) es moderno, el término $\Delta Z = 0$, etc.

Caso 2: Balance hidrológico de la zona radicular de un cultivo

Si el sistema en estudio se limita a la zona radicular, como se esquematiza en la Fig. 5, la expresión del balance hidrológico es:

$$P + EI_1 = I_N + ET + EI_2 + P_f + \Delta H$$

Ecuación 2.7

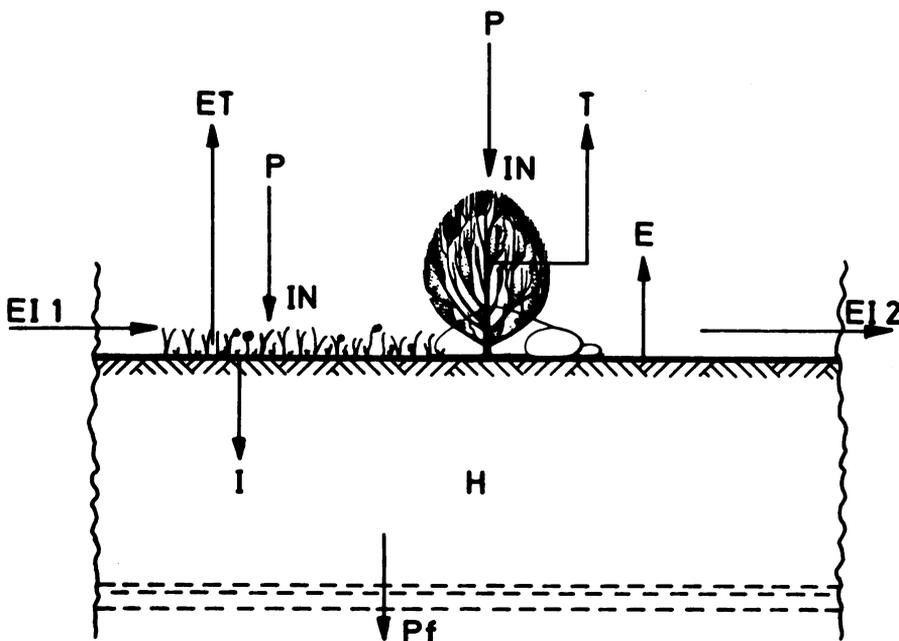


Fig. 5. Esquema de los procesos hidrológicos de la zona radicular de un cultivo.

Los aportes de entradas netas de agua al sistema radicular están constituídos por

$$I = P + EI_1 - I_N - ET - EI_2$$

Ecuación 2.8

Por lo tanto la ecuación de balance también puede escribirse como:

$$I = P_f + \Delta H$$

Ecuación 2.9

Caso 3: Balance hidrológico de una región

Un sector de una cuenca que comprende un tramo del río principal, puede representarse esquemáticamente como en la Fig. 6.

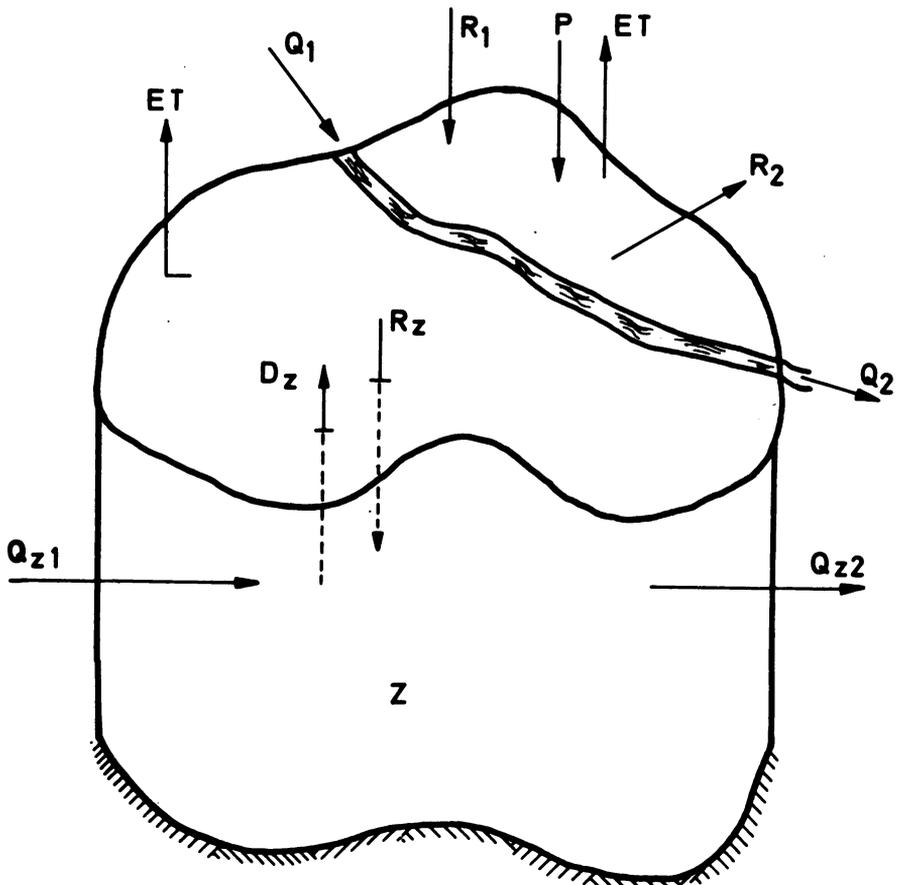


Fig. 6. Esquema de los procesos hidrológicos de una región.

En que:

P = precipitación bruta menos intercepción

Q = gasto superficial del río

Q_z = escorrentía subterránea

H = humedad de los suelos

Z = almacenamiento (de aguas) subterráneo

ET = evapotranspiración

R_1 = recarga superficial del sector proveniente de canales o de las quebradas del sector

R_2 = descarga superficial del sector (canales, etc.)

D_z = descarga desde el almacenamiento subterráneo por pozos o directamente como aportes de la napa al río

R_z = recarga subterránea

La aplicación de la ecuación de balance a este sistema da el siguiente resultado:

$$P + Q_1 + R_1 + Q_{z1} = R_2 + ET + Q_2 + Q_{z2} + \Delta H + \Delta Z$$

Ecuación 2.10

Considerando como subsistema el embalse subterráneo se tiene que:

$$Q_{z1} + R_z = Q_{z2} + D_z + \Delta Z + \Delta H$$

Ecuación 2.11

Para un sector de una cuenca o un tramo de río las ecuaciones anteriores permiten, por ejemplo, estimar las pérdidas y recuperaciones de agua, el monto de los consumos de agua y la magnitud de la interconexión entre el río y los acuíferos.

Caso 4: Balance hidrológico de un embalse

La Fig. 7 representa esquemáticamente un embalse superficial de un río.

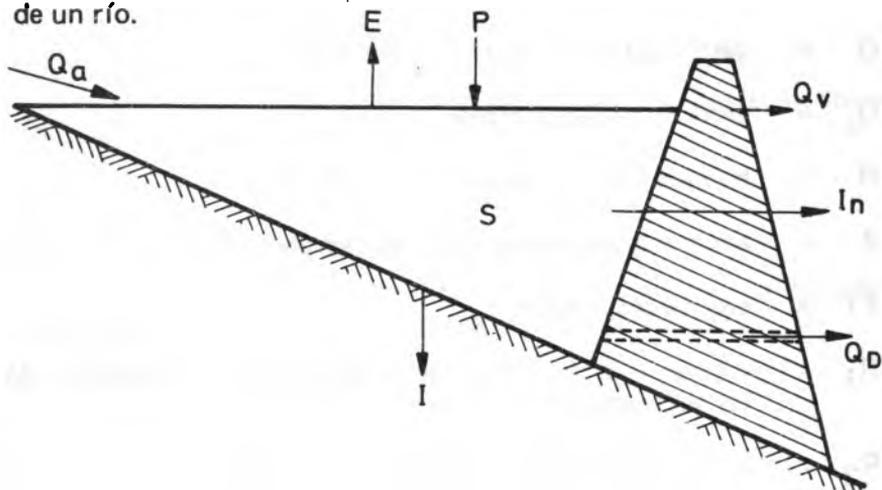


Fig. 7. Esquema de los procesos hidrológicos de un embalse de acumulación.

En que:

- Q_a = caudales afluentes al embalse (del río, o de canales de alimentación, o quebradas)
- P = precipitación sobre la poza del embalse
- E = evaporación desde el embalse
- I = infiltración
- Q_v = gasto efluente por el vertedero del embalse
- I_M = infiltración a través del muro del embalse
- Q_D = gasto efluente por las obras de entrega, para ser utilizado según los objetivos y usos del embalse
- S = volumen de agua almacenada en el embalse

Aplicando la ecuación general de continuidad se tiene para un cierto período de tiempo Δt que:

$$Q_a + P = Q_v + Q_D + I + I_M + E + \Delta S$$

Ecuación 2.12

Esta ecuación se utiliza en estudios de operación de embalses para determinar su capacidad óptima, en el dimensionamiento de vertederos y en la reconstitución de la estadística de caudales de un río.

CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

La calidad del agua para riego se determina por la composición y concentración de los constituyentes que pueda contener en solución o suspensión, adquiridos durante su transporte desde los puntos de precipitación e infiltración hasta donde es utilizada. Esa calidad es determinante en el comportamiento de los suelos y los cultivos en los aspectos relacionados con la salinización, la dispersión o destrucción de la estructura, la depositación de sedimentos y la diseminación de plagas y enfermedades fungosas.

Las características que determinan la calidad del agua de riego son:

1. La concentración total de sólidos en suspensión (sedimentos de origen erosivo).
2. La concentración total de sales solubles.
3. La concentración relativa de Sodio en relación a otros cationes.
4. La concentración de Boro u otros elementos tóxicos.
5. La dureza del agua, o sea la concentración de bicarbonatos en relación a los cationes divalentes.
6. La presencia de semillas de malezas, esporas de hongos patógenos y huevos o larvas de insectos.

Sedimentos sólidos en suspensión

En relación con los sedimentos sólidos en suspensión no existen valores límites; en general debe tratarse de usar agua para riego lo más limpia posible, con el fin de no producir un depósito de material sobre el suelo agrícola. Para ello se utilizan estructuras hidráulicas sobre los canales, conocidas como "decantadores" o "desarena-dores"; consisten básicamente en expansiones bruscas del área por donde circula el agua de tal forma que se disminuye drásticamente la velocidad del flujo. De ese modo las partículas en suspensión tienen la oportunidad de decantar hacia el fondo de la estructura, que debe ser limpiada periódicamente en forma manual o automática. El pro-

blema de los sedimentos es bastante crítico en muchas regiones y obliga a un alto gasto de mantenimiento en las estructuras de conducción (canales) y de almacenamiento (embalses). En las provincias de Mendoza, San Juan y Catamarca, en la República Argentina, por efecto de las precipitaciones en la Cordillera de los Andes se arrastran por los cauces verdaderos aluviones de sedimento que obligan a mantener costosos y complejos sistemas de limpieza de las obras de conducción de agua de riego; los embalses de acumulación, a pesar de ser limpiados frecuentemente, terminan colmándose y deben ser abandonados en un par de decenas de años. A nivel intrapredial los canales secundarios y terciarios deben ser limpiados manualmente todos los años al final de la temporada de riego. En algunas zonas de Chile se remueve hasta 25 toneladas de material depositado por kilómetros de canal, lo que representa alrededor de 15 jornadas-hombre por kilómetro. La tala indiscriminada de bosques nativos y la quema de sectores selváticos naturales en las áreas más elevadas de las hoyas hidrográficas contribuyen significativamente a una erosión que provoca el arrastre de enormes masas de material a través de los cauces; tal es el caso del río Maule en Chile, cuya barra de depósito en el mar puede ser apreciada claramente con fotografía aérea o fotos desde satélites de observación, cubriendo un área aproximada de 200 km² alrededor del estuario del río. Estos sedimentos depositados son comparativamente recientes (alrededor de 200 años); han sido causados por la destrucción del bosque nativo de robles que existió en las cercanías de la laguna del Maule.

Constituyentes fitopatógenos y semillas de malezas

La presencia en el agua de riego de semillas de malezas, esporas de hongos y otros constituyentes fitopatógenos se incrementa a medida que el agua es transportada hasta los lugares donde será usada para el riego, o cuando es utilizada más de una vez para regar en el valle. El problema de diseminación de malezas, plagas y enfermedades por el agua de riego es bastante significativo en ciertas regiones y cultivos, como el caso de hongos del género *Phytophthora* en algunos frutales o la maleza cúscuta.

A pesar de su simplicidad, el uso de mallas y decantadores significa una solución apreciable del problema de diseminación de malezas en el agua de riego.

Concentración total de sales

La concentración total de sales solubles en las aguas de riego para fines de diagnóstico y de clasificación se puede expresar en términos de conductividad eléctrica, que se determina en forma rápida y precisa en el laboratorio. Casi todas las aguas usadas normalmente para riego tienen una conductividad eléctrica menor de 2 250 micromhos/cm. Ocasionalmente se usan aguas de mayor conductividad eléctrica, pero los rendimientos de los cultivos regados con estas aguas no son satisfactorios. Un suelo es salino cuando la conductividad de su extracto de saturación es mayor de 4 milimhos/cm ó 4 000 micromhos/cm. Se ha comprobado que la conductividad eléctrica del extracto de saturación de un suelo, en ausencia de acumulación de sales provenientes del agua subterránea, es generalmente de dos a diez veces mayor que la correspondiente al agua con que se ha regado. Este aumento en la concentración de sales resulta de la extracción continua de humedad por las raíces y de la evaporación. Por lo tanto el uso de aguas entre moderada y altamente salinas puede ser la causa de que se desarrollen condiciones de salinidad en el suelo, aun cuando el drenaje sea satisfactorio. En general las aguas cuya conductividad eléctrica es menor de 750 micromhos/cm son satisfactorias para el riego en lo que se refiere a sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados adversamente cuando se usan aguas cuya conductividad varía entre 250 y 750 micromhos/cm.

Las aguas cuya conductividad eléctrica varía entre 750 y 2 250 micromhos/cm son utilizadas comúnmente; con ellas se obtiene crecimiento adecuado de las plantas si hay un buen manejo del suelo y un drenaje eficiente; sin embargo si el lavado y el drenaje no son adecuados se presentarán condiciones de salinidad en el suelo. El empleo de aguas con conductividad eléctrica mayor de 2 250 micromhos/cm es una excepción; rara vez se obtienen resultados económicos con los cultivos agrícolas. Únicamente los cultivos más tolerantes a las sales se pueden desarrollar bien cuando se riegan con ese tipo de agua, siempre que se aplique en abundancia y el drenaje del subsuelo sea adecuado.

La necesidad de lavado para suelos en que no existe precipitación de sales está directamente relacionada con la conductividad eléctrica del agua de riego y con la conductividad permisible del agua que drena en la zona radicular del cultivo. Las necesidades de lavado para valores específicos de conductividad eléctrica de aguas de riego y aguas de drenaje se presentan en el Cuadro N° 5.

Esos valores que son probablemente algo altos para las necesidades de lavado, ilustran cómo la conductividad eléctrica de las aguas de riego influye en diferentes niveles de salinidad del suelo, cuando dichos requerimientos se expresan en términos de la conductividad eléctrica de la solución del suelo en la parte inferior de la zona radicular. Es evidente que las propiedades de transmisión del agua, el drenaje del suelo y la tolerancia a las sales del cultivo regado son factores importantes en la evaluación de aguas para riego desde el punto de vista de su concentración total de sales.

CUADRO N° 5 Necesidad de lavado^(*) con relación a las conductividades eléctricas de aguas para riego y aguas de drenaje.

Conductividad eléctrica de aguas para riego (micromhos/cm)	Necesidad de lavado para los valores máximos indicados en la conductividad eléctrica del agua de drenaje, en la parte inferior de la zona radicular del cultivo.			
	4 mmhos/ cm (%)	8 mmhos/ cm (%)	12 mmhos/ cm (%)	16 mmhos/ cm (%)
100	2.5	1.2	0.8	0.6
250	6.2	3.1	2.1	1.6
750	18.8	9.4	6.2	4.7
2 250	56.2	28.1	18.8	14.1
5 000	—	62.5	41.7	31.2

(*) Fracción del agua de riego que debe ser llevada a través de la zona radicular, expresada en porcentajes.

Fuente: Richards³.

Concentración relativa de Sodio

Además de la concentración total de sales en solución interesa la proporción relativa de Na y cationes divalentes en el agua de riego, por su efecto sobre la sodificación del suelo. La importancia de este proceso radica en el efecto dispersante que tiene el Na al ser intercambiado por los coloides del suelo, debido a su elevado radio de hidratación. Cuando un suelo sufre dispersión por efecto del Na. su

estructura —la ordenación espacial característica de las partículas del suelo— se ve alterada con diferentes grados de intensidad, sellándose total o parcialmente la superficie del suelo a la infiltración del agua de riego e impidiendo el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el perfil del suelo. Se crean en consecuencia condiciones inapropiadas para el adecuado desarrollo del sistema radicular de las plantas, afectándose el rendimiento de los cultivos; por el efecto sobre la infiltrabilidad —disminuida a causa del sellamiento del suelo— disminuye la eficiencia del riego, incrementándose el escurrimiento superficial y el tiempo de riego necesario para reponer el agua consumida por los cultivos.

Por tratarse de un proceso de intercambio catiónico entre las arcillas del suelo y los iones disueltos en el agua que fluye en el perfil del suelo, el peligro de sodificación queda determinado por la relación entre Na y iones divalentes, expresada a través de un índice conocido como **relación de adsorción de Sodio** o RAS, expresada en la Ecuación 2.13.

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / 2}$$

Ecuación 2.13

Na⁺, Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ representan las concentraciones en miliequivalentes por litro de los iones respectivos.

La concentración de la solución del suelo aumenta a causa de la extracción de agua del suelo por las raíces y a causa de la evaporación. Debido a que la cantidad de sal absorbida por las plantas es relativamente pequeña la solución remanente en el suelo es más concentrada que el agua de riego aplicada. Al siguiente riego esta solución más concentrada puede ser desplazada hacia abajo o ser diluida; de ese modo la concentración de la solución que está en contacto con el suelo variará con el tiempo y localización en el perfil. No es raro encontrar agua subterránea o agua de drenaje de concentración de dos o diez veces mayor que el agua para riego. Puede suponerse que para una profundidad limitada del suelo, como en los primeros 30 centímetros, la concentración de la solución del suelo no es en promedio más de dos o tres veces la concentración del agua para riego.

Si en un suelo cualquiera se hace caso omiso de la precipitación y de la absorción de sales solubles por las raíces, fácilmente se comprende que el agua para riego una vez que penetra al suelo se

vuelve más concentrada sin cambiar su composición relativa. No obstante, la RAS aumenta en proporción a la raíz cuadrada de la concentración total, o sea que si el valor de la concentración total se duplica el valor de la RAS aumenta según el factor 1.41. Si se cuadruplica la concentración, la RAS se duplica.

La clasificación de las aguas de riego con respecto a la RAS se basa primordialmente en el efecto que tiene el Sodio intercambiable sobre la condición física del suelo. No obstante las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del Sodio en sus tejidos cuando los valores del Sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo. Debido a que el peligro de sodificación del suelo depende al mismo tiempo de la RAS y de la concentración total de sales en el agua de riego, no es posible establecer valores críticos de RAS en forma independiente. Más adelante se incluirá un esquema de clasificación del agua de riego en que a aguas con RAS constante se les atribuye mayor peligro de sodificación al aumentar la concentración total de sales, de acuerdo con observaciones de campo y de laboratorio.

Concentración de Boro

El Boro se encuentra en casi todas las aguas de riego y su concentración varía desde trazas hasta varias partes por millón. A pesar de ser un elemento esencial para el crecimiento de las plantas se convierte en tóxico cuando excede su nivel óptimo, que ha sido establecido de 0.03 a 0.04 ppm para la mayoría de los cultivos; sin embargo la concentración que afecta a algunas especies es óptima para otras; por ejemplo los limoneros muestran daños económicamente significativos si se riegan con aguas con más de 1 ppm de Boro, en cambio la alfalfa logra su máximo desarrollo si el agua de riego posee entre 1 y 2 ppm de Boro.

Las concentraciones tóxicas de Boro que se encuentran en algunas aguas de riego obligan a considerar este elemento para establecer su calidad. El Cuadro N° 6, sentado por Richards³ en 1954, establece límites de Boro para las aguas de riego.

CUADRO N° 6 Límites permisibles de Boro para aguas de riego.

Clase de agua por concentración de Boro	Cultivos sensibles p p m	Cultivos semitolerantes p p m	Cultivos tolerantes p p m
1	0.33	0.67	1.00
2	0.33 a 0.67	0.67 a 1.33	1.00 a 2.00
3	0.67 a 1.00	1.33 a 2.00	2.00 a 3.00
4	1.25	2.50	3.75

Fuente: Richards³

Concentración de bicarbonatos

En aguas ricas en iones bicarbonato, el Calcio y el Magnesio tienden a precipitar en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que se produce las concentraciones de Calcio y Magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa del Sodio.

CLASIFICACION DEL AGUA DE RIEGO DE ACUERDO CON SU CALIDAD

Al clasificar las aguas para riego se supone que van a usarse bajo condiciones medias con respecto a la textura del suelo, la velocidad de infiltración, el drenaje, la cantidad de agua usada, el clima y la tolerancia del cultivo a las sales. Desviaciones considerables del valor medio de cualesquiera de estas variables pueden hacer inseguro el uso de agua que en condiciones medias sería de muy buena calidad. o al contrario pueden inducir a considerar el agua como buena cuando bajo condiciones medias sería de dudosa calidad. Esto debe tenerse muy en cuenta cuando se trata de clasificar las aguas para riego.

Peligro de salinidad

Las aguas se dividen en cuatro clases con respecto a su conductividad; los puntos de división entre dichas clases son los valores 250, 750 y 2 250 micromhos/cm. (Fig. 8). Los límites entre clases se seleccionaron de acuerdo con las relaciones que existen entre la conductividad eléctrica y la concentración total de sales en el agua de riego, tal como se discutió previamente en este capítulo.

Peligro de Sodio

Una clasificación de la calidad de las aguas con respecto al peligro del Sodio es más complicada que en el caso del peligro por salinidad. Se puede considerar el problema desde el punto de vista del grado probable en que un suelo adsorberá el Sodio del agua, así como la velocidad en que tiene lugar dicha adsorción al aplicar el agua. Considérese el caso simple de un suelo no sódico que es lavado constantemente con agua de riego rica en Sodio y en el cual se ha impedido un aumento en la concentración de las sales de la solución por la ausencia del desarrollo vegetal y de la evaporación superficial. Bajo estas condiciones el porcentaje de Sodio intercambiable (PSI) que tendrá el suelo cuando éste y el agua estén en equilibrio se puede pronosticar aproximadamente conociendo el valor de la RAS del agua. La velocidad a la cual se alcance el equilibrio dependerá de la concentración catiónica total, o sea la conductividad eléctrica del agua (CE). Por lo tanto, en una situación como la indicada el riego con aguas que tengan idéntica RAS y CE variable puede resultar en casi los mismos PSI, pero la calidad de agua necesaria para que el suelo adquiera este último PSI variará inversamente a la CE. En la práctica el valor de la RAS del agua aumenta en el suelo a consecuencia del aumento de la concentración de todas las sales y de la posible precipitación de las concentraciones de Calcio y Magnesio a medida que disminuye el contenido de humedad por la extracción que hacen las plantas y por la evaporación superficial. Esto motiva que el PSI sea un poco más alto que el que se pronosticaría de acuerdo con la RAS del agua. Aunque el valor de la RAS es el mejor índice de equilibrio del PSI del suelo con relación al agua para riego, la concentración catiónica total o conductividad es un factor adicional de importancia.

Diagrama de clasificación

El diagrama para la clasificación de aguas para riego se muestra en la Fig. 8 y está basado en la conductividad eléctrica en micromhos por centímetro y en la relación de adsorción de sodio.

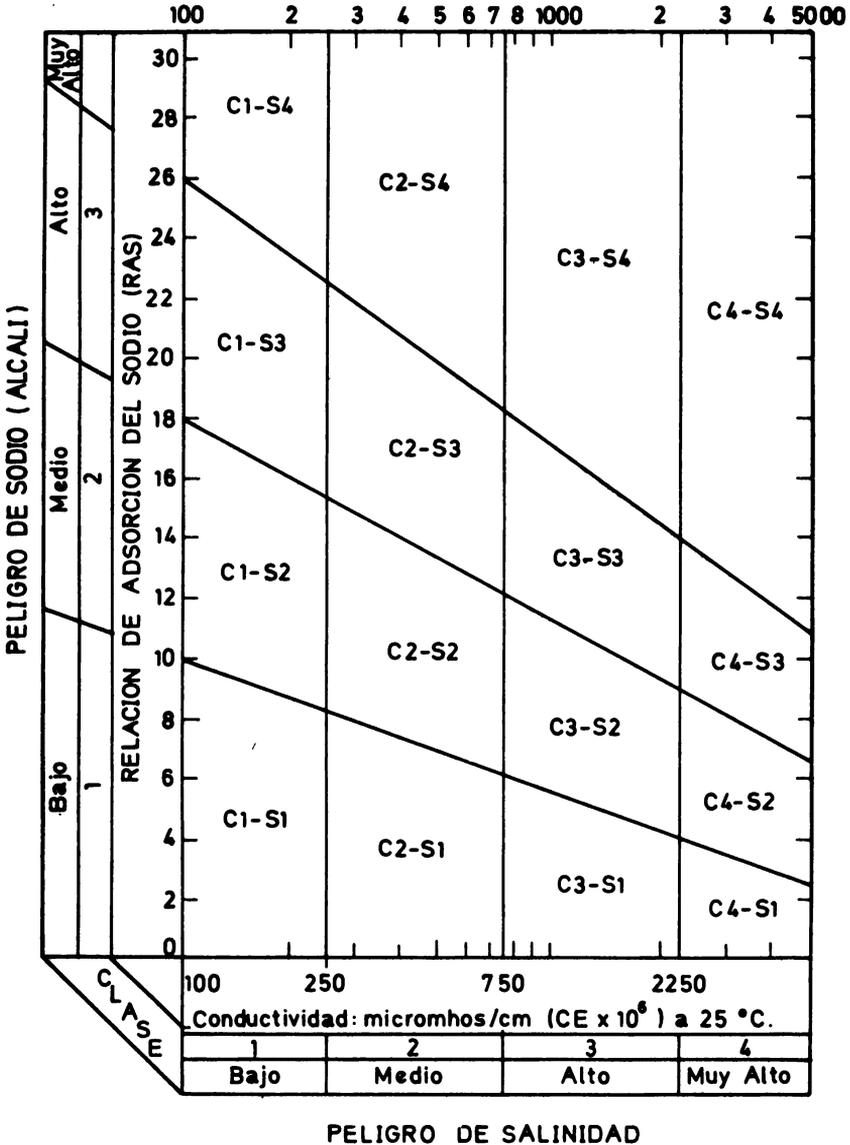


Fig. 8. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego. (Fuente: Richards³).

Para usar el diagrama es necesario conocer la conductividad eléctrica y las concentraciones de Sodio y (Calcio + Magnesio) del agua. Cuando únicamente se conoce el valor del (Calcio + Magnesio), el Sodio puede calcularse de la manera siguiente:

$$\text{Na}^+ = (\text{CE} \times 10^6 / 100) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

Ecuación 2.14

Inversamente, si sólo se conoce el valor del Sodio, el (Calcio + Magnesio) puede calcularse por la ecuación:

$$(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) = (\text{CE} \times 10^6 / 100) - \text{Na}^+$$

Ecuación 2.15

Las concentraciones iónicas se expresan en miliequivalentes por litro. La relación de adsorción de Sodio (RAS) puede calcularse con la ecuación que define su valor. Usando los valores de la RAS y la CE como coordenadas se ubica el punto correspondiente en el diagrama; la posición de este punto determina la clasificación de calidad del agua. El significado e interpretación de las clases por calidad en el diagrama se resumen a continuación:

a. Conductividad

1. Agua de baja salinidad (C1): puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo, con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado pero éste se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

2. Agua de salinidad media (C2); puede usarse siempre que haya un cierto grado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

3. Agua altamente salina (C3): no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas de control de la salinidad, debiendo por lo tanto seleccionarse únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

4. Agua muy altamente salina (C4): no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias; puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y el drenaje adecuado, debiendo aplicarse exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso se debe seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

b. Sodio

1. Agua baja en Sodio (S1): puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de Sodio intercambiable. No obstante los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

2. Agua media en Sodio (S2): en suelos de textura fina de Sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

3. Agua alta en Sodio (S3): puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que éstos necesitarán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable; sin embargo tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.

4. Agua muy alta en Sodio (S4): es inadecuada para riego excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico su empleo.

Ocasionalmente el agua de riego puede disolver un buen porcentaje de calcio en los suelos calcáreos de tal manera que disminuye notablemente el peligro por Sodio, condición que deberá tenerse muy en cuenta en el caso de usar aguas de las clases C1-S3 y C1-S4.

Tratándose de suelos calcáreos de pH alto o de suelos que no son calcáreos el estado del Sodio de las aguas C1-S3, C1-S4, C2-S4 se puede modificar ventajosamente agregando yeso al agua. De igual manera es conveniente aplicar yeso al suelo periódicamente cuando vaya a regarse con aguas C2-S3 y C3-S2.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. ¿Qué problemas prácticos de la agricultura se derivan del movimiento de solutos en el perfil del suelo?
2. ¿Cuáles son los mecanismos que explican el movimiento de solutos en el suelo y en qué consisten?
3. Indique con un diagrama los componentes y los procesos que integran el ciclo hidrológico.
4. El balance hídrico es la resultante de la situación de los procesos de flujo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera y refleja un 'estado de situación' en un momento dado. Un balance integral es la resultante de los procesos mencionados cuando se considera un intervalo de tiempo; un balance diferencial es la resultante de las velocidades de los procesos considerados.
Escriba la ecuación que describe el balance hídrico integral y diferencial de una pequeña superficie agrícola cultivada y regada. Comente la importancia relativa de cada uno de los componentes de la ecuación e indique brevemente qué procedimiento emplearía en su determinación.
5. Señale los efectos adversos sobre los cultivos que puede tener la presencia de una capa freática alta. Refiérase con detalle a uno de estos efectos y explique cómo puede solucionarse.
6. Haga un balance hídrico completo, diferencial o integral, para un predio agrícola hipotético, considerando y dando valores al mayor número posible de procesos.

7. ¿Qué significa que un agua de riego se haya clasificado como C3-S2 en cuanto al peligro de salinizar el suelo y/o de sodificarlo?
8. ¿Cuáles son las características que determinan la calidad del agua de riego?
9. ¿Cuál es la clasificación de un agua de riego con conductividad eléctrica 5 milimhos por centímetro y $RAS = 20$?
10. Escriba la ecuación que describe el balance hídrico integral y diferencial de una hoja hidrográfica completa. Comente la importancia relativa de cada uno de los componentes de la ecuación e indique brevemente qué procedimiento emplearía en su determinación.
11. Si un agua de riego tiene dos toneladas de sal por cm de agua, ¿cuál es su concentración en ppm?
12. Exprese el balance hidrológico de la zona radicular de un cultivo en un suelo regado, definiendo cada uno de los términos empleados.

BIBLIOGRAFIA

1. **ESPILDORA, B.** Principios de Hidrología. Publicación Universidad de Chile. 1974. 240 p.
2. **PLA, I. y DAPPO, F.** Sistema racional para la evaluación de calidad de agua para riego. Fundación para el Desarrollo de la Región Central Occidental de Venezuela. 1975. 85 p.
3. **RICHARDS, L.A. (ed).** Diagnóstico y funcionamiento de suelos salinos y sódicos. Publicación USDA N° 60: 1954.
4. **VEGA, A. y VELASQUEZ, V.** Balance hídrico de un predio de la comuna de Pirque. Tesis de Grado, Universidad de Chile. 1975. 72 p.
5. **WISLER, C.O. y BRATER, E.F.** Hydrology. Wiley International, 2 ed. 1959.

El texto del Capítulo 2 ha sido preparado por el autor con base en partes de las obras de Espíldora¹ y de Richards³, para los cursos generales de Riego que se dictan en la Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 3

EL AGUA EN EL SUELO

INTRODUCCION

El suelo es un sistema de gran complejidad constituido por material sólido, líquido y gaseoso. La fase sólida puede ser mineral y orgánica; la porción mineral es un conjunto de partículas de varios tamaños, formas y estructura química, y la porción orgánica incluye residuos vegetales o animales en diferentes estados de descomposición, así como organismos vivos en plena actividad. La fase líquida es el agua, que llena total o parcialmente los espacios libres entre las partículas de suelo y que varía en su composición química y en su facilidad de movimiento. La fase gaseosa o de vapor ocupa el espacio poroso entre las partículas del suelo que no está lleno con agua; su composición varía ampliamente en intervalos de tiempo relativamente cortos.

El suelo y el agua son recursos fundamentales del ambiente natural y de la agricultura. El aumento de la población humana y la consiguiente presión sobre

estos recursos ha motivado su escasez o ha llevado a su abuso en muchas partes del mundo. La necesidad de manejarlos en forma eficiente es una de las tareas vitales de este tiempo. Entre los más importantes fenómenos relacionados con los suelos se encuentran los de naturaleza netamente física, asociados con propiedades que dependen de las interacciones entre las partículas sólidas y el líquido presente en el espacio poroso. Por esta razón se ha hecho fundamental profundizar y difundir el conocimiento de las propiedades y comportamiento del sistema suelo-agua en relación con sus condiciones climatológicas, el crecimiento de las plantas y el ciclo hidrológico.

La Física de Suelos es el estudio del estado y transporte de materia y energía en el suelo. Es una ciencia relativamente nueva reconocida desde aproximadamente 1930 como un campo vital de interés universal, como una disciplina independiente y también como contacto entre varias ramas de las ciencias naturales. Actualmente la investigación en aspectos fundamentales y aplicados a la Física de Suelos es llevada a cabo a través de todo el mundo en relación con la Hidrología, Ecología, Ingeniería y Agricultura.

Dado que el suelo es escenario en todo momento de complejas interacciones entre sus componentes es extremadamente difícil definir su estado físico en un momento determinado. Cuando el suelo y sus propiedades se estudian en condiciones específicas debe simplificarse el sistema, concentrándose en los factores que parecen tener la mayor y más directa influencia sobre el problema en estudio; se deja de lado los factores que aparentemente tienen una importancia secundaria.

En muchos casos las teorías y ecuaciones comúnmente empleadas no describen el suelo en sí mismo sino un modelo ideal y bien definido con el cual es posible simular su comportamiento. El suelo puede ser comparado con una colección de pequeñas esferas, un conjunto de tubos capilares, una colección de plaquitas coloidales paralelas, o incluso con un *continuum* mecánico. La tendencia general es describir el sistema macroscópicamente en vez de microscópicamente; en vez de definir el estado de una partícula o poro específico se tiende a caracterizar el conjunto por medio de sus partes. El valor de estos modelos y representaciones depende del grado de realidad en cada caso particular pero en general sólo explican parcialmente el comportamiento del suelo. Las complicaciones que se dejan de lado al analizar un problema determinado no desaparecen; una vez

que se han definido los más importantes efectos (llamados efectos primarios) se debe refinar el modelo considerando los efectos secundarios. De ese modo el conocimiento del suelo, que está en su etapa de desarrollo como el conocimiento de otros sistemas complejos, se obtiene por aproximaciones sucesivas.

El uso de modelos es una herramienta tradicional e indispensable en todos los campos de la Física. Una teoría es el modelo de un proceso o estructura del mundo material; el modelo intenta explicar cómo se comportan las cosas y las relaciones causa-efecto observadas entre eventos físicos. Todos los modelos y teorías son idealizaciones y no siempre corresponden a observaciones directas fácilmente comprensibles; por ejemplo, nadie ha visto un electrón pero su modelo conceptual ha tenido una importancia enorme en la Física. El calor no 'fluye' realmente pero la analogía con un fluido permite entender el comportamiento del calor y facilita las especulaciones respecto a él. La imagen visual de algo fluyendo lleva a pensar en gradientes, en una tendencia natural a fluir de un nivel alto a un nivel bajo. Esto resulta útil y corresponde a las observaciones y mediaciones. Sin embargo cuando un modelo comienza a fallar, o sea a apartarse notoriamente de los hechos, debe ser modificado o reemplazado.

Los modelos son expresados en forma concisa y precisa en el lenguaje de las Matemáticas; una ecuación describe el comportamiento del modelo y transformando la ecuación se puede predecir cómo se va a comportar el modelo bajo condiciones diferentes. De ese modo el modelo no sólo sirve para resumir lo que se sabe sino también para predecir lo que aún no se sabe. Posteriormente las predicciones se verifican por medio de la experimentación; si los resultados coinciden se dice que se trata de un modelo adecuado. La teoría no puede avanzar sin experimentación, pero la experimentación sin teoría posiblemente será estéril y sin sentido, desembocando en un conglomerado de datos aparentemente no relacionados y librados al azar.

EL SUELO COMO SISTEMA DISPERSO

El término 'suelo' alude a la capa más superficial de la corteza terrestre que ha sufrido los efectos del clima y se ha fragmentado en partículas. Inicialmente se ha formado por la desintegración y descomposición de rocas a través de procesos físicos y químicos, y ha

sufrido también los efectos de la actividad y acumulación de residuos de numerosas especies biológicas. El suelo puede ser estudiado y descrito desde muchos puntos de vista; por lo tanto la ciencia del suelo es en realidad un conglomerado de varias disciplinas separadas pero interdependientes.

Este enfoque guarda relación con las propiedades físicas y con la descripción, medida y control de los procesos que tienen lugar en el suelo. Así como la Física se ocupa de la materia y de la energía (sus formas e interrelaciones), la Física de Suelos trata del estado y movimiento de la materia, y de los flujos y transformaciones de la energía en el suelo. La parte práctica de esta ciencia tiene por objeto elaborar instrumentos para un manejo adecuado del suelo por medio del riego, drenaje, conservación del agua y del suelo, labores de suelo, mejoramiento de la estructura, aireación del suelo y regulación de su temperatura, así como su uso como material de construcción o como base de caminos o estructuras.

Los sistemas naturales pueden estar formados por una o más sustancias, por una o más fases. Un sistema formado por una sustancia es además monofásico si en todas sus partes las propiedades son similares. Puede mencionarse como ejemplo una cantidad de agua que consiste enteramente de hielo; ese sistema es homogéneo. En los sistemas dispersos por lo menos una de las fases está subdividida en pequeñas partículas que en conjunto muestran un área superficial considerablemente grande. Ejemplos de sistemas dispersos frecuentes en la naturaleza son los soles coloidales, los geles, las emulsiones y los aerosoles.

El suelo es un sistema heterogéneo (varias sustancias), polifásico (varias fases), particulado (las sustancias sólidas están finamente subdivididas), disperso (en general la relación entre partículas es más bien débil) y poroso. La naturaleza dispersa de los suelos y la actividad en la interfase entre las partículas, resultante de esta naturaleza, da origen a fenómenos como expansión, contracción, dispersión, agregación, adhesión, adsorción, intercambio iónico y otros.

Las tres fases que existen ordinariamente en la naturaleza están presentes en el sistema suelo: la fase sólida, o sea las partículas de suelo; la fase líquida, o sea el agua del suelo (que también tiene sustancias disueltas, por lo que debería llamarse la 'solución' del suelo). Y por último la fase gaseosa, que consiste en el aire del suelo.

El suelo es en consecuencia un sistema realmente complejo. Su matriz sólida consiste en partículas que difieren en composición química y mineralógica, así como en tamaño, forma y orientación. La acomodación u organización de estas partículas en el suelo determina las características de los espacios porosos, en los cuales el agua y el aire son transportados o retenidos. El agua y el aire varían en composición tanto en el tiempo como en el espacio.

RELACIONES DE VOLUMEN Y MASA ENTRE LOS CONSTITUYENTES DEL SUELO

La Fig. 9 presenta el diagrama esquemático del suelo, útil para definir las relaciones de volumen y de masa entre sus tres fases. El histograma completo representa la masa y el volumen totales del suelo y está dividido en tres secciones que en general son cuantitativamente desiguales; la sección más baja representa la fase sólida, la sección media la fase líquida y la sección superior la fase gaseosa.

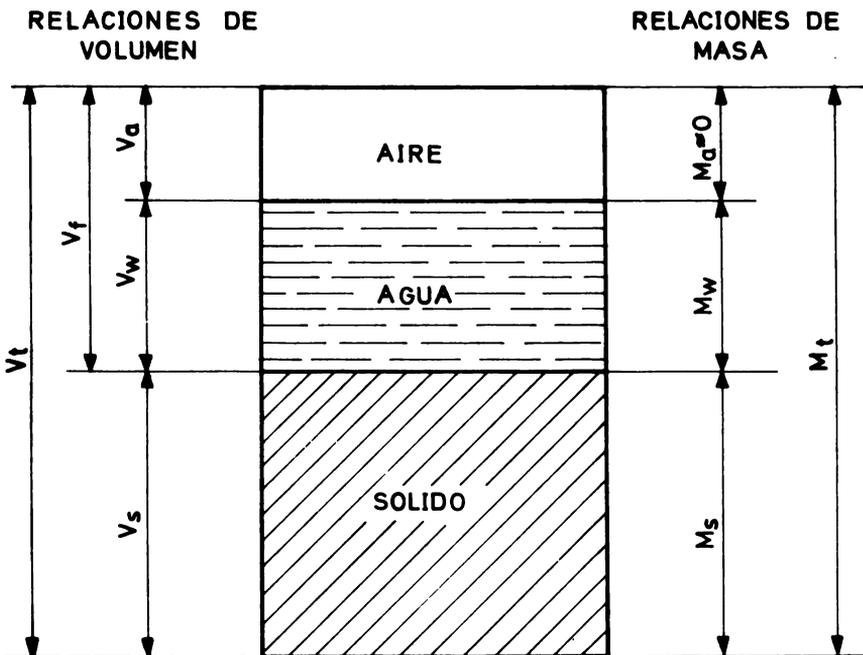


Fig. 9. Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases.

Con base en este diagrama se pueden definir términos que se usan generalmente para expresar las relaciones cuantitativas de los tres constituyentes básicos del suelo.

1. Densidad de sólidos (densidad de partículas)

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Ecuación 3.1

En la mayoría de los suelos minerales la densidad de partículas es alrededor de 2.6 - 2.7 gr/cm³. La presencia de materia orgánica reduce este valor. A veces la densidad se expresa como peso específico; éste es el cociente entre la densidad del material y la densidad del agua a 4° C y a presión atmosférica. En el sistema métrico este último valor es igual a la unidad, siendo entonces el peso específico numérica pero no dimensionalmente igual a la densidad.

2. Densidad aparente: D_b

$$D_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_a + V_w}$$

Ecuación 3.2

La densidad aparente (*bulk density*) expresa la relación entre la masa de partículas del suelo después que han sido secadas y el volumen total del suelo, que incluye las partículas y los poros en conjunto. Obviamente éste es menor que el valor de D_s . Para el suelo en el cual los poros constituyen la mitad del volumen total, D_b es $\frac{1}{2}$ de D_s , o sea aproximadamente 1.3 - 1.35 gr/cm³. En un suelo arenoso, D_b puede ser del orden de 1.6 gr/cm³; en uno arcilloso puede llegar a 1.1 gr/cm³.

La densidad aparente es afectada por la estructura del suelo, es decir por su grado de compactación, así como por sus características de expansión y contracción que dependen a su vez del grado de humedad.

3. Densidad aparente total: D_t

$$D_t = \frac{M_t}{V_t}$$

Ecuación 3.3

Esta expresión indica la relación entre masa total de un suelo húmedo y volumen total. Es un valor poco usado.

4. Volumen específico seco (V_b)

$$V_b = \frac{V_t}{M_s} = \frac{1}{D_b}$$

Ecuación 3.4

El volumen de una masa de suelo seco (cm^3 por gr) sirve como índice del grado de compactación o soltura de un suelo.

5. Porosidad: f

$$f = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_a + V_w}$$

Ecuación 3.5

La porosidad es un índice del volumen relativo de poros en el suelo. Este valor se encuentra en general en el rango 0.3 -0.6 (30-60%). El suelo de texturas gruesas tiende a ser menos poroso que el de texturas finas, aunque el tamaño promedio de los poros individuales es mayor en el primero que en el segundo. En los suelos con alto contenido de arcilla la porosidad es muy variable a medida que el suelo alternativamente se expande o contrae, se agrega o dispersa, se compacta y se parte. La porosidad total no revela nada acerca de la distribución de poros por tamaño, que es por sí misma una importante propiedad del suelo en relación al riego.

6. Espacio vacío: e

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V_f}{V_t - V_f}$$

Ecuación 3.6

Ese espacio vacío es también un índice del volumen relativo de poros del suelo, pero en relación al volumen de sólidos más que al volumen total del suelo; la ventaja de este índice sobre el anterior es que un cambio en el volumen de poros cambia el numerador del cociente en la Ecuación 3.6 en vez de cambiar el numerador y denominador como es el caso de la porosidad (Ecuación 3.5). El espacio vacío es preferido como índice en Ingeniería de Suelos y en Mecánica, mientras que la porosidad es más frecuentemente usada en Física Agrícola de Suelos. El espacio vacío generalmente varía entre 0.3 y 0.2.

7. Humedad del suelo

La humedad o contenido relativo de agua de un suelo puede expresarse en varias formas: relación a la masa total, al volumen de sólidos, al volumen total y al volumen de poros.

a. Contenido de agua gravimétrico o humedad de masa: w

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

Ecuación 3.7

Es la masa de agua con relación a la masa de partículas de suelo seco; éste se define generalmente como el suelo secado hasta el equilibrio en una estufa a 105° C, aunque las arcillas pueden contener cantidades apreciables de agua incluso a temperaturas mayores. El suelo secado al aire contiene generalmente una apreciable cantidad de agua en comparación con un suelo secado en una estufa a 105° C, fenómeno que se debe a la adsorción de vapor de agua; este fenómeno se llama 'higroscopicidad'.

En un suelo mineral saturado w varía entre 25 % y 60 %, según la densidad aparente. El contenido de agua en condiciones de saturación es generalmente mayor en suelos más arcillosos. En suelos orgánicos el contenido de agua de saturación en base a masa puede exceder del 100 %.

b. Humedad volumétrica: θ

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f}$$

Ecuación 3.8

El contenido de agua volumétrica o humedad volumétrica se computa con base en el volumen total del suelo.

En suelos arenosos el valor de θ en saturación es del orden de 40-50 %, aumentando a medida que la textura del suelo se hace más arcillosa.

El uso de θ en vez de w para expresar el contenido de agua es más conveniente pues se adapta más directamente a la computación de flujos y cantidades de agua agregados al suelo a través del riego, la lluvia y a las cantidades de agua extraídas del suelo por evapotranspiración y drenaje.

c. Grado de saturación: θ_s

$$\theta_s = \frac{V_w}{V_f} = \frac{V_w}{V_a + V_w}$$

Ecuación 3.9

Este índice —conocido algunas veces solamente por saturación— expresa el volumen de agua presente en el suelo con relación al volumen de poros. El índice θ_s varía entre 0 en suelo seco hasta 100 % en un suelo totalmente saturado. Sin embargo es casi imposible obtener 100 % de saturación, ya que siempre hay algo de aire y puede ser atrapado en forma de burbujas en un suelo que se humedece muy rápidamente.

Este índice no es adecuado para suelos arcillosos que se hinchan, en los cuales la porosidad cambia con el contenido de agua del suelo.

8. Porosidad llena de agua o contenido de aire relativo: f_a

$$f_a = \frac{V_a}{V_t} = \frac{V_a}{V_a + V_s + V_w}$$

Ecuación 3.10

Esta es una medida del contenido relativo del aire del suelo; es un criterio importante en la aireación del suelo. El índice f_a está relacionado con el grado de saturación θ_s .

$$f_a = f - \theta_s$$

Ecuación 3.11

9. Interrelaciones adicionales

a. Relación entre porosidad y espacio vacío

$$e = \frac{f}{1 - f'} \qquad f = \frac{e}{1 + e}$$

Ecuación 3.12

b. Relación entre grado de saturación y humedad volumétrica

$$\theta_s = \frac{\theta}{f}$$

Ecuación 3.13

c. Relación entre porosidad y densidad aparente

$$f = \frac{D_s - D_b}{D_s} = 1 - \frac{D_b}{D_s}$$

Ecuación 3.14

- d. Relación entre humedad volumétrica y humedad gravimétrica

$$\theta = \frac{w D_b}{D_w}$$

Ecuación 3.15

donde D_w = densidad del agua = M_w/V_w
 w = humedad en base a masa = M_w/M_s

- e. Relación entre contenido de aire y contenido de humedad

$$f_a = f - \theta = f(1 - \theta_s)$$

Ecuación 3.16

EL ESTADO ENERGETICO DEL AGUA EN LOS SUELOS

La principal característica física del suelo es el estado energético en que se encuentra el agua contenida en él. Los fenómenos en que está involucrada el agua del suelo —que envuelven las relaciones entre el contenido de agua, su estado energético y los procesos de gradientes energéticas en el sistema suelo-agua— constituyen el área más importante de la Física de Suelos, aportan el cuerpo orgánico más grande de teorías matemáticas que hay en esta ciencia y son de fundamental importancia para el riego.

El agua del suelo, como otros cuerpos en la naturaleza, puede contener energía en diferentes formas y cantidades. La Física clásica reconoce dos formas principales de energía: cinética y potencial. Dado que el movimiento de agua en el suelo es relativamente lento en condiciones normales, su energía cinética —proporcional al cuadrado de la velocidad— se considera generalmente sin importancia. Por otra parte la energía potencial, debida a posición o condición interna dentro del sistema, es de primordial importancia para determinar el estado de energía y el movimiento de agua en el suelo. La energía potencial del agua del suelo varía en un amplio rango. La diferencia en energía potencial del agua entre dos puntos da origen a la posibilidad del agua de fluir dentro del suelo. La tendencia espontánea y universal de toda la materia en la naturaleza es moverse desde donde su energía potencial es alta hacia donde ésta sea baja, y en el caso de

cada trozo de materia, llegar a un equilibrio con su entorno inmediato. El agua del suelo obedece a estos mismos principios, moviéndose constantemente en la dirección de energía potencial descendente. La velocidad de disminución de energía potencial respecto a la distancia es la fuerza causante del flujo de agua en el suelo. El conocimiento del estado energético relativo del agua del suelo, en cada punto dentro de éste, nos permite evaluar las fuerzas que están actuando sobre el agua del suelo en todas direcciones y determinar a qué distancia se encuentra el agua de llegar a un estado de equilibrio. En consecuencia no es la cantidad absoluta de energía potencial 'contenida' en el agua la que tiene una importancia por sí misma, sino más bien el nivel relativo de aquella energía en diferentes regiones del suelo. El concepto de 'potencial de agua en el suelo' es un criterio o vara de medida de esta energía.

El concepto de potencial del agua en el suelo expresa la energía potencial específica del agua del suelo con relación a la del agua en un estado de referencia estándar. El estándar usado generalmente es el de un estanque hipotético de agua pura en estado libre a la presión atmosférica, a la misma temperatura que el agua del suelo y con una elevación constante. Como la elevación del estanque puede fijarse a voluntad, el potencial que se determina por comparación con este estándar no es absoluto.

En la misma forma en que un incremento de energía puede ser visualizado como el producto de una fuerza por un incremento de distancia, la razón de una energía y un incremento de distancia puede ser visualizada como una fuerza. De esta forma la fuerza que actúa sobre el agua del suelo en la dirección de una zona de alto potencial hacia una zona de potencial más bajo, es igual a la gradiente de potencial negativa ($-d\phi / dx$), que es el cambio de energía potencial ϕ , con la distancia x . El signo negativo indica que la fuerza actúa en la dirección del potencial decreciente.

El concepto de potencial del agua del suelo es de importancia fundamental. Este concepto reemplaza las categorías arbitrarias que clasificaban antiguamente las 'formas de agua en el suelo' (agua gravitacional, agua capilar, agua higroscópica, entre otras). El hecho real es que toda el agua del suelo está afectada por el campo gravitacional de la tierra; de ese modo, toda ella sería 'gravitacional'. Por otra parte las leyes de capilaridad no cesan de tener validez para un amplio rango de humedades del suelo y tamaño de los poros, de tal forma que también toda el agua del suelo sería 'capilar'.

¿En qué forma difiere el agua entre puntos del suelo y en el tiempo? No difiere en forma sino en energía potencial. Los valores posibles de la energía potencial del agua del suelo son continuos y no presentan discontinuidades abruptas o cambios de una condición a otra (salvo cambios de fase). Así, en vez de tratar de 'clasificar' el agua del suelo, el enfoque más válido es caracterizar su estado de energía potencial.

Cuando el suelo está saturado y su agua se encuentra a una presión hidrostática mayor que la presión atmosférica (por ejemplo, bajo una napa de agua), el nivel de energía potencial del agua puede ser mayor que la del estanque de 'referencia' descrito anteriormente; el agua tenderá pues a moverse desde el suelo a ese estanque. Por otra parte, si el suelo está húmedo pero no saturado, su agua no estará libre para fluir hacia el estanque en condiciones de presión atmosférica; por el contrario, la tendencia será que el suelo extraiga agua del estanque si se pone en contacto con él, en forma similar a un secante en contacto con tinta. (Fig. 10)

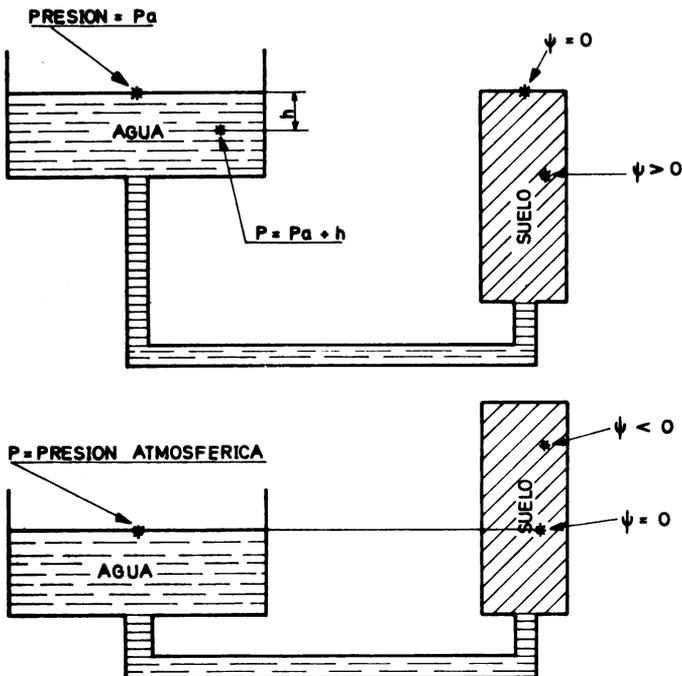


Fig. 10. Esquema del concepto de potencial de referencia del agua en el suelo.

Bajo condiciones de presiones hidrostáticas mayores que la atmosférica, el potencial del agua del suelo (cuando no hay factores osmóticos involucrados) es mayor que el del estado de referencia y puede ser considerado 'positivo'. En un suelo no saturado el agua es retenida por fuerzas capilares y de adsorción de tal forma que su energía potencial es 'negativa' y su presión hidrostática equivalente es menor que la del estado de referencia. En condiciones de campo normales el suelo generalmente es no saturado y el potencial del agua del suelo es negativo. Su magnitud en cualquier punto depende no sólo de la presión hidrostática sino también de aquellos factores físicos como elevación (relativa a la elevación de referencia), concentración de sales y temperatura.

POTENCIAL TOTAL DEL AGUA DEL SUELO

Desde el punto de vista termodinámico la energía potencial puede ser considerada en términos de una diferencia en energía libre entre el agua del suelo y el agua estándar. Más explícitamente, el potencial total del agua del suelo ha sido definido como "la cantidad de trabajo que debe ser efectuado por unidad de agua pura para transportar en forma reversible e isotérmica una cantidad infinitesimal de agua desde una piscina de agua pura, a una elevación específica a presión atmosférica, hasta el agua del suelo en el punto considerado". Se trata de una definición formal, pues en la práctica el potencial total del agua del suelo no se mide trasladando agua como en la definición, sino midiendo otras propiedades relacionadas con el potencial en alguna forma conocida (por ejemplo la presión hidrostática, la elevación u otros).

El agua del suelo está influida por una serie de campos de fuerza que hacen que su potencial sea diferente al del agua pura y libre. Esos campos resultan de la atracción de la parte sólida hacia el agua, así como de la presencia de solutos, la acción de presiones causadas por fases externas y la gravitación. Por ello puede entenderse el potencial total del agua del suelo como la suma de las contribuciones separadas de estos factores varios.

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_o + \dots$$

Ecuación 3.17

En esta ecuación ϕ_t es el potencial total, ϕ_g es el potencial gravitacional, ϕ_p es el potencial de presión o potencial mátrico o matricial, ϕ_o es el potencial osmótico; los puntos en el lado derecho significan términos adicionales, que son teóricamente posibles.

No todos los potenciales separados actúan en la misma forma y sus gradientes pueden no ser igualmente efectivas para causar flujo (por ejemplo la gradiente de potencial osmótico requiere la presencia de una membrana semipermeable para inducir el flujo de líquido). La principal ventaja del concepto de potencial total es que proporciona una medida uniforme por medio de la cual el estado del agua puede ser evaluado en cualquier momento y en cualquier lugar dentro del sistema unitario y continuo suelo-planta-atmósfera.

Potencial gravitacional

El potencial gravitacional del agua del suelo en cualquier punto está determinado por la elevación del punto en relación a algún nivel de referencia arbitrario. Por conveniencia es costumbre fijar el nivel de referencia bajo el perfil del suelo considerado, de tal forma que el potencial gravitacional sea mayor que cero (o sea, siempre positivo).

A una altura z sobre la referencia, la energía potencial gravitacional E_g de una masa M de agua, que ocupa un volumen V es

$$E_g = M.g.z = D w . V.g.z$$

Ecuación 3.18

En esta ecuación Dw es la densidad del agua y g es la aceleración de gravedad. En la misma forma, el potencial gravitacional en términos de energía potencial por unidad de masa es

$$\phi_g = g.z$$

Ecuación 3.19

y en términos de energía potencial por unidad de volumen

$$\phi_g = w.g.z$$

Ecuación 3.20

El potencial gravitacional es independiente de las condiciones químicas y de presión del agua del suelo; depende únicamente de la elevación relativa.

Potencial de presión

Cuando el agua del suelo está sometida a una presión hidrostática mayor que la presión atmosférica su potencial de presión se considera positivo. Lo contrario ocurre cuando está bajo la presión atmosférica, lo que comúnmente se llama tensión o succión. La Fig. 11 esquematiza estas relaciones.

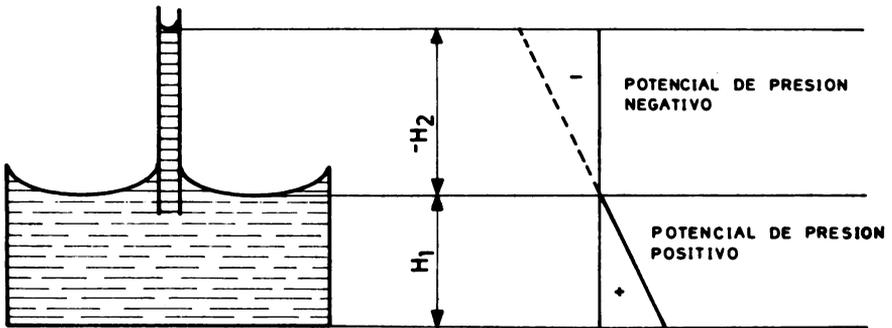


Fig. 11. Esquema de posibles potenciales de presión en el agua del suelo.

El potencial de presión positivo que existe bajo el nivel de agua del suelo ha sido llamado también 'potencial sumergido'. La presión hidrostática P del agua con referencia a la presión atmosférica es

$$P = Dw.g.h$$

Ecuación 3.21

en que h es la profundidad bajo la superficie de agua libre (llamada también altura piezométrica).

La energía potencial del agua libre es

$$E = P.dv$$

Ecuación 3.22

y el 'potencial sumergido', tomado como energía potencial por unidad de volumen es

$$\phi_{ps} = P$$

Ecuación 3.23

Un potencial de presión negativo es conocido con el nombre de potencial capilar y más recientemente como potencial matricial. Este potencial del agua del suelo es la resultante de las fuerzas capilares y la adsorción debidas a la matriz sólida del suelo; estas fuerzas atraen y enlazan al agua en el suelo y disminuyen su energía potencial bajo la del agua libre.

La capilaridad es el resultado de la tensión superficial del agua y su ángulo de contacto con las partículas sólidas. En un sistema de suelo no saturado se forman meniscos curvos que obedecen a la ecuación de capilaridad.

$$p_o - p_c = p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Ecuación 3.24

en que p_o es la presión atmosférica (convencionalmente tomada como cero), p_c es la presión del agua del suelo, que puede ser menor que la atmosférica, p es el déficit de presión del agua del suelo, γ es la tensión superficial del agua y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de un punto en el menisco.

Si el suelo fuera como un simple conjunto de tubos capilares, las ecuaciones de capilaridad serían suficientes para describir la relación del potencial de presión negativo con los radios de los poros del suelo. Sin embargo, además del fenómeno de capilaridad el suelo exhibe fenómenos de adsorción, que son la causa de la formación de envolturas hidratadas sobre las partículas del suelo. Estos dos mecanismos de interacción entre el agua y las partículas del suelo están ilustrados en la Fig. 12.

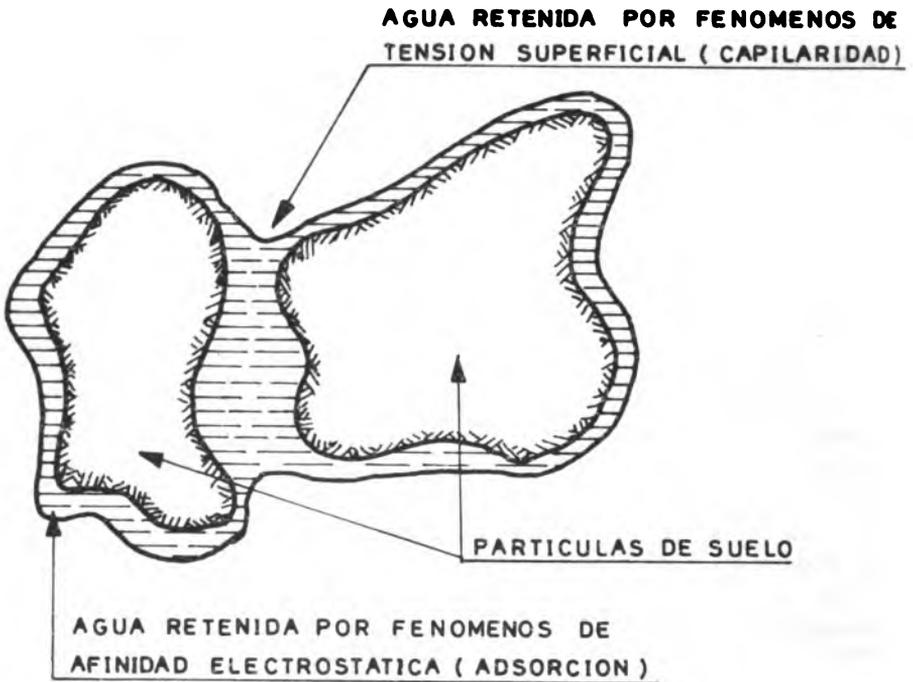


Fig. 12. Fenómenos de adsorción y capilaridad en la retención de agua por el suelo.

El agua en un suelo no saturado está sujeta a capilaridad y adsorción que combinados producen la succión matricial o potencial de presión negativo.

Existe una gran ventaja en unificar el potencial de presión positivo y el potencial matricial (considerando este último sólo como un potencial de presión negativo) ya que este concepto unificado permite considerar todo el perfil de humedad en el suelo en términos de un potencial continuo que se extiende desde la región saturada a la región no saturada, bajo y sobre la napa de agua.

Un factor adicional que puede afectar la presión del agua del suelo es un posible cambio en la presión del aire ambiental. En general este efecto es despreciable, ya que la presión atmosférica es prácticamente constante (si no se toman en cuenta pequeñas variaciones barométricas). Sin embargo, en condiciones de laboratorio la aplicación de presión de aire para cambiar la succión o tensión del agua en

el suelo es una práctica común. Este efecto se conoce como 'potencial neumático' y en un suelo no saturado ϕ_p puede ser considerado como la suma de los potenciales matricial (ϕ_m) y neumáticos (ϕ_a).

En ausencia de solutos, las fases líquida y gaseosa en un medio poroso no saturado están relacionadas en condiciones de equilibrio por

$$HR = \exp(g \cdot \phi_m / RT)$$

Ecuación 3.25

en que HR es la humedad relativa, R es la constante de los gases para el vapor de agua, y T la temperatura absoluta.

Potencial osmótico

La presencia de solutos en el agua del suelo afecta sus propiedades termodinámicas y baja su energía potencial, especialmente la presión de vapor del agua del suelo; a pesar de que este fenómeno no influye significativamente en el flujo masivo del líquido, puede jugar un papel importante cuando se hace presente en el sistema una membrana o barrera difusiva que transmita más fácilmente el agua que las sales. Este efecto osmótico es importante en la interacción entre las raíces de plantas y el suelo y en los procesos relacionados con la difusión de vapor de agua.

EXPRESION CUANTITATIVA DEL POTENCIAL DEL AGUA EN EL SUELO

El potencial puede expresarse físicamente por lo menos en tres formas:

1. Energía por unidad de masa:

Es la forma fundamental para expresar el potencial, usando unidades de ergs por gramo o joules por kilogramo, cuyas dimensiones son $L^2 T^{-2}$.

2. Energía por unidad de volumen:

Como el agua es prácticamente incompresible, su densidad no es afectada por el potencial; y la energía puede tener una expresión a

través del potencial por unidad de volumen. Esta última expresión tiene las dimensiones de presión (el cociente entre energía y volumen es presión). Esta presión equivalente puede ser medida en términos de dinas/cm², bares o atmósferas. Las dimensiones básicas son las de fuerza por unidad de área (ML⁻¹ T⁻²); este método de expresión es conveniente para los potenciales osmóticos y potenciales de presión pero tiene poco uso para expresar el potencial gravitacional.

3. Energía por unidad de peso o carga hidráulica:

Todo aquello que puede ser expresado en unidades de presión hidrostática puede ser expresado también en términos de carga hidráulica, que es la altura de una columna de líquido correspondiente a una presión dada.

Por ejemplo, una presión de una atmósfera es equivalente a una columna de agua vertical, o carga hidráulica, de 1 033 cm o a una carga de mercurio de 76 cm.

Este método de expresión es más sencillo y generalmente más conveniente que los métodos previos. Por lo tanto, es común caracterizar el estado del agua del suelo en términos de 'carga de potencial total', 'carga de potencial gravitacional' y 'carga de potencial de presión', que se expresan generalmente en cm de agua.

Así, en vez de

$$\phi = \phi_g + \phi_p$$

Ecuación 3.26

se puede escribir

$$H = H_g + H_p$$

Ecuación 3.27

Esta ecuación expresa que la carga de potencial total del agua del suelo (H) es la suma de las cargas de potencial gravitacional (H_g) y de presión (H_p); H es llamado también carga hidráulica.

Al tratar de expresar el potencial de presión negativo del agua del suelo en términos de una carga hidráulica, debe tenerse presente

que es posible encontrar cargas de -10 000 o aún -100 000 cm de agua. Para evitar el uso de estos números, Schoefield sugirió el uso de unidades pF (en analogía a la escala de pH de acidez). Este pF es definido como el logaritmo de la carga de presión negativa (tensión o succión) en cm de agua. Así, un pF de 1 indica una carga potencial de 10 cm de agua y un pF 3 una carga de 1 000 cm de agua.

Debe entenderse claramente que las expresiones alternativas del potencial del agua en el suelo son equivalentes y cada método de expresión puede ser traducido directamente en cualquier otro método. Si se usa ϕ para designar el potencial en términos de energía por unidad de masa, P para el potencial en términos de presión y H para el potencial en términos de carga, entonces:

$$\phi = \frac{P}{D w}$$

Ecuación 3.28

$$H = \frac{P}{D w \cdot g} = \frac{\phi}{g}$$

Ecuación 3.29

en que D w es la densidad del agua líquida y g la aceleración de gravedad.

Medición del potencial del agua en el suelo

Aunque la medición del contenido de agua del suelo o humedad del suelo es esencial en muchas investigaciones de Física de Suelos y de Ingeniería, no es suficiente para dar una descripción del estado del agua del suelo; para obtener una descripción de este tipo es necesario evaluar el estado de energía del agua del suelo (o potencial del agua del suelo, o succión). En general ambas propiedades —humedad del suelo y potencial— deben ser medidas directamente y la expresión de una en otra es con base en curvas de calibración de muestras de suelo es poco confiable.

El potencial total del agua del suelo se entiende en general como la suma del potencial matricial y del potencial osmótico; es un índice

de gran utilidad para caracterizar el estado energético del agua del suelo con respecto a la absorción de agua por las plantas. La suma de las cargas (o potenciales) matriciales e hidrostáticas se conoce con el nombre de carga hidráulica o potencial hidráulico, y es de utilidad para evaluar la dirección y la intensidad de las fuerzas que causan el movimiento del agua en el perfil del suelo.

Existen métodos para determinar tanto el potencial total como el potencial matricial, en forma conjunta o por separado. Para medir en condiciones de campo el potencial matricial, se utilizan tensiómetros y para la medición del potencial total se hace uso de *psycrómetros-termocuplas*, que determinan la presión de vapor del agua del suelo.

En condiciones de equilibrio el potencial del agua del suelo es igual al potencial del vapor de agua en la atmósfera. Si existe un equilibrio térmico y se desprecia el efecto gravitacional el potencial del vapor es igual a la suma de los potenciales matricial y osmótico, ya que el aire actúa como una membrana semipermeable que permite solamente el paso de las moléculas de agua. A temperatura ambiente, la humedad relativa del aire se relaciona con el potencial de la siguiente forma:

$$pF = 6.5 + \log (2 - \log H.R.)$$

Ecuación 3.30

en que $pF = \log$ (potencial osmótico + potencial matricial), cuando esos potenciales se expresan como cm de columna de agua.

H.R. = humedad relativa.

El tensiómetro tiene hoy en día una gran aceptación como instrumento práctico para las mediciones en terreno de la succión matricial, la carga hidráulica y las gradientes hidráulicas; las principales partes de un tensiómetro se esquematizan en la Fig. 13.

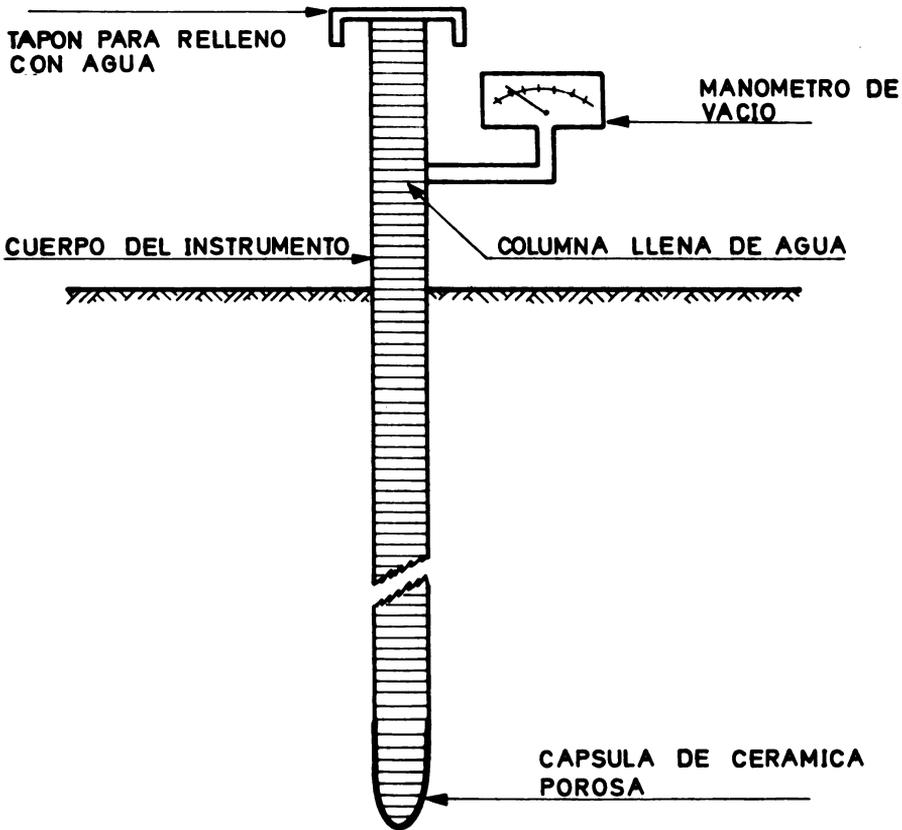


Fig. 13. Ilustración esquemática de las partes de un tensiómetro.

El tensiómetro consiste en una cápsula porosa de material cerámico conectada mediante un tubo a un manómetro, llenándose todas las partes con agua. Cuando la cápsula es colocada en el suelo donde se va a realizar la medición de succión, la masa de agua dentro de la cápsula entra en contacto hidráulico y tiende a equilibrarse con el agua del suelo a través de los poros de la pared de cerámica. Cuando el tensiómetro está recién colocado en el suelo, el agua contenida en el interior se encuentra a presión atmosférica. Como el agua del suelo está generalmente sometida a una presión subatmosférica, se ejerce una succión que elimina cierta cantidad de agua del tensiómetro rígido, impermeable al aire, causando una baja en la presión hidrostática. Este cambio de presión se indica por un manómetro que puede ser simplemente de agua, de mercurio, una válvula de vacío o un transductor eléctrico.

Un tensiómetro dejado en el suelo por un período continuado tiende a seguir los cambios de tensión matricial del agua del suelo. A medida que se va eliminando humedad del suelo por evaporación, drenaje o absorción de las plantas, o que se va agregando agua al suelo por lluvia o riego, se pueden leer en el manómetro las variaciones de succión. Puesto que las paredes porosas de la cápsula del tensiómetro son permeables al agua y a los solutos, el agua dentro del tensiómetro se equilibra en composición y concentración con el agua del suelo, de tal forma que el instrumento no indica la succión osmótica del agua del suelo.

Las mediciones con tensiómetros se limitan generalmente a succiones matriciales menores de una atmósfera; el rango más común es de 0.1 a 0.8 atmósferas. Esto se debe al hecho de que el indicador de vacío o el manómetro mide un vacío parcial relativo a la presión atmosférica externa, así como a la imposibilidad que tienen las columnas de agua en sistemas macroscópicos de extraer tensiones que excedan de una atmósfera. Otro factor que determina este rango es la constitución altamente porosa y permeable del material cerámico con que está formada la cápsula. En altas tensiones pueden causar la entrada de aire en la cápsula, lo que igualaría la presión interna a la atmosférica; en esas condiciones la succión del suelo puede continuar incrementándose, aún cuando el tensiómetro no lo indique. En la práctica el límite de utilidad de la mayoría de los tensiómetros es de alrededor de 0.8 bares como máximo.

Los tensiómetros han sido de utilidad para determinar en forma práctica cuándo se debe regar cultivos y huertos frutales, así como plantas en maceteros. Una práctica común es colocar el tensiómetro en una o más profundidades del suelo, que representan la zona radicular, regando cuando el tensiómetro indica que la succión matricial ha alcanzado algún valor determinado. El uso de varios tensiómetros a diferentes profundidades puede indicar la cantidad de agua necesaria para el riego, así como los gradientes hidráulicos en el perfil del suelo.

Si $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n$ son las succiones matriciales en centímetros de columna de agua (milibares) a las profundidades $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, medidas en cm desde la superficie del suelo, la gradiente hidráulica promedio i entre las profundidades d_n y d_{n+1} es

$$i = (\phi_{n+1} + d_{n+1}) - (\phi + d_n) / (d_{n+1} - d_n)$$

Ecuación 3.31

La medición de la gradiente hidráulica es particularmente importante en la región situada bajo la zona radicular, en la cual la dirección y la magnitud del movimiento de agua no puede ser estimada de otra manera.

Para succiones mayores de 0.8-1 bares, los procedimientos de determinación directa y los principios envueltos en éstos son discutidos más adelante en este capítulo; sin embargo existen métodos indirectos para determinar ϕ superiores a 1.0 atmósfera. Se puede hacer uso de la dependencia de la presión de vapor sobre una superficie de agua, en la diferencia de presión hidrostática mantenida entre los dos lados de la interfase aire-agua. La presión de vapor también es afectada por la presión osmótica de la solución, de tal forma que no es posible diferenciar entre succión hidrostática y presión osmótica.

$$1n(p - p_0) = 1n(S/S_0) = MP/RT Dw$$

Ecuación 3.32

en que M es el peso molecular del agua, cuya densidad es D_w , R es la constante de los gases, T es la temperatura en $^{\circ}K$, S y S_0 son las densidades del vapor de agua correspondientes a las presiones de vapor p y p_0 respectivamente, y P es la presión hidrostática. Si el agua experimenta una succión, P es negativo y p es menor que p_0 . Una medición de la humedad relativa p/p_0 es suficiente para la determinación de P .

CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD

En el suelo saturado, en equilibrio con agua libre a la misma elevación, la presión es atmosférica; por lo tanto la presión hidrostática y la succión o tensión es cero.

Si una pequeña succión, o sea una presión de agua ligeramente sub-atmosférica, se aplica al agua en un suelo saturado, no se apreciará flujo de agua hasta que el incremento en la succión llegue a un valor crítico en el cual el poro más grande comience a vaciarse. Esta succión crítica se llama 'succión de entrada de aire' y su valor es pequeño en suelos de textura gruesa o suelos con buena agregación. Sin embargo como los suelos de texturas gruesas tienen sus poros relativamente uniformes en tamaño, estos suelos presentan el fenó-

meno de entrada de aire crítica en forma más aguda y distintiva que los suelos de texturas más finas.

A medida que la succión se va haciendo cada vez mayor, se va extrayendo del suelo más y más agua y se va vaciando un mayor número de poros a medida que ya no pueden retener agua contra la succión aplicada. Recordando la ecuación de capilaridad, en condiciones de ángulo de contacto igual a cero y poros del suelo aproximadamente cilíndricos:

$$-P = 2\gamma/r$$

Ecuación 3.33

se puede predecir que un incremento gradual de la succión tendrá como resultado el vaciamiento de los poros cada vez más chicos hasta que en condiciones de muy altas succiones sólo los poros muy pequeños van a retener agua. En forma similar, un incremento en la succión del agua del suelo está asociado con una disminución en el grosor de las envolturas de hidratación que cubren la superficie de las partículas del suelo.

La cantidad de agua que permanece en el suelo en el equilibrio a una succión determinada, depende de los tamaños y los volúmenes de los poros llenos de agua y por lo tanto es función de la succión matricial. Esta relación es generalmente medible en forma experimental y es representada gráficamente por una curva llamada 'curva de retención de humedad del suelo' o 'curva característica de humedad'.

Hasta hoy no se conoce una teoría que permita predecir la relación entre succión matricial y contenido de agua del suelo, partiendo de propiedades básicas de éste. Los efectos de adsorción y de geometría de los poros son tan complejos que no pueden ser descritos por un solo modelo.

La cantidad de agua retenida bajo succiones matriciales relativamente pequeñas (entre 1 y 2 bares) depende en primer lugar del efecto de capilaridad y de la distribución de poros y por lo tanto está fuertemente afectada por la estructura del suelo. Por otra parte la retención de agua en el rango alto de succiones se debe más que nada a la adsorción y por ello está menos afectada por la estructura y mucho más por la textura y la superficie específica del material sólido del suelo.

Cuanto mayor sea el contenido de arcilla en un suelo, mayor será el contenido de humedad a una succión determinada, y más gradual será la pendiente de la curva. En un suelo arenoso los poros son en su mayoría relativamente grandes, y cuando estos poros se vacían a una succión determinada, sólo una pequeña cantidad de agua permanece en el suelo. En un suelo arcilloso la distribución de poros según su tamaño es más uniforme (o sea, los hay de todos los portes) y la mayor parte de agua está retenida por adsorción, de tal forma que un incremento en la succión matricial causa un descenso más gradual en el contenido de agua. (Fig. 14).

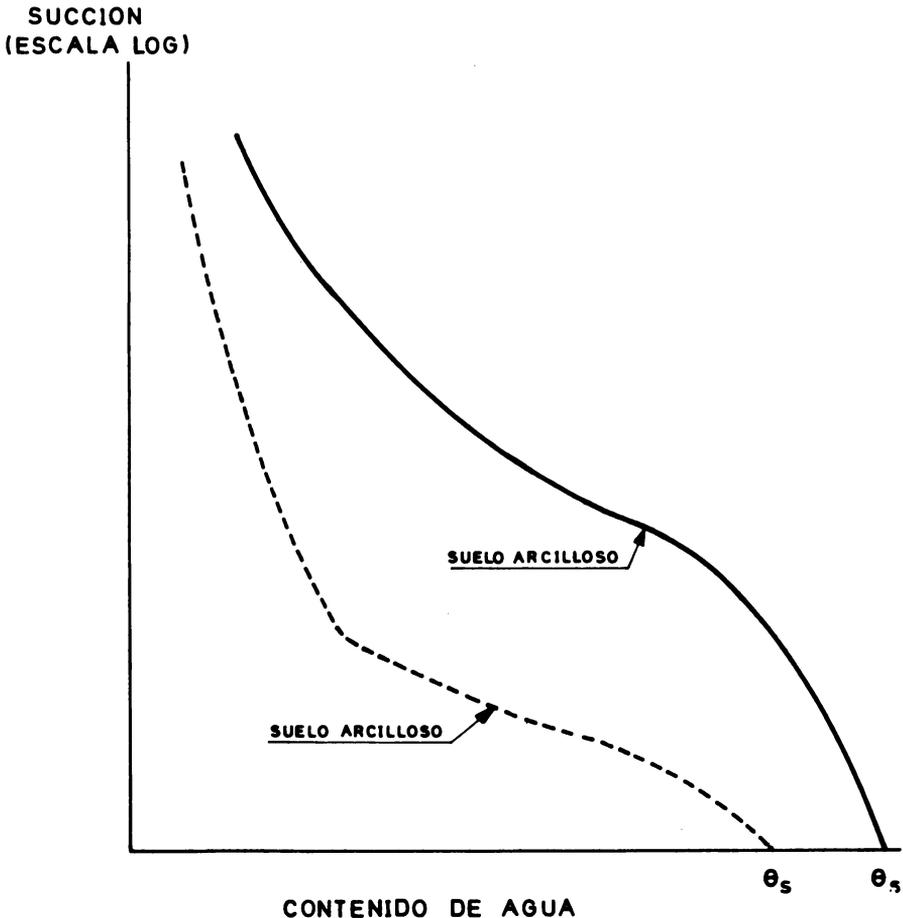


Fig. 14. El efecto de la textura en la retención de agua del suelo.

La estructura del suelo también afecta la forma de la curva de retención de humedad, especialmente en el rango de las bajas succiones. El efecto de la compactación es bajar la porosidad total y especialmente disminuir el volumen de los poros relativamente grandes que existen entre los agregados.

Esto implica la reducción del contenido de agua en la saturación; asimismo la baja inicial en el contenido de agua, al aplicársele a este suelo compactado una pequeña succión, es menor que la correspondiente al mismo suelo no compactado. Sin embargo el volumen de poros de tamaño intermedio es un poco mayor en un suelo compactado (pues algunos poros originalmente grandes se han comprimido por la compactación) y los poros chicos presentes dentro del agregado no han sido afectados por la compactación; por esta causa las curvas para el suelo compactado y sin compactar serán casi idénticas, en el rango de succiones medias a altas, no así en el caso de succiones bajas (suelo con contenido alto de agua) (Fig. 15).

Si dos masas de suelo de diferente textura o estructura se ponen en contacto una con otra, después de un cierto tiempo se equilibrarán en cuanto a potencial pero, en general, exhibirán una discontinuidad en el contenido de agua; estos contenidos corresponden a sus curvas características de retención.

En un suelo que no presenta los fenómenos de expansión y contracción, la curva de retención característica permite —una vez determinada— el cálculo de la distribución efectiva de poros (o sea el volumen de diferentes poros clasificados en cuanto a tamaño).

Si de un incremento en succión matricial de ϕ_1 a ϕ_2 resulta la extracción de un cierto volumen de agua, este volumen es igual al volumen de los poros que tienen un rango de radios efectivos entre r_1 y r_2 , en que ϕ_1 y r_1 , y ϕ_2 y r_2 están relacionados con la ecuación de capilaridad (Ecuación 3.33).

Debe subrayarse que si el agua está en un suelo no saturado, a presión sub-atmosférica, no tiene la tendencia a pasar a la atmósfera. Para fluir espontáneamente fuera del suelo y hacia la atmósfera, la presión del agua del suelo debe exceder a la presión atmosférica. En forma similar, para que un suelo de textura fina se drene hacia los poros grandes de una capa seca de textura más gruesa, el agua del suelo tiene que estar a una presión muy cercana a la atmosférica.

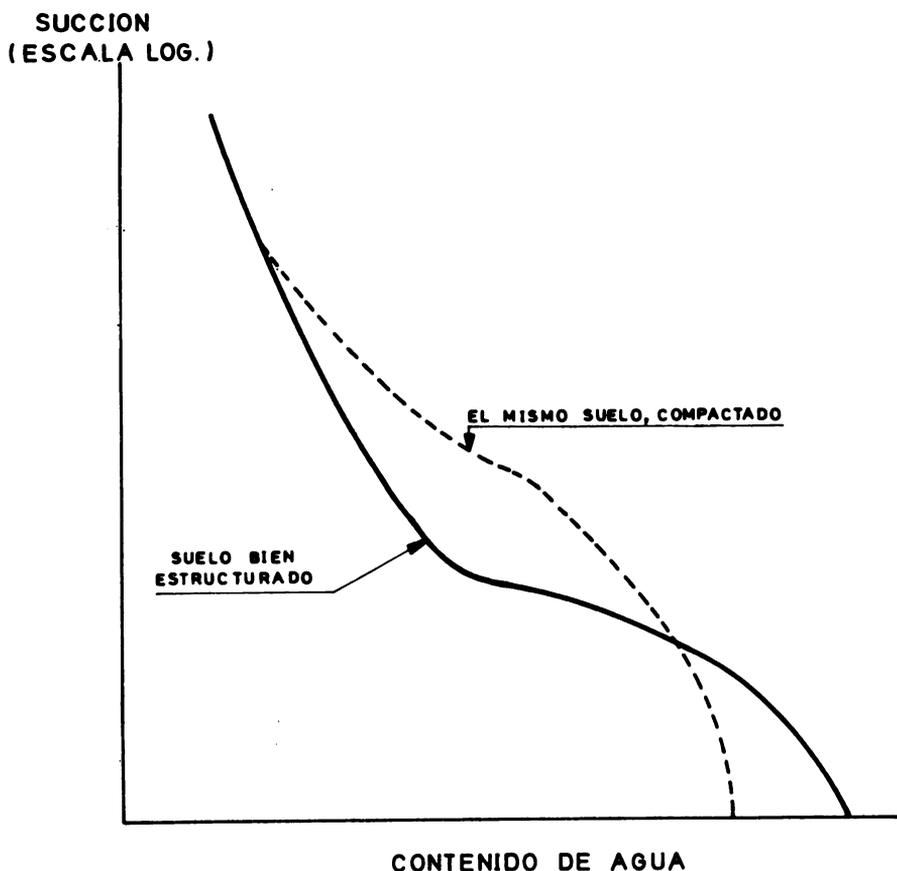


Fig. 15. El efecto de la estructura en la retención de agua del suelo.

Medición del potencial para valores de succión superiores a una atmósfera

La medición de la succión del agua del suelo cuando el potencial es superior a una atmósfera de presión se realiza por medio de los platos de presión o membranas de presión. Estos instrumentos permiten la aplicación de valores progresivos de succión y la medición repetida de la humedad del suelo en equilibrio en cada una de esas succiones.

La succión máxima que es posible obtener con los aparatos mencionados es de 1 bar si el aire del suelo es mantenido a presión atmosférica y la diferencia de presión a través del plato se controla por vacío o colgando una columna de agua (Fig. 16).

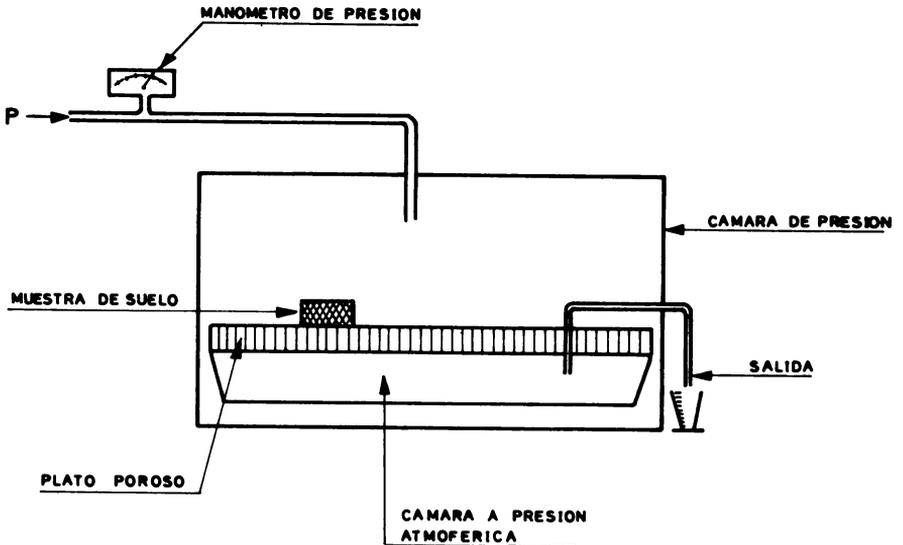


Fig. 16. Aparato de presión para curvas características de humedad.

Pueden obtenerse succiones matriciales considerablemente altas (20 bares o más) incrementando la presión del aire; ello requiere que el plato poroso se coloque en una cámara de presión.

El límite de succión matricial que puede obtenerse con este aparato depende del diseño de la cámara (su presión máxima de trabajo) y de la máxima diferencia de presión que el plato poroso saturado pueda soportar sin permitir que burbujee el aire a través de sus poros. En general los platos de presión de cerámica no soportan presiones mayores de 20 bares, pero las membranas de acetato de celulosa pueden ser usadas con presiones de 100 bares.

La retención de agua del suelo en el rango de succión bajo (0-1 bar) está significativamente afectada por la estructura del suelo y por la distribución de poros; mediciones realizadas en muestras disturbadas no representan las condiciones de campo. La retención de humedad del suelo en el rango de altas succiones se debe primordialmente a la adsorción; por lo tanto está correlacionada con la superficie específica del material del suelo más que con su estructura.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Señale en cuál de los suelos especificados más abajo será mayor la densidad aparente, el contenido de agua en condiciones de saturación y el contenido de agua cuando el suelo esté en equilibrio con la humedad del aire y el valor de entrada de aire. Explique brevemente porqué.

Suelo	A	B	C
% arena	62	48	32
% limo	25	25	25
% arcilla	12	24	38
% M.O.	1	3	5

2. Comente cuatro características principales del sistema suelo-agua y su relación con problemas de riego.
3. Si la densidad aparente del suelo es 1.2 gr/cm^3 , ¿Cuál es su porosidad total? ¿Qué porcentaje volumétrico de agua tendrá este suelo cuando el peso del material sólido sea igual al peso del agua?
4. Señale brevemente los fenómenos físicos y físico-químicos que se asocian con los diferentes valores (negativos y positivos) que puede asumir el potencial del agua en el suelo.
5. Refiérase a las características físicas del sistema suelo que lo hacen distinto de otros sistemas de la naturaleza. ¿Qué fenómenos y procesos de suelo se asocian con dichas características?

6. Una muestra de suelo obtenida con un cilindro de 15 cm de alto y 5 cm de diámetro tiene un contenido gravimétrico de agua de 21 %. ¿Qué densidad aparente tiene ese suelo y cuál es el contenido volumétrico de agua si en total se extraen del suelo 85 cm³ de agua?
7. Si una muestra de 150 gr del suelo anterior se pone en un cilindro de 240 cm³, se satura y luego se aplican presiones equivalentes a los potenciales señalados, determine la distribución de poros según tamaño.
8. Encuentre un modelo matemático (ecuación) que permita asociar los siguientes valores ϕ y θ

ϕ	θ
0.1	67.6
0.3	41.2
0.5	32.8
0.7	28.2
1	24.0
2	17.5
5	11.6
10	8.5
15	7.1

9. ¿Cómo expresaría Ud. la relación $\phi - \theta$ en el rango de 0 a 15 atmósferas? ¿A qué se debe que ésta no sea una relación biunívoca (uno a uno)? Explique la causa de este fenómeno y señale algunos métodos para determinar la relación $\phi - \theta$ en el rango mencionado.
10. Se hizo un orificio en el suelo cuyo volumen fue de 1 000 cm³; la masa húmeda del suelo fue de 1 800 g, de los cuales 300 g eran de agua.

- a. ¿Cuál es el contenido de agua con base en volumen (θ):
0.35, 0.30, 0.25, 0.28, 0.15?
 - b. ¿Cuál es el contenido de agua con base en peso (w):
0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15?
 - c. ¿Cuál es la densidad aparente (D_b):
1.8, 1.3, 1.5, 1.6?
 - d. ¿Qué proporción del volumen total fue llenado con aire bajo condiciones de campo:
0.42, 0.32, 0.12, 0.36?
 - e. ¿Cuál es la porosidad (f):
0.58, 0.42, 0.50, 0.32, 0.12?
11. ¿Cuál es la diferencia entre textura y estructura del suelo? ¿En qué rangos de contenido de agua del suelo el efecto de esas dos características es relativamente más importante en la retención de agua?
12. Un terrón natural de suelo húmedo tiene un volumen de 150 cm^3 ; su peso es de 240 gr. El espacio ocupado por aire es de $0.15 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$.
- Calcular:
- a. Densidad aparente con base en peso seco
 - b. Contenido de humedad con base en peso
 - c. Contenido de humedad con base en volumen
 - d. Porosidad total
 - e. Si la profundidad del suelo es de 80 cm, ¿Cuánta agua es capaz de almacenar el suelo en 10 ha?
13. ¿Cuál es el potencial total de agua, de un suelo cuyo potencial gravitacional es +25 cm, potencial osmótico -1.0×10^5 ergs/g, potencial mátrico -2.0 bars y potencial neumático es cero?

14. La altura de mercurio en un tensiómetro es 8 cm. La distancia desde el reservorio del mercurio a la cápsula del tensiómetro es 50 cm. ¿Cuál es el potencial de presión? $R = -21$ cm.

BIBLIOGRAFIA

1. **BAVER, L.D., GARDNER, W.H., GARDNER, W.R.** Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 4 Ed. Capítulo 8. 1972.
2. **CHILDS, E.C.** An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena. Wiley Interscience, New York. Capítulos 7 y 8. 1969.
3. **DAY, P.R., BOLT, G.H., ANDERSON, D.M.** Nature of Soil Water. In "Irrigation of Agricultural Lands", R. Hagan (ed). Agronomy N° 11. Capítulo 12. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967.
4. **HILLEL, D.** Soil and Water. Physical Principal and Processes. Academic Press, New York. Capítulo 3. 1971.
5. **KIRKHAM, D.; POWERS, W.L.** Advanced Soil Physics. John Wiley & Sons, New York. Capítulo 1. 1972.

Este capítulo se ha basado en una adaptación y resumen de partes del libro de D. Hillel⁴, preparada para cursos de Física de Suelos dictados por el autor en el Programa de Post-Grado en Riego, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 4

MEDICIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

INTRODUCCION

La medición del contenido de agua del suelo tiene fundamental importancia para el riego; con el fin de poder establecer la frecuencia de riego (¿cuándo regar?) y la carga de agua a reponer en el suelo durante el riego (¿cuánto regar?), la forma más directa y confiable es determinar el contenido de agua que hay almacenado en el perfil del suelo en un momento dado. En condiciones de campo se requiere una medida directa del contenido de agua, o alternativamente la medición de un índice del contenido de agua.

El contenido de agua de una muestra de suelo se expresa tradicionalmente como la relación entre la masa de agua (M_w) y la masa de suelo secado hasta que llega a un peso constante (M_s), de acuerdo con la Ecuación 4.1.

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{sh} - M_s}{M_s}$$

Ecuación 4.1

donde M_{sh} = masa de suelo húmedo

Evidentemente, la masa de agua resulta de la diferencia de peso de la muestra de suelo húmeda (M_{sh}) y seca (M_s). Alternativamente, el contenido de agua también se expresa como relación entre el volumen de agua (V_w) presente en un cierto volumen de suelo (V_s) de acuerdo con la Ecuación 4.2

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}$$

Ecuación 4.2

Ya sea que el contenido del agua del suelo se exprese en forma gravimétrica (w), o sea como una relación de masas, o en forma volumétrica (θ), como una relación de volúmenes, el agua de la muestra de suelo debe ser separada del suelo y luego medida o estimada por medio de una determinación de la masa de la muestra antes y después del secado. Esto lleva a definir qué se entiende por suelo 'seco'; tradicionalmente, se lo define como la masa de una muestra de suelo después que ha llegado a un peso constante en una estufa a 110°C , temperatura un tanto arbitraria pero ampliamente aceptada, tanto para trabajos científicos como para determinaciones de riego.

En el caso del riego la expresión del contenido de agua del suelo que más interesa es θ , o sea el contenido volumétrico de agua definido en la Ecuación 4.2. Cuando θ es multiplicado por 100 se obtiene el porcentaje de agua de la muestra de suelo; sin embargo, la determinación de θ generalmente se realiza a partir de la determinación de w (contenido gravimétrico, Ecuación 4.1), pues resulta bastante difícil establecer el volumen exacto de una muestra de suelo; por ello se utiliza la relación entre θ y w expresada en la Ecuación 4.3.

$$\theta = D_b \cdot w$$

Ecuación 4.3

en que D_b es la densidad aparente del suelo, que fue definida en el capítulo anterior (Ecuación 3.2). Así, para determinar correctamente θ , se requiere una medición de D_b . Si se considera la variabilidad del suelo, incluso en una pequeña extensión de terreno, siempre se comete algún error en la medición de D_b , en general dentro del rango de error experimental que se comete en la determinación de w . Sin embargo muchos suelos con contenidos apreciables de arcillas monto-

moriloníticas tienen una densidad aparente D_b variable, que es función del contenido de agua; esto es, cuando w es un valor comparativamente grande (suelo bastante húmedo) estas arcillas tienden a expandirse, con lo que disminuye su densidad aparente, y cuando w es relativamente pequeño (suelo semiseco) las arcillas se contraen, aumentando D_b . La determinación exacta de θ en este tipo de suelos es bastante compleja; para lograrla se requiere un conocimiento adecuado de la variación de la densidad aparente en función del contenido del agua del suelo.

Cuando se aplica agua a un suelo a través del riego o la lluvia la cantidad aplicada se expresa habitualmente en términos de carga o lámina de agua, cuyas unidades son de longitud (cm) pues resultan de la relación entre el volumen aplicado y la superficie de terreno que recibe el agua ($L^3 / L^2 = L$). Análogamente el contenido de agua del suelo en una zona o profundidad específica del perfil se expresa también en cm; así se determina la carga o lámina de agua que sería necesario aplicar para llevar al suelo el contenido de agua en cuestión. Si se conoce el contenido gravimétrico de agua del suelo (w) y la densidad aparente del suelo (D_b), multiplicando ambos valores se obtiene θ (contenido volumétrico de agua). Al multiplicar θ por la profundidad H del suelo se obtiene una carga o lámina de agua almacenada en el suelo (h) (Ecuación 4.4).

$$h = (w \cdot D_b) \cdot H = \theta \cdot H$$

Ecuación 4.4

Esta carga de agua h puede expresarse en m de agua —equivalente a los metros cúbicos de agua aplicados a una hectárea ($10\,000\text{ m}^2$)— o en cualquier otra unidad de longitud.

De ese modo es posible visualizar la importancia que tiene, para una adecuada práctica de riego, conocer en un momento dado cuál es la situación de contenido de agua en diferentes profundidades del perfil del suelo, y expresar esos contenidos en unidades homogéneas de carga, porcentaje o fracción decimal; se puede así establecer el posible déficit de agua del suelo respecto a su capacidad de almacenamiento, con el fin de aplicar agua suficiente que supla ese déficit.

MÉTODOS DE DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Se ha desarrollado innumerables métodos para determinar el contenido de agua del suelo, de acuerdo con las necesidades y características de diversos problemas de riego enfrentados por investigadores, productores agrícolas y extensionistas. Los métodos desarrollados pueden agruparse en dos tipos: los directos en los cuales es necesario separar físicamente el agua del suelo, generalmente por secado, y los métodos indirectos, en los que se aprovecha alguna propiedad del sistema suelo-agua, que sea función del contenido de agua.

1. Métodos directos

Cuando se separa el agua presente en el suelo del material sólido a través de secado o evaporación, la cantidad de agua removida se determina midiendo la pérdida de peso de la muestra. Como depende de las características texturales (tamaño de las partículas) y estructurales (ordenamiento de esas partículas en el espacio) de la muestra, varía significativamente el tiempo de secado necesario para llegar a un peso constante del suelo seco, indicador de que toda el agua ha sido removida. Un suelo arenoso se seca normalmente después de 12 a 24 horas en la estufa a 110° C; un suelo arcilloso necesita más de 48 horas de secado. También es de significativa importancia el tamaño de la muestra de suelo; mientras mayor sea éste, mayor será el tiempo que deba mantenerse el suelo en la estufa hasta que alcance un peso constante.

El método más aceptado para determinar el contenido de agua del suelo es el muestreo y posterior secado en estufa a 110° C; sin embargo, para las prácticas de riego este método tiene desventajas e inconvenientes que lo convierten en una operación poco práctica en condiciones de campo. En primer lugar, el procedimiento de muestrear el suelo, colocarlo en un recipiente hermético, transportar la muestra al laboratorio, el proceso de secado de la muestra, la tabulación de los resultados y la recepción de éstos por parte del usuario, demorará generalmente varios días, quizás una semana; recién después de ese período el usuario estará en condiciones de planificar la operación de su riego (cuánto, cuándo y dónde regar), con base en datos que no representan la situación real existente en el momento en que se empieza a regar. En segundo lugar, el número de muestras

que debe tomarse depende de la variabilidad natural del suelo y se multiplica debido a la necesidad de tomar muestras a diferentes profundidades en el perfil y a diferentes distancias a lo largo y ancho del campo regado; ese muestreo se efectúa con el fin de lograr una descripción completa del contenido de agua en la zona de raíces, como también en la dirección del flujo de agua a través del campo regado (Fig. 17). En último término el procedimiento del muestreo resulta en extremo oneroso y se transforma, en la práctica, en una complicación para el agricultor en la época del verano. En esa época el muestreo debería ser más acucioso y frecuente, y coincide con la época de mayor trabajo en el campo y de mayores requerimientos de agua por parte de los cultivos.

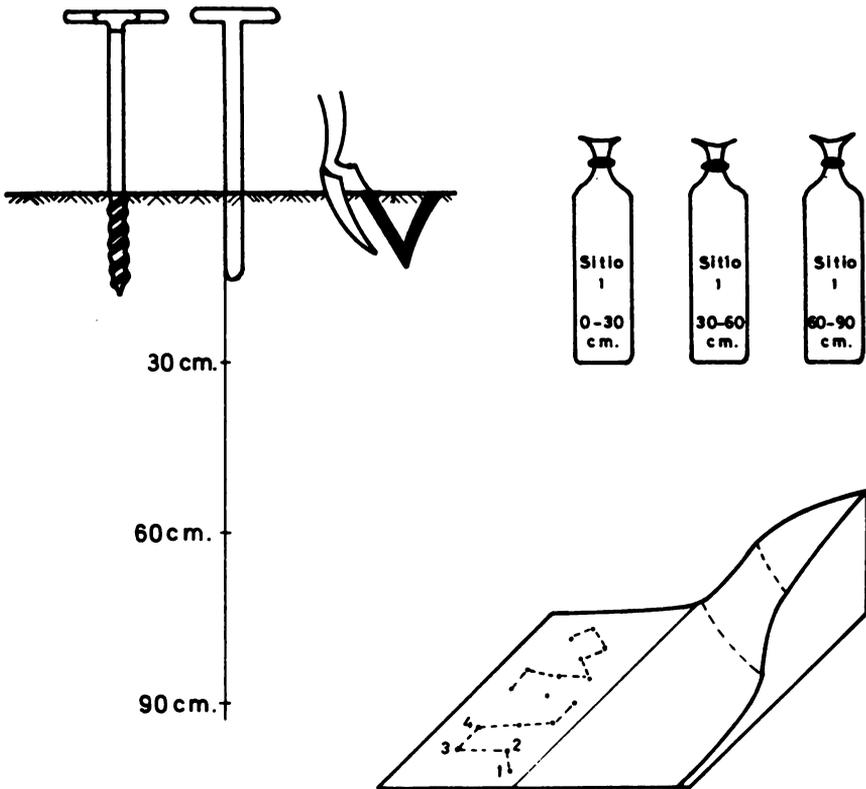


Fig. 17. Esquema de muestreo de suelo en terreno.

En parte los problemas señalados puede obviarse determinando directamente el contenido de agua en el suelo a través del método de alcohol. Este consiste en agregar a la muestra de suelo, inmediatamente después de extraída del perfil, un volumen de alcohol de quemar y encenderlo, de tal modo que el calor generado permita una evaporación del agua presente en la muestra. Así pueden obtenerse los valores de contenido de agua necesarios para la planificación del riego, directamente en terreno y en forma expedita. Los valores obtenidos por el método de la estufa y del alcohol son comparables en una amplia gama de suelos, con excepción de aquellos con un contenido de materia orgánica que exceda el 2.5 %, ya que al quemarse el alcohol la combustión se hace extensiva a la materia orgánica; se libera CO_2 y disminuye el peso de la muestra no sólo por secado sino también por quemado de la parte orgánica del material sólido.

Sin embargo en el caso del método del alcohol subsisten la necesidad de obtener un alto número de muestras para obviar problemas de representatividad y las complicaciones emergentes para el agricultor de estos procedimientos directos de determinación.

Dado que los métodos directos son los más exactos, es posible que una organización regional de agricultores pueda financiar y operar un sistema de determinación directa de contenidos de agua en los suelos; asociado con un buen servicio de extensión, ésta puede llegar a ser una herramienta eficaz y económica para el conjunto de agricultores.

2. Métodos indirectos

Algunas propiedades físicas y físico-químicas del suelo varían con el contenido de agua; cuando puede calibrarse la variación, estas propiedades resultan útiles como métodos indirectos para caracterizar el suelo respecto a su contenido de agua. Estos métodos indirectos se han desarrollado debido a la versatilidad y economía que puede obtenerse con ellos en relación con los métodos directos ya discutidos. Muchos de los métodos indirectos permiten mediciones muy frecuentes, incluso continuas, en el mismo lugar. Una vez que se han instalado los instrumentos correspondientes sólo se requieren algunos minutos para hacer la medición; al contar con una curva de calibración se obtiene la información del contenido de agua en forma inmediata.

La conductividad eléctrica de los materiales porosos como el suelo varía con el contenido de agua y es utilizada como método indirecto de determinación a través de bloques de resistencia eléctrica o 'bloques de Bouyoucos'.

El uso de bloques de resistencia eléctrica, o 'bloques de yeso' como se les conoce normalmente, se basa en los cambios de resistencia eléctrica o conductividad de soluciones en un bloque poroso de yeso. Estos cambios son causados por las variaciones en el contenido de agua de los bloques, controladas por la tensión relativa de la solución del suelo que los rodea.

El equipo necesario para realizar en condiciones de campo la medición de contenido de agua por este método, consiste en un medidor portátil de conductividad eléctrica (conductivímetro), generalmente accionado a pilas, y una batería de bloques enterrados a diferentes profundidades. Para traducir la información provista por la lectura de la conductividad eléctrica a valores de contenido de agua se requiere una calibración de los bloques, proporcionada generalmente por el fabricante y que se adapta a un rango amplio de suelos, pero no puede ser utilizada ni en suelos muy arcillosos, ni en los muy arenosos (Fig. 18).

Los bloques de yeso solamente pueden utilizarse con cultivos que tengan sistemas radiculares bien desarrollados y que se distribuyan uniformemente en el perfil, ya que se requiere un cierto tiempo de respuesta del bloque frente a variaciones en el contenido de agua del suelo.

La principal desventaja de los bloques de yeso es que las calibraciones entre lecturas del conductivímetro y el contenido real del agua del suelo se ven seriamente afectadas si hay variaciones estacionales de la salinidad del suelo, o sea del contenido de sales de la solución del suelo. Esto ocurre bastante frecuentemente, y las decisiones de riego basadas en bloques pueden conducir a graves problemas si no se tiene en consideración la variación del contenido de sales del suelo.

Otros métodos indirectos de determinación se basan en la dispersión de neutrones y la atenuación de rayos *gamma* que ocurren en el suelo con diferentes contenidos de agua.

Los neutrones ubicados en el núcleo de los átomos no tienen cargas eléctricas y pueden perder energía sólo por su interacción con

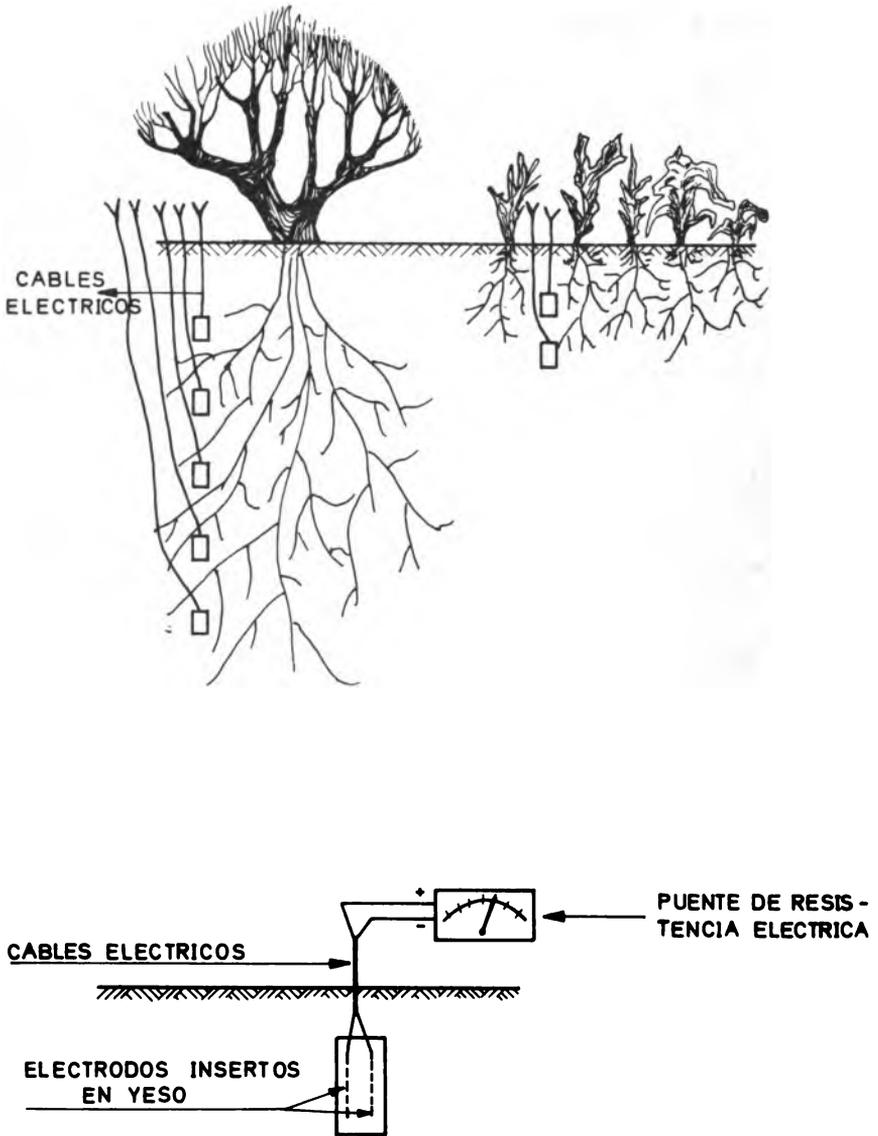


Fig. 18. Diagrama esquemático de una instalación de bloques de "bouyoucos".

otros núcleos. Esta interacción es en forma de colisiones y sigue la Ley de Conservación de Momentum. En cada colisión los neutrones transfieren parte de su energía cinética al núcleo chocado. Esta transferencia sigue la siguiente relación:

$$V_c = \frac{M}{m + M} = V_o$$

Ecuación 4.5

Donde M es la masa del neutrón, m es la masa del núcleo chocado, V_o la velocidad o energía antes de la colisión y V_c la velocidad o energía después de la colisión.

Cuando una fuente radioactiva emite neutrones de alta energía en un medio con gran cantidad de núcleos, las colisiones sucesivas van reduciendo su energía y quedan transformados en neutrones lentos. A este proceso se le conoce como 'Termalización de Neutrones'. Se define entonces como neutrones rápidos a los que tienen una energía alta, de 0.1 a 15 MeV (millones de electronvoltios) y alcanzan velocidades de hasta 1 600 km/seg. Un neutrón lento es aquel 'neutrón termalizado' cuya energía es del orden de 0-1 000 electronvoltios. Hay dos factores importantes en este proceso: a) transferencia de energía en cada colisión; b) probabilidad estadística de que ocurra cada colisión. La transferencia de energía depende del número de colisiones y la masa atómica del núcleo chocado. Un neutrón rápido pierde mayor cantidad de energía en cada colisión mientras menor sea la masa atómica del núcleo que ha chocado. Así, un neutrón requiere 18 colisiones con protones para reducir su energía a niveles térmicos (baja energía). Para lograr ese mismo objetivo requiere hacerlo 67 veces con átomos de Litio, 114 con Carbono y 150 con Oxígeno. La probabilidad estadística está relacionada con el concepto de 'Sección Transversal de Dispersión' (S T D). La S T D de un núcleo es su área proporcional a la probabilidad de colisión entre él y un neutrón. La S T D. se mide en barns (equivale a 10^{-24} cm²).

El Hidrógeno es el elemento que presenta una mayor STD, pues debido a su reducido tamaño, en un volumen dado presentará una mayor cantidad de núcleos que cualquier otro elemento; por lo tanto la probabilidad de colisión con neutrones es también bastante mayor. La STD del Hidrógeno varía desde 1 a 13 barns según cuál sea la energía del neutrón (es mayor mientras menor sea la energía). Otros

elementos con STD significativos (2-5 barns) son el Carbono, Nitrógeno, Oxígeno y Berilio. En resumen, se puede apreciar la marcada propiedad de los núcleos de Hidrógeno para termalizar neutrones, facultad que se aprovecha para determinar por medios indirectos el contenido del agua de los suelos.

La cantidad de hidrógeno en los suelos depende de su naturaleza mineralógica, sobre todo del contenido y tipos de arcillas, de la materia orgánica presente y del contenido de agua (H_2O). El elemento más dinámico es sin embargo el contenido de agua, pues la cantidad de hidrógeno de la red cristalina y de la materia orgánica (salvo niveles altos) es poco variable. El hidrógeno que contiene una arena gruesa seca es casi cero, y puede llegar a alrededor de 8 % en suelos de textura fina con un contenido de agua de 30 % con base en volumen.

Cuando una fuente de neutrones rápidos se coloca en un suelo húmedo, se forma una nube de neutrones termalizados cuya densidad representa un equilibrio entre la cantidad de neutrones rápidos emitidos, los termalizados y los absorbidos por algunos núcleos. Entre los elementos con propiedades de absorber neutrones presentes en el suelo pueden mencionarse el Boro, Cloro, Litio y Manganeso.

La cantidad de neutrones termalizados estará directamente relacionada con el contenido de agua del suelo a través de una curva de calibración.

Las probetas de neutrones son los instrumentos para realizar las mediciones y constan de a) Fuente radioactiva de neutrones rápidos; b) detector sensible sólo a neutrones lentos.

La fuente radioactiva debe emitir alrededor de 10^7 neutrones por segundo. Los neutrones tipo son los que más útiles y pueden ser producidos por Plutonio, Berilio, Radio-Berilio y otros elementos. Se ha usado Radio-Berilio hasta hace muy poco debido a su larga vida (1 690 años). Tiene el inconveniente de producir un remanente de rayos *gamma* que es nocivo para el operador en concentraciones que exceden cierto nivel. La desintegración del Radio produce un gas radioactivo, el Radón, que también puede ser nocivo si excede una determinada concentración.

Los detectores sensibles sólo a neutrones lentos se basan en la reacción nuclear que produce el neutrón lento con el trifluoruro de Boro gaseoso (BF_3). El Boro de este gas está formado por isótopos

B^{10} y B^{11} que absorben neutrones lentos con gran facilidad; se produce así una ionización del gas y resulta un impulso eléctrico. Estos impulsos son del rango de 1 - 25 milivoltios; por ello deben ser amplificados para detectarlos en un escalímetro.

La probeta es un cilindro metálico de 40 cm de alto y 3.8 cm de diámetro que se mantiene dentro de un escudo de Plomo y parafina (Fig. 19). La fuente radioactiva colocada en medio de la probeta mide 7 x 7.5 mm. Además de actuar como envase de la probeta el escudo sirve para chequear el sistema; emite neutrones rápidos dentro de él y mide los termalizados. Esto se logra debido a que la parafina es rica en Hidrógeno.

Los aparatos comerciales traen una curva de calibración estándar que en general se adecúa a una gran variedad de suelos. Cuando se requieren mediciones en extremo precisas (con errores menores al 5%) se debe establecer una curva de calibración particular, haciendo mediciones y obteniendo muestras para la determinación del agua por gravimetría.

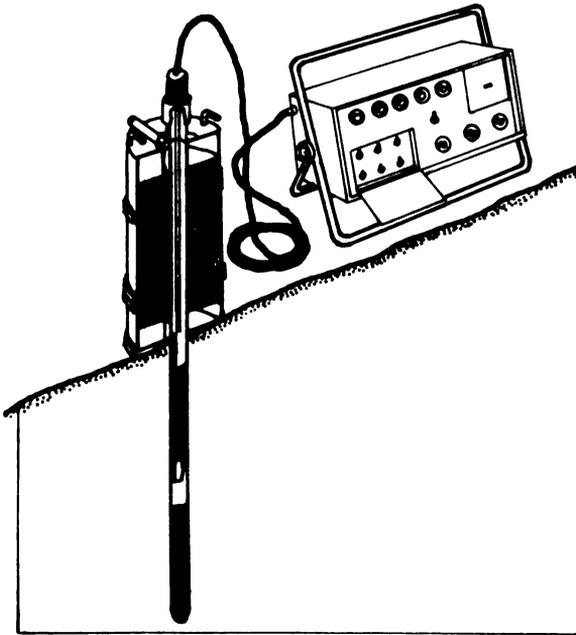


Fig. 19. Diagrama esquemático de un aspersor de neutrones.

Si bien la cantidad de Hidrógeno de un suelo es fácilmente removible y varía de un suelo a otro (debido a que la mayor parte del Hidrógeno está contenido en el agua almacenada en el suelo), las curvas sirven para muchos tipos diferentes de suelo. Muchas curvas de calibración son realizadas en arenas; sin embargo dan valores adecuados para suelos de texturas medias y finas, con errores máximos del 5 %.

Las curvas relacionan las cuentas de neutrones lentos en el escalímetro con el contenido de agua expresado en porcentajes basados en volumen (Fig. 20)

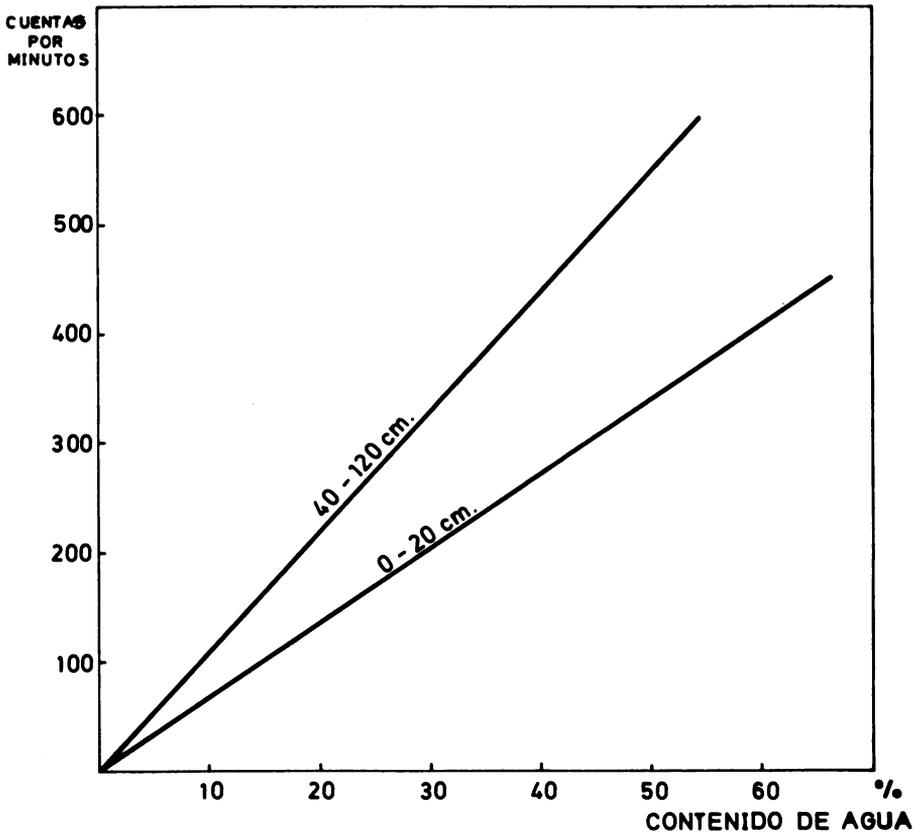


Fig. 20. Curva de calibración típica de un aspersor de neutrones.

Los factores que afectan la calibración son: a) contenidos altos de materia orgánica (mayores al 5 %); b) presencia de sales con altos contenidos de Boro, Litio, Cloro y Hierro. Para estos casos deben hacerse nuevas curvas que representan las nuevas condiciones.

También pueden afectar la calibración las mediciones a menos de 18 cm de la superficie pues debido a la discontinuidad aire-suelo los neutrones escapan y no son registrados. Para esta profundidad debe usarse sondas especiales que se colocan sobre la superficie del suelo, o bien sondas comunes pero usando una cubierta de polietileno.

Debe advertirse en este Capítulo que en muchas oportunidades la determinación del contenido de agua del suelo es menos útil que algunas otras propiedades que dependen del contenido de agua; tal es el caso de la determinación de la tensión del agua en el suelo, un parámetro muy relacionado con el desarrollo de las plantas y la determinación de la frecuencia de riego. Por ello muchas veces se efectúan mediciones —en terrenos o en laboratorio— de la tensión o energía de retención del agua del suelo más que del contenido de agua que éste tenga en un momento determinado. Estas determinaciones se hacen en el terreno mediante el uso de tensiómetros, cuyos componentes y principios de funcionamiento se han discutido en el Capítulo 3.

Las mediciones tensiométricas se realizan a fin de conocer el estado energético del agua del suelo (retención de agua). Estas mediciones pueden relacionarse con la cantidad de agua disponible para la planta (fig. 21) pero no sirven para determinar directamente el contenido de agua.

La unidad métrica decimal empleada para medir la tensión del agua es el bar, equivalente a 0.987 atmósfera. Los tensiómetros suelen estar calibrados en centibares; un centibar equivale a la succión ejercida por una columna acuosa de 10 centímetros de alto. Una lectura manométrica de 'cero' significa que existe una condición de saturación en el suelo. La tensión máxima que el instrumento puede medir es teóricamente de 1 bar, pero en la práctica sólo alcanza a medir hasta 0.8 bar. Aunque el suelo siga secándose el manómetro no dará una lectura más alta. A esta tensión (0.8 bar) aparece una burbuja en la parte superior del tensiómetro y crece a medida que el suelo se reseca.

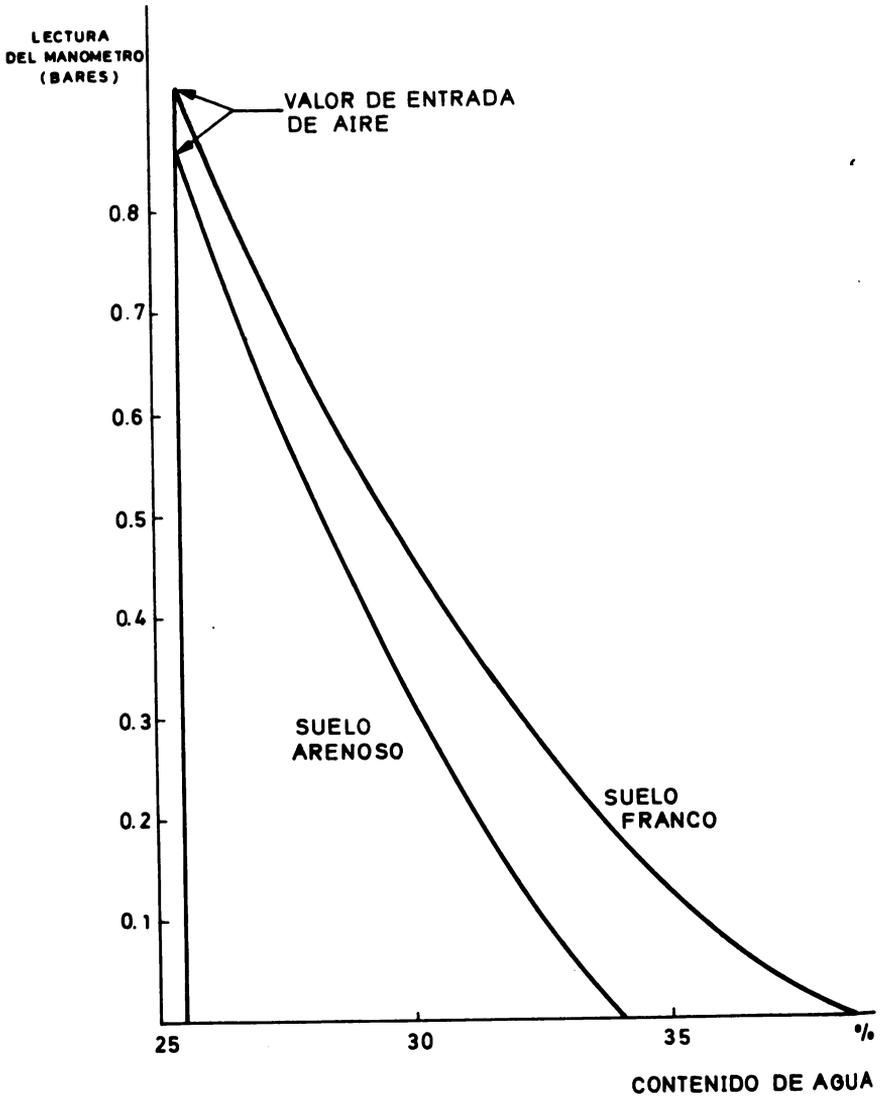


Fig. 21. Curva de calibración de un tensiómetro.

El intervalo de tensiones en el que un tensiómetro funciona satisfactoriamente es adecuado para casi todos los cultivos. En su intervalo de sensibilidad el tensiómetro es más preciso que cualquier otro medio utilizado para determinar la tensión del agua del suelo. Asimismo el agua que el suelo contiene en la zona radicular efectiva, previamente al riego, determina el volumen que debe aplicarse. Por consiguiente los tensiómetros, colocados a una cierta profundidad (o profundidades), pueden emplearse para indicar qué volumen se debe aplicar. Un descenso en la lectura del instrumento significa que el agua de riego ha alcanzado la profundidad a que se encuentra la cápsula de cerámica. El cierre del agua en ese momento garantiza el riego hasta una profundidad constante; de ese modo la operación llena las necesidades del cultivo, el suelo y el clima.

Si se colocan tensiómetros a diversas profundidades es posible regular la aplicación del agua con relación al estado de humedad que existe a diferentes niveles del suelo. Se pueden aplicar a menudo pequeños volúmenes para mojar sólo la estrata superior; los volúmenes mayores pueden aplicarse con menor frecuencia para mojar las estratas más profundas, a fin de lixiviar de sales el terreno o con otros propósitos. La posibilidad de regular el volumen de aplicación de agua, controlando la profundidad del humedecimiento, ha conducido al desarrollo del riego automático; éste se basa en la condición real de humedad del suelo y no es la aplicación de cantidades arbitrarias basadas en un programa prefijado.

El número de tensiómetros requeridos por cada parcela depende del cultivo, el tipo de suelo y el método de riego. Para cada cultivo hay que emplear por lo menos un instrumento, y preferiblemente más de uno. Si el tipo, la estructura o la profundidad del suelo son variables se requiere un instrumento por cada una de estas variables. Asimismo habrá que utilizar más instrumentos si se varía el método de riego o el intervalo entre riegos. Para ciertos cultivos se necesitan dos tensiómetros en cada sitio; esto es determinado por la profundidad de la zona radicular. En caso de que el desarrollo radicular sólo llegue a 40 ó 50 cm de profundidad es suficiente con un solo instrumento. Para cultivar plantas perennes o anuales profundamente arraigadas es preferible usar dos tensiómetros.

En campos de por lo menos 10 hectáreas se usa habitualmente el valor medio para calcular la cantidad necesaria de riego. Si el campo es uniforme y si la red de riego es permanente, cuatro tensiómetros bastan para cultivos de campo y seis pares de instrumentos

(colocados a dos profundidades) son suficientes en huertos. En el caso de pequeñas parcelas es conveniente instalar inicialmente unos cuantos instrumentos y, a la luz de la información y experiencias recabadas, decidir sobre el número que será representativo de la parcela.

El tensiómetro debe colocarse en un sitio y a una profundidad tales que la cápsula porosa quede dentro de la zona radicular activa, en contacto íntimo con el suelo y mojada por el agua de riego. En siembras que forman hilera se debe colocar los tensiómetros dentro de la hilera y entre dos plantas; si la siembra es tupida no tiene importancia el punto exacto de colocación.

La instalación correcta del tensiómetro exige que sea introducido en un barreno hasta una profundidad en que la cápsula haga buen contacto con suelo no perturbado. El barreno se introduce a la profundidad que se desee y la broca debe sacarse con cuidado para que la perforación permanezca despejada y redonda; entonces se introduce el tensiómetro, dándole ligeros golpes desde arriba. Se apila un poco de tierra alrededor del instrumento, a nivel del suelo, para que no quede ningún hueco donde se pueda acumular el agua.

El tensiómetro es un instrumento delicado; se le debe resguardar contra daños mecánicos que pueden ser causados por equipos agrícolas (como segadoras, cultivadoras u otros) o por el tránsito de los trabajadores. No hay que situar los instrumentos en caminos o veredas. Si se les ubica entre dos árboles, donde una segadora podría alcanzarlos, deben estar rodeados de estacas. Es posible instalar los instrumentos en ángulo para que la cápsula quede en un lugar y la parte superior del tensiómetro en un sitio mejor resguardado. En algunos tensiómetros especiales es posible separar la cápsula del tubo de agua (junto con el manómetro) a fin de que se pueda colocar el tubo en un lugar resguardado.

El mejor momento para observar el tensiómetro es la madrugada; a esa hora el movimiento del agua en el suelo y a través de las plantas es insignificante; prácticamente existe un estado de equilibrio. Las observaciones deben hacerse siempre a la misma hora; la frecuencia de las observaciones —lo mismo que la frecuencia de riego— depende del cultivo, suelo, clima y método de riego. Cuanto mayor sea el intervalo entre dos riegos consecutivos las observaciones deben hacerse menos frecuentemente. En el caso de cultivos sensibles y de raíces poco profundas, o de cultivos regados por goteo, se

recomienda observar los tensiómetros diariamente y regar a bajas tensiones. La utilización de tensiómetros es más eficaz cuando las lecturas se transportan diariamente a papel cuadrulado; la curva así obtenida describe la tendencia del uso consuntivo (uso consumo) del agua por el cultivo, y de esto se puede concluir cuáles son los factores que afectan el uso consumo (como el clima, floración, cosecha, turgencia foliar, entre otros). Las gráficas también permiten fijar de antemano la fecha del siguiente riego y la cantidad necesaria de agua que habrá que aplicar (Fig. 22).

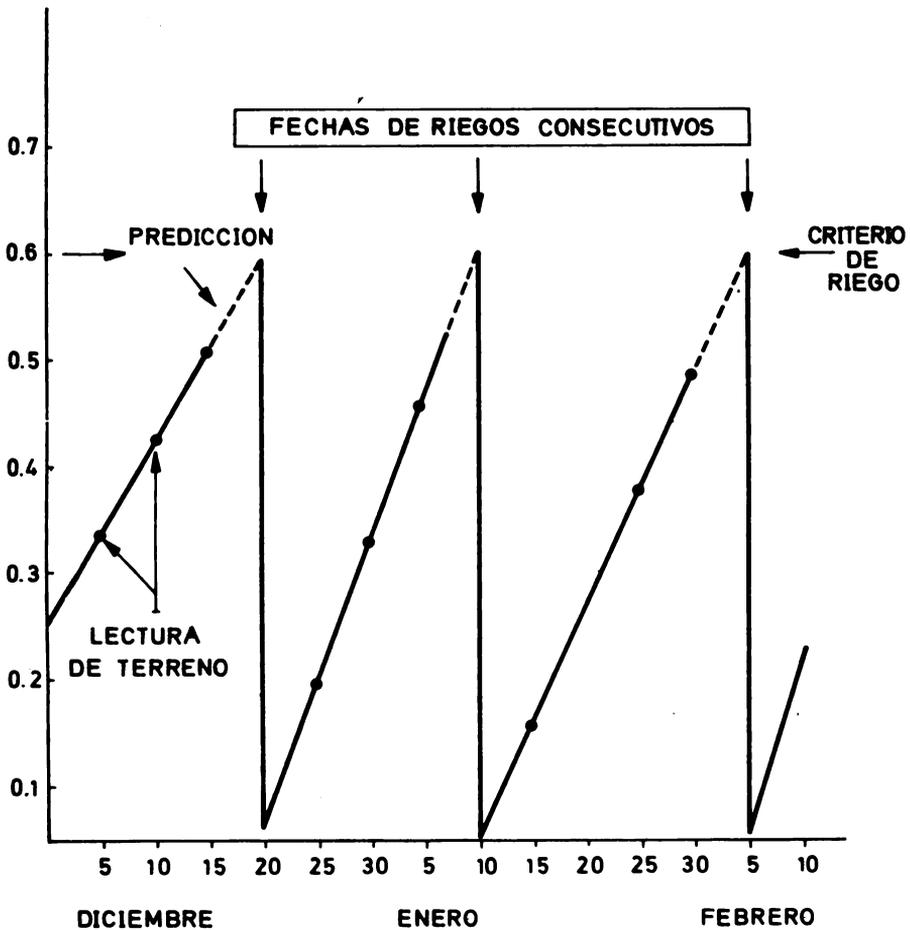


Fig. 22. Gráfica de lecturas de un tensiómetro a 30 cm durante la temporada de riego.

De vez en cuando puede ser necesario agregar agua al tensiómetro; ello sucede sobre todo si se trata de instrumentos que indican altas tensiones durante las cuales un poco de aire penetra por los poros de la cápsula de cerámica, pasa al tubo del agua y se acumula bajo el tapón de plástico. Es más apropiado agregar agua después de un riego, cuando el tensiómetro ha recobrado la mayor parte del agua y la tensión es baja.

Los poros de la cápsula se van tapando poco a poco debido a la precipitación de sales solubles presentes en la solución del suelo; esto reduce la permeabilidad de la cápsula y retarda su respuesta a los cambios en el contenido de agua del suelo. La obstrucción parcial no es significativa siempre que el tiempo empleado para la respuesta no sea demasiado largo; sin embargo en ciertos casos se debe cambiar la cápsula por una nueva. Su período de utilidad depende de la manera como se use y del tipo de suelo; si no se saca el tensiómetro del suelo, la cápsula seguirá sirviendo varios años en casi todo tipo de suelo. Si las lecturas de tensión son generalmente bajas —aunque el suelo esté seco o haya alguna duda sobre si el tensiómetro funciona bien— se puede probar fácilmente el instrumento con una bomba aspirante.

ALGUNOS VALORES DE CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO RELEVANTES PARA EL RIEGO

Es conveniente definir algunos valores de contenido de agua del suelo de especial importancia desde el punto de vista del riego, que serán analizados en mayor detalle en algunos capítulos posteriores (incluyendo algunos conceptos no discutidos aún en el texto).

El suelo es capaz de retener agua de acuerdo a sus características de capilaridad (tamaño de los poros y tensión superficial del agua) y de adsorción (superficie específica de las arcillas). Cuando se está regando un suelo la estrata más superficial se presenta en un estado de saturación; todo el espacio poroso está lleno de agua y el potencial de presión es positivo (Capítulo 3). Sin embargo las estratas que se encuentran por debajo de la estrata superior saturada tienen un menor contenido de agua, coexisten el aire y el agua del suelo dentro de su espacio poroso y el potencial de presión es negativo. De esta manera mientras dure el proceso del riego, o sea mientras se mantenga agua sobre la estrata superior, pasará agua a las inmediatamente inferiores por efecto de la diferencia de potencial existente (Capítu-

lo 5). Sin embargo después de un par de días este flujo disminuye apreciablemente en velocidad y, si bien continúa incesantemente, su magnitud es varios órdenes inferior al flujo de los primeros días.

El contenido de agua que tiene la estrata de suelo originalmente saturada luego que ha drenado libremente en el perfil hacia las estratas inferiores se conoce con el nombre de **Capacidad de Campo**. Como su nombre lo indica este valor debe determinarse en condiciones de campo; se agrega una carga apreciable (10 a 20 cm de agua) a la superficie, se cubre luego el suelo con un material impermeable (un film de polietileno por ejemplo) y se toma después de 48 a 72 horas una muestra de suelo a 30 cm de profundidad. El contenido de agua de esta muestra corresponde al valor de capacidad de campo. Asimismo el contenido de agua en capacidad de campo se correlaciona adecuadamente con el contenido de agua que tiene una muestra de suelo en equilibrio con una presión de 0.3 bares, que puede determinarse en el campo con tensiómetros o en laboratorio en ollas y platos de presión. Esta correlación es bastante alta en suelos de texturas medias con una condición estructural adecuada; sin embargo en suelos muy arenosos o muy arcillosos o suelos dispersados por problemas de salinidad o sodificación y en suelos compactados, la correlación entre los valores obtenidos con procedimientos de campo y el equilibrio con una presión de 0.3 bares no es muy alta.

Existe otro procedimiento para una estimación aproximada en condiciones de campo del valor de capacidad de campo, y que consiste en agregar un volumen conocido de agua —alrededor de 20 cm^3 — a un puñado de tierra seca, separando la masa de suelo mojado del suelo seco y pesándolo. De esta forma se conoce el peso del suelo seco, igual a la diferencia entre el peso del suelo mojado menos el peso del agua agregada; aplicando la ecuación 4.1 es posible determinar el valor de w (contenido gravimétrico de agua) que corresponde a capacidad de campo, ya que la masa de suelo mojado ha drenado 'libremente en el perfil'.

De acuerdo con lo expuesto, y desde un punto de vista práctico, dos o tres días después de un riego un suelo se ha mojado hasta capacidad de campo en una profundidad que dependerá del total de agua que se haya incorporado efectivamente al perfil del suelo durante el proceso del riego. Esto significa que mientras mayor sea el tiempo de riego el suelo tendrá un contenido de agua correspondiente a capacidad de campo, hasta mayor profundidad en el perfil. Así cuando se riega un suelo no queda con valores intermedios de

contenido de agua, sino que alcanza un valor único (capacidad de campo) a diferentes profundidades en el perfil.

Otro valor de contenido de agua que tiene importancia en la práctica de riego es el conocido como Punto de Marchitez Permanente (PMP), que corresponde al contenido de agua que tiene un suelo bajo el cual las plantas no son capaces de absorber agua por las raíces. Existe una buena correlación entre el contenido de agua correspondiente al PMP y el contenido de agua de una muestra de suelos en equilibrio con una presión de 15 bares. Como se discutirá más adelante, se ha definido el rango de contenidos de agua en el cual la planta puede desarrollarse; se encuentra entre los contenidos de agua correspondientes a capacidades de campo y punto de marchitez permanente; este rango se ha llamado 'humedad aprovechable del suelo' y se expresa en porcentaje de agua o en carga (cm) de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$H.A. = (w_{cc} - w_{PMC}) \cdot 100 \%$$

Ecuación 4.6

$$H.A. = (w_{cc} - w_{PMC}) \cdot Db \cdot H$$

Ecuación 4.7

en que H.A. es la 'humedad aprovechable' y H el grosor del perfil del suelo o de la estrata de suelos considerada.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

- Se desea determinar el contenido de agua de un suelo por el método del alcohol. Se dispone de:
 - Un recipiente metálico que pesa 100 gramos;
 - una balanza; c) alcohol.
 Al pesar el suelo húmedo se obtiene: 450 gr. Al pesar el suelo seco se lee en el escalímetro de la balanza 418 gr. A este suelo húmedo se le agregan 100 cc de agua; una vez que ésta ha drenado se separa el suelo en capacidad de campo del resto del suelo y se pesa. El resultado es 480 gr.
 ¿Cuál es la capacidad de campo de este suelo y cuál fue su contenido inicial de agua?
- Derive una expresión para la relación entre el contenido de agua volumétrico y gravimétrico del suelo.
- Defina capacidad de campo, punto de marchitez permanente y máxima capacidad de retención de agua de un suelo.
- ¿Qué carga de agua hay que aplicar a un suelo con las características que siguen, para reponer el déficit de humedad?
 ¿Qué volumen de agua es necesario aplicar a 10 ha de ese suelo?

<u>Prof.</u>	<u>Da (gr/cc)</u>	<u>C.C.</u>	<u>PMP</u>	<u>PW. al regar</u>
0-50	0.92	35.0	17.3	23.4
30-70	0.96	31.5	15.9	22.1
70-90	0.98	32.7	16.5	22.5

Si se desea regar las 10 ha en cuatro jornadas de riego de ocho horas cada una, ¿qué caudal de agua se necesitará? ¿Qué estrata almacena un mayor contenido de agua?

Si llueve 25 mm durante dos días, y se supone que no hay escurrimiento superficial, ¿hasta qué profundidad de suelo se llega a capacidad de campo?

5. Una zona radicular de 120 cm de profundidad, con $\theta = 25\%$ en capacidad de campo, tiene $\theta = 10\%$ en los primeros 30 cm, 15% en los 30 cm que siguen, 20% en los otros 30 cm y 22% en la última estrata. Un sistema de riego aplica agua a una velocidad de media pulgada por hora durante 6 horas; no hay escurrimiento superficial.
¿Cuál es la eficiencia de almacenamiento de ese riego?
6. Una muestra de 50 cm^3 de suelo pesa 80 gr. Después de secarse durante 24 horas a 105°C , pesa 70 gr. Determine su contenido de agua con base en la masa, con base en el volumen y la cantidad de agua disponible para las plantas en un perfil de 60 cm. El w en PMP es de 10% .
7. Calcule la cantidad neta de agua que requiere un predio agrícola en el que se cultiva:
 - 1/4 hectárea de maíz
 - 1/4 hectárea de cebolla
 - 1/2 hectárea de frijol
 durante un mes tipo en que el U.C. es 5 mm/día, así como la lámina neta para el mismo predio cuando el U.C. es de 2 mm/día. Expresé estas láminas en las siguientes unidades:

litros
 m^3 por cultivo
 m^3/ha

litros/seg-ha
 altura (cm)
 altura (pulgadas)

BIBLIOGRAFIA

1. CHASE, G.D., RABINOWITZ, I.L. Principles of radioisotope methodology. 3 ed. Burgess Publishing Co. pp. 187–241–284–290. 1967.
2. GAIRON, S. y HADAS, A. Measurement of the water status in Soils. In "Arid Zone Irrigation". Xaron, B., Danfors, E. y Vaadia, Y., eds Springer-Verlag, Berlin. 1973.
3. GARDNER, W.H. Water Content. In "Methods of Soil Analysis", Parte I., Black, C.A., ed. Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A., 1967.
4. GUROVICH, L. y GALLEGUILLOS, J. Relaciones hídricas de algunos velos del Valle del Río Aconcagua establecidas a partir de muestras tamizadas y no disturbadas. Ciencia e Investigación Agraria 6(4): 251–264. 1979.
5. IRSAELSEN, O.W. y HANSEN, J.E. Irrigation Principles and Practices. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1962. pp. 171–184.
6. MARSH, A.W. Questions and Answers about tensiometers. Division of Agricultural Sciences, University of California. Leaflet 2264. 1975.

CAPÍTULO 5

FLUJO DE AGUA EN EL SUELO

INTRODUCCION

En los capítulos anteriores se han presentado los fundamentos físicos que determinan una condición estática del agua en el suelo. Se ha hecho referencia a una situación que ocurre en el suelo en un instante determinado, a la 'fotografía' de una situación que, si se repitiera después de cierto tiempo, sería bastante diferente de la primera. En la realidad, cuando la variable **tiempo** interviene en las relaciones entre el agua y el suelo sobreviene un proceso dinámico, llamado **flujo de agua en el suelo**, que se desarrolla incesantemente y con velocidades y direcciones variables entre diferentes puntos del perfil del suelo.

Entre los principales procesos de flujo de agua en el suelo debe destacarse: la infiltración o entrada de agua al perfil del suelo, la redistribución del agua entre puntos diferentes del perfil, el drenaje o paso del agua bajo la zona radicular, la evaporación o pérdida de agua en forma

de vapor hacia afuera del perfil del suelo y por último el movimiento de agua desde el suelo hacia las raíces de las plantas. Todos estos procesos de flujo, que actúan en forma simultánea o secuencial, determinan el contenido de agua en un punto del suelo en un instante dado; normalmente esa condición no representa una situación de equilibrio. El conocimiento de las velocidades de flujo de cada uno de los procesos mencionados y la resultante de éstos constituyen la evaluación de la economía del agua en el suelo llamada también 'balance hidrológico del suelo' (Capítulo 2).

Así como el dueño de una cuenta bancaria deposita dinero y gira cheques de diferentes magnitudes en diferentes fechas y se informa a través del balance diario de su estado de situación y su capacidad para desarrollar actividad comercial, el balance hidrológico del suelo indica la posibilidad de la planta de desarrollar actividad productiva a través de la transpiración; modificaciones artificiales de este balance, como sucede en el caso del riego, permiten optimizar la producción de los cultivos. En ese sentido el estudio de las velocidades relativas de los procesos de flujo de agua en el suelo determinan en buena medida la frecuencia del riego (**cuándo regar**) y en forma indirecta la carga de agua a aplicar (**cuánto regar**), o sea la problemática del riego como se expresó en el Capítulo introductorio de este libro.

LA CAUSA DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

La velocidad de flujo del agua en el suelo está determinada por dos factores principales: la fuerza que actúa sobre cada porción del volumen del agua del suelo y la resistencia al flujo ofrecida por el espacio poroso del suelo. La fuerza que actúa sobre el volumen del agua del suelo está representada a su vez por dos términos: la fuerza gravitacional que hace que el agua caiga a un nivel menor y la fuerza debida a las diferencias de presión hidrostática en diferentes puntos del sistema, existiendo la tendencia a moverse de una zona alta a una de baja presión. Si la temperatura varía a través del sistema o si varía la concentración de sales se afectará la presión de vapor de agua y existirá un transporte de agua por difusión en la fase de vapor. La fuerza gravitacional y la fuerza debida a las diferencias de presión hidrostática, que contribuyen a la fuerza total que actúa sobre el agua del suelo, actuarán sólo en contados casos en la misma dirección, de tal modo que la resultante debe ser calculada por la cons-

trucción geométrica del paralelogramo de fuerzas. Para no realizar esta engorrosa operación es conveniente utilizar el concepto de diferencia de potencial, cuyos componentes pueden sumarse de acuerdo con las leyes ordinarias del álgebra.

Si el suelo fuera un conjunto de tubos rectos y lisos, cada uno uniforme en radio, se podría suponer que la velocidad de flujo total sería igual a la suma de las velocidades de flujo a través de los tubos individuales. Infortunadamente, desde el punto de vista de la simplicidad física los poros del suelo no son uniformes ni lisos, sino altamente irregulares, tortuosos e interconectados. El flujo a través de los poros del suelo está limitado por numerosas contracciones o 'cuellos' y 'calles sin salida'; por tal causa la geometría y el modelo de flujo de una muestra de suelo típico son demasiado complicados para ser descritos detalladamente en forma microscópica y la velocidad del fluido varía entre un punto y otro, incluso dentro de un mismo tubo capilar. Por esta razón el flujo a través de medios porosos complejos es descrito generalmente en términos de un sector de flujo macroscópico, que es el promedio de las velocidades microscópicas en todo el volumen del suelo. Se deja de lado el modelo detallado del flujo, y el volumen de suelo por donde fluye el agua es tratado como si fuera un medio uniforme con el flujo distribuido sobre la sección, incluido el espacio poroso y la porción sólida. Se supone implícitamente que el volumen de suelo considerado es lo suficientemente grande en relación con el espacio poroso y con la heterogeneidad microscópica, y permite promediar la velocidad y el potencial en la sección del suelo.

Al examinar el flujo de agua en un suelo saturado macroscópicamente uniforme se debe describir las relaciones cuantitativas entre la velocidad de flujo, las dimensiones del volumen de suelo considerado y las condiciones hidráulicas en los bordes de entrada y de salida. La Figura 23 muestra una columna de suelo horizontal a través de la cual hay un flujo permanente de agua de izquierda a derecha, desde un estanque elevado hacia otro más bajo; en ambos el nivel de agua es constante.

La experiencia indica que la velocidad de descarga Q , siendo V el volumen que fluye a través de la columna por unidad de tiempo, es directamente proporcional al área de la sección y a la caída de carga hidráulica ΔH , e inversamente proporcional al largo de la columna L .

$$Q = \frac{V}{t} \propto \frac{A \Delta H}{L}$$

Ecuación 5.1

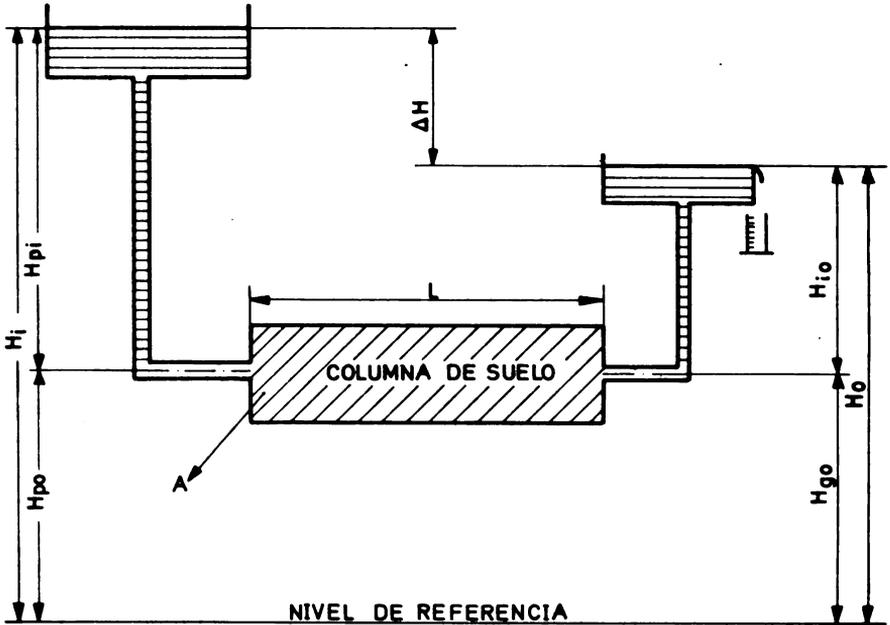


Fig. 23. Flujo en una columna horizontal saturada.

La forma habitual de determinar H es medir la carga en el borde de entrada (H_i) y en el borde de salida (H_o), en relación a algún nivel de referencia. Obviamente no hay flujo cuando $\Delta H = 0$

$$\Delta H = H_i - H_o$$

Ecuación 5.2

La caída de carga por unidad de distancia en la dirección del flujo ($\Delta H/L$) es la gradiente hidráulica, en realidad la fuerza que produce el flujo. La velocidad de descarga específica Q/A o sea, el volumen de agua que fluye a través de una sección de área A en el tiempo t , se llama densidad de flujo o simplemente el flujo y se indica por q .

$$q = \frac{Q}{A} \propto \frac{V}{At} = K \frac{\Delta H}{L}$$

Ecuación 5.3

El factor de proporcionalidad K se conoce como conductividad hidráulica.

$$q = K \frac{\Delta H}{L}$$

Ecuación 5.4

Esta ecuación es conocida como Ley de Darcy.

Si el flujo no es constante (o sea si q cambia en el tiempo) o el suelo no es uniforme, la carga hidráulica puede disminuir en forma no lineal en la dirección del flujo. Cuando la gradiente de carga hidráulica o la conductividad son variables se debe considerar los valores de flujo, gradiente y conductividad locales. Por lo tanto una expresión más generalizada de la Ley de Darcy adopta forma diferencial; para el flujo de agua saturado, en un medio poroso de tres dimensiones en forma de ecuación diferencial: KVH es el producto de un escalar (K) por un vector (VH), por lo tanto el flujo (q) es un vector cuya dirección está determinada por VH.

$$q = -K \cdot VH$$

Ecuación 5.5

La Ecuación 5.5 indica que el flujo de un líquido a través de un medio poroso ocurre en la dirección de y a una velocidad proporcional a la fuerza que actúa sobre el líquido (la gradiente hidráulica) y también proporcional a las propiedades del medio para transmitir el líquido (la conductividad hidráulica).

En un sistema unidimensional, la Ecuación 5.5 toma la forma

$$q = -K \frac{dH}{dx}$$

Ecuación 5.6

Matemáticamente, la Ley de Darcy es similar a las ecuaciones de transporte lineal de la Física clásica, que incluyen la Ley de Ohm (la corriente, o velocidad de flujo de la electricidad, es proporcional a la gradiente de potencial eléctrico), la Ley de Fourier (la velocidad de conducción de calor es proporcional a la gradiente de temperatura) y la Ley de Fick (la velocidad de difusión es proporcional a la gradiente de concentración).

Cargas hidráulicas

El agua que entra en la columna de suelo de la Fig. 23 está sometida a una presión P_i que es la suma de la presión hidrostática P_s y la presión atmosférica P_a , actuando sobre la superficie del agua en el estanque. Ya que la presión atmosférica es la misma en ambos bordes del sistema, se puede dejar de considerar, tomando en cuenta solamente la presión hidrostática. Por este motivo la presión en el borde de entrada es $D_w \cdot g \cdot H_{pi}$; dado que D_w y g son prácticamente constantes, puede expresarse esta presión en términos de carga de presión H_{pi} .

El flujo de agua en una columna horizontal se debe a una gradiente de carga de presión; el flujo en una columna vertical es causado por la gravitación al mismo tiempo que por la gradiente de presión. La carga gravitacional H_g en cada punto está determinada por la altura del punto relativa a algún plano de referencia, mientras que la carga de presión está determinada por la altura de la columna de agua sobre ese punto.

La carga hidráulica total H está compuesta por la suma de ambas cargas.

$$H = H_p + H_g$$

Ecuación 5.7

Para aplicar la Ley de Darcy al flujo vertical debe considerarse la carga hidráulica total en los bordes de entrada y de salida (H_i y H_o respectivamente).

$$H_i = H_{pi} + H_{gi}$$

$$H_o = H_{po} + H_{go}$$

Ecuación 5.8

Por lo tanto, la Ley de Darcy resulta así:

$$q = K \frac{(H_{pi} + H_{gi}) - (H_{po} + H_{go})}{L}$$

Ecuación 5.9

La carga gravitacional se designa generalmente por Z, que es la distancia vertical en el sistema de coordenadas x, y, z. Es conveniente poner el nivel de referencia z = 0 en el fondo de la columna vertical, o al centro de una columna horizontal. Sin embargo no tiene importancia la elevación exacta de este nivel hipotético, ya que los valores absolutos de las cargas hidráulicas se determinan en referencia y son irrelevantes; solamente sus diferencias entre un punto y otro en el suelo afectan al flujo.

La Figura 24 muestra una columna vertical saturada cuya superficie superior está cubierta con una carga constante de agua H₁ y la superficie inferior está colocada en un recipiente de nivel constante. El flujo tiene lugar desde la parte superior a la inferior a través de la columna de largo L.

Para calcular el flujo de acuerdo con la Ley de Darcy se debe conocer la gradiente de carga hidráulica, que es el cociente entre la caída de carga hidráulica y el largo de la columna.

Carga hidráulica en el borde de entrada	<u>Carga de presión</u>	+	<u>Carga de gravedad</u>
	H _i = H ₁		L
<u>Carga hidráulica en el borde de salida</u>	H _o = 0	+	0
Diferencia de carga hidráulica	<u>H = H_i - H_o = H₁ + L</u>		

La Ecuación de Darcy para este caso es:

$$q = K \frac{H}{L} = \frac{H_1 + L}{L} = K \cdot \frac{H_1}{L} + K$$

Ecuación 5.10

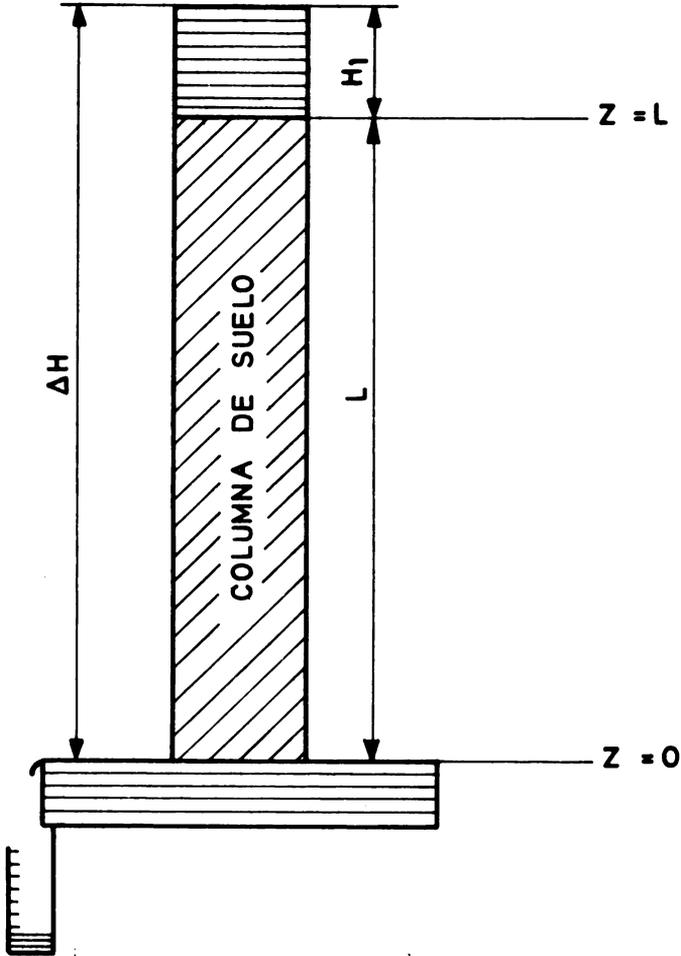


Fig. 24. Flujo descendente en una columna vertical saturada.

Comparando este caso en la situación de una columna horizontal se puede demostrar que el flujo hacia abajo del agua en una columna vertical es mayor que en una columna horizontal, en la magnitud de la conductividad hidráulica. Resulta también evidente que si H_1 es despreciable el flujo es igual a la conductividad hidráulica; ello se debe a que en ausencia de una gradiente de presión la única fuerza que causa movimiento es la gradiente de la carga gravitacional, que en una columna vertical tiene el valor de la unidad (ya que esta carga varía con la altura en la relación 1:1).

Examinando el caso del flujo hacia arriba en una columna vertical, como se muestra en la Fig. 25, se advierte que la dirección del flujo es opuesta a la dirección de la gradiente gravitacional y la gradiente hidráulica resulta ser así:

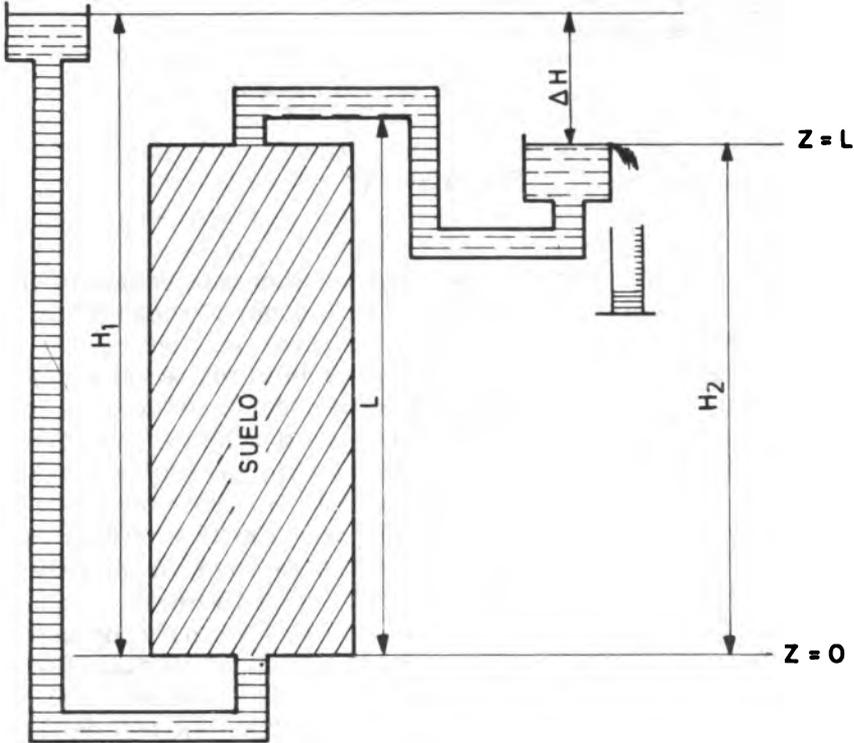


Fig. 25. Flujo ascendente en una columna vertical saturada.

Carga hidráulica en la entrada	<u>Carga de presión</u>	+	<u>Carga de gravedad</u>
	$H_i = H_1$		0
Carga hidráulica en la salida	$H_o = 0$	+	L
Diferencia de carga hidráulica	$H = H_i$	-	$H_o = H_1 - L$

La ecuación de Darcy es

$$q = K \frac{H_1 - L}{L} = K \frac{H_1}{L} - K$$

Ecuación 5.11

Conductividad hidráulica

La densidad de flujo (o simplemente, el flujo) es el volumen de agua que pasa a través de una sección unitaria perpendicular a la dirección del flujo, por unidad de tiempo.

Las dimensiones del flujo son:

$$q = V/At = L^3/L^2T = LT^{-1}$$

Ecuación 5.12

o sea, longitud por tiempo, que son las dimensiones de velocidad. Sin embargo es preferible usar el término flujo y no velocidad de flujo, ya que éste es muy ambiguo. Como los poros del suelo varían en forma, ancho y dirección, la velocidad de flujo real en el suelo es sumamente variable (los poros más grandes conducen al agua más rápidamente); el agua en el centro de un poro se mueve más rápido que el líquido cercano a las partículas del suelo que forman el poro. Hablando en forma estricta, no puede hablarse de una velocidad de flujo sino de una velocidad promedio, pero aun la velocidad promedio del líquido que está fluyendo difiere del flujo, en la forma en que se ha definido. El flujo no ocurre en realidad a través de toda la sección de área A , dado que parte de ésta está formada por las partículas del suelo y sólo la porción porosa está abierta al flujo. Como el área real del flujo es menor que A , la velocidad promedio real del líquido debe ser mayor que el flujo q . Aún más: el flujo real sigue un camino mucho mayor que el largo L de la columna, debido a la tortuosidad del medio poroso.

La conductividad hidráulica es la razón entre el flujo y la gradiente hidráulica. Siendo las dimensiones del flujo LT^{-1} , las dimensiones de la conductividad hidráulica dependen de las dimensiones de la fuerza que causa el movimiento (la gradiente de potencial). Se ha mostrado que la forma más simple de expresar la gradiente de potencial es usando unidades de carga, es decir longitudes. Por ser una relación entre dos longitudes, la gradiente de carga hidráulica $\Delta H/L$ es adimensional; por lo tanto las dimensiones de la conductividad son las mismas que las del flujo, o sea LT^{-1} . En sentido estricto, H no es una altura real sino una presión equivalente en términos de altura de una columna de agua $H = p/Dwg$, y su gradiente debería tener valores de $cm H_2O/cm$.

En un suelo saturado de estructura estable así como en un medio poroso rígido (como la arena, por ejemplo), la conductividad hidráulica es constante. Su orden de magnitud es de 10^{-2} a 10^{-3} cm/seg en un suelo arenoso y 10^{-4} a 10^{-7} cm/seg en un suelo arcilloso.

La conductividad hidráulica está afectada también por la estructura; es mayor en un suelo poroso, fracturado y agregado que en un suelo compacto y denso. La conductividad depende no sólo de la porosidad total sino principalmente del tamaño de los poros conductentes. Un suelo de piedrecillas o arena gruesa con grandes poros, por ejemplo, puede tener una conductividad hidráulica mucho mayor que un suelo arcilloso con poros pequeños, a pesar de que la porosidad total de la arcilla sea generalmente mucho mayor que la de un suelo arenoso con poros grandes.

Si la carga de presión es positiva, el paso de agua por grietas, agujeros de gusanos y de raíces de plantas de descomposición contribuirá en gran medida al flujo que puede observarse y a la conductividad que se mide en condiciones de campo o laboratorio. En muchos suelos la conductividad hidráulica no es constante en el tiempo; debido a procesos químicos, físicos y biológicos la conductividad hidráulica puede cambiar a medida que el agua penetra y fluye en un suelo. Los cambios en las proporciones de los cationes adsorbidos a los coloides del suelo, así como la entrada de agua de composición química diferente a la solución del suelo, afectan significativamente la conductividad hidráulica. En general la conductividad disminuye, con una baja concentración de los electrolitos solubles, debido a fenómenos de expansión y dispersión. La migración de partículas de arcilla durante un período de flujo continuado puede tener como consecuencia el sellado de los poros. En la práctica es extremadamente difícil saturar un suelo con agua sin dejar atrapado algo de aire. Las burbujas de aire atrapadas pueden bloquear los pasajes porosos; los cambios de temperatura pueden motivar que el agua del suelo disuelva o libere gas, lo que causa un cambio en el volumen de la fase gaseosa, afectándose así la conductividad.

FLUJO DE AGUA EN CONDICIONES NO SATURADAS

Los procesos relacionados con el flujo del agua del suelo en condiciones de campo, en la zona radicular de la mayoría de los cultivos, tienen lugar en su mayoría cuando el suelo está en condi-

ciones insaturadas. Los procesos de flujo en condiciones de no saturación son en general complicados y difíciles de describir en forma cuantitativa, ya que incluyen cambios en el estado y el contenido del agua del suelo durante el flujo. Estos cambios incluyen relaciones complejas entre el contenido de agua, que es variable, la succión y la conductividad; asimismo pueden estar influidos por la histéresis. La formulación y la solución de problemas de flujo no saturado requieren habitualmente el uso de métodos indirectos de análisis basados en aproximaciones o técnicas numéricas. Por esta razón el desarrollo de teorías rigurosas y métodos para la solución de estos problemas es relativamente nuevo. En los últimos años, sin embargo, el flujo en condiciones de no saturación se ha transformado en uno de los tópicos más importantes y activos en la investigación de Física de Suelos; esta investigación ha sido el punto de partida para progresos significativos en la teoría y la práctica de varias ramas de la ciencia de suelos, especialmente el riego.

Comparación entre flujo en condiciones de saturación y no saturación

En los párrafos anteriores se estableció que el flujo del agua del suelo es causado por una fuerza impulsora, que resulta de una gradiente de potencial efectiva, y que el flujo tiene lugar en la dirección de la disminución del potencial. Por otra parte, la velocidad del flujo es proporcional a la gradiente de potencial y es afectada por las propiedades geométricas de los canales de poros a través de los cuales el flujo tiene lugar. Estos principios se aplican en suelos saturados y también en suelos no saturados.

La fuerza motriz de un suelo saturado es la gradiente de un potencial de presión positivo (se deja de lado por ahora la fuerza gravitacional que no es afectada por las condiciones de saturación o de insaturación). Por otra parte, el agua en un suelo no saturado está sometida a presiones subatmosféricas, o sea a succión; la gradiente de esta succión constituye por sí misma una fuerza motriz. La succión matricial se debe, como ya se ha señalado, a la afinidad física del agua con la superficie del suelo y de los poros capilares. El agua tiende a ser extraída desde una zona en que las envolturas de hidratación alrededor de las partículas son gruesas, hacia una zona en que son delgadas, y desde una zona en que los meniscos capilares son menos curvados, hacia donde sean más curvados.

El agua tiende a fluir desde donde la succión es baja hacia donde la succión es alta. Cuando la succión es uniforme en toda la longitud de una columna horizontal, esta columna está en equilibrio y no hay una fuerza motriz. Cuando existe una gradiente de succión el agua fluye en los poros que permanecen llenos de agua bajo esa succión y se desliza a través de las películas de hidratación sobre las superficies de las partículas, con una tendencia a equilibrar el potencial. La fuerza motriz es mayor a medida que el 'frente de humedecimiento' entra en un suelo originalmente seco. En esta zona, la gradiente de succión puede ser de varios bars por centímetro de suelo. Una gradiente de este tipo constituye una fuerza motriz miles de veces mayor que la fuerza gravitacional. Como se verá más adelante se requieren a veces fuerzas de esa magnitud para obtener un flujo determinado en vista de la conductividad hidráulica extremadamente pequeña que un suelo relativamente seco puede exhibir.

La diferencia más importante entre el flujo saturado y el no saturado es el conductividad hidráulica. Cuando el suelo es saturado todos los poros están llenos y conducen agua, de tal modo que la conductividad es máxima. Cuando el suelo se hace no saturado algunos de los poros se llenan de aire y la porción conductiva de la sección del suelo disminuye en forma proporcional. Más aún, a medida que se desarrolla esta succión los primeros poros que se vacían son los más grandes —los más conductivos— dejando que el agua fluya sola a través de los poros más pequeños.

La velocidad de flujo total a través de un tubo capilar es proporcional a la cuarta potencia del radio, mientras que la velocidad de flujo por unidad de sección del tubo es proporcional al cuadrado del radio. Así, un poro de radio 1 mm conducirá lo mismo que 100 000 poros de radio 0.1 mm. Los poros vacíos son aireados; de tal manera, a medida que se incrementa la desaturación, aumenta la tortuosidad. En suelos de texturas gruesas el agua permanece a veces casi enteramente en los bordes y puntas de las partículas, formando bolsas de aire discontinuas. En suelos de buena agregación los espacios grandes que quedan entre los agregados —con una alta conductividad en condiciones de saturación— se transforman, cuando se vacían, en barreras que obstaculizan el flujo de líquidos de un agregado al otro vecino. De modo que la transición de la saturación a la insaturación lleva consigo generalmente una caída violenta en la conductividad hidráulica que puede disminuir varios órdenes de magnitud (a veces hasta 1/100 000 de su valor en condiciones de saturación) a medida que la succión se aumenta de cero a -1 bar.

En condiciones de succión mayores, o sea con menores contenidos de humedad, la conductividad puede ser tan pequeña que se requieren gradientes de succión muy grandes o períodos de tiempo muy largos para estimar en forma apreciable el flujo del agua. También debe considerarse que cuando el sistema suelo-agua está sometido a succiones demasiado grandes, aparte del incremento en la tortuosidad y el descenso del número y tamaño de los poros conductores puede haber un cambio en la viscosidad del agua adsorbida, lo que lleva a una reducción aún mayor de la conductividad.

En condiciones de saturación los suelos más conductivos son aquéllos en que los poros grandes y continuos constituyen la mayor parte del volumen de poros del suelo, mientras que los suelos menos conductivos son aquéllos en los cuales el volumen de poros consiste en numerosos microporos. Así los suelos arenosos conducen agua mucho más rápidamente que los suelos arcillosos. Sin embargo, se produce exactamente lo contrario en condiciones de no saturación, dado que los suelos con poros grandes se vacían rápidamente, con un ligero aumento de la succión, y se hacen no conductivos; su conductividad disminuye así en gran medida y en forma repentina. En un suelo con pequeños poros, por otra parte, muchos de ellos permanecen llenos y plenamente conductivos aun bajo condiciones de succión apreciable, de tal forma que la conductividad hidráulica no disminuye tan violentamente y puede ser mayor que la de un suelo arenoso sometido a la misma succión. Dado que en condiciones de campo el suelo se encuentra saturado la mayor parte del tiempo, generalmente ocurre que el flujo es más apreciable y persiste durante mayor tiempo en suelos arcillosos que en suelos arenosos. Por esta razón la existencia de una barrera de arena en el perfil de un suelo de textura fina, lejos de promover el flujo de agua puede en realidad impedirlo en condiciones no saturadas, hasta que el agua se acumule sobre la arena y disminuya la succión lo suficiente para que el agua penetre en los poros de la arena.

Relación entre conductividad, succión y humedad

Considérese un suelo no saturado en el cual el agua fluye bajo una cierta gradiente de succión, tal como se esquematiza en la Fig. 26.

En este modelo la diferencia de potencial entre la entrada y la salida no se mantiene por diferentes cargas de presión hidrostática positiva sino por diferentes succiones.

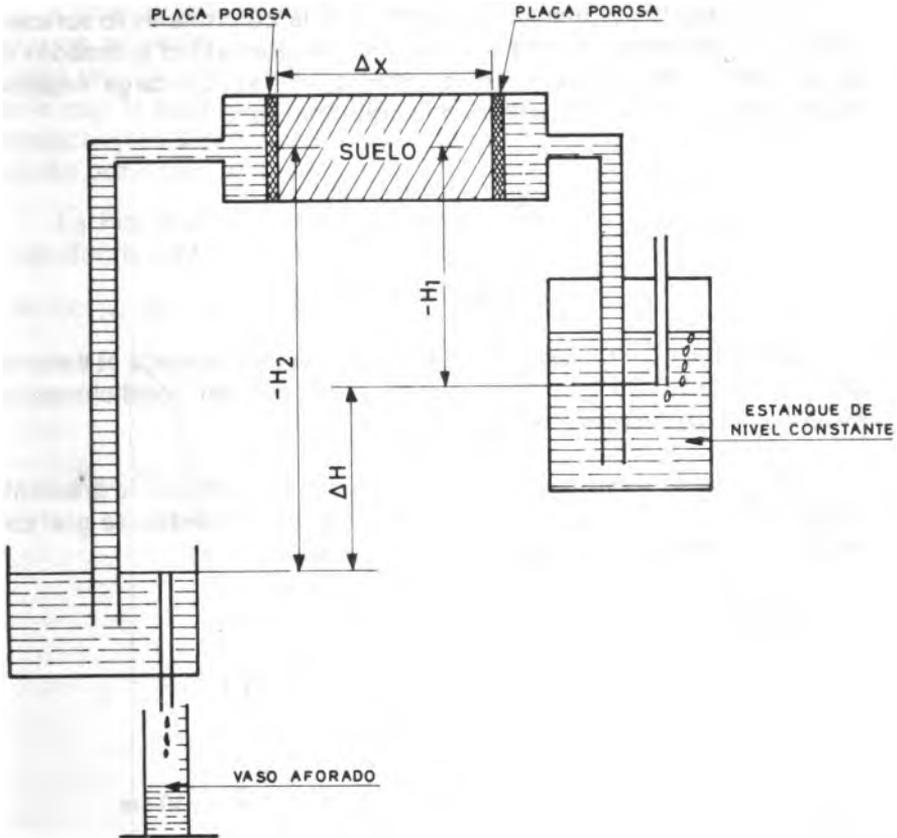


Fig. 26. Modelo esquemático del flujo no saturado en una columna horizontal.

A medida que la succión varía a lo largo de la muestra, en igual forma variará generalmente la conductividad y el contenido de agua. Si las cargas de succión en ambos límites de la muestra se mantienen constantes, el proceso de flujo será constante y la gradiente de succión aumentará a medida que disminuya la conductividad por efecto del aumento de succión a lo largo del eje de la muestra.

Dado que la gradiente a lo largo de la columna no es constante —como es el caso de sistemas saturados uniformes— no es posible, hablando en sentido estricto, dividir el flujo distancia ($\Delta H/\Delta x$) para obtener la conductividad. Por lo tanto es necesario dividir el flujo por la gradiente exacta en cada punto para evaluar la conductividad exacta y su variación con la succión.

En el análisis que sigue se asume que la columna es lo suficientemente corta para permitir evaluar una conductividad promedio de la muestra como un todo (o sea $K = q\Delta x/\Delta H$). La carga negativa promedio, o succión que actúa en la columna, es:

$$-\bar{H} = \bar{\phi} = \frac{H_1 - H_2}{L}$$

Ecuación 5.13

Se asume que la succión en todos los puntos excede el valor de entrada de aire, de tal forma que el suelo está en condiciones no saturadas en toda su extensión.

Mediciones sucesivas y sistemáticas del flujo *versus* la gradiente de succión, para valores diferentes de succión promedio, se grafican esquemáticamente como se aprecia en la Fig. 27.

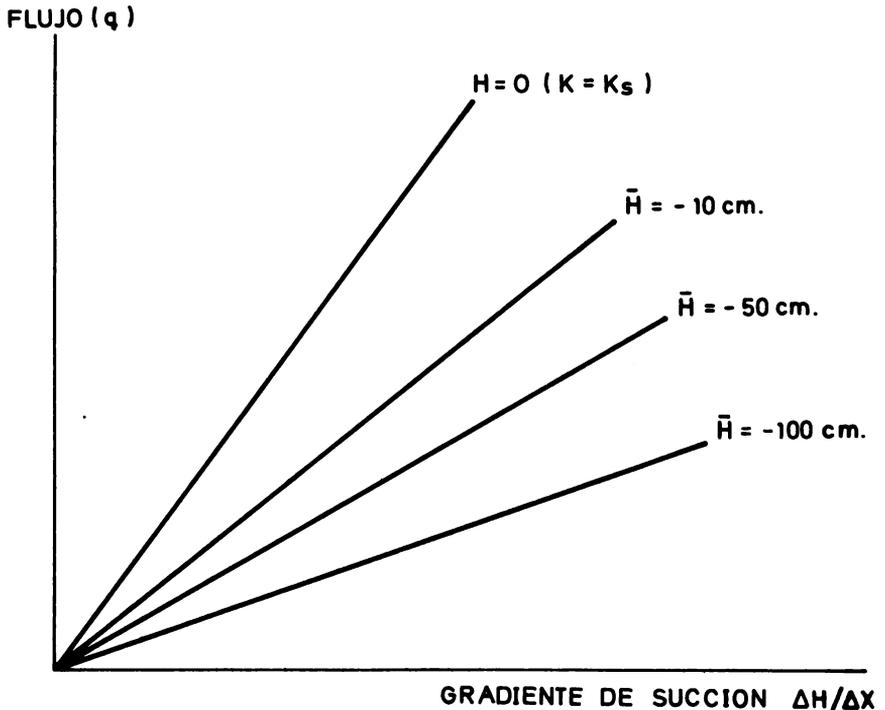


Fig. 27. Relación entre gradiente hidráulica $\Delta H/\Delta X$ y flujo no saturado q en el suelo.

Como sucede en el caso del flujo saturado encontramos que el flujo no saturado es proporcional a la gradiente; sin embargo la pendiente del flujo *versus* la gradiente, o sea la conductividad hidráulica, varía con la succión promedio. En un suelo saturado, en cambio, la conductividad hidráulica es generalmente independiente de la magnitud del potencial del agua (presión).

La Figura 28 muestra la tendencia general en la dependencia de la conductividad sobre la succión en suelos de diferente textura.

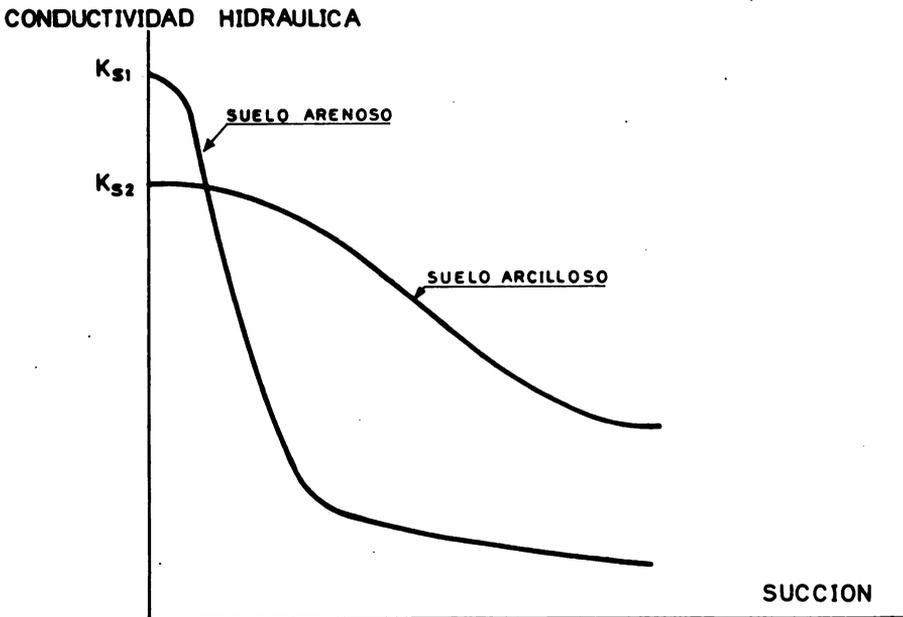


Fig. 28. Dependencia de la conductividad sobre la succión en suelos de diferentes texturas (escala log/log).

Las curvas de K *versus* succión se dibujan generalmente en escala log-log, ya que tanto K como ϕ varían en varios órdenes de magnitud en el rango de succión que interesa desde el punto de vista agrícola (o sea desde 0 a 10 000 cm de la carga de succión).

En la Fig. 28 se puede apreciar que, aunque la conductividad de saturación en el suelo arenoso K_{s1} es típicamente mayor que la del suelo arcilloso K_{s2} , la conductividad en condiciones no saturadas decrece más rápidamente en el suelo arenoso y luego, a medida que la succión se aumente, se hace incluso menor que en el suelo arcilloso, para la misma succión.

SITUACIONES DE FLUJO EN CONDICIONES DE CAMPO

Raras veces el suelo está sometido en el campo a condiciones de saturación; durante el riego la estrata más superficial se encuentra saturada, pero el efecto del perfil del suelo —en el que coexisten el agua y el aire dentro del espacio poroso— sobre la velocidad del flujo es bastante importante, tal como se presenta en el próximo capítulo. La aplicación de la Ley de Darcy en su expresión más sencilla, o sea cuando K es una constante, se restringe en la práctica al estudio del flujo de agua en una napa freática, donde efectivamente hay condiciones de saturación.

La solución de problemas de flujo en condiciones no saturadas requiere un análisis matemático o numérico fuera del ámbito de esta obra; por ello se ha dado mucha importancia a los aspectos conceptuales y cualitativos de la causa del movimiento de agua (la gradiente hidráulica) y el freno que tiene el agua en su flujo en el suelo (la conductividad hidráulica). Sin embargo el tema del balance hídrico del suelo y su aplicación en el riego es extremadamente útil, especialmente en la predicción de los perfiles de humedad que se generan en el suelo a medida que un cultivo crece y transpira, con el fin de optimizar las prácticas de riego y mantener una buena disponibilidad de agua para las plantas. La predicción de perfiles de humedad en el tiempo, basada en las leyes físicas que rigen los procesos de flujo de agua en el suelo, es una de las actividades que durante la década del 70 han concitado los mayores esfuerzos de los investigadores del área de suelos.

La situación más común que se produce en condiciones de campo es que el suelo, en el momento de la siembra, presente un perfil de humedad relativamente homogéneo y que el contenido de agua en los diferentes puntos de perfil sea comparativamente alto. A medida que pasa el tiempo el suelo se seca por efecto de la evaporación del agua a partir de las estratas más superficiales y a causa de la transpiración de las plantas, que absorben cantidades de agua distintas desde diferentes estratas del perfil, de acuerdo a la distribución relativa y actividad de su sistema radicular. De ese modo el perfil de humedad se va modificando en forma bastante drástica, como resultado de flujos que se producen siempre en condiciones no saturadas.

Cualquier adición de agua, ya sea por riego, lluvia o ascensión desde una napa freática relativamente superficial, modificará nuevamente el perfil de humedad al crear condiciones saturadas temporales

en ciertas partes del perfil y permitir una redistribución del agua entre diferentes puntos del mismo.

Al aplicar la Ley de Darcy al flujo entre dos puntos del suelo separados por una distancia L , en el fondo se está estableciendo la velocidad con que un cierto volumen de agua abandonará el punto donde la succión sea menor y aumentará el contenido de agua en el punto donde la succión sea mayor. De esta forma se predice que después de un tiempo t , el primer punto tendrá un $\theta_1 = \theta_i - \Delta\theta_i$ y en el segundo $\theta_2 = \theta_i' + \Delta\theta_i$. Para lograr esto se requiere conocer la función $K(\theta)$, los θ iniciales y el intervalo de tiempo t ; este último puede hacerse un intervalo diferencial, solucionándose el problema de acuerdo a un análisis numérico por alguno de los métodos de cálculo comúnmente aplicables a este tipo de problemas. La principal dificultad de estas soluciones está en establecer condiciones iniciales y de borde adecuadas al caso específico de flujo que se esté estudiando, pero hay cada vez mayor número de soluciones en la literatura aplicables a problemas típicos de flujo de agua en el suelo en condiciones no saturadas.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. ¿Cómo es el potencial total del agua en el suelo y sus componentes en el caso del flujo saturado?
2.
 - a. Determine la conductividad hidráulica de un suelo por medio del permeámetro de carga constante para diferentes valores de flujo y de carga hidráulica que Ud. mismo establezca.
 - b. ¿En qué consiste la determinación de la conductividad hidráulica de saturación con un permeámetro de carga variable?
 - c. ¿Para qué usaría los valores de K_S en problemas de riego?
3. Diseñe una experiencia práctica para determinar el efecto de la estratificación del perfil del suelo sobre los valores de capacidad de campo.
4. Haga un comparación entre los procesos de flujo de agua en el perfil del suelo conocidos como redistribución, drenaje entero y evaporación (explique en qué consisten, cuáles son sus características principales, qué factores inciden en su intensidad y en qué condiciones predomina uno sobre el otro en su intensidad).
5. Defina los términos de la ecuación de Darcy. ¿Para qué condiciones físicas esta ley se reduce a: $Q = -K$? Compare la ecuación de Darcy cuando se aplica al flujo en condiciones saturadas y no saturadas en el suelo. ¿Qué relaciones necesita Ud. conocer para definir la velocidad y la dirección del flujo en ambas condiciones?

6. Compare los flujos de agua en el suelo en condiciones saturadas y no saturadas en cuanto a velocidad, dirección, oportunidad de aparición, etc. Indique qué relaciones necesita conocer para predecir dicho flujo en ambas condiciones.
7. Compare las conductividades hidráulicas no saturadas de dos suelos de diferente textura cuando tienen igual contenido de agua. ¿A qué se debe que puedan ser diferentes?
8. Compare los valores de flujo saturado en un suelo arenoso y en uno arcilloso, expresando la causa de posibles diferencias.
9. ¿De qué depende la magnitud que alcanza el flujo saturado en un determinado suelo?
10. En un permeámetro de carga constante se encuentra una muestra de suelo de 20 cm de altura ubicada en un cilindro de 20 cm de diámetro. La conductividad hidráulica de saturación es de $2,8 \times 10^{-7}$ m/seg.
 - a. ¿Qué flujo de agua se obtendrá de esa muestra si la carga hidráulica es de 30 cm?
 - b. Si se obtiene un flujo de 100 ml en 20 minutos, ¿cuál es la carga hidráulica que está actuando sobre la muestra de suelo?
11. A través de una muestra de suelo de 4 000 gr, que ocupa 10 cm de altura, ubicada en un cilindro de 20 cm de diámetro, se hace pasar agua con una carga constante de 10 cm de altura. ¿Cuál es la conductividad hidráulica saturada, si se obtiene 250 ml de agua cada 10 minutos? ¿Qué flujo se obtendrá si la carga constante es de 20 cm de altura? ¿Cuál es la conductividad hidráulica no saturada para $Q = 0.3$, si la curva de retención está dada por la expresión: $Y = 0.003 \theta^{-4.5}$?

12. ¿Qué es el proceso de redistribución del agua en el suelo? ¿Qué importancia tiene desde el punto de vista del riego?
13. Señale los efectos adversos sobre los cultivos que puede tener la presencia de napa freática alta. Refiérase con detalle a uno de estos efectos y explique cómo puede solucionarse.
14. Compare la conductividad hidráulica de un suelo franco arcilloso arenoso con $\theta = 25\%$, con la del mismo suelo con $\theta = 35\%$.
15. La presión en un punto A es -145 cm y en un punto B es -140 cm. Si el potencial osmótico de A es -100 cm y en B de -50 cm, ¿cuál es la gradiente hidráulica?
16. ¿Cuál es la conductividad hidráulica de un muestra de suelo saturada colocada en una columna vertical de área 20 cm² y largo 50 cm, con un carga de agua de 10 cm, cuya descarga $Q = 5$ cm³/hora?

BIBLIOGRAFIA

1. **BAVER, L.D., GARDNER, W.H., GARDNER, W.R.** Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1972. p. 317–343.
2. **BOERSMA, L.** Hydraulic Conductivity measurement Techniques. In "Methods of Soil Analysis". Parte I. Agronomy N° 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967. p. 210–261.
3. **HILLEL, D.** Soil and Water. Physical Principles and Processes. Academic Press, New York. 1971. p. 79–126.

La redacción de este Capítulo se basa en una adaptación de los Capítulos N° 4 y 5 de la obra de Hillel³, preparada por el autor para sus cursos de Fundamentos de Riego y Física de Suelos en el Programa de Post-Grado en Riego de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 6

INFILTRACIÓN DEL AGUA DURANTE EL RIEGO

INTRODUCCION

El movimiento cíclico del agua en el suelo comienza con su entrada en el perfil a través del proceso de infiltración, continúa con su almacenamiento temporario en la zona de enraizamiento y termina con su remoción del suelo por el drenaje, la evaporación o la absorción por las plantas. Este ciclo consiste en un número apreciable de procesos diferentes, que pueden ocurrir en forma simultánea e interdependiente. La infiltración o entrada de agua en el suelo ocurre generalmente en la superficie del suelo y tiene dirección vertical hacia abajo. El agua puede entrar a través de toda la superficie, en forma uniforme, como cuando el suelo está inundado o cuando llueve, y también puede penetrar a través de surcos o acequias e incluso puede moverse hacia arriba en el perfil del suelo, desde una fuente inferior, como en el caso de una napa freática alta.

El proceso de infiltración de agua

en el suelo ha sido intensamente estudiado debido a su importancia en el manejo del agua en la agricultura, la conservación del recurso suelo y otras actividades técnicas. La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión hídrica. En casi todos los métodos de riego la velocidad de entrada de agua al suelo determina los tiempos de riego y los diseños de los sistemas en cuanto al tamaño de las unidades superficiales y los caudales a utilizar. Además el proceso de infiltración es de gran importancia práctica dado que su velocidad determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento, pudiendo detectarse así el peligro de erosión durante inundaciones o lluvias muy intensas. En los casos en que la velocidad de infiltración es limitante puede ser afectado todo el sistema de economía de agua de la zona de enraizamiento ; para un manejo eficiente del suelo y del agua se requiere un conocimiento detallado del proceso de infiltración, debido a que éste se correlaciona con las propiedades del suelo y con el aporte de agua al sistema.

DESCRIPCION DEL PROCESO DE INFILTRACION

Si se aplica agua a determinada superficie de suelo, a una velocidad que se incrementa en forma uniforme, tarde o temprano se llega a un punto en que la velocidad de aporte comienza a exceder la capacidad del suelo para absorber agua y el exceso se acumula sobre la superficie, o escurre si las condiciones de pendiente lo permiten.

La capacidad de infiltración —conocida también como infiltrabilidad del suelo— es el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie cuando es mantenido en contacto con el agua a la presión atmosférica. Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la infiltrabilidad, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada y la velocidad de aporte determina la velocidad de infiltración (o sea, el proceso es controlado por el flujo). Sin embargo, una vez que la velocidad de aporte excede la infiltrabilidad del suelo es ésta última la que determina la velocidad real de infiltración; de ese modo el proceso es controlado por las características del perfil. Si una capa de agua delgada se aplica en forma instantánea y luego se mantiene sobre la superficie de un suelo inicialmente no saturado, es posible medir desde el comienzo la infiltrabilidad del suelo; muchas mediciones de infiltración en condiciones de apozamiento poco profundo han mostrado que la infiltrabilidad varía con el tiempo y generalmente decrece. La infiltración

acumulada, que es la integración en el tiempo de la velocidad de infiltración, tiene así una dependencia curvilínea con el tiempo y una pendiente que decrece gradualmente. La infiltrabilidad del suelo y su variación en el tiempo dependen del contenido de agua inicial y de la succión, así como de la textura, estructura y uniformidad (o secuencia de las estratas) del perfil del suelo. En general la infiltrabilidad del suelo es alta en los primeros estados de infiltración, especialmente cuando el suelo está relativamente seco; tiende a decrecer en forma monótona y eventualmente a acercarse asintóticamente a una velocidad constante denominada generalmente capacidad de infiltración final (final no en el sentido de que termina el proceso, sino que el proceso ha alcanzado una velocidad constante que parece no disminuir más en el tiempo). Esta velocidad se conoce también como infiltrabilidad estable o de equilibrio.

La disminución de la infiltrabilidad desde una velocidad relativamente grande puede ser el resultado (por lo menos en parte) de un deterioro gradual de la estructura del suelo y del sellamiento parcial del perfil por la formación de una costra superficial densa, o por la separación y migración de partículas del suelo que bloquean los poros de éste por la expansión de las arcillas, por el atrapamiento de burbujas de aire o por la compresión del aire del suelo, si no se permite que escape del perfil mientras es desplazado por el agua que está entrando. Sin embargo la disminución en la velocidad de infiltración es consecuencia principalmente de una disminución inevitable de la gradiente de succión matricial que ocurre a medida que tiene lugar el proceso. La gradiente de succión matricial es una de las fuerzas que permiten la entrada de agua en el suelo; si la superficie de un suelo inicialmente seco se satura repentinamente, la gradiente de succión matricial que actúa en la estrata superficial es en un comienzo muy grande. A medida que la zona mojada se profundiza esta gradiente se reduce; mientras más se prolonga el proceso la gradiente de succión tiende a cero. En una columna horizontal la velocidad de infiltración tiende eventualmente a cero, mientras que con un flujo hacia abajo en una columna vertical puede esperarse que la velocidad de infiltración llegue a una velocidad constante, inducida por la gravedad, que será prácticamente igual a la conductividad hidráulica si el perfil es homogéneo y estructuralmente estable. Si la superficie recibe agua a una velocidad menor que la conductividad de saturación, o se mantiene con un contenido de agua menor que la saturación, la velocidad de infiltración de equilibrio es igual a la conductividad hidráulica no saturada correspondiente al contenido de agua obtenida.

Distribución de la humedad durante la infiltración

Si se examina un perfil homogéneo en cualquier momento durante la infiltración, en condiciones de apozamiento de agua sobre la superficie, puede observarse que la superficie del suelo está saturada hasta una profundidad que fluctúa de varios milímetros hasta un par de centímetros. Más abajo de esta zona de saturación completa existe una zona de elongación aparentemente uniforme, cercana a la saturación de agua, conocida como zona de transición. Después de ella está la zona de humedecimiento, en la cual el contenido de agua del suelo disminuye con la profundidad de una gradiente pronunciada hasta el frente de humedecimiento; allí la gradiente de humedad es tan aguda que aparece como un límite claramente definido entre el suelo húmedo de arriba y el suelo seco de abajo. Esta gradiente tan pronunciada se produce porque a medida que el contenido de agua disminuye la conductividad hidráulica generalmente se atenúa en forma exponencial. Dado que el flujo es producto de la gradiente por la conductividad, para obtener un cierto flujo en el suelo la gradiente debe incrementarse a medida que la conductividad disminuye.

El perfil típico de humedad durante la infiltración, aparece en la Fig. 29.

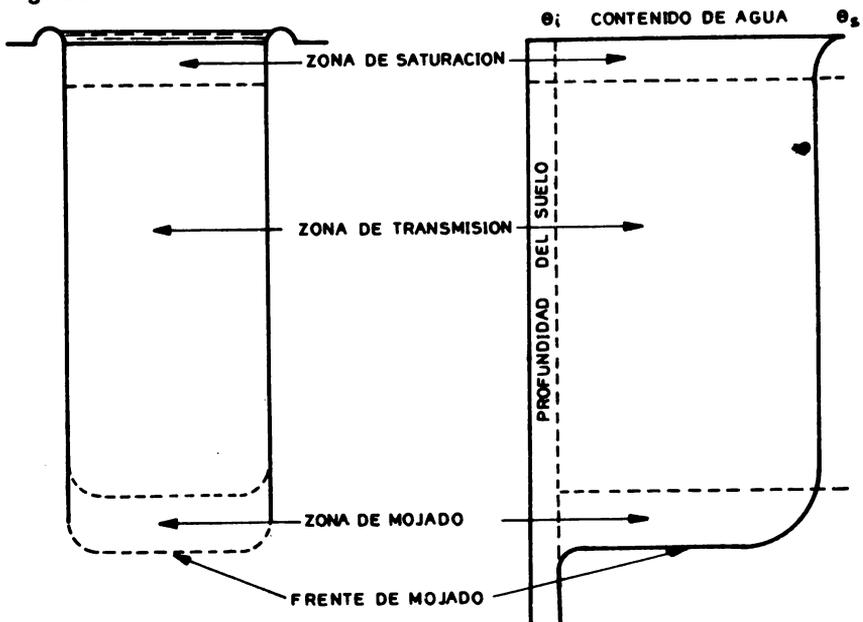


Fig. 29. Representación del perfil de humedad durante el proceso de infiltración.

✓ Si se examina el perfil de humedad periódicamente durante el proceso de infiltración se advierte que la zona de transmisión casi saturada se alarga (o sea, se profundiza) continuamente y que la zona de humedecimiento y el frente de humedecimiento se mueven hacia abajo también en forma continua; el humedecimiento se hace cada vez menos agudo a medida que se profundiza en el perfil. La Fig. 30 presenta familias típicas de curvas de humedad durante el proceso de infiltración.

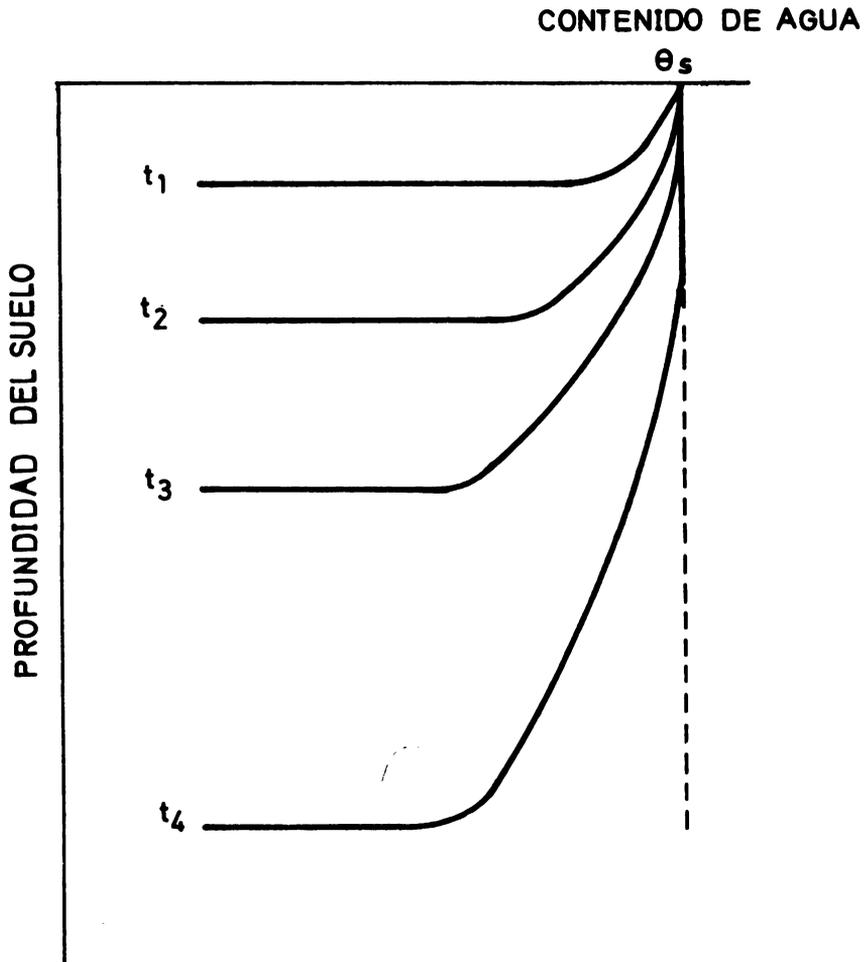


Fig. 30. Familias de curvas de contenidos de agua en el suelo durante la infiltración.

Factores que afectan el proceso de infiltración

Los factores que afectan la velocidad de infiltración son aquellos que afectan las propiedades físicas del suelo y, en el caso del riego por aspersión, el tipo de cubierta vegetal:

1. Sellamiento superficial

La formación de una capa fina y compacta sobre la superficie del suelo reduce rápidamente la penetración de agua a través de la superficie. Esta capa resulta de un rompimiento de la estructura del suelo, producido en parte por la acción erosiva de las lluvias o del riego por aspersión, y también por la acción del flujo del agua sobre la superficie, donde las partículas finas son fijadas alrededor de las partículas mayores formándose una capa impermeable. Las empastadas ayudan a prevenir este efecto; el paso superficial de una rastra u otro implemento cultivador antes del riego romperá fácilmente ese sellamiento.

2. Compactación del suelo

Las labores de preparación de suelos —especialmente las araduras que se realizan en suelos húmedos— pueden producir compactación y formación de capas impermeables denominadas 'pie de arado' exactamente debajo de la profundidad a que penetra el implemento. Este 'pie de arado' impide el movimiento de agua y reduce la velocidad de infiltración; se recomienda en estos casos la acción de un subsolador, que es capaz de romper estratos impermeables del subsuelo.

3. Partículas o grietas del suelo

Los suelos de texturas finas tienden a partirse cuando se secan; al aplicarse agua las partículas del suelo comienzan a aumentar de tamaño, sellando las partiduras hasta disminuir considerablemente la velocidad de infiltración.

4. Preparación de suelo

Se indicó que la velocidad de infiltración puede ser aumentada a través de araduras, rastrajes u otros procedimientos; sin embargo el efecto beneficioso en la porosidad del suelo producido por el

paso de estos implementos dura solamente hasta que el terreno vuelve a su condición anterior de densidad, como consecuencia de riegos o lluvias subsecuentes. Es necesario considerar también la compactación producida por el excesivo paso de implementos, con la consiguiente disminución de la velocidad de infiltración.

5. **Materia orgánica y rotación de cultivos**

La materia orgánica mantiene la porosidad del suelo durante períodos largos; éstos dependen del estado de descomposición en que aquélla se encuentra. De ese modo la velocidad de infiltración no se altera e incluso puede aumentar mediante la siembra de pastos y legumbres o utilizando prácticas que aumenten el contenido de materia orgánica en el suelo.

6. **Sales del suelo y del agua**

Las sales que contiene el agua de riego se van acumulando en el perfil del suelo; esto se hace más notorio cuando las precipitaciones no son suficientes para lixiviar las sales más abajo de la zona de las raíces (Capítulo 2).

7. **Sedimentos en el agua de riego**

Las partículas de limo y arcilla que se mantienen en suspensión afectan la calidad del agua de riego y producen un encostramiento en el suelo, que disminuye en forma notoria la infiltración del agua en el suelo. Esto puede ser beneficioso en suelos arenosos pero es muy perjudicial en los de texturas finas.

8. **Perfil del suelo**

La diferente disposición de las estratas en el perfil tiene también gran influencia en la velocidad de infiltración del suelo; evidentemente este factor no es manejable por el hombre, pero debe ser considerado como un elemento de análisis.

MEDICION DE LA INFILTRACION

↳ Para medir la velocidad de infiltración se utilizan varios métodos; se trata siempre de usar alguno aproximado al método de riego

que se ha de emplear en la zona o cultivo que se esté trabajando. El grado de confianza de estas mediciones con respecto a la velocidad de infiltración real se relaciona con la superficie que se pretende representar y la variabilidad del perfil, dado que la heterogeneidad de los suelos, incluso dentro de un área comparativamente pequeña, origina un rango de resultados en las mediciones experimentales. La variabilidad de los resultados de campo, resultante de la heterogeneidad del suelo y de las condiciones iniciales de contenido de agua y gradiente, hace que estos resultados sean sólo aplicables para superficies pequeñas y para esas condiciones iniciales. Por esta razón se ha intentado utilizar parámetros físicos del suelo y enfocar el problema a través del uso de modelos matemáticos (empíricos, semianalíticos y analíticos) que representan de algún modo un proceso físico de la infiltración. Los enfoques empíricos desarrollados son en general sencillos y se adaptan a condiciones comunes de suelo, pero no proporcionan ninguna interpretación física del fenómeno. Los enfoques semianalíticos y analíticos, en cambio, permiten describir e interpretar cuantitativamente las pruebas experimentales de infiltración con limitaciones en algunos enfoques, en las suposiciones de homogeneidad e isotropismo del perfil, o en lo elaborado de las resoluciones numéricas. Estas últimas permiten interpolar o pronosticar resultados respecto a otras situaciones diferentes a las experimentales.

En algunos trabajos (Gurovich¹, Gurovich y Jaramillo²) se ha presentado modelos físicomatemáticos para simular el proceso de infiltración de agua en el suelo con el objetivo de diseñar sistemas de riego; se compararon satisfactoriamente resultados experimentales de campo, modelos matemáticos empíricos, semianalíticos y analíticos del proceso y su modelo de simulación, determinándose que los enfoques semianalíticos y de simulación son los medios más adecuados para describir este proceso y usar los resultados obtenidos en el diseño de sistemas de riego.

Existen un sinnúmero de métodos que se utilizan para medir la infiltración en el campo; la decisión del método a usar, según Richards, depende de las condiciones físicas del suelo y de la disponibilidad de equipo, materiales y servicios adecuados; por tal causa no existe un procedimiento estándar, aplicable en todos los casos. Todos los métodos para medir la infiltración en condiciones de campo se basan en la inundación y estancamiento de agua en la superficie, aplicación de agua por aspersión, y medidas de entrada y salida de agua por surcos y zanjas.

Cilindros infiltrómetros

Musgrave ideó en 1935 los cilindros infiltrómetros, probablemente los instrumentos más usados en el estudio de la velocidad de infiltración de los suelos. En los primeros estudios sólo fueron empleados cilindros simples; los resultados obtenidos presentaron una gran variabilidad, posiblemente debido al movimiento lateral de agua no controlado. Con posterioridad se empleó cilindros dobles o multicilindros, con el objeto de minimizar el flujo lateral por medio de un área tampón alrededor del cilindro central. El movimiento de agua desde un cilindro infiltrómetro se produce en dirección descendente, a causa de la aplicación de una lámina de agua medida en el cilindro a diferentes tiempos. Los resultados que se obtienen indican a menudo una considerable variación en los valores de infiltración, en áreas aparentemente uniformes.

La limitación más seria para el uso de cilindros es su ubicación en el suelo, que produce un cierto grado de alteración de las condiciones naturales (destrucción de la estructura o compactación); ello provoca a su vez gran variación en las velocidades de infiltración. El problema del aire atrapado en el interior de la columna del suelo es otra de las limitaciones, dado que el aire que originalmente ocupa el espacio poroso del suelo no puede ser liberado desde éste bajo condiciones de flujo saturado, creando un impedimento para el movimiento vertical de agua. Los cilindros infiltrómetros han sido ampliamente usados para obtener valores de infiltración que permitan el diseño de sistemas y métodos de riego por inundación. Sin embargo estas determinaciones no pueden correlacionarse con velocidades de infiltración que se adapten a otros sistemas de riego.

Surcos infiltrómetros

El método de surcos infiltrómetros también se denomina de entrada y salida de agua. Este método, descrito por Shockley, determina la velocidad de infiltración mediante el aforo de agua a la entrada y salida de un surco. La diferencia entre la cantidad de agua que entra y la que sale puede considerarse representativa de la infiltración. En este caso sólo una parte del suelo se encuentra en contacto con el agua; la infiltración total del terreno regado dependerá tanto de la infiltración vertical como de la infiltración lateral entre surcos consecutivos. El flujo de agua en el surco, en suelos de textura limosa o arenosa, puede tener algún efecto de sellamiento sobre la

superficie del suelo causando con el tiempo una relativa disminución en la velocidad de infiltración. Este método sólo proporciona valores promedios de un rango de infiltración; se adapta únicamente a las condiciones de infiltración que existen en un surco durante el riego, y no permite usar los valores obtenidos para cualquier otro método de riego.

Método de represa o poceta

Este método consiste en represar agua sobre un área determinada mediante bordes o pretiles contruidos alrededor de ella. Mediante un medidor de flotador o una regla se mide el agua infiltrada a medida que su nivel baja. El grado con que baja el nivel de agua en una parcela grande es probablemente la mejor indicación de la velocidad de infiltración.

Se ha señalado que las pocetas pequeñas tienen generalmente una limitación similar a la de los cilindros infiltrómetros; el factor de aire atrapado puede originar un movimiento vertical retardado. Las pocetas grandes, en cambio, no son prácticas debido a las grandes cantidades de agua necesarias para las mediciones y el nivel topográfico requerido en el área experimental.

En general, todos los métodos usados para medir la infiltración de agua en el suelo en condiciones de campo dan una variabilidad de resultados para un mismo lugar; incluso cada método produce resultados puntuales, que no representan a toda el área considerada. Por esta causa su aplicación e interpretación no siempre son apreciados; se ha intentado relacionar el proceso de infiltración con parámetros físicos del suelo y enfocar el problema mediante modelos matemáticos (empíricos, semianalíticos y analíticos) que ayuden a la comprensión de este fenómeno.

Los enfoques empíricos tienen la ventaja de ser muy sencillos en su resolución y de adaptarse en general a condiciones diferentes de suelo; sin embargo, tienen la limitación de no proporcionar ninguna interpretación física directa del proceso y por lo tanto hacen difícil extrapolar la información obtenida a condiciones diferentes a aquellas en las cuales se obtiene. Es frecuente que las determinaciones de infiltración se hagan en condiciones diferentes a las que luego presentan en la práctica del riego.



Kostiakov, en 1932, fue el primero que propuso el uso de una ecuación empírica, que hasta hoy es de amplio uso, para analizar los resultados experimentales que se obtienen de las pruebas de infiltración en el campo. Como la velocidad de infiltración comienza generalmente con un valor relativamente alto y decrece con el tiempo, puede ser expresada, según Kostiakov, de la forma siguiente:

$$I = K T^n \quad -1 < n < 0$$

Ecuación 6.1

donde:

I es la velocidad de infiltración instantánea (L/T)

T es el tiempo (minutos)

K es la constante que representa la velocidad de infiltración para T = 1

n es la pendiente de la curva de velocidad de infiltración con respecto al tiempo.

La infiltración acumulada, se obtiene integrando la ecuación de velocidad de infiltración:

$$D = \int_0^t I \, dT$$

Ecuación 6.2

donde:

D es infiltración acumulada o lámina de agua acumulada (L)

Reemplazando la ecuación 6.1 en 6.2 y desarrollando ésta, la infiltración acumulada resulta:

$$D = C T^b \quad 1 > b > 0$$

Ecuación 6.3

donde:

C es la lámina de agua acumulada en el perfil del suelo cuando $T = 1$

b es la pendiente de la curva de infiltración acumulada *versus* el tiempo $D = f(T)$.

Al comparar esta ecuación con resultados de las experiencias realizadas, los datos que se obtienen se ajustan moderadamente bien a las determinaciones prácticas, dado que los parámetros de la ecuación son evaluados a partir de mediciones experimentales únicamente. Los parámetros de las ecuaciones 6.1 y 6.3 no tienen un significado físico particular. Variaciones comparativamente pequeñas de los exponentes (pendientes de las rectas) con respecto a sus valores reales producen resultados muy alejados de la realidad; por tal razón conviene determinar éstos en forma analítica a través del cálculo de ecuaciones de regresión lineal, con los logaritmos de los valores de infiltración y tiempo.

Otros enfoques de cálculo o estimación de la velocidad de infiltración, como las ecuaciones de Horton, Holtan, Green-Ampt y Philip, tienen aplicaciones diversas para los estudios de suelos, y en cierta medida pueden utilizarse en el diseño del sistema de riego. Sin embargo, debido a la complejidad de su tratamiento matemático su estudio detallado escapa a los objetivos de este libro; el proceso de infiltración se describe a partir de datos experimentales, a través de la ecuación de Kostiakov.

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACION

La velocidad con que el agua entra al suelo en un punto dado determina el tiempo durante el cual el agua debe estar en contacto con la superficie (tiempo de riego) para lograr reponer en el perfil el agua consumida por los cultivos; asimismo, esta velocidad de entrada determina qué proporción del agua aplicada entrará en el perfil en un tiempo determinado y qué proporción escurrirá hacia otros puntos de la superficie, para infiltrar allí.

Para determinar experimentalmente la velocidad de infiltración, ya sea por el método de cilindro infiltrómetro o el surco infiltrómetro, es necesario considerar los siguientes aspectos:

1. Selección de un sitio que sea representativo de la correspondiente unidad de suelo. Las mediciones de velocidad de infiltración no deben efectuarse en lugares donde existen partiduras del suelo o deposiciones de animales u otros materiales que cubran el lugar. Es conveniente efectuarlas en un lugar cercano a la fuente de agua.

2. Examen y descripción del perfil del suelo. Determinación de la textura y los cambios texturales. Descripción de la estructura del suelo. Las condiciones de los primeros 30 cm son de particular importancia. Comprobación de la presencia de cantidades excesivas de Sodio absorbido en lugares donde las condiciones son de estructura masiva.

3. Estimaciones de la humedad del suelo o, si el estudio requiere mayor precisión, determinación de la humedad del perfil del suelo mediante alguno de los métodos conocidos. Es muy recomendable efectuar las mediciones de velocidad de infiltración con una humedad del suelo aproximada a aquella existente antes de un riego.

4. Anotación de cualquier característica observada que tenga influencia en la velocidad de infiltración.

Método del cilindro

Este método se utiliza para determinar la velocidad de infiltración en suelos en los que se establecerían métodos de riego, tales como: acequias en contorno, bordes, tazas, aspersión y goteo.

a. Material necesario

1. **Cilindro metálico.** Los cilindros requeridos deben tener un diámetro no inferior a 30 cm. Deben ser contruidos con acero suave a efecto de minimizar la fricción al hacerlos penetrar en el suelo; el acero galvanizado es un material adecuado. El cilindro debe ser suficientemente resistente como para aguantar los fuertes golpes del martinete, necesarios para introducirlo en el suelo. Es recomendable un grosor del acero de alrededor de 0.5 cm. En este caso es necesario hacer un filo no mayor de 2 mm en el extremo del cilindro, con el fin de facilitar la penetración. El largo del cilindro debe ser superior a los 30 cm. Es conveniente colocar una manilla de acero soldada para facilitar el transporte. Se recomienda el uso de un mínimo de tres

cilindros para cada determinación. Para facilitar el transporte los cilindros pueden construirse con diámetro diferente, con el fin de colocar uno dentro del otro; en ese caso sólo el cilindro exterior llevaría manilla. Así un grupo de tres cilindros que tengan un diámetro interior de 30, 31 y 32 cm puede ser almacenado o transportado en el espacio ocupado ordinariamente por un solo cilindro de 32 cm.

2. Martinete. Es necesario un martillo pesado para la labor de penetración del cilindro en el suelo. El peso adecuado es de 8-15 kilos. Un buen martinete puede ser construido colocando un mango a un trozo de acero de 2 pulgadas de grueso. Si el trozo de acero es de 15 cm de ancho y 20 cm de largo, el martinete pesará alrededor de 15 kilos. Un trozo de riel de ferrocarril puede servir como base en la construcción de un martinete.

3. Estanque de agua. Es necesario un estanque de agua de 40-60 litros en caso de que la distancia desde la fuente de agua al lugar de la prueba sea muy grande; además es conveniente tener un par de baldes de 10-15 litros.

4. Calidad del agua a usar. En estudios de infiltración debe usarse la misma calidad de agua usada para el riego; por lo tanto el agua a usar para dichos estudios puede ser obtenida de las acequias o canales de riego más cercanos al lugar de la determinación. Donde esto no es posible se requiere un estanque de gran capacidad o varios más pequeños, con el fin de proveer el agua suficiente a los cilindros infiltrómetros y la poza o cilindro exterior. En estudios de este tipo puede utilizarse un tambor de 200 litros al cual se le instala una llave en la base, o galones plásticos de 60 litros.

5. Aparato medidor. La forma más corriente de medir es instalar una regla de alrededor de 30 cms, cuya escala sea de fácil lectura, y determinar diferencias de 1 mm. Esta regla debe tener un pequeño orificio con el fin de hacerla penetrar en un pequeño vástago que sobresalga del interior del cilindro.

6. Protector de erosión. Un pedazo de plástico, papel grueso o un trozo de madera delgado sirven como protectores del suelo al ser

colocados en el fondo del cilindro durante la primera aplicación de agua. Así se protegerá de cualquier alteración física que pueda producir el impacto del agua sobre el suelo.

7. Reloj o cronómetro. Cualquier tipo de reloj que pueda leerse con una aproximación de un minuto podrá ser utilizado satisfactoriamente.

b. Instalación

1. Seleccionar un lugar para cada cilindro; examinar cuidadosamente que allí no exista alguna alteración física del suelo, deposiciones de animales, o piedras que se puedan dañar o impedir la penetración del cilindro. Se debe evitar aquellas áreas que pueden haber sido afectadas por el tráfico de animales o maquinaria. La distancia a la que deben colocarse los cilindros de un set para una prueba no debe ser mayor de 15 metros; deben ubicarse formando triángulo, con el fin de facilitar las lecturas al operar simultáneamente con cada uno de ellos .

2. Colocar el cilindro en el lugar determinado y presionar con fuerza sobre el suelo, haciéndole girar. El cilindro no debe quedar inclinado.

3. Colocar sobre el cilindro un trozo de madera o metal sobre el cual se golpeará con el martinete para introducir el cilindro en el suelo. Comprobar que el cilindro va penetrando en forma pareja en el suelo; para ello puede colocarse un nivel de carpintero sobre el cilindro, aunque normalmente es suficiente la apreciación visual.

4. Golpear con el martinete hasta que el cilindro haya penetrado hasta una profundidad de 15 a 20 cm. La nivelación o inclinación con que va penetrando el cilindro respecto a la superficie del suelo debe ser controlada con frecuencia. El cilindro no debe introducirse irregularmente en el suelo; en otras palabras, no debe golpearse a un lado primero y luego al otro lado con el fin de emparejarlo. Esto produce un mal contacto entre las paredes del cilindro y el suelo y puede alterar la estructura del suelo dentro del cilindro. Por lo tanto, si el cilindro ha penetrado en forma inconveniente en el suelo debe removerse y colocarse nuevamente en un lugar cercano.

5. Construir una poza homogeneizadora alrededor del cilindro; una forma fácil y que produce buenos resultados es hacer un pretil alrededor del cilindro. Este debe tener una altura de 10 a 15 cm y la pared interna debe quedar a una distancia mínima de 20 cm del cilindro. En la construcción del pretil no debe alterarse el suelo que va a quedar entre este último y el cilindro.

En campos cultivados o en áreas donde el agua debe ser traída de un lugar lejano al de la prueba, es recomendable un cilindro metálico concéntrico que haga las veces de pretil; este cilindro debe tener un diámetro mayor que el cilindro interior. La diferencia debe ser de un mínimo de 30 cm. Sin embargo el cilindro exterior no necesita ser tan largo, ni necesita ser enterrado tan profundamente como el interior. Generalmente tiene un largo de 20 a 25 cm. Debido al mayor diámetro de estos cilindros, presentan más dificultades para la penetración en el suelo, por lo cual deben ser construidos con un metal firme o deben ser reforzados con huinchas metálicas soldadas en el borde interior. Estas pozas-homogeneizadoras o tampones no siempre son necesarios. Donde la principal estrata de conductividad hidráulica restringida, como 'pie de arado', pan de arcilla u otros, es penetrada o atravesada por el cilindro interior, la poza no será necesaria.

c. Operación

1. Llenar la poza homogeneizadora (si la hubiera) con agua, a una profundidad mínima de 5 cm y mantener esta altura de agua a través de todo el período de observación. Si bien esta altura de agua no es de fundamental importancia, requiere sin embargo un constante suministro de agua en la poza.

2. Colocar un aparato protector de erosión (plástico, madera u otro) dentro del cilindro.

3. Llenar con agua el cilindro interior hasta una profundidad de 15-20 cm.

4. Extraer rápidamente el aparato protector de erosión.

5. Medir el nivel de agua en la regla previamente instalada en el cilindro; es importante marcar este nivel para realizar las lecturas subsiguientes en el mismo punto. La operación de llenado del cilindro debe ser muy rápida y la medición inicial de la superficie de agua

tiene que ser hecha inmediatamente para reducir los errores debidos a la infiltración que se produce durante este período.

6. Anotar en la hoja de registros la lectura que indique el aparato medidor y el momento en que fue hecha la observación.

7. Realizar mediciones de altura de agua en el cilindro a intervalos periódicos, anotando los valores observados; al comienzo de la prueba los intervalos deben durar de 5 a 10 minutos. Para la mayoría de los suelos, observaciones hechas al final de 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, y 120 minutos y luego cada una hora permiten obtener una adecuada información. Suelos de alta velocidad de infiltración requieren mediciones más frecuentes. Como regla general, la infiltración entre 2 mediciones no debería ser mayor de 3 cm. Las mediciones deberían realizarse por un tiempo de 3-4 horas. Sin embargo, en suelos de alta velocidad de infiltración rara vez es necesario extender la prueba más allá del tiempo que se requiere para agregar al suelo una lámina de 10 cm. Por otro lado, en suelos de muy baja velocidad de infiltración puede ser conveniente prolongar la prueba por más de 4 horas.

8. Cuando el nivel de agua ha bajado alrededor de 6 cm en el cilindro es necesario rellenar el nivel inicial; este rango de fluctuación del nivel de agua debe mantenerse durante toda la prueba. Cuando se realiza un relleno debe medirse la altura de agua antes y después de la operación y realizarla en forma muy rápida, para evitar errores debidos a la infiltración durante el tiempo que dure esa tarea. Al utilizar la información se asume que el relleno se realiza en forma instantánea.

Los ejercicios por resolver al final de este Capítulo ilustran el uso de la información experimental de terreno, a partir de cilindros infiltrómetros, en la determinación del tiempo de riego necesario para incorporar al perfil una lámina h y de la lámina de agua que penetra al perfil para un determinado tiempo de riego.

9. Cuando la infiltración es anormalmente alta o baja debería examinarse cuidadosamente el suelo y asegurarse que el cilindro esté correctamente instalado.

10. Una vez terminada la prueba, remover y limpiar los cilindros.

d. Elaboración de la información

1. Cálculo de la infiltración acumulada h , para cada cilindro. La información es registrada en la forma en que se muestra en el Cuadro 7. Allí aparecen las columnas 'altura de agua' para los respectivos cilindros y para los diferentes períodos de tiempos considerados en la primera columna.

A partir de ese Cuadro se ha desarrollado un ejemplo que sirve para explicar el procedimiento de cálculo. A partir de la columna 'altura de agua' para el respectivo cilindro, se restan los valores registrados a los diferentes tiempos, del valor de altura de agua al tiempo cero. Por ejemplo: determinar la infiltración acumulada a los 10 minutos para el cilindro N° 1. Para ello se resta de la altura de agua a los 10 minutos correspondientes de este cilindro la que es igual a 18.8 cm. del valor al tiempo cero, 20 cm. Luego $20 - 18.8 = 1.2$ o sea $h_1 = 1,2$ cm. Cuando se computan lecturas en que se ha realizado relleno del cilindro se utiliza el mismo procedimiento de cálculo, pero ahora los valores se restan (a partir de la altura correspondiente al tiempo en que se realizó el último relleno) al valor obtenido en el último relleno. Al valor obtenido en esta forma se le agrega la infiltración acumulada, h , obtenida en el momento en que se realizó el relleno. Ej.: Determinar la infiltración acumulada, h , que se produce a los 120 minutos para el cilindro N° 1. De acuerdo al procedimiento indicado, se tiene que el último relleno se realizó a los 90 minutos, obteniéndose un valor de altura de agua de 21.0 cm. El valor obtenido a los 120 minutos es de 19.6, luego $21.0 - 19.6 = 1.4$ cm. Por otro lado, el valor de infiltración acumulado h cuando se realizó el relleno a los 90 minutos es 6.0 cm., luego $1.4 + 6.0 = 7.4$ cm.

Los valores de infiltración acumulada promedio de los tres cilindros, h , aparecen en la penúltima columna del Cuadro 7.

2. Elaboración de gráficos. Una vez calculados los valores de infiltración h , se grafican con respecto al tiempo correspondiente que aparece en la primera columna, trazándose luego la curva que mejor se aproxime a los puntos determinados. La elaboración de estos gráficos no es necesaria cuando los datos experimentales son relacionados entre sí por medio de ecuaciones (punto 3).

CUADRO N° 7 Hoja de registros para la determinación de infiltración del suelo mediante cilindros infiltrómetros.

<p>Tiempo (min)</p> <p>Hora lectura cilindro N° 1</p> <p>Altura de agua cilindro N° 1 (cm)</p> <p>Infilt. acumulada h_1, cm.</p>	<p>0</p> <p>5</p> <p>10</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>45</p> <p>60</p> <p>90</p> <p>21.0</p> <p>7.4</p> <p>8.2</p> <p>9.4</p>	<p>8.00</p> <p>8.05</p> <p>8.10</p> <p>8.20</p> <p>8.30</p> <p>8.45</p> <p>9.00</p> <p>9.30</p> <p>20.0</p> <p>19.1</p> <p>18.8</p> <p>18.0</p> <p>17.0</p> <p>16.8</p> <p>15.6</p> <p>14.0</p> <p>19.6</p> <p>18.8</p> <p>17.6</p>	<p>0.0</p> <p>0.9</p> <p>1.2</p> <p>2.0</p> <p>3.0</p> <p>3.2</p> <p>4.4</p> <p>6.0</p>	<p>Hora lectura cilindro N° 2</p> <p>Altura de agua cilindro N° 2 (cm)</p> <p>Infilt. acumulada de h_2, cm.</p> <p>Hora lectura cilindro N° 3</p> <p>Altura de agua cilindro N° 3 (cm)</p> <p>Infilt. acumulada h_3, cm.</p> <p>\bar{h} (cm) (\bar{I} acumulada)</p> <p>Observaciones</p>	<p>8.01</p> <p>8.06</p> <p>8.11</p> <p>8.21</p> <p>8.31</p> <p>8.46</p> <p>9.01</p> <p>9.31</p> <p>22.0</p> <p>20.9</p> <p>20.2</p> <p>19.5</p> <p>19.1</p> <p>18.7</p> <p>17.0</p> <p>16.4</p> <p>20.0</p> <p>0.0</p> <p>1.1</p> <p>1.8</p> <p>2.5</p> <p>2.9</p> <p>3.3</p> <p>4.6</p> <p>5.6</p> <p>8.02</p> <p>0.07</p> <p>8.12</p> <p>8.22</p> <p>8.32</p> <p>8.47</p> <p>9.02</p> <p>9.32</p> <p>21.0</p> <p>20.2</p> <p>18.2</p> <p>18.0</p> <p>17.7</p> <p>17.0</p> <p>16.2</p> <p>15.2</p> <p>20.0</p> <p>0.0</p> <p>0.9</p> <p>1.6</p> <p>2.5</p> <p>3.1</p> <p>3.5</p> <p>4.6</p> <p>5.8</p>	<p>18.01</p> <p>18.4</p> <p>17.0</p> <p>11.01</p> <p>12.01</p> <p>18.4</p> <p>17.2</p> <p>18.4</p> <p>17.0</p> <p>15.4</p> <p>12.01</p> <p>7.2</p> <p>8.6</p> <p>10.1</p>	<p>7.2</p> <p>8.6</p> <p>10.1</p>	<p>Relleno cilindros 1, 2 y 3</p>
---	--	---	---	---	---	---	-----------------------------------	-----------------------------------

3. Cálculo de la velocidad de infiltración. Los valores de infiltración acumulada h , que aparecen en el Cuadro 7 (última columna) pueden relacionarse con el tiempo T de la columna 1, a través de una expresión similar a la Ecuación 6.3 ($h = CT^b$). Los valores del coeficiente C y el exponente b pueden obtenerse a través de un análisis de regresión lineal, o gráficamente, al linealizar la relación $h = f(T)$ por medio de una transformación logarítmica de los valores de la columna 1 y 11 del Cuadro N° 7. Estas transformaciones se realizan con mucha facilidad al contar con una sencilla calculadora de bolsillo o una Tabla de Logaritmos. Conocidos los valores de C y b , pueden obtenerse el coeficiente K , y el exponente n de la Ecuación 6.1 de velocidad de infiltración ($i = K T^n$), a través de las siguientes relaciones:

$$K = 60 Cb$$

Ecuación 6.4

$$n = b - 1$$

Ecuación 6.5

Método del surco infiltrómetro

La determinación de la velocidad de infiltración a través del método del surco infiltrómetro consiste en la medición de los caudales de entrada y salida del agua que escurre a través de un surco. La diferencia entre estos caudales corresponde al volumen de agua infiltrada en un determinado período. Este método se utiliza en general para determinar la velocidad de infiltración de suelos cuyos cultivos se riegan por surcos.

a. Material necesario

1. Huincha de 25 m o más
2. Pala
3. Baldes de 10 - 15 litros calibrados
4. Reloj y cronómetro

5. Cajas de distribución, orificios o sifones u otros implementos que controlen la entrada de agua en los surcos.
6. Hoja de registro.

b. Preparación previa

Antes de realizar las pruebas es necesario hacer algunas determinaciones y trabajos anexos que servirán posteriormente; ellos son: la determinación del caudal a utilizar, el trazado y la selección del surco infiltrómetro y la regulación del caudal seleccionado.

1. **Determinación del caudal máximo no erosivo.** Se denomina caudal máximo no erosivo (c.m.n.e.) a aquel caudal que se considera que no producirá erosión bajo las condiciones de terreno a regar (textura del suelo, pendiente). Este caudal debe ser el que se utilice durante la prueba de infiltración, ya que de lo contrario varía la velocidad de infiltración.

Para determinar el c.m.n.e. se aplica el siguiente procedimiento:

- i. Trazar varios surcos de riego separados entre sí a la distancia que tiene o tendrá el cultivo que se regará en la temporada. En el resto del área los surcos se trazan en el mismo sentido del riego.
- ii. Instalar en la acequia regadora las cajas, orificios o sifones que distribuirán el agua a los surcos, y hacer en la cabecera de los surcos cavidades donde colocar los baldes para medir el caudal.
- iii. Escurrir un caudal diferente por cada surco: 5 a 10 minutos después, observar el color del agua y el arrastre de partículas en los diferentes surcos. Desechar aquellos caudales en que el agua esté turbia o produzca demasiado arrastre de suelo.
- iv. Medir los caudales de entrada en los surcos seleccionados, colocando un balde bajo el chorro de entrada de cada surco y tomando el tiempo que demora en llenarse. Al dividir el volumen de agua colectada en el recipiente por el tiempo que demoró en llenarse, se obtiene el caudal (Fig. 31). Esta operación se repite de tres a cinco veces y se utiliza el promedio de los valores obtenidos como caudal de entrada.

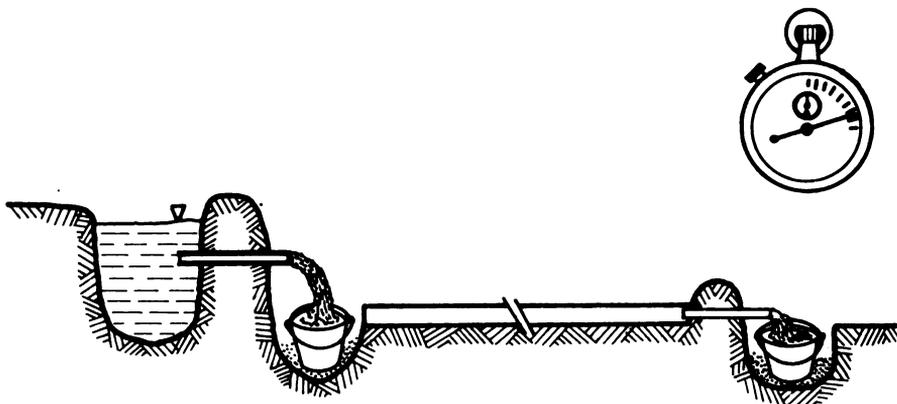


Fig. 31. Medición del caudal de entrada y salida en el surco infiltrómetro.

- v. Cortar la afluencia de agua a los surcos, observar el grado de erosión que se haya producido en las paredes de los surcos seleccionados y escoger el caudal más conveniente, o sea el c.m.n.e.; este caudal puede estimarse en forma aproximada, de acuerdo con la **Ecuación 6.6**.

$$Q = \frac{0.63}{s}$$

Ecuación 6.6

En que:

Q = caudal en $1. \text{seg}^{-1}$

s = pendiente en %

2. Trazado y selección del surco infiltrómetro. Se recomienda considerar los siguientes aspectos:
- i. Trazar 3 surcos de 30 m de largo, separados entre sí a la misma distancia que tienen o tendrán en el cultivo que se regará en la temporada.
 - ii. Seleccionar el surco del centro para hacer la determinación de infiltración.

iii. Cavar en los extremos superiores o inferiores del surco central pozos donde colocar los baldes para medir los caudales de entrada y salida.

3. Regulación del caudal máximo no erosivo. Regular una caja de distribución, orificio o sifón para entregar al surco central el c.m.n.e. previamente determinado. Debe cuidarse que durante esta operación el agua no entre al surco central donde se medirá la velocidad de infiltración; para ello es conveniente desviar el agua hacia uno de los surcos laterales hasta que se haya logrado el caudal requerido.

c. Operación

1. En el momento en que el agua entre al surco infiltrómetro anotar la hora en la hoja de registros (Cuadro 8); al mismo tiempo hacer escurrir agua por los surcos laterales para uniformar la humedad del perfil del suelo y disminuir el movimiento del agua hacia los lados, fenómeno que altera los valores de infiltración que se producen al efectuar los riegos del cultivo; es importante tratar de mantener constante el caudal de entrada, ya que variaciones superiores al 30 % de lo establecido producen errores que motivan que se repita la determinación usando otro surco infiltrómetro.

2. Cuando el agua llegue al final del surco anotar la hora, esperar unos minutos hasta que el caudal de salida se regularice y en ese momento efectuar su medición a la salida y entrada del surco; anotar ambos datos en las columnas correspondientes (1, 5 y 6) de la hoja de Registros (Cuadro 8).

3. A partir de la hora en que el agua llega al final del surco, efectuar mediciones periódicas de caudales en forma simultánea a la salida y entrada del surco infiltrómetro, a intervalos de tiempo que se proponen de 5-5-5-10-10-10-15-15-15-30-30-30-60. . . minutos. Anotar cuidadosamente esos valores a la hora en que se efectúan.

4. La determinación debe realizarse por un período mínimo de 2 horas; éste debe prolongarse en suelos de textura arcillosa. Se logra un buen índice para finalizar la prueba de infiltración cuando el caudal de salida se aproxima al caudal de entrada; ello significa que las diferencias entre dichos caudales son cada vez menores, llegando a ser constantes o con mínimas variaciones.

d. Elaboración de la información

1. Cálculo de velocidad de infiltración instantánea, I . La información obtenida del surco infiltrómetro es registrada en la forma que se muestra en el Cuadro N° 8. En la columna 4 aparecen los tiempos promedio de escurrimiento de agua en el surco proveniente de las columnas 2 y 3. En la columna 7 se indica la diferencia de caudales, lo que corresponde al caudal infiltrado en el surco. La velocidad de infiltración instantánea I , que aparece en la columna 8, fue calculada a través de la Ecuación 6.7.

$$I = \frac{360 \times Q}{L \text{ (m)} \times D \text{ (m)}}$$

Ecuación 6.7

donde:

I = Velocidad de infiltración, cm/h

Q = Diferencia entre el caudal de entrada y salida, litro/seg.

L = Largo del surco, infiltrómetro, m

D = Espaciamiento entre surcos, m

Ejemplo: Determinar la velocidad de infiltración instantánea I , que se produce a los 90 minutos de comenzada la prueba. De acuerdo con el Cuadro 8, el caudal de entrada es 1.0 litro/seg, el caudal de salida es 0.8 litro/seg, luego $Q = 0.20$ litro/seg.

$$L = 30 \text{ m} \qquad D = 1.0 \text{ m}$$

luego,

$$I = \frac{360 \times 0.20}{30 \times 1.0} = 2.40 \text{ cm/h}$$

2. Elaboración de gráficos. Una vez calculados los valores de velocidad de infiltración I , éstos se grafican con respecto al tiempo promedio de la columna 4 (Cuadro N°8); luego se traza la curva que mejor se aproxima a los puntos terminados. En la Fig. 31 aparecen graficados los valores mencionados.



CUADRO N° 8 Hoja para la determinación de infiltración de suelo mediante surcos.

Hora	1	8.00
Tiempo en min. lugar entrada de agua.	2	0
Tiempo en min. lugar salida de agua.	3	—
Tiempo promedio min	4	—
Caudal de entrada litro/seg.	5	1.0
Caudal de salida litro/seg.	6	—
Caudal infiltrado litro/seg	7	—
Velocidad de infiltración cm/h	8	—
		5.16
		3.84
		3.24
		3.00
		2.40
		2.04
		1.68
		1.56
		8.18
		8.20
		8.30
		8.45
		9.00
		9.30
		10.00
		11.00
		12.00
		180
		240
		2
		12
		27
		42
		72
		102
		162
		222
		11
		21
		36
		51
		81
		111
		171
		231
		0.57
		0.60
		0.73
		0.75
		0.80
		0.83
		0.86
		0.87

3. Cálculo de la infiltración acumulada h . Los valores de infiltración I , que aparecen en la última columna del Cuadro 8, se relacionan con el tiempo T de la columna 2 a través de una expresión similar a la **Ecuación 6.1** ($I = KT^n$). Los valores del coeficiente K y del exponente n se pueden obtener a través de un análisis de regresión lineal, o gráficamente al linearizar la relación $I = f(T)$ por medio de una transformación logarítmica de los valores de las columnas 2 y 8 del Cuadro 8. Conocidos los valores de K y n , puede obtenerse el coeficiente C y el exponente b de la **Ecuación 6.3** a través de las siguientes relaciones, que derivan de las **ecuaciones 6.4 y 6.5**.

$$C = \frac{K}{60^b}$$

Ecuación 6.8

$$b = n + 1$$

Ecuación 6.9

Los ejercicios que se presentan al final de este Capítulo ilustran sobre el uso de la información experimental de terreno, obtenida a partir de surcos infiltrómetros, en la determinación del tiempo de riego y de la lámina h que se obtiene en el suelo con un tiempo determinado de riego.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Nombre cinco factores que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo.
2. Determine la infiltración acumulada y la velocidad de infiltración para $t = 60$ minutos, a partir de datos de campo obtenidos con cilindros infiltómetros.

t(min)	h(cm)	t(min)	h(cm)	t(min)	h(cm)
5	3.39	20	8.12	40	12.57
10	5.25	25	9.35	50	14.47
15	6.78	30	10.49	75	18.68
				90	20.95

3. Describa el perfil de contenido de agua de un suelo homogéneo que se obtiene después de 240 minutos de iniciado el proceso de infiltración, y la velocidad de avance del frente mojado en un suelo con las siguientes características:

$$\theta_i = 0.15$$

$$D_b = 1.25 \text{ gr/cm}^3$$

Valores de infiltración acumulada

h cm	t min	h cm	t min
1.6	5	4.4	50
2.1	10	4.9	60
2.6	15	6.1	90
3.0	20	6.9	120
3.3	25	7.8	150
3.5	30	8.7	180
4.0	40		

4. Compare gráficamente la velocidad del proceso de infiltración en dos perfiles:
 - a. suelo arenoso sobre suelo arcilloso
 - b. suelo arcilloso sobre suelo arenoso
5. ¿Cuál es la diferencia entre infiltración y conductividad hidráulica?
6. En las determinaciones de velocidad de infiltración de agua en dos suelos se obtuvieron los siguientes datos:

Tiempo (min)	Infiltración acumulada (cm)	
	Suelo A	Suelo B
2	1.14	0.75
4	1.64	1.23
6	2.03	1.64
10	2.65	2.36
15	3.27	3.15
20	3.80	3.86

- a. ¿Cuáles son las velocidades de infiltración instantánea de ambos suelos al primer minuto y a los 45 minutos?
- b. ¿Cuál de los dos suelos acumulará más agua durante un riego de una hora de duración? Indique los cálculos realizados.
- c. Si se quiere agregar una carga de agua de 15 cm, ¿cuánto tiempo hay que regar cada uno de estos suelos? Indique los cálculos realizados.

7. La Ecuación de VI de un suelo es $I = 6T^{-0.5}$
- ¿Cuál es la carga de agua aplicada en 240 minutos?
 - ¿Cuál es la velocidad de infiltración a los 240 minutos de riego?
 - Si la D_a del suelo es 1 gr/cm^3 y el riego se efectuó con $w = 13\%$ y w de capacidad de campo es 25% , ¿qué profundidad de suelo se mojó?
 - Si el suelo tiene una profundidad total de 80 cm indique si quedó un déficit o exceso y a qué volumen de agua corresponde.
8. ¿En qué suelo será mayor la velocidad de infiltración básica? ¿En un franco limoso o en un franco arcilloso? ¿Por qué?
9. Si los coeficientes de la ecuación $I = KT^n$ son $n = -0.31$ y $K = 12$, ¿cuánta agua infiltra en el suelo en 10 minutos?
10. Se ha determinado la velocidad de infiltración de una plantación por el método del surco infiltrómetro. Los datos de campo son los siguientes:

Hora	Tiempo de entrada (min)	Tiempo de salida (min)	Tiempo promedio (min)	Caudal de entrada (litros/seg)	Caudal de salida (litros/seg)	Q (litros/seg)	V.I. (cm/h)	D (cm)
11.10	0							
11.26	16	0			0.136	0.264	2.64	
11.31	21	5		0.379	0.218			
11.36			18				1.50	
11.41	31	15		0.379			1.28	
11.51	41	25						

- a. Determine el largo del surco infiltrómetro.
 - b. Complete todos los datos de la tabla.
 - c. Determine las ecuaciones de VI y D.
 - d. ¿Qué caudal se está infiltrando a la media hora de riego al regar 1 ha de papas en un potrero de 80 m de largo con una distancia de plantación de 80 cm?
11. Se riega un suelo con $500 \text{ m}^3/\text{ha}$ en el tiempo de 90 minutos. En el primer minuto de riego penetraron 6 litros/m^2 . ¿Cuál es la ecuación de velocidad de infiltración instantánea y el tiempo en que se produce la infiltración básica?
12. Determine la infiltración acumulada y la velocidad de infiltración para $t = 80$ minutos a partir de datos de campo obtenidos con cilindro infiltrómetro.

<u>T. min</u>	<u>h cm.</u>
5	1.6
10	2.1
15	2.6
20	3.0
25	3.3
30	3.5
40	4.0
50	4.4
60	4.9
90	6.1
120	6.9

13. Se ha realizado varias determinaciones de infiltración para un mismo suelo, por el método del cilindro infiltrómetro, para diferentes contenidos iniciales de humedad. Grafique una serie de curvas que representen posibles datos experimentales, indicando claramente a qué corresponden los ejes y cada una de las curvas.
14. Se cuenta con la siguiente información de dos suelos:

- a. Velocidad de infiltración (cilindro infiltrómetro)

Tiempo (min)	Suelo 1	Suelo 2
2	1.00	0.75
4	1.70	1.15
6	2.15	1.75
10	2.80	2.15
15	3.50	2.75
20	3.90	3.15

- b. Curva característica de humedad

Tensión (bares)	Contenido Volumetrico de Agua (%)	
	Suelo 1	Suelo 2
0.3	18	28
1.0	15	24
3.0	14	20
7.0	12	17
10.0	11	15
15.0	9	13

1. ¿Cuál es la expresión de la función de VI en el tiempo para ambos suelos?

2. ¿Qué contenido de agua tendrá cada uno de estos suelos cuando un tensiómetro marque 0.8 bares?
 3. ¿Cuánto tiempo hay que regar cada uno de estos suelos para almacenar un volumen de $700 \text{ m}^3/\text{ha}$?
 4. Si se almacenaran $700 \text{ m}^3/\text{ha}$ de agua en el perfil, ¿qué tensión promedio tendrá esa agua en el suelo?
 5. Si ambos suelos se riegan durante 2 horas, ¿cuál será el contenido de agua que almacenarán y a qué tensión estará retenida?
15. ¿Por qué disminuye la velocidad de infiltración a medida que transcurre el tiempo de riego hasta llegar a su valor constante? Base su explicación en la aplicación de la Ley de Darcy.
16. Determinar la ecuación de VI en función del tiempo, la ecuación de Infiltración Acumulada IA en función del tiempo, la Infiltración básica Ib y el tiempo de riego para aplicar una carga de agua de 45 cm, de acuerdo a los siguientes datos experimentales.

Hora	Tiempo entrada	Tiempo salida	Tiempo promedio	Caudal entrada	Caudal salida	Caudal infiltrado	VI cm/hora
12.40	0	—	—	2.5	—	—	—
12.44	4	0	2	2.5	—	—	—
12.45	5	1	3	2.5	0.5	2.0	24.00
12.46	6	2	4	2.5	0.8	1.7	20.40
12.47	7	3	5	2.5	1.0	1.5	18.00
12.50	10	6	8	2.5	1.3	1.2	14.40
12.55	15	11	13	2.5	1.4	1.1	13.20
13.00	20	16	18	2.5	1.5	1.0	12.00
13.10	30	26	28	2.5	1.6	0.9	10.80
13.20	40	35	38	2.5	1.8	0.7	8.40
13.40	60	56	58	2.5	1.9	0.6	7.20
14.00	80	76	78	2.5	2.1	0.4	4.80
14.30	110	106	108	2.5	2.3	0.2	2.40
15.00	140	136	138	2.5	2.3	0.2	2.40
15.30	170	166	168	2.5	2.3	0.2	2.40
16.00	200	196	198	2.5	2.3	0.2	2.40
16.45	245	241	243	2.5	2.4	0.1	1.20
17.00	260	256	258	2.5	2.4	0.1	1.20
17.30	290	286	288	2.5	2.4	0.1	1.20
18.45	305	301	303	2.5	2.4	0.1	1.20

BIBLIOGRAFIA

1. GUROVICH, L. Modelo simulativo para la predicción de la infiltración del agua en el suelo. *Ciencia e Investigación Agraria*, Vol. 4(3): 183–196. 1977.
2. _____, y JARAMILLO, G. Modelos matemáticos y mediciones experimentales en la determinación de infiltración del agua en el suelo. *Ciencia e Investigación Agraria*, Vol. 4(3): 197–208. 1977.
3. HENDERSON, D.W. y H.R. HAISE. Control of Water: Intake rates. In "Irrigation of Agricultural Lands", Hagan, R. ed. *Agronomy N° 7*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967. p. 925–940.
4. HILLEL, D. *Soil and Water, Physical Principles and Processes*. Academic Press, New York. 1971. Capítulo 6.
5. TOSSO, J. y J. TONDREAU. Velocidad de Infiltración para Diseño de Métodos de Riego. Edición "Comunicaciones Agrícolas", SAG, Chile. 1975. 44 pp.

El texto de este Capítulo ha sido adaptado por el autor a partir de las obras de Tosso y Tondreau y D. Hillel, para el desarrollo de los cursos de Riego que dicta en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 7

EVAPOTRANSPIRACIÓN, DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA LOS CULTIVOS Y FRECUENCIA DE RIEGO

INTRODUCCION

A pesar de todas sus leyes de conservación la naturaleza puede, en algunas oportunidades, ser considerablemente ineficiente, o al menos así nos parece desde nuestro particular punto de vista. Unos de los ejemplos más significativos de lo anterior es la forma en que las plantas extraen agua del suelo en cantidades que superan con mucho sus necesidades metabólicas. En climas áridos las plantas consumen cientos de toneladas de agua por cada tonelada de crecimiento vegetativo. Esto quiere decir que las plantas inevitablemente transmiten hacia la atmósfera la mayor parte (más de un 90 %) del agua que extraen del suelo. El consumo de agua por parte de las plantas, proceso llamado transpiración, no es necesariamente el resultado de la actividad vital de éstas. En realidad las plantas pueden vivir en una atmósfera saturada, con requerimiento de muy poca transpiración. La transpiración está causada, más que por el crecimiento de los vegetales por un gradiente de presión entre las

hojas y la atmósfera que las rodea. En otras palabras: una vez absorbida por las raíces, el agua del suelo abandona la planta a través de las hojas como resultado de la demanda evaporativa de la atmósfera.

Para crecer satisfactoriamente las plantas deben alcanzar tal economía de agua que la demanda a la que están sujetas sea balanceada con la oferta disponible. El problema reside en que la demanda evaporativa de la atmósfera es casi continua, mientras que la lluvia o el riego ocurren ocasionalmente y en forma irregular. Para sobrevivir durante los períodos secos entre lluvias o entre riegos, la planta debe estar capacitada para hacer uso del agua contenida y retenida en el espacio poroso del suelo.

Uno de los aspectos principales de la operación de cualquier sistema de riego es la frecuencia, o sea el intervalo que transcurre entre dos riegos consecutivos. La determinación de la frecuencia de riego (*cuánto regar*) puede enfocarse desde el punto de vista del agua en el suelo, utilizando como índices ya sea el contenido de agua o la tensión con que ésta se encuentra retenida en un momento dado (Capítulos 3 y 4). La frecuencia de riego también puede determinarse a partir de una medición o una estimación del consumo de agua del cultivo, incluyendo dentro de éste la transpiración de las plantas y la evaporación desde el suelo. Las características del sistema suelo-agua determinan que el suelo sea un reservorio de agua a disposición de las raíces de las plantas; sin embargo es necesario establecer cuán fácilmente pueden sacar las plantas el agua retenida por el suelo y hasta qué límite de tensión puede considerarse que no se afecta el crecimiento o la producción de los cultivos. En cierta forma puede compararse la planta en el campo con la mecha de una lámpara de aceite, uno de cuyos extremos está sumergido en el combustible y el otro está sujeto al fuego que consume el combustible. La mecha misma está constantemente transmitiendo el líquido desde el fondo hacia el tope, bajo la influencia de gradientes de succión física que la mecha no crea pero que le son impuestas por las condiciones prevalecientes en sus dos extremos. En forma similar, la planta tiene sus raíces en el reservorio suelo-agua, y sus hojas están sujetas a la radiación del sol y a la acción del viento (o sea, a las condiciones meteorológicas externas) que le imponen la necesidad de transpirar incesantemente. Por cierto que esta analogía es una sobresimplificación; la planta no es tan pasiva, pues tiene la propiedad de limitar la velocidad de transpiración al cerrar los estomas de sus hojas. Sin embargo al limitar la transpiración la planta limita al mismo tiempo su crecimiento potencial, dado que los mismos estomas que transpiran el

vapor de agua sirven también para la absorción de anhídrido carbónico, necesario en la fotosíntesis. Al mismo tiempo una transpiración reducida contribuye a un alza en la temperatura interna de la planta, lo cual resulta perjudicial para sus actividades metabólicas.

USO—CONSUMO

El consumo de agua de los cultivos, llamado uso-consumo (U.C.), se define como la cantidad de agua usada por cada cultivo o vegetación natural y que se utiliza en la formación de tejidos, se pierde por las hojas y se reintegra a la atmósfera debido a la intercepción de la lluvia o del sistema conductor del agua de riego; se utiliza también para este fenómeno la denominación 'evapotranspiración actual'. Se ha desarrollado un gran número de metodologías para estimar las cantidades de agua que se requiere para una producción óptima de los cultivos. Estos métodos se han desarrollado para condiciones específicas de suelos, cultivos y climas en áreas determinadas; la aplicación de estas metodologías a un área diferente es bastante problemática, dado que se requieren costosos y largos experimentos de campo para ajustar los métodos a un nuevo conjunto de condiciones. Los principales métodos directos para la determinación del uso-consumo son:

- 1. Tanques y lisímetros.** Son aparatos rodeados de vegetación natural en los cuales se reproducen las condiciones existentes en el campo; por diferencias de peso medidas continuamente se determina la pérdida de agua del cultivo.
- 2. Estudios de humedad del suelo.** Determinan la humedad del terreno, antes y después de cada riego, en la zona radicular.
- 3. Método de integración.** Se base en la suma del producto de la superficie que ocupa un cultivo y el consumo de agua por la unidad vegetativa, o sea el consumo unitario de la vegetación natural por su superficie ocupada, más la evaporación desde el suelo sin vegetación, por su superficie.
- 4. Método del balance de agua.** Utiliza la ecuación del balance hidrológico mediante la cual, por determinación de todas las variables relevantes, es posible obtener la evapotranspiración al despejar esta variable en la Ecuación 2.5

5. Método de equilibrio de energía. Implica la estimación de la energía radiante que entra y sale de los cultivos y la radiación neta absorbida por ellos.

La ecuación del equilibrio de energía es:

$$R_n = H + IE + G + aA$$

Ecuación 7.1

En donde:

R_n = Radiación neta

H = Intercambio de calor sensible con la atmósfera

IE = Calor latente empleado en la evapotranspiración

G = Intercambio de calor con el suelo y la vegetación

aA = Energía empleada en la fotosíntesis y desprendida por la respiración.

6. Método aerodinámico o de flujo de vapor. Se refiere a la determinación del flujo ascendente de vapor por encima de la superficie; también es posible obtener estimaciones del flujo de vapor por medio de la medición del gradiente de humedad producido sobre un cultivo.

Estos métodos presentan algunas importantes desventajas operacionales y de costo, pues requieren para sus determinaciones un instrumental complejo y en algunos casos la reproducción de condiciones naturales, difíciles de obtener y mantener.

Los principales métodos indirectos para estimar el uso-consumo de los cultivos consisten en una gran cantidad de relaciones empíricas basadas en datos meteorológicos diversos como temperatura, humedad, velocidad del viento, presión de vapor y radiación solar; esos factores permiten la evaluación del uso-consumo con cierto grado de aproximación. La estimación del uso-consumo es obtenida con precisión si existe buena correlación entre los diversos procedimientos empíricos de cálculo con el uso-consumo medido directamente en determinaciones lisimétricas. El problema de la aplicación de ecuaciones empíricas se presenta cuando la información meteorológica dis-

ponible es escasa. Ante esa dificultad se plantean como alternativas de solución la determinación de parámetros no medidos, expresados como coeficientes, y el uso de fórmulas que tengan parámetros medibles, correlacionados con un método estándar. Este método estándar de determinación de uso-consumo, es el evaporímetro de bandeja Clase A, del U.S.W.B.*; representa la evaporación desde una superficie de agua, que es el mejor integrador de los factores climáticos que influyen en la evapotranspiración. La evaporación medida por este método es denominada **evaporación de bandeja**; se encuentra referida a una vegetación de escasa altura en activo crecimiento, que cubre íntegramente el terreno y sin restricciones de humedad del suelo y depende fundamentalmente de las condiciones climáticas existentes, dadas por las características de la atmósfera vecina al suelo.

El cuadro N° 9 resume los principales métodos que se han desarrollado para estimar el uso-consumo de los cultivos, con los parámetros que es necesario conocer para aplicar dichos métodos.

Al analizar el cuadro N° 9 puede advertirse que el clima es uno de los factores más importantes en la determinación de las pérdidas de agua del cultivo a través del proceso de evapotranspiración, aunque resulta evidente que las características del cultivo (su edad, desarrollo y hábito de crecimiento), así como la disponibilidad de agua del suelo para las raíces —tema que se trata más adelante en este Capítulo— tienen significativa relevancia en la pérdida real de agua de un cultivo específico en un período de tiempo dado. La evapotranspiración potencial ET_0 se ha definido como la "velocidad de pérdida de agua de un cultivo verde, de 8 a 15 cm de altura uniforme, en crecimiento activo, que cubre toda la superficie del suelo y no está sometido a condiciones de falta de agua del suelo", o sea un cultivo hipotético en el cual solamente el clima determina la velocidad de evapotranspiración. ET_0 se expresa normalmente en mm por día, lo que representa un volumen de agua perdido desde una superficie unitaria —de acuerdo con el método indirecto de estimación usado. El valor de ET_0 es en realidad un valor promedio de la pérdida de agua del cultivo en un período de diez días a un mes. Para una zona determinada el valor de ET_0 variará de año en año; es conveniente realizar un análisis de las magnitudes y frecuencias de los diferentes valores de ET_0 que pueden registrarse.

*U.S.W.B. = *United States Weather Bureau*, o sea la Oficina Meteorológica de los Estados Unidos, que desarrolló el método.

CUADRO N° 9 Fórmulas y enfoques para estimar los requerimientos de agua de los cultivos

RESULTADOS

Fórmula	Variables										Factor de conexión	Precipitación	Datos barométricos	ETp (pasto), mensual
	Temperatura	Humedad del aire	Boilbo seco-mojado	Horas de luz diurna	Horas de sol/cubierta de nubes	Radición	Velocidad del viento	Evaporación del metro	Datos del cultivo	Factor del cultivo del suelo				
Makkink 1957 Holanda	X					X								ETp (cultivo), mensual
Blaney-Criddle 1964 EE.UU.	X		X							X				UC cultivo, mensual
Jensen-Haise 1963 EE.UU.	X	X	(X)	(X)	(X)	X								ETp (cultivo) ET cultivo
Penman 1948-56 Ing.	X	X	(X)	(X)		X								Eo o ET cultivo
Bouchet Lowry-Johnson 1942 EE.UU.	X	X				X	X							ETp cultivo
Thornthwaite 1965 EE.UU.	X				(X)									UC cultivo
Turc-Langbein 1954 Francia	X		X	(X)										ET de todo el valle Estación de crecimiento
Snow URSS	X		X	(X)		(X)								ET del cultivo, mensual para 60-70 % agua disponible
Hudec 1962 Alem. Suvarov 1960 URSS	X		X											Eo o ET cultivo anual hoya hidrográfica
Blaney-Morin 1942 URSS	X	X	X	X										ET para producción óptima
Herscott 1949 EE.UU. Halsead 1961 EE.UU. Rohwer 1931 EE.UU.	X	X	X	X										ET cultivo
Invern 1967 URSS Kotliadze URSS	X	X	X	X										ET cultivo
Turc 1954 Francia Hargreaves 1966 EE.UU. Turc 1963 Francia	X	X	X	X										ET cultivo bajo condiciones óptimas de agua
Christiansen 1966 EE.UU.	X	X	X	X										ET cultivo
Thornthwaite-Mather	X	X	X	X										Eo (Bandeja clase A) o ET cultivo
Munson 1960 EE.UU. Walker	X	X	X	X										Eo (Bandeja clase A)
Oliver 1961 Ing.	(X)	(X)	X	(X)	(X)	X								ET y balance hídrico
Rijtema 1967 Holanda	X	X	(X)	(X)	(X)	X								UC
McIlroy 1961 Australia	X	X	(X)	(X)	(X)	X								Requerimientos básicos de agua para unidad cultivo/
Lineora 1967 Austria	X	X	X	X	X	X								ETp cultivo
Van Bavel 1966 EE.UU. Sverdrup 1962 EE.UU.	X	(X)	X	X	(X)	X								ETp cultivo
			X	X	X	X								ET por unidad de superficie

ETP (pasto), men

() - cuando los parámetros esenciales no se encuentran disponibles
Fuente: Doorenbos y Pruitt

CUADRO N° 10. Coeficientes estacionales de uso-consumo (Kc) para diferentes cultivos regados.

Cultivo	Duración de la estación normal de crecimiento	Coefficiente de uso-consumo (Kc)
Alfalfa	Entre heladas	0.80 a 0.90
Plátano	Todo el año	0.80 a 1.00
Porotos	3 meses	0.60 a 0.70
Cacao	Todo el año	0.70 a 0.80
Café	Todo el año	0.70 a 0.80
Maíz	4 meses	0.75 a 0.85
Algodón	7 meses	0.60 a 0.70
Dátiles	Todo el año	0.65 a 0.80
Colza	7 - 8 meses	0.70 a 0.80
Cereales	3 meses	0.75 a 0.85
Sorgo	4 - 5 meses	0.70 a 0.80
Girasol	4 - 5 meses	0.65 a 0.75
Huertos:		
Aguacates	Todo el año	0.50 a 0.55
Pomelos	Todo el año	0.55 a 0.65
Naranjos y limones	Todo el año	0.45 a 0.55
Nogales	Entre heladas	0.60 a 0.70
Hoja caduca	Entre heladas	0.60 a 0.70
Empastadas:		
Mixtas	Entre heladas	0.75 a 0.85
trébol ladino	Entre heladas	0.80 a 0.85
Papas	3 - 5 meses	0.65 a 0.75
Arroz	3 - 5 meses	1.00 a 1.10
Sisal	Todo el año	0.65 a 0.70
Remolacha azucarera	6 meses	0.65 a 0.75
Caña de azúcar	Todo el año	0.80 a 0.90
Tabaco	4 meses	0.70 a 0.80
Tomates	4 meses	0.65 a 0.70
Viñas	5 - 7 meses	0.50 a 0.60

Fuente: Jensen³.

Para conocer la evapotranspiración de los cultivos ETc es necesario conocer el valor Kc o coeficiente del cultivo, valor que ha sido tabulado para diferentes cultivos, estados de desarrollo de los mismos

y diferentes condiciones de clima; estos valores se han obtenido experimentalmente en diferentes localidades y en consecuencia serán diferentes según la operación de cada método de riego específico (frecuencia de riego y carga de agua aplicada). Como referencia, el Cuadro 10 entrega algunos valores de K_c publicados recientemente y que se utilizan como base para muchos estudios de riego.

La evapotranspiración del cultivo ET_c , llamada también evapotranspiración real, resulta del producto de ET_o y K_c , de acuerdo con la **Ecuación 7.2**

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Ecuación 7.2

y representa la pérdida de agua de un cultivo libre de enfermedades que crece en una superficie superior a una hectárea, en condiciones óptimas de humedad y fertilidad del suelo, de tal manera que alcance su rendimiento potencial en el ambiente en que se está desarrollando.

Resulta evidente que ET_c depende de una condición agrotécnica adecuada, no muy claramente definida, pero que afecta al valor de ET_c y muy especialmente a una cierta condición 'óptima' de humedad en el suelo, que se conoce como disponibilidad de agua para las plantas.

Procedimientos de cálculo para estimar el uso-consumo

Antes de determinar la ET cultivo debe realizarse un exhaustivo estudio de los informes climatológicos y agrícolas que puedan existir en la zona en la cual se quiere determinar los requerimientos de agua. Con estos antecedentes se procede a:

1. **Calcular ET_o :** se selecciona un método de estimación (Cuadro N° 9) de acuerdo al nivel de exactitud necesario y el volumen de información climatológica disponible; se computa ET_o para períodos de 30 o de 10 días, usando datos climáticos promedios; se analiza la magnitud y frecuencia de los datos de ET_o obtenidos; se determina la distribución de frecuencias de ET_o .
2. **Seleccionar K_c :** se selecciona el período de crecimiento del cultivo; se determina las características del cultivo (fecha de

siembra, plantación o brotación, estado de desarrollo, entre otras; se selecciona un coeficiente K_c (Cuadro N° 10).

3. Calcular ET cultivo (ET_c): se aplica la Ecuación 7.2.
4. Modificar el valor de ET cultivo de acuerdo con: disponibilidad de agua del suelo para las plantas; efecto de las prácticas agro-técnicas (laboreo de suelos, método de control de malezas, eficiencia y oportunidad en el control de plagas y enfermedades etc.); nivel de producción en relación con la producción potencial del cultivo.

Aplicación de métodos indirectos en la estimación del uso-consumo

Existen dos publicaciones de gran actualidad y extremadamente detalladas que se refieren a la aplicación de los diversos métodos de estimación de la evapotranspiración de los cultivos (Jensen³; Dorenboos y Pruit¹). Ambas tuvieron gran difusión y fueron traducidas a varios idiomas, entre ellos el castellano; se encuentran en las bibliotecas especializadas del mundo entero, especialmente en las Universidades y Centros de Investigación y Extensión. En ellas se detalla paso a paso, con ejemplos, el uso de los métodos empíricos; aplicar algunos de estos procedimientos a datos climatológicos de la región particular donde se encuentre el lector es un ejercicio de gran importancia. Escapa al objetivo de este libro detallar el uso de las fórmulas y métodos de estimación del uso-consumo; sin embargo se orienta su utilización por parte del lector de los Ejercicios 1, 2 y 3, al final de este Capítulo.

En América Latina se sufre en general de una escasez de información meteorológica adecuada y extensa para la utilización racional de los métodos indirectos de estimación del uso-consumo; se han desarrollado algunas técnicas para efectuar esta estimación cuando los datos de clima son escasos o poco extensos en el tiempo. Dichas técnicas se basan en la obtención de ecuaciones de regresión entre los valores de ET_o obtenidos con diferentes métodos empíricos en zonas donde hay adecuada información climatológica y la aplicación de estas ecuaciones en aquellas zonas donde solamente se conoce uno o dos parámetros climáticos, como la temperatura o las horas de luz. Los resultados obtenidos son de gran significación, y han permitido estimar valores de uso-consumo de tasas de riego (Ca-

pítulo 8) aplicables a zonas en este momento no regadas (de secano) que se desea incorporar al riego a través de algunos proyectos regionales de envergadura.

Como se ha señalado anteriormente, los valores de ET cultivo dependen en gran medida de un valor o situación conceptual conocido como disponibilidad del agua del suelo para la plantas; si esta disponibilidad es adecuada la planta podrá tener una ET cultivo acorde con los valores que se esperan, aplicando correctamente la Ecuación 7.2; si por el contrario la planta está sometida a condiciones de disponibilidad limitada de agua (*stress* hídrico) los valores de ET-cultivo serán menores de lo esperado. Ello indica que la planta tiene sus estomas semicerrados durante parte de su período de crecimiento, disminuyendo con ello el intercambio gaseoso, la fotosíntesis y, en último término, no alcanzándose el rendimiento que sería posible obtener de ese cultivo (rendimiento potencial).

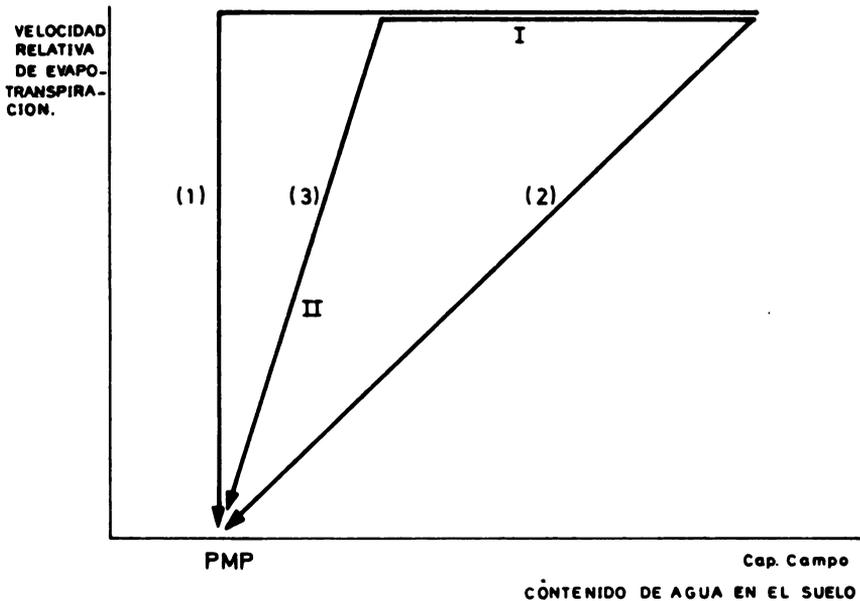
DISPONIBILIDAD DE AGUA DEL SUELO PARA LAS PLANTAS

Conceptos clásicos

El concepto de disponibilidad de agua del suelo, aunque nunca fue definido claramente en términos físicos, ha sido motivo de ardua controversia entre los adherentes a diferentes escuelas de pensamiento.³ Veihmeyer y Hendrickson^{6,7} postularon que el agua del suelo es igualmente disponible en un rango definible de humedad del suelo, desde un límite superior (capacidad de campo) a un límite inferior (el punto de marchitez permanente); ambos son característicos y constantes para cada suelo. Los mismos autores han afirmado que las funciones de la planta se mantienen sin afectarse por cualquier disminución del contenido de agua del suelo hasta que se alcanza el punto de marchitez permanente, momento en el cual la actividad de la planta cesa en forma abrupta. Aunque basado en límites arbitrarios, este modelo esquematizado tuvo una amplia aceptación durante muchos años, principalmente entre quienes se han preocupado del manejo del agua de riego en condiciones de campo. Otros investigadores, sin embargo —entre ellos Richards y Waldleigh⁴— presentaron evidencias que indican que la disponibilidad del agua del suelo para las plantas realmente disminuye a medida que desciende al contenido de agua del suelo, y que una planta puede sufrir un *stress* hídrico y una reducción del crecimiento mucho antes

que se alcance el punto de marchitez permanente. Otros autores, buscando un compromiso entre esos puntos de vista opuestos, intentaron dividir el llamado 'rango disponible' del agua del suelo en dos regiones: la 'fácilmente disponible' y la 'de disponibilidad de decrecimiento'; de esa forma trataron de encontrar un 'punto crítico' que se encuentre en algún lugar entre capacidad de campo y punto de marchitez y que sirva como un criterio adicional de disponibilidad de agua del suelo.

Esas diferentes hipótesis, que estuvieron en boga hasta hace poco tiempo, se presentan gráficamente en la Fig. 32.



- (1) AGUA IGUALMENTE DISPONIBLE ENTRE CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE
- (2) AGUA EN DISPONIBILIDAD DECRECIENTE AL PERDER AGUA EL SUELO
- (3) AGUA "FACILMENTE" (I) Y "DIFICILMENTE" (II) DISPONIBLE

Fig. 32. Las tres hipótesis clásicas acerca de la disponibilidad de agua para las plantas.

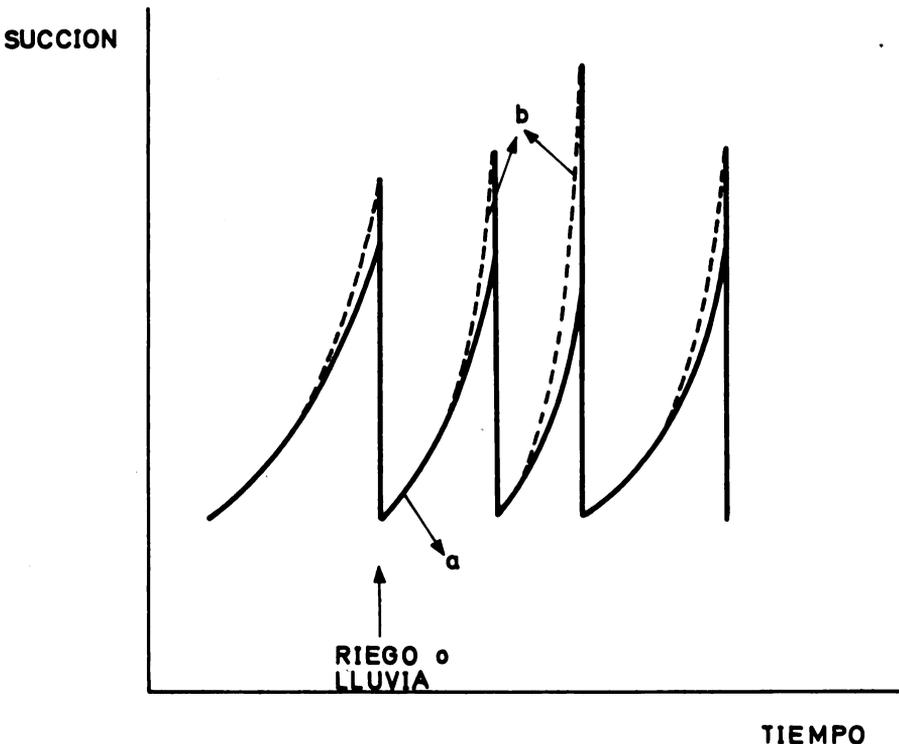
Ninguna de esas escuelas de pensamiento basó su hipótesis en un marco teórico integral, que pudiera tomar en cuenta la mayor parte de los factores que influyen sobre el régimen hídrico del sistema suelo—planta—atmósfera considerado como una unidad. El panorama era confuso debido a una falla en la distinción de diferentes respuestas de las plantas a la humedad del suelo. A pesar de que la velocidad de transpiración puede durante cierto tiempo ser relativamente independiente del contenido de agua del suelo en la zona de raíces, otras formas de la actividad de las plantas no pueden ser independientes. La fotosíntesis, el crecimiento vegetativo, la floración, la fructificación y la producción de semillas o fibras pueden reaccionar en forma muy diferente a un cambio en el contenido de agua del suelo.

Desde hace mucho tiempo se reconoce que el contenido de agua del suelo no es por sí mismo un criterio satisfactorio de disponibilidad. Por lo tanto se ha intentado correlacionar el estado del agua de las plantas con el estado de energía de agua en el suelo, o sea el potencial de agua en el suelo. Las llamadas 'constantes' del agua del suelo han sido definidas en términos de valores de potencial —entre 0.1 y 0.3 bares para capacidad de campo y 15 bares para punto de marchitez permanente—, de tal forma que se pueda aplicar en forma universal aquellos conceptos de energía, lo que ha representado un avance considerable sobre las ideas anteriores; sin embargo, estos conceptos no toman en cuenta la naturaleza dinámica de las relaciones suelo—planta—agua.

En todo intento de definir o describir en forma física exacta la absorción de agua por las plantas se presenta una dificultad experimental fundamental, debido a las complicadas relaciones espacio—temporales envueltas en este proceso. Las raíces crecen en diferentes direcciones y espaciamiento, y aún no existe un método experimental que permita medir las gradientes microscópicas y los flujos de agua en la vecindad inmediata de las raíces. Los métodos convencionales de medición de contenido o potencial del agua del suelo están basados en el muestreo o el uso de sensores de un volumen relativamente grande de suelo; por tal causa no pueden estimarse las condiciones reales alrededor de las raíces. La succión del agua del suelo en contacto con las raíces probablemente será mucho mayor que la succión promedio que pueda medirse con un tensiómetro.

Existe una dificultad adicional para describir físicamente el sistema: hasta el presente no ha sido posible lograr que crezcan plantas

en un suelo con potencial de agua constante. Por el contrario es preciso regar el suelo periódicamente, rellenando así su capacidad como reservorio. En un régimen de humedad del suelo variable como el que se ha descrito, las plantas estarán mucho más influidas por los valores extremos del potencial del agua a que son sometidas que por un valor promedio; esto puede apreciarse en la Fig. 33. Además, la distribución de raíces no es uniforme o contante en la zona correspondiente; tampoco el modelo de extracción del agua por parte de las raíces coincide necesariamente con el modelo de distribución de las mismas. Por lo tanto, una correlación de la respuesta de las plantas al agua del suelo requiere generalmente integrar cada una de ellas tanto en el espacio como en el tiempo, de tal manera que la relación real entre el agua del suelo y la respuesta de las plantas es generalmente oscura.



a = SUCCION PROMEDIO DETERMINACION CON TENSIOMETROS
b = SUCCION DEL SUELO EN CONTACTO CON LA RÁIZ

Fig. 33. Variación de la succión del agua en el suelo durante ciclos de riego sucesivos.

Nuevos conceptos de disponibilidad

En los últimos años se ha producido un cambio fundamental en la evaluación de las relaciones suelo—planta—agua. Con el desarrollo de la comprensión teórica del estado y movimiento del agua en el suelo, en la planta y en la atmósfera, y con el desarrollo concurrente de técnicas experimentales que permiten una medición más exacta de las relaciones de potencial, conductividad, contenido de agua y flujo tanto en el suelo como en la planta, se ha abierto el camino para un enfoque básico del problema. Se ha hecho muchísimo más claro que en un sistema dinámico los conceptos estáticos de 'constantes' de agua del suelo —como capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad crítica, entre otros— no tienen un significado físico, ya que están basados en la suposición de que los procesos en el sistema ocurren en forma estática. En realidad el flujo tiene lugar prácticamente en forma incesante, aunque variando en cantidad y en dirección; las situaciones estáticas casi nunca ocurren.

El desarrollo de estas ideas ha llevado al abandono de los conceptos clásicos de 'agua disponible' en su sentido original. No existe una diferencia cualitativa fundamental entre el agua que se encuentra en otro valor de humedad; asimismo la cantidad y velocidad con que las plantas extraen agua del suelo no es una función exclusiva del contenido o potencial del agua del suelo; depende también de la habilidad de las raíces para absorber agua desde el suelo con el cual están en contacto, así como de la habilidad del suelo para aportar y transmitir el agua hacia las raíces a una velocidad suficiente que permita compensar los requerimientos de transpiración. Estos requerimientos dependen además de las propiedades de la planta (densidad de raíces, profundidad de raíces y velocidad de extensión del sistema radicular, así como de la habilidad fisiológica de la planta para incrementar su propia succión de agua en forma suficiente como para continuar extrayendo agua desde el suelo a una velocidad tal que le permita evitar la marchitez). Los requerimientos transpirativos dependen a su vez de las propiedades del suelo (las relaciones entre conductividad hidráulica, difusividad, succión matricial, contenido de agua) y al mismo tiempo, en forma considerable, de las condiciones micrometeorológicas (que establecen la velocidad a la cual la planta debe transpirar y, por lo tanto, la velocidad a la cual la planta debe extraer agua del suelo para mantener su propia hidratación).

Desde un punto de vista físico, la evapotranspiración puede verse como una corriente que fluye desde una fuente de capacidad limitada

y de potencial variable, o sea el reservorio del agua del suelo, a un estanque de capacidad virtualmente ilimitada (aunque de potencial evaporativo variable), la atmósfera. Mientras la velocidad de absorción de agua del suelo por parte de las raíces balancea la velocidad de pérdida por transpiración de la parte aérea de las plantas, la corriente continúa con una velocidad sin disminución. En el momento en que la velocidad de absorción se hace menor que la velocidad de transpiración, la planta misma debe comenzar a perder agua. Este desbalance no puede continuar por mucho tiempo sin que ocurra una pérdida de turgencia y un marchitamiento de la planta.

La transpiración potencial es una medida de la velocidad con que puede ser extraída el agua de las partes aéreas de las plantas por efecto de las condiciones atmosféricas, cuando el aporte del agua del suelo no es limitante. Si la cubierta vegetal cubre completamente la superficie del suelo, se supone que la velocidad de transpiración potencial es igual a la evapotranspiración potencial y, como tal, es equivalente a la evaporatividad externa o demanda evaporativa. El uso de la palabra potencial en este contexto se refiere a la velocidad máxima posible, y no debe ser confundido con el concepto de energía potencial. Se ha intentado definir una disponibilidad potencial del agua del suelo con términos de la velocidad con que fluye desde el suelo hacia la ubicación de las raíces. A medida que la humedad del suelo va disminuyendo, la transpiración puede ser limitada por esta disponibilidad potencial. Por lo tanto, la mayor parte del tiempo las condiciones meteorológicas externas afectan la velocidad de transpiración más que las condiciones del suelo.

FRECUENCIA DE RIEGO

Después de analizar los conceptos de evapotranspiración, disponibilidad de agua para las plantas, energía de retención y propiedades de almacenamiento de agua por los suelos, puede definirse en forma adecuada cuál debe ser el intervalo de tiempo entre dos riegos consecutivos (frecuencia de riego) para no afectar el desarrollo, el crecimiento y la producción de los cultivos sometiéndolos innecesariamente a una situación de *stress* hídrico; esta situación se produce cuando la velocidad de pérdida de agua por el cultivo, impuesta por la demanda evaporativa de la atmósfera, es mayor que la velocidad de flujo de agua desde la masa del suelo hacia las raíces de las plantas.

Como ya se ha señalado en los párrafos anteriores, cuando las coberturas vegetales cubren la superficie y la succión del agua del suelo es relativamente pequeña, la velocidad de evapotranspiración potencial está determinada por factores meteorológicos. La planta, en forma similar al suelo, es un conductor hidráulico en el cual la velocidad del flujo es proporcional al producto de una fuerza causante (una gradiente de potencial o de succión) y un coeficiente de transmisión (conductividad). Si la conductividad de la planta permanece constante a pesar de variaciones en el potencial del agua, la diferencia de succión entre las raíces y las hojas depende solamente de la velocidad de transpiración. Aparentemente, sin embargo, la conductividad de la planta no es constante; una progresiva reducción del potencial del agua de la hoja eventualmente trae como consecuencia un cierre de los estomas y un incremento de la resistencia en el transporte de agua hacia la atmósfera. La relación real entre el potencial del agua en la hoja y la apertura estomática, y sus efectos sobre los procesos de transpiración, síntesis, respiración y crecimiento, pertenecen al campo de la Fisiología Vegetal.

Debe tenerse presente que un incremento continuo en la succión del agua del suelo debe, tarde o temprano, tener un efecto negativo en la velocidad de transpiración; la disminución algunas veces se presenta abruptamente, justo antes de que las plantas se marchiten. Un suelo arcilloso puede mantener una alta velocidad de transpiración durante un tiempo más largo que un suelo arenoso, dado que tanto su contenido de agua como su conductividad hidráulica son generalmente mayores en estado no saturado comparadas con un suelo arenoso. De tal manera es posible graficar en forma esquemática la evapotranspiración real de un cultivo, tanto en función del contenido de agua en el suelo como de la demanda evaporativa de la atmósfera, de acuerdo con la Fig. 34.

En la Fig. 34 la velocidad de pérdida de agua del cultivo (evapotranspiración real) se expresa en mm por día; cuando el clima es caluroso y seco y, por ende, la demanda evaporativa de la atmósfera es elevada como durante las horas de mediodía en pleno verano, la evapotranspiración del cultivo se verá disminuida, incluso cuando el contenido de agua del suelo sea elevado (cercano a capacidad de campo). Esto explica porqué las plantas de un campo de maíz recién regado tienden a mostrarse algo marchitas a mediodía; a pesar del alto contenido de agua en el suelo, la velocidad con que el agua se mueve desde la masa de suelo hacia las raíces de las plantas es menor que la velocidad de pérdida de agua impuesta por la atmósfera. Esta

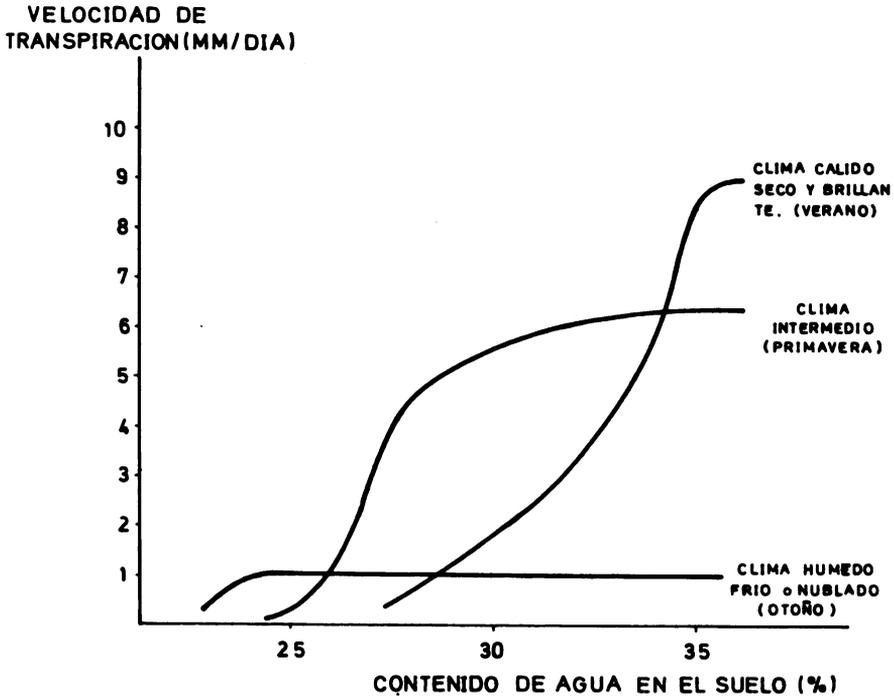


Fig. 34. Relación entre velocidad de evapotranspiración del cultivo y contenido de agua en la zona radicular bajo diferentes condiciones de clima.

situación de *stress* hídrico temporal desaparece en cuanto la demanda atmosférica disminuye, al acercarse las horas más frescas de la tarde, o con días parcialmente nublados. En este caso el contenido de agua del suelo puede disminuir considerablemente por debajo de capacidad de campo, sin que en realidad las plantas estén sometidas a condiciones de *stress* hídrico, de tal manera que el cultivo tiene una velocidad de evapotranspiración equivalente a aquella que le impone la atmósfera. La situación extrema se produce en el otoño; puede ser que el contenido de agua en el suelo después del verano sea realmente bajo, acercándose incluso al punto de marchitez permanente, pero debido al hecho de que la demanda atmosférica es baja (días fríos, húmedos y nublados) las plantas no presentan signos de *stress* hídrico; esto puede notarse en un parque durante los meses previos a las lluvias invernales, en el que las plantas de hojas persistentes no se presentan marchitas a pesar de que en el suelo hay un contenido muy bajo de agua.

La frecuencia de riego debe basarse, en consecuencia, en estas consideraciones de balance entre velocidad de pérdida de agua por las hojas y aporte hacia las raíces. Durante el verano la frecuencia de riego será máxima, tratándose de que pueda reponerse en el suelo el agua consumida por los cultivos (regarse) casi continuamente, como es el caso del riego por goteo, cada día o cada dos o tres días. La frecuencia óptima es una función de el tipo de suelo (su capacidad de almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica del suelo en condiciones no saturadas); la demanda de la atmósfera; el estado de desarrollo del cultivo (especialmente distribución de las raíces en profundidad del perfil); consideraciones económicas en relación con equipos de riego disponibles, mano de obra y disponibilidades de agua para el riego.

Durante la primavera y el otoño (cuando corresponda, según el cultivo) la frecuencia de riego es significativamente menor que durante el verano. Esta frecuencia de riego, variable a lo largo de la temporada de crecimiento y producción del cultivo, es una práctica que no sólo beneficia al cultivo desde un punto de vista fisiológico, sino que significa un ahorro considerable de agua en la temporada de riego. Sin embargo, debido a la conveniencia de tener esta frecuencia de riego variable es necesario establecer algún índice o indicador de frecuencia que sea práctico en condiciones de campo. La experiencia indica que el uso de tensiómetros —discutido con detalle en el Capítulo 3— es el índice más adecuado, ya que la tensión del agua en la zona radicular varía durante la temporada de cultivos, con velocidades diferentes acordes con la pérdida de agua del cultivo impuesta por la relación entre demanda atmosférica y contenido de agua en el suelo. La Fig. 33 indicó anteriormente cómo se pueden establecer curvas de tensión de agua en el tiempo, en la zona radicular de un cultivo. Utilizando estas curvas es posible establecer además los período de tiempo en los cuales el cultivo está sometido a condiciones de *stress*, si se determina un criterio fijo o variable de frecuencia de riego, tal como se presenta en la Fig.35.

En la Fig. 35 puede apreciarse que si el criterio de frecuencia de riego para un cultivo es regarlo cada 10 días, en total el cultivo estará sometido durante 20 días a condiciones de *stress* hídrico, en un conjunto determinado de condiciones edafoclimáticas. Esta situación afectará necesariamente la producción del cultivo, no pudiendo alcanzarse el rendimiento potencial que resultaría si no se le sometiera a condiciones de *stress* hídrico. Asimismo, con base en la Fig. 35 es posible establecer un criterio de frecuencia de riego va-

de los recursos disponibles (de agua, mano de obra e infraestructura de riego), así como para asegurar a las plantas del cultivo una disponibilidad de agua adecuada durante toda la temporada; de ese modo se maximizan los beneficios derivados de las prácticas de riego.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Grafique la dinámica del flujo del agua en el suelo para un período de 10 días, si la demanda evapotranspirativa de la atmósfera es de 8 mm por día, para:
 - a. un suelo de perfil homogéneo, de 80 cm de profundidad, de textura franco arcilloso, originalmente saturado hasta los 30 cm;
 - b. perfil estratificado (20 cm arcilloso, 20 cm arenoso, 40 cm arcilloso) originalmente saturado en toda su profundidad.
2. a. Ud. quiere planificar el riego de un cultivo de alfalfa y desea obtener semilla; indique si puede dejar de regar, si esto es conveniente y por qué.
 - b. Explique los efectos de la disponibilidad de agua del suelo en el paso del agua hacia la atmósfera a través de la planta.
 - c. Explique el efecto de la humedad relativa del aire en el paso del agua del suelo en la atmósfera.
3. ¿En qué principios se basan las fórmulas empíricas para estimar la evapotranspiración desde superficies cultivadas? Cuál es su estructura típica general, qué información se requiere para su uso y en qué casos se utilizan.
4. Señale de qué propiedades dependería la disponibilidad de agua para las plantas según las teorías modernas de disponibilidad.
5. Haga un esquema gráfico del efecto de la temperatura sobre la velocidad de transpiración en diferentes condiciones de velocidad del viento.

6. Defina la evapotranspiración de un cultivo.
7. ¿Cuál es factor climático más importante que afecta a la evapotranspiración?
8. Señale otros factores no climáticos que afecten la velocidad de evapotranspiración de un cultivo.
9. Establezca la diferencia entre *stress* hídrico temporal y permanente en relación a su causa, su extensión y sus efectos en las actividades de las plantas.
10. Explique el mecanismo físico y fisiológico involucrado en los procesos de absorción de agua por las plantas. ¿A qué se debe que exista un lag de absorción?
11. En la ciudad de Santiago de Chile existe una radiación de onda corta de $550 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ si la temperatura media de la atmósfera es de 16 grados. Si la temperatura del agua en una bandeja es de 15° C , calcule la evaporación de la bandeja, sin considerar otros efectos diferentes al balance de energía (exprese sus resultados en cm/día). Asuma valores adecuados en aquellos parámetros que considere sean necesarios.
12. Señale cuáles son los factores que determinan una situación de *stress* hídrico en la planta. Coméntelos brevemente con especial referencia al efecto del *stress* sobre el rendimiento de los cultivos.
13. Para una eficiencia de aplicación del 65 %, ¿cuántos l/seg/ha , h y m^3 se necesitarán para regar 5 ha de maíz en un tiempo de 8 horas, si el uso-consumo correspondiente es de mm/día y la frecuencia de riego es de 10 días?

14. Si la evapotranspiración potencial de un cultivo maduro de maíz es de 0.35 pulgadas por día, ¿qué cantidad de agua evapotranspira ese cultivo en un mes?
15. Para la Estación Experimental Agrícola más cercana a su localidad, durante la primavera y el verano, calcule la ET potencial por el método de Blaney y Criddle.
16. Señale de qué propiedades del sistema suelo—planta—agua— atmósfera dependería la disponibilidad de agua para las plantas, según las actuales teorías.
17. ¿Cuál es la causa de que las plantas de un cultivo puedan verse marchitas incluso después de haberse regado?

BIBLIOGRAFIA

1. DORENBOOS, M. and PRUIT, W.O. Crop water requirements. Artículos de Riego y Drenaje N° 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. 1975.
2. HILLEL, D. Soil and Water, Physical Principles and Processes. Academic Press, New York. 1971. Capítulo 10.
3. JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers, Special Publication. 1973. 143 pp.
4. RICHARDS, L.A., y WALDLEIGH, C.H. Soil water and plant growth. In "Soil Physical Conditions and Plant Growth", p. 13. Amer. Soc. Agron. Monograph 2. Madison. Wisconsin, 1952.
5. SANCHEZ, C. Metodología de determinación de Uso-Consumo para datos agroclimáticos restringidos. Tesis de Grado, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 1979. 149 p.
6. VEIHMEYER, F.I. y HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. Plant Physiol. 2: 71-78. 1927.
7. _____ y _____. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. Soil Sci. 68: 75-94. 1949.

CAPÍTULO 8

EFICIENCIA DE RIEGO

INTRODUCCION

En los estudios de evaluación de recursos naturales de una región determinada, el conocimiento de las características de los suelos constituye una herramienta fundamental, ya que el recurso suelo es la base de sustentación de la agricultura, una de las actividades principales de toda región geográfica. Si la región en estudio corresponde a una agricultura de riego, es necesario estudiar los parámetros y características hídricas de los suelos regados, con el fin de evaluar las tecnologías utilizadas por los agricultores en la actualidad y detectar la causa de posibles deficiencias en la utilización del otro recurso fundamental de la agricultura de riego, el agua.

La caracterización hídrica de los suelos es el estudio de los parámetros físicos de éstos, que relacionan el suelo y el agua. Estos parámetros corresponden a las características de retención de agua y a sus propiedades de infiltración durante

el riego. Una vez determinados estos dos conjuntos de características es posible tener una visión clara de los problemas de frecuencia de riego (respondiendo a la pregunta fundamental de **cuándo regar**) y de los problemas de diseño de sistemas o métodos de riego adecuados, a nivel del agricultor o usuario del agua, o sea responder a las otras dos preguntas fundamentales del agricultor de riego (**cómo regar y durante cuánto tiempo regar**). El conjunto de características hídricas de un suelo, o suelos en una zona determinada, permite asimismo evaluar y comprender los problemas relacionados con el manejo actual y futuro del agua durante la práctica del riego, cuya eficiencia preocupa muy especialmente en los estudios de evaluación de recursos y de planificación regional.

La eficiencia con que los agricultores aplican su dotación de agua de riego al suelo depende de dos factores fundamentales: el manejo del agua durante el riego, y las características hídricas del suelo que se está regando.

En el manejo del agua durante el riego se distinguen varios aspectos que interactúan e inciden en forma determinante en la eficiencia de aplicación del agua de riego:

1. el diseño del sistema de riego (dimensiones y orientación del campo regado, pendiente, infraestructuras de abastecimiento de agua, control de caudales, recepción de derrames, etc.);
2. los caudales utilizados y la dirección del flujo de agua sobre la superficie del suelo durante el riego;
3. la frecuencia de riego, que en este caso determina el contenido de agua del suelo en el momento previo a la aplicación de agua;
4. el tiempo de riego utilizado durante el cual el agua está en contacto con la superficie del suelo, permitiéndose en esa forma que tenga lugar el proceso de infiltración.

Entre las características hídricas de los suelos regados, los siguientes aspectos son determinantes en la eficiencia con que los agricultores aplican el agua de riego:

1. la velocidad de infiltración del agua, o sea la propiedad del perfil del suelo de permitir el flujo descendente del agua que está en contacto con la superficie, a través del perfil, en profundidad;

2. las características de retención del agua del suelo, o sea la energía con que cierto contenido de agua está retenido en el suelo; esta energía resulta de las interacciones físicoquímicas de adsorción y tensión superficial, entre las partículas del suelo (principalmente arcillas) y las moléculas de agua, así como de la estructura del suelo, u ordenamiento de sus partículas en modelos especiales determinados;

3. la profundidad del perfil del suelo y sus condiciones de estratificación, que determinan las diferentes capacidades conductivas del perfil total frente al agua;

4. la densidad aparente de las diferentes estratas del perfil del suelo, también resultante de complejas interacciones entre la textura (composición porcentual de partículas del suelo según su tamaño) y la estructura.

Esta interacción entre el manejo del agua de riego y las características hídricas del suelo, que constituye la causa de una determinada eficiencia de utilización del agua de riego, da origen a varias situaciones posibles. En primer lugar ocurre con frecuencia que las características de manejo del agua de riego son tradicionales y tienden a mantenerse en el tiempo, transmitidas de un agricultor a otro hace bastante tiempo, copiándose sin mayores variaciones entre zonas de suelos muy diversos en sus características hídricas. Pueden resultar así dos situaciones de manejo muy similares en suelos diferentes, lo que conduce a eficiencias de utilización de agua de riego totalmente diversas. Por otra parte, no siempre se operan los diferentes métodos de riego con los rangos de eficiencia con que han sido diseñados, a través del manejo diferenciado del agua, para cada tipo de suelo. Esto es de gran importancia y constituye en el fondo la esencia de un programa de tecnificación del riego: adecuar el manejo del agua al suelo que se está regando, con el fin de alcanzar la eficiencia óptima para el método de riego usado.

Los métodos de riego tradicionalmente usados por los agricultores —tendido y surco— y que en el futuro previsible seguirán siendo utilizados con modificaciones técnicas fundamentales pero de baja inversión, están diseñados para ser aplicados con una cierta eficiencia, que cae dentro de un rango relativamente estrecho; por debajo de su límite inferior, la eficiencia indica que se producen pérdidas considerables de agua por percolación profunda y/o escurrimiento superficial; sobre el límite superior se está indicando que el riego necesariamente ha sido poco adecuado para suplir el agua del suelo consumida

por los cultivos, tal como se explica más adelante. Este riego deficiente, cuyo índice coincide con una alta o baja eficiencia de aplicación, debe implementarse para obtener el resultado que se persigue con el riego, o sea proporcionar a las plantas de un cultivo, en forma homogénea, condiciones de humedad del suelo acordes con sus requerimientos, de acuerdo con la definición explicada en el Capítulo 1.

Es indispensable establecer, por lo tanto, un rango de eficiencia para cada método de riego; por ello se hace necesario definir más exactamente qué se entiende por eficiencia de riego, cuáles son los componentes de esta eficiencia y analizar luego brevemente algunas situaciones de eficiencia que pueden presentarse, interpretando su significado desde el punto de vista práctico, agronómico y económico y el efecto de la eficiencia de aplicación del agua sobre la tasa de riego.

CONCEPTUALIZACION DE LA EFICIENCIA DE RIEGO Y SUS COMPONENTES

Uno de los parámetros fundamentales que deben establecerse en todo proyecto de factibilidad o evaluación de recursos, en el cual el riego juegue un papel importante, es la tasa de riego, o sea la cantidad de agua que se utiliza —o debe utilizarse— por unidad de superficie para regar. La definición de tasa de riego así expresada es muy vaga; no indica quién utiliza el agua para el riego, ni el momento o en qué forma ésta es utilizada, ni cuál es el objetivo que se persigue en un riego específico para el cual se utiliza la cantidad de agua estimada como tasa de riego.

Se define más precisamente la tasa de riego como una relación entre el uso—consumo y la eficiencia de aplicación del agua, de acuerdo con la Ecuación 8.1.

$$TR = \frac{U.C.}{Eap}$$

Ecuación 8.1

De acuerdo con esta definición la tasa de riego es función directa de la variable uso—consumo (U.C.), e inversa de la variable eficiencia de aplicación (Eap). Sin embargo, existe una diferencia funda-

mental en el efecto de un cambio de alguna de estas dos variables sobre la tasa de riego; por una parte el uso—consumo varía en un rango relativamente amplio, ya que es resultante de la interacción de tres procesos: la demanda evaporativa de la atmósfera; el contenido de agua del suelo; el estado de desarrollo del cultivo.

Por otra parte, la eficiencia de aplicación (E_{ap}), como se definirá más adelante, es una variable continua solamente en el rango de 0 a 1 (0 a 100 %). Por esto, una variación relativamente pequeña en la eficiencia de aplicación tiene un efecto muy significativo sobre la tasa de riego, al compararlo con el efecto de una variación similar en el uso—consumo. De allí que deba estudiarse con cierto detalle los valores de eficiencia de aplicación que se usarán en los estudios de riego, con el fin de no sobreestimar o subestimar las tasas de riego para los diferentes cultivos o suelos. Este aspecto es de tal importancia que si se ha determinado una tasa de riego promedio para diferentes cultivos en una zona, subvaluada en un 10 %, esto traerá como consecuencia que un embalse regional o una red de canales, una vez construidos, no tendrán la posibilidad de proporcionar el agua necesaria para regar toda la superficie para la cual fueron proyectados, debiendo dejarse de cultivar un 10 % de los suelos que en principio se regarían. Si, por el contrario, se sobreestima en un 10 % la tasa de riego, ello implica que los embalses y canales se construirán sobredimensionados en ese porcentaje, a un costo que no es lineal con la dimensión sino exponencial; esto implica que para aumentar en 10 % la capacidad de embalse o conducción, el costo no sube un 10 % sino mucho más. En relación con las características de la región puede llegar a duplicarse el costo de estas obras por un sobredimensionamiento de 10 %.

Eficiencia de utilización es la resultante de la interacción de las eficiencias de tres condiciones de aplicación del agua durante el riego, de acuerdo con la Ecuación 8.2.

$$EU = E_{ap} \times E_{al} \times E_d$$

Ecuación 8.2

en que E_u es la eficiencia de utilización o eficiencia agronómica.

E_{ap} es la eficiencia de aplicación.

E_{al} es la eficiencia de almacenamiento.

Ed es la eficiencia de uniformidad.

Esta definición de Eu es solamente válida a nivel predial. En la determinación de la tasa de riego interesa qué cantidad de agua debe utilizarse por unidad de superficie, a nivel de campo que se está regando, sin considerar la pérdida que a nivel de zona puedan tener los canales de conducción, ni la reutilización o recuperación de las aguas en otros campos o predios en la zona de riego. Esos procesos, con sus eficiencias correspondientes, deben incluirse en un balance hidrológico a nivel de cuencas, pero la tasa de riego corresponde a un valor aplicable sólo a la unidad superficial continua que está regándose en una temporada determinada.

Se entiende aquí como eficiencia de aplicación la relación que existe entre el agua a la entrada del sector de riego y el agua que efectivamente quedó retenida en la zona radicular, de acuerdo con la **Ecuación 8.3:**

$$E_{ap} = \frac{V \text{ entrada} - V \text{ salida}}{V \text{ entrada}}$$

Ecuación 8.3

Esta eficiencia se ha definido con base en volúmenes de agua, forma que se determina normalmente. Sin embargo es posible traducir esta información a cualquier unidad de las comúnmente utilizadas en riego, como caudales, cargas de agua, etc.

El volumen de entrada corresponde a la cantidad total de agua que se hace entrar al sector del riego durante el tiempo que dure esta práctica. El volumen de salida está representado por dos tipos de pérdida:

1. la cantidad total de agua que sale del sector de riego por escurrimiento superficial y no tiene la posibilidad de infiltrar al perfil, y
2. la cantidad total de agua que sale del sector de riego por percolación bajo la zona de arraigamiento del cultivo y no queda a disposición de las plantas.

Una eficiencia de aplicación cercana al 100 % no indica necesariamente un buen riego, ya que de acuerdo con la definición de la

Ecuación 8.3 agregar un litro de agua a una hectárea de suelo relativamente seco, tendría una eficiencia de aplicación de 100 %, pues no habría pérdida de ningún tipo; sin embargo no sería un riego muy efectivo para el cultivo.

Esta eficiencia de aplicación representa en realidad la eficiencia que debe utilizarse en aquellos estudios en que se incluyen balances hidrológicos, dado que guarda relación con la técnica misma del riego. Si bien no determina si el riego es satisfactorio desde el punto de vista de una práctica agronómica, es el parámetro que indica cuánta agua, del volumen total que se aplica por unidad de superficie, se utiliza para regar el suelo.

Además de minimizar las pérdidas de agua desde el sector de riego por escurrimiento superficial y por percolación profunda, o sea además de mejorar la eficiencia de aplicación, debe tenerse en cuenta la segunda variable de la Ecuación 8.2, la eficiencia de almacenamiento, que se define como la relación entre el agua almacenada en el perfil como efecto del riego y el agua necesaria para llevar ese mismo perfil hasta la capacidad de campo en toda la profundidad de arraigamiento del cultivo (Ecuación 8.4).

$$E_{al} = \frac{\text{Volumen almacenado}}{\text{Volumen necesario para CC}}$$

Ecuación 8.4

Para un suelo con una velocidad de infiltración determinada, el volumen almacenado dependerá del tiempo de riego; el volumen necesario para llevar el perfil hasta la profundidad de arraigamiento del cultivo a la capacidad de campo depende del contenido de agua antes del riego. Tampoco en este caso una eficiencia de almacenamiento de 100 % está indicando un riego adecuado, ya que es posible llevar el perfil del suelo hasta la capacidad de campo pero con una pérdida por escurrimiento superficial y/o percolación profunda significativamente altas.

La última componente de la eficiencia de utilización es la eficiencia de uniformidad, definida como la relación entre el promedio de profundidad alcanzado por el agua en un perfil durante el riego y la desviación de este promedio para un número de puntos específicos de muestreo.

$$E_d = 1.0 - \frac{\sum |x|}{n \cdot M}$$

Ecuación 8.5

en que $\sum |x|$ es la suma de los valores absolutos de la desviación de observaciones individuales con respecto al promedio de profundidades de mojado M , y n es el número de observaciones. Así, mientras más pequeña sea la desviación respecto al promedio, o sea mientras más uniforme sea la profundidad de mojado del perfil regado, mayor será la eficiencia de uniformidad.

La eficiencia de utilización del agua de riego y sus componentes aquí definidos tienen validez agronómica para un campo regado en forma individual y permiten, una vez evaluados durante el riego de un agricultor, definir cuáles son las prácticas de manejo del agua durante el riego susceptibles de ser modificadas, con el fin de adecuar la eficiencia de riego al método y a las características del suelo. Por ello se hace necesario discutir aquí con cierto detalle algunas situaciones de eficiencia posibles de encontrar.

Como se explicó anteriormente, la eficiencia del riego resulta de la interacción entre el manejo del agua de riego y las características hídricas del suelo. Estas últimas son prácticamente fijas para un suelo dado y no son modificables directamente; por tal causa el manejo del agua es la única herramienta eficaz para adecuar la eficiencia del riego en un suelo específico.

Cuando se encuentran eficiencias de aplicación muy bajas, se entiende que las pérdidas por percolación profunda y/o escurrimiento superficial han sido grandes. Si se trata de una gran percolación es probable que la causa sea un tiempo de riego demasiado prolongado, en un suelo con una velocidad de infiltración relativamente alta. El manejo en este caso debe modificarse a tiempos de riego más cortos y, por lo tanto, también a paños de riego más pequeños.

Por otra parte, si las pérdidas se deben principalmente a un gran escurrimiento superficial, es probable que la pendiente sea muy alta para el método de riego usado, debiendo nivelarse los suelos o cambiar el método de riego. Otra causa puede ser el uso de caudales muy grandes y sin regulación, debiendo solucionarse esta situación para aumentar la eficiencia. Una causa adicional puede ser un suelo con

una velocidad de infiltración relativamente pequeña, que indica que los campos de riego deben agrandarse así como hacer más prolongados los tiempos de riego, disminuyendo significativamente los caudales empleados y la pendiente; de tal forma se permitirá un contacto prolongado del agua con la superficie del suelo que se está regando.

Cuando se encuentran eficiencias de aplicación muy altas se puede concluir que se han minimizado las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento superficial. Sin embargo, para los métodos de riego superficiales que utilizan generalmente los agricultores eso indica que, si bien gran parte del agua aplicada queda dentro del perfil del suelo que se está regando, la distribución del agua debe ser poco adecuada; es probable asimismo que existan pérdidas de agua por percolación profunda a la entrada del paño de riego, pero que al llegar al final de éste sólo se alcance a mojar unos pocos centímetros del perfil (Figura 1).

Ejemplos de eficiencias de riego

La Fig. 36 contiene nueve perfiles ilustrativos de prácticas comunes de riego. Los tres ejemplos de la línea superior presentan una aplicación excesiva de agua cerca de la entrada de la unidad de riego e ilustran cómo los tres componentes de la eficiencia de utilización varían, a medida que se incrementa la cantidad total de agua aplicada.

Los ejemplos de la línea media ilustran prácticas de riego muy comunes en nuestra agricultura de riego. Los ejemplos de la línea inferior ilustran la distribución del agua del suelo que se obtiene con el riego por aspersión. Como se ha explicado, eficiencias de aplicación del 100 % en métodos de riego superficiales son un indicador de un riego agrónomicamente inadecuado; asimismo, eficiencias de aplicación y de distribución muy altas implican necesariamente costos elevados de infraestructura, equipos y operación del riego, que pudieran ser superiores a los beneficios derivados de su aplicación. Por tal causa es necesario evaluar económicamente hasta dónde se justifica mejorar la eficiencia de una práctica de riego, o la selección de un método alternativo más eficiente, en relación con la rentabilidad y potencial productivo de los cultivos a regar.

- E_a = Eficiencia de aplicación (suponiendo que no hay escurrimiento).
 E_{al} = Eficiencia de almacenamiento.
 E_d = Eficiencia de distribución.

1 CARGA DE AGUA A REPONER CON EL RIEGO
 2 CARGA DE AGUA APLICADA CON EL RIEGO

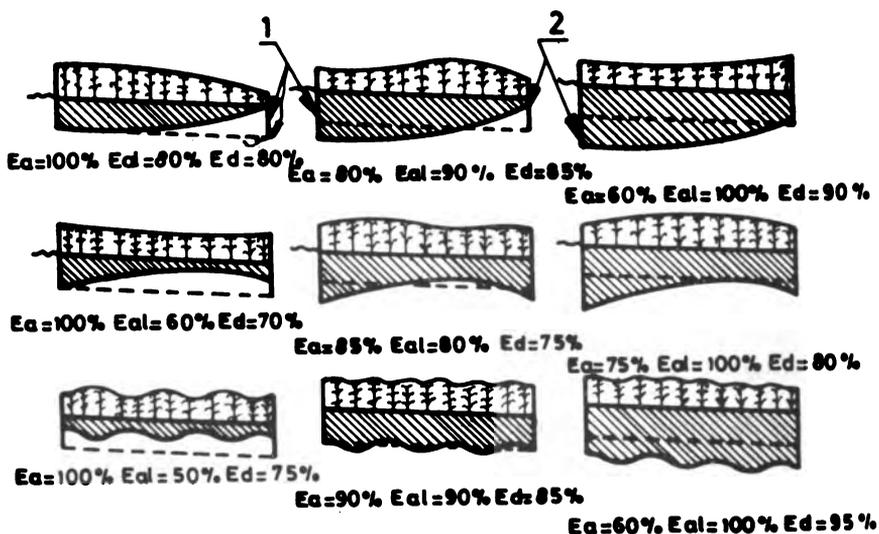


Fig. 36. Perfiles esquemáticos que resultan de diferentes prácticas de riego, en relación con la eficiencia.

EFICIENCIAS DE RIEGO EN RELACION CON EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Muchos países que cuentan con zonas áridas o semi-áridas tienen actualmente un déficit de agua para regar toda la superficie agrícola potencial y económicamente regable. Esto ha llevado a estudiar la necesidad real de las grandes cantidades de agua que hoy se aplican en las agriculturas más avanzadas y a analizar si hay posibilidades de ahorrar agua sin comprometer los rendimientos de los cultivos. Muchos investigadores coinciden en que los volúmenes de agua que hoy se usan para regar los cultivos agrícolas (tasas de riego) son exagerados y pueden ser reducidos al aumentar las eficiencias de aplicación.

Sin embargo existen algunas definiciones de eficiencia de riego, además de las tratadas en el punto anterior, que guardan relación con el aporte de agua a los cultivos, el rendimiento que se obtiene de éstos, y el consumo de agua:

El cuadro N° 11 presenta un resumen de algunas de estas definiciones de eficiencia, con referencias bibliográficas para consulta detallada por parte del lector.

Los agrónomos y los ingenieros hidráulicos normalmente expresan el rendimiento en toneladas por hectárea por centímetro de carga de agua aplicada, mientras los economistas prefieren otros parámetros, como el valor calorífico de la producción o el equivalente en trigo del cultivo de que se trate. Asimismo los especialistas en economía del agua se preocupan por las funciones de producción del agua de riego y el retorno marginal, o sea la cantidad física de rendimiento adicional que puede obtenerse al incrementar el riego, dividida por el número de metros cúbicos de agua adicional usada.

Resulta evidente que la eficiencia del uso de agua en la agricultura debería estar basada en consideraciones económicas, aunque en ese sentido debe señalarse que la investigación de los aspectos económicos del riego está hoy en día en sus etapas iniciales. El término 'eficiencia de uso de agua' E_u , representa un enfoque tradicional; supone que es posible aumentar el nivel de eficiencia incrementando el numerador (o sea el rendimiento) sin cambiar el denominador (o sea la evapotranspiración) en la fórmula correspondiente. El término 'eficiencia óptima del riego', E_{opt} , representa en cambio un enfoque de optimización; indica que es posible mejorar la eficiencia del riego al aumentar el rendimiento y simultáneamente disminuir la cantidad de agua aplicada, por debajo del valor de evapotranspiración.

En el enfoque tradicional se ha dedicado poco esfuerzo a aumentar la proporción del agua de riego efectivamente evapotranspirada por el cultivo; más bien se han buscado variedades y técnicas productivas, aparte del riego, que aumenten el rendimiento, y con ello se ha mejorado en forma indirecta la eficiencia de uso del agua. El camino recorrido en ese sentido no ha sido demasiado largo, especialmente si se considera que la disponibilidad de agua para las plantas, como resultado de un riego poco oportuno o poco uniforme, es escasa. En el enfoque de optimización se han conseguido resultados sorprendentes al seleccionar una frecuencia alta de riego, con cargas de agua comparativamente pequeñas; de tal modo se mantiene en el

CUADRO N° 11 Términos utilizados para describir eficiencias de riego y eficiencias de uso del agua por los cultivos

Término	Símbolo	Fórmula	Descripción	Referencia
Eficiencia de riego	E_r	$\frac{VET}{Vap}$	Relación entre el volumen de agua consumido (evapotranspirado) por el cultivo y el volumen de agua aplicado	Hagan et al ⁵
Eficiencia de uso—consumo	E_{UC}	$\frac{Vucp}{Vucr}$	Relación entre el volumen de agua potencialmente evapotranspirado por el cultivo en condiciones normales y el volumen de agua realmente evapotranspirado. (Índice de <i>stress</i>)	Hagan et al ⁵
Eficiencia de uso de agua	E_u	$\frac{Rend}{VET}$	Relación entre el peso seco o peso comerciable (ton/hectárea) y la carga de agua evapotranspirada por el cultivo (cm)	Viets ¹¹
Eficiencia óptima del riego	$E_{opt\ máx}$	$\frac{Rend}{Vap}$	Valor máximo de la relación entre rendimiento y agua aplicada en la estación del cultivo	Schmnueli ¹⁰

perfil del suelo, en forma constante, una baja succión del agua, y es posible reponer en la temporada del riego menos agua que la evapotranspirada, al hacer uso de un mojamiento parcial del perfil del suelo (no todo el suelo es humedecido). De esta manera puede ser mantenida una agricultura permanente en un alto nivel productivo, con un aporte de agua —durante la temporada de crecimiento— inferior a la cantidad evapotranspirada por el cultivo. La diferencia entre la evapotranspiración estacional y la cantidad de agua de riego aplicada se obtiene del agua almacenada en la zona radicular al comienzo de la estación de crecimiento; su origen puede ser la lluvia invernal o un riego profundo de pre-siembra.

El autor⁴ ha presentado un trabajo de investigación realizado en Chile acerca de eficiencias de riego, de rendimiento y de uso de agua, en diferentes cultivos regados en forma tradicional y en forma tecnificada (o sea con una frecuencia y una carga de agua adecuadas a las condiciones de clima, suelo y cultivo). Los resultados de este trabajo, que se incluyen en el cuadro N° 12, representan la proporción del volumen total de agua aplicada en la estación de crecimiento efectivamente evapotranspirada por los cultivos, o sea que fue utilizada por el cultivo para producir rendimiento. En el caso de las parcelas regadas en forma tecnificada el incremento en eficiencia de riego es, en promedio, de 56 %. Asimismo el rendimiento de los cultivos, por unidad de volumen de agua aplicada, fue calculado de acuerdo con la definición de Schmueli¹⁰ del Cuadro 11; los resultados indican que al mejorar la práctica del riego se obtienen incrementos en la eficiencia de rendimiento del agua (relación entre rendimiento y agua aplicada) que en promedio alcanzan a un 127 % para las parcelas con riego mejorado en comparación con las regadas tradicionalmente. Cuando se estudia la eficiencia del uso del agua, de acuerdo con la definición de Viets¹¹ del Cuadro N° 11, se advierte un incremento promedio de 44% entre ambos tipos de parcelas; para el caso del tomate, por ejemplo, se obtienen 6.57 kg de frutos frescos comerciables por cada m³ de agua evapotranspirada por el cultivo en las parcelas controles (riego tradicional), comparado con 11.7 kg de fruto por m³ de agua en las parcelas con riego mejorado, o sea un incremento de 78 %.

A la luz de los resultados presentados en el cuadro N° 12 y de muchos trabajos de investigación publicados en la literatura especializada —resumidos en varias de las referencias que se presentan al final de este capítulo— puede decirse que un mejoramiento en la práctica del riego, al adaptarla a las condiciones de suelos, clima y

CUADRO N° 12. Eficiencia de riego, de rendimiento y de uso de agua.

Eficiencia	Tipo de riego	Cultivo			
		Manzanos	Duraznos	Paltos	Uva de mesa
$E_r = \frac{VET}{Vap} \cdot 100$	Tradicional	41.0	34.9	36.3	41.8
	Mejorado	63.0	55.8	56.5	65.9
$E_{rend} = \frac{Rend}{Vap}$	Tradicional	0.80	0.60	0.18	0.69
	Mejorado	1.74	1.22	0.38	1.51
$E_u = \frac{Rend}{VET}$	Tradicional	1.96	1.76	0.48	1.65
	Mejorado	2.75	2.19	0.67	2.29

		Maíz	Papas	Trigo	
$E_r = \frac{VET}{Vap} \cdot 100$	Tradicional	25.0	44.6	35.7	
	Mejorado	51.4	53.9	53.3	
$E_{rend} = \frac{Rend}{Vap}$	Tradicional	0.27	0.99	0.32	
	Mejorado	0.78	2.10	0.70	
$E_u = \frac{Rend}{VET}$	Tradicional	1.07	2.23	0.90	
	Mejorado	1.52	3.45	1.31	

		Porotos	Tomates	Trébol	Alfalfa
$E_r = \frac{VET}{Vap} \cdot 100$	Tradicional	35.8	42.2	31.9	39.5
	Mejorado	53.0	55.8	50.5	55.8
$E_{rend} = \frac{Rend}{Vap}$	Tradicional	0.23	2.27	0.14	0.26
	Mejorado	0.49	6.53	0.32	0.47
$E_u = \frac{Rend}{VET}$	Tradicional	0.63	6.57	0.43	0.65
	Mejorado	0.91	11.70	0.57	0.92

cultivo específicos, tiene como resultado un incremento en la eficiencia del riego; se expresa en cualquier relación entre el rendimiento y el agua aplicada o el agua evapotranspirada efectivamente por el cultivo.

Un aumento en la eficiencia agronómica del riego y por ende de sus componentes, de acuerdo con la Ecuación 8.2, que se logra con una práctica mejorada del riego, permite transformar la situación de riego de la Fig. 1 a en la de la Fig. 1 b y con ello dejar a lo largo del campo regado un mayor número de plantas con una disponibilidad más adecuada de agua; en consecuencia, con mejores posibilidades de alcanzar su rendimiento potencial.

EFICIENCIAS DE RIEGO EN RELACION CON LOS METODOS DE RIEGO

Después que el agua ha sido conducida hasta el campo de riego, la meta del agricultor debe ser distribuirla del modo más uniforme posible sobre la superficie del campo; el método de riego mediante el cual se realice esta operación es de gran importancia en la obtención de la eficiencia adecuada de riego.

Los métodos de riego, cuando son operados correctamente, están diseñados de tal manera que permiten optimizar la eficiencia agronómica de riego E_u de la Ecuación 8.2. En el capítulo correspondiente se analizará con cierto detalle la eficiencia de riego de cada método en particular; es conveniente señalar sin embargo que cada método de riego en forma específica tiene una E_u determinada, o sea una eficiencia de diseño. El cuadro N° 13 indica las eficiencias agronómicas de cada método de riego y sus componentes; tales eficiencias son susceptibles de alcanzarse con un adecuado diseño y operación del sistema de riego elegido.

En el cuadro N° 13, la eficiencia de utilización es la eficiencia agronómica E_u ; sus componentes han sido expresados en fracción decimal y puede verse que los valores se ordenan de menor a mayor a medida que se tecnifica el método de riego; los valores de E_u indican en buena medida qué proporción del agua realmente infiltrada en el perfil y retenida por el suelo está en condiciones de ser evapotranspirada por todas las plantas del cultivo, a lo largo del campo regado.

Si en la evaluación de algún sistema de riego en particular se encuentran valores superiores a los mencionados en alguno de los componentes de la E_u , este aumento necesariamente será a expensas del valor de los otros componentes, ya que los métodos de riego se diseñan con una eficiencia determinada. Si al evaluar un riego por surcos encontramos una eficiencia de aplicación de 0.80, debido a

CUADRO N° 13. Eficiencias posibles de alcanzar con diferentes métodos de riego, en una situación óptima de diseño y operación.

Método de riego	E. aplicación	E. almacenamiento	E. distribución	E. agronómica
Tendido (Inundación)	0.40	0.85	0.60	0.20
Surcos	0.55	0.85	0.75	0.35
Bordes	0.60	0.90	0.70	0.38
Aspersión	0.90	1.00	0.85	0.76
Goteo	0.95	1.00	0.90	0.86

que no se ha perdido mucha agua por escurrimiento superficial al final del campo regado ni tampoco ha habido una percolación profunda exagerada en la cabecera, esto forzosamente indica que la distribución del agua a lo largo del campo no es muy adecuada; probablemente ese riego no fue suficiente para reponer en el perfil el agua consumida por los cultivos y llevar el contenido de agua hasta un valor cercano a la capacidad de campo en la profundidad de la zona radicular.

En relación con el tipo de suelo, método de riego y eficiencia de aplicación, Bos y Nutgeren² resumen los resultados de una encuesta mundial de tecnología de riego. Señalan que el riego en suelos más livianos (con un contenido mayor de arena) es más eficiente que en suelos arcillosos, lo cual estaría indicando que los problemas especiales con los que se encuentra el regador en suelos arenosos son apreciados en toda su magnitud; el diseño y operación se adaptan a pequeñas dimensiones del campo de riego y a tiempos de riego adecuados a las características de infiltración del suelo arenoso. Los suelos arcillosos son menos adecuados para el riego por aspersión a menos que se disponga a aspersores de baja descarga, de tal manera que la velocidad de descarga no exceda la infiltrabilidad del suelo; en caso contrario se producen anegamientos superficiales y si el suelo tiene pendiente se produce escurrimiento superficial. Los resultados del trabajo de Bos y Nutgeren en relación con el tema aquí presentado, pueden resumirse en la Fig. 37.

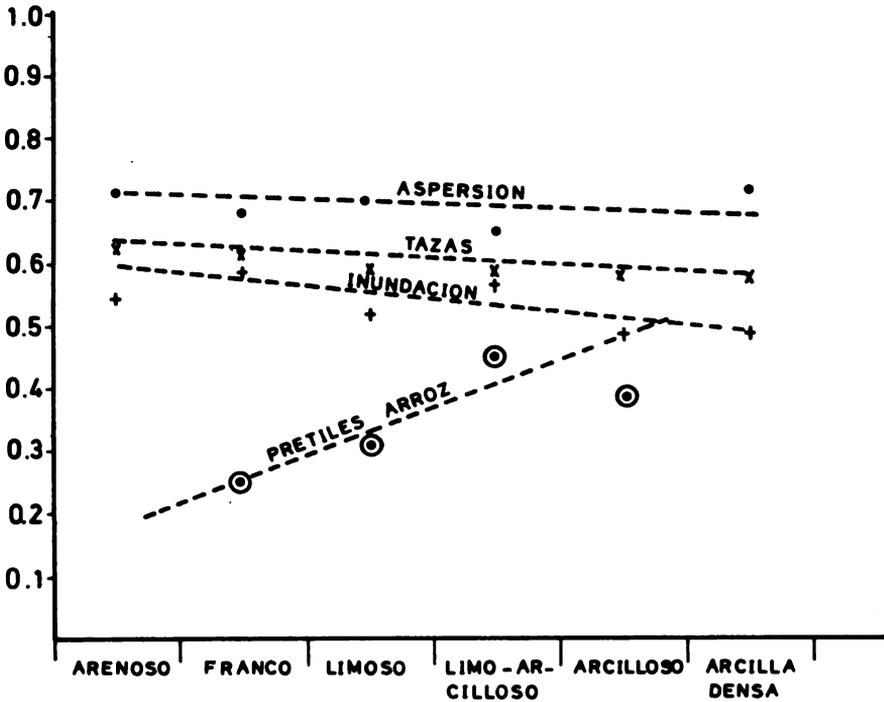


Fig. 37. Eficiencia de aplicación del agua de riego en relación con el método de riego y la textura del suelo.

En los ejemplos de diseño y evaluación de métodos de riego de los Capítulos 10 al 14 puede encontrarse una discusión más detallada acerca del tema de la eficiencia; se relaciona asimismo con el costo de tecnificación implícito en un mejoramiento de la eficiencia.

TASAS DE RIEGO

La tasa de riego, definida en la Ecuación 8.1, es la relación entre el uso-consumo del cultivo y la eficiencia de aplicación del agua de riego. Sin embargo, debido a que estos parámetros son funciones que varían en rangos de magnitud diferentes, el efecto de una sobreestimación o subestimación de ellos altera en forma diferente los valores de tasa de riego del cultivo (Gurovich⁴). Más aún: las funciones de eficiencia de aplicación (E_a) y uso-consumo (UC) no son independientes, sino que están efectivamente relacionadas a través de varios

factores de carácter agronómico. Con una E_a comparativamente alta, que se acerque a la eficiencia de diseño del sistema de riego, puede esperarse una mejor distribución de la carga de agua aplicada en un riego individual a lo largo del campo regado; esto asegura un desarrollo más uniforme del cultivo y por lo tanto un UC mayor y más homogéneo entre todas las plantas del cultivo. Por otra parte, si el UC es elevado —como ocurre durante el verano— la frecuencia del riego, o sea el intervalo de tiempo que transcurre entre dos riegos consecutivos, es menor, y la eficiencia de riego tenderá a modificarse como consecuencia tanto del menor tiempo de riego como de la acción mecánica del agua sobre la estructura del suelo, que en general tiene un efecto negativo sobre la velocidad de infiltración. Asimismo, el hecho de aplicarse con frecuencia cargas de agua comparativamente pequeñas reduce la E_a para métodos de riego superficiales, por las dificultades prácticas de regular pequeños caudales en el terreno.

En muchos países se realizan esfuerzos considerables por definir 'tasas de riego racionales y beneficiosas' para diferentes cultivos en zonas edafoclimáticas diversas. La estimación del uso-consumo de los cultivos analizada en detalle en el Capítulo anterior, asociada al diseño y operación de sistemas de riego —en tal forma que alcance las eficiencias óptimas señaladas en el Cuadro N° 13— parece ser un enfoque más sencillo y lógico del problema; tiene una validez más amplia y un impacto mayor sobre la producción agrícola que hacer simplemente esfuerzos por dotar a una región de un volumen de agua determinado como racional y beneficioso, sin preocuparse de mejorar las técnicas de aplicación del agua, esto es sin mejorar la eficiencia. Existen varios sistemas complementarios para lograr un incremento de la eficiencia de aplicación del agua de riego por los usuarios a nivel regional: realizar un esfuerzo concentrado en asistencia técnica y extensión agrícola; regular los caudales en canales principales y secundarios, obteniendo una tasa de riego tal que obligue al agricultor a usar el recurso más eficientemente; y por último implementar un sistema de precios del agua de riego que la transforme en un insumo de valor que sea necesario utilizar en forma eficiente. A éste último punto se hará referencia a continuación.

Estos sistemas de estímulo para el uso más racional del agua de riego, que inciden directamente en la eficiencia de aplicación del agua de riego e inversamente en la tasa de riego, sólo tienen efecto si son continuos, si se aplican gradualmente y si los usuarios están directamente involucrados en su implementación, como lo indican múltiples

experiencias en diferentes países de América Latina, especialmente en los distritos de riego de Perú, México y Chile.

Valores de uso-consumo de $3\,700\text{ m}^3\text{ hectárea}^{-1}$ por temporada de riego para el cultivo del trigo y de $6\,400\text{ m}^3\text{ hectárea}^{-1}$ para el cultivo de maíz, por ejemplo, son frecuentes en el valle central de la zona central de Chile. Si se asocian a estos valores las eficiencias de aplicación del cuadro N° 13, para el riego por tendido o inundación y por surcos, respectivamente para ambos cultivos, se obtiene tasas de riego de $9\,250\text{ m}^3$ por hectárea para el trigo y $11\,650\text{ m}^3$ por hectárea para el maíz.

En el cuadro N° 14 se presenta algunos valores de tasas de riego medidas en condiciones de campo y estimadas como probables con una eficiencia adecuada para los métodos de riego respectivos, en cuatro grupos de cultivos de relevancia para la agricultura chilena.

CUADRO N° 14. Tasas de riego actuales y potenciales para la temporada de riego en la zona central de Chile.

Cultivo	Tipo de suelo	Tasa de riego actual m^3/ha	Tasa de riego potencial m^3/ha
Trigo de invierno	Franco arenoso	15 575	6 208
	Arcilloso	12 655	5 900
Empastadas	Franco arenoso	25 225	20 553
	Arcilloso	17 236	16 080
Maíz	Franco arenoso	9 538	9 824
	Arcilloso	6 847	11 667
Frutales y Viñas	Franco arenoso	8 761	9 024
	Arcilloso	6 915	11 782

Fuente: Sánchez⁹

Como puede observarse en el cuadro N° 14, el suelo arcilloso presenta una tasa de riego menor, porque la eficiencia del riego es superior en este tipo de suelo al compararlo con el suelo arenoso; sin embargo la tasa de riego potencial en el caso de cultivos regados por surco, como maíz o huertos frutales, es superior a la tasa de riego actual. Ello se debe a que la eficiencia de aplicación que puede medirse en condiciones de campo es en general superior a la eficiencia de diseño del sistema de riego; puede comprobarse, efectivamente, que en la mayoría de los casos no hay una reposición uniforme o completa del agua evapotranspirada por los cultivos regados por surco, lo que afecta la tasa de riego. Las disminuciones de las tasas de riego actuales en cultivos extensivos, que representan alrededor de un 30 %, pueden destinarse a regar nuevas superficies agrícolas o a reforzar el riego de cultivos más rentables, actualmente regados en forma deficiente debido a una tecnología de riego poco adecuada o a una falta aparente o real de dotación de agua.

Debe señalarse además que los datos del cuadro N° 14 representan la tasa de riego efectivamente aplicada a los cultivos, sin considerar aquella proporción de los recursos hídricos prediales que no es utilizada para el riego (agua de la noche, fin de semana, etc.), que en muchos casos representa hasta un 60 % de las disponibilidades reales con que cuenta el predio. En ese sentido existe una eficiencia aprovechamiento del recurso agua que también puede ser aumentada significativamente, en la medida que se aumente el número de horas diarias de riego o se embalse en pequeños estanques o reservorios prediales el agua que al llegar al predio no se use inmediatamente para regar.

MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE RIEGO Y EL PROBLEMA DEL PRECIO DEL AGUA

Los métodos para cobrar un precio por el agua y transformarla en un insumo de importancia económica en la agricultura, como una forma de estimular un mejoramiento de la eficiencia de riego, varían entre diferentes países; pueden ser clasificados de acuerdo con las filosofías generales que les sirven de base y justificación, relacionadas con el objetivo del cobro:

1. para cubrir los costos de operación del sistema hidráulico de riego;

- 2. para cubrir parcial o totalmente el reembolso de la inversión realizada, así como los costos de operación del sistema;**
- 3. para asignar los beneficios del riego entre los agricultores y el resto de la comunidad;**
- 4. para cobrar el valor marginal, obligando al agricultor a pagar el valor real del agua, induciéndole a una óptima utilización de este factor de la producción (tanto para el agricultor como para la comunidad).**

En los dos primeros casos se acepta que la contribución del sector agrícola al crecimiento económico justifica subsidios de diferente magnitud por parte de la comunidad; el cobro al valor marginal, por su parte, está basado en la teoría económica pura.

En la práctica la forma de cobro del agua adopta muy variadas modalidades de implementación, como las siguientes: cobro fijo por agricultor, que puede ser una cuota única que cubra los costos de operación del sistema de riego (administración, limpieza y mantenimiento de canales y obras de infraestructura mayor, entre otros); cobro por agricultor en relación con la superficie regada que cubra los mismos costos anteriores; cobro diferenciado por agricultor, en relación con la superficie regada, el tipo de suelo (según alguna clasificación de uso potencial) y la ubicación dentro del Valle (esto último en el sentido que los predios que se encuentran más cerca de las obras de embalse o derivación principales del sistema reciben menos servicios que aquellos ubicados aguas abajo). Las mismas modalidades de cobro pueden utilizarse cuando, además de los costos de operación del sistema, se desea recuperar total o parcialmente la inversión realizada en la construcción de obras mayores e infraestructura de conducción y repartición del agua.

En vez de cobrar cuotas por agricultor puede establecerse una modalidad diferente, cobrando el agua de riego de acuerdo con el volumen de agua distribuido por el sistema o entregado a cada agricultor. En este caso hay un incentivo para que el agricultor economice (o sea, para mejorar su eficiencia de aplicación). El cobro de agua puede ser decreciente a medida que aumenta el consumo hasta un cierto límite; de acuerdo con la curva de demanda los primeros metros cúbicos consumidos son de gran valor para el usuario y luego el precio va bajando, por volumen adicional consumido, siempre que el agricultor no sobrepase la capacidad de agua a la que tiene derecho.

Ese cobro decreciente tiene por objeto estimular al agricultor a usar la mayor cantidad de agua posible del total de su dotación; esa cantidad debe ser establecida técnicamente en relación con las características edafoclimáticas y los cultivos a regar. Sobre la dotación de agua del predio el precio puede ser progresivamente más caro, de tal forma de limitar un consumo excesivo que motivaría que el costo del agua fuera superior a los beneficios que podría obtener el agricultor de este consumo adicional. En forma similar, pueden establecerse tarifas estacionales diferenciadas cuando en las épocas de mayor demanda la dotación predial es escasa, de tal manera que se estimule el riego de primavera (cereales y empastadas anuales) o de otoño (viñas y olivos), por ejemplo, desincentivando el establecimiento de cultivos que demanden mucha agua en pleno verano. De este modo éstos se podrán circunscribir a los mejores suelos, que permiten un rendimiento mayor capaz de cubrir los costos del agua estival.

En muchas regiones del mundo la asignación o dotación de agua a los predios agrícolas no es volumétrica sino que representa una parte alícuota (proporcional) del caudal total disponible. Si este caudal es pequeño, especialmente durante el verano, se utiliza además el tiempo como otro criterio de asignación del agua (turnos de agua); durante el tiempo o turno correspondiente a cada agricultor se le entrega el caudal total disponible, lo que le obliga a un riego muy rápido y por ende poco eficiente. En este caso la única alternativa viable es embalsar el agua del turno y utilizarla posteriormente durante un tiempo más prolongado. En el caso del turno de riego, el sistema de cobro se establece por superficie regada o por tiempo de entrega de agua; en realidad no hay ningún estímulo para que el agricultor mejore su eficiencia de aplicación.

Los impuestos indirectos sobre los principales productos de una región como algodón, arroz u otros —comercializados a través de cooperativas o por el Estado— constituyen un método de cobro por el agua en el cual se distribuyen los beneficios del agua entre los agricultores y el resto de la comunidad. Esta forma de cobro —con sus diversas variaciones— tiene la ventaja de ser sumamente sencilla en su aplicación; sin embargo, sus efectos estimulantes en el uso más eficiente del agua no son significativos debido a su incidencia indirecta sobre las prácticas agronómicas de producción.

La implementación del cobro por el agua de riego, cualquiera sea la modalidad elegida entre las discutidas en los párrafos anteriores, es bastante compleja y no siempre resulta efectiva. Los cobros

por superficie regada, en sus diversas alternativas, pueden realizarse junto con los impuestos (o contribuciones) territoriales, por la organización administrativa que opera el sistema o por otro organismo especializado. En el caso del cobro volumétrico, que parece ser el de mayor efecto en producir un mejoramiento en la eficiencia de riego, la operación es realmente compleja debido a la necesidad de medir y registrar los volúmenes de agua realmente entregados al agricultor; ello requiere una infraestructura de medición y de organización cuyo costo puede ser bastante elevado. El cobro por el agua de riego es el único medio para lograr un mejoramiento extensivo de la eficiencia de riego en una región. La experiencia ha demostrado que múltiples esfuerzos de extensión agrícola y capacitación no fueron suficientes para estimular por sí solos un uso más adecuado de los recursos de agua; sin embargo, cuando este esfuerzo ha sido asociado a un sistema de cobro directo por el agua de riego, ha sido posible detectar mejoras significativas en las eficiencias de riego. Desgraciadamente estas experiencias son pocas y no han sido continuas en el tiempo, por lo cual no es posible presentar una cuantificación al respecto.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. ¿Qué eficiencia de riego debe alterarse para lograr el lavado de un suelo salino?
2. Para una eficiencia de aplicación del agua de riego de 45 %, ¿qué carga de agua, expresada en cm, m³ y litros/seg/ha se necesita para regar 5 hectáreas de maíz en un tiempo de riego de 8 horas, si el uso-consumo es de 6 mm/día y la frecuencia de riego es de 10 días en un período de 90 días?
3. Se le ha pedido que determine la tasa de riego de un área. Indique:
 - a. Qué mediciones haría en terreno.
 - b. Qué factores y eficiencia consideraría.
 - c. Qué parámetros presentan mayor imprecisión en su cálculo: E aplicación, E distribución, E almacenamiento.

Se tiene los siguientes datos:

Suelo A: CE = 12 mhos, 40 % arcilla

Suelo B: CE = 2 mhos, 30 % arcilla

pendiente: 0.5 en A y B

Si ambos suelos se riegan con las siguientes eficiencias:

	<u>Suelo A</u>	<u>Suelo B</u>
Eficiencia de distribución	85 %	85 %
Eficiencia de almacenamiento	95 %	95 %
Eficiencia de aplicación	40 %	100 %

- a. Haga una crítica a los sistemas de riego empleados.
- b. Pronostique los posibles problemas futuros bajo estas condiciones de manejo y qué recomendaciones haría.

Recuerde que la conductividad eléctrica de la solución del suelo es un índice del contenido de sales y se relaciona en forma directa con éste (Capítulo 2).

4. Enumere cuatro factores que afectan la cantidad y frecuencia del riego.
5. Determine la eficiencia de aplicación del sistema de riego por surco con un largo de tres veces el tiempo de riego.
6. Escriba una breve monografía sobre los sistemas de cobro por agua de riego a los agricultores en su país.

BIBLIOGRAFIA

1. BERGMANN, H. y BOUSSARD, I.M. Guide to the economic evaluation of Irrigation projects. Organization for economic cooperation and development. 1976. 263 pp.
2. BOS, M.G. y NUTGEREN, I. On Irrigation Efficiencies. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Publication N° 19. 1974.
3. GUROVICH, L. Conceptualización de la eficiencia de riego a nivel predial. Análisis de algunas situaciones en Chile. Ciencia e Investigación Agraria 5(4): 213–224. 1978.
4. _____. Eficiencia de aplicación del agua de riego y uso consumo de los cultivos, en la determinación de tasas de riego. I. Análisis matemático de los componentes de la tasa de riego. Ciencia e Investigación Agraria 7(1): 2–15. 1980.
5. HAGAN, R.M., RIJOV, J.N., ASTON, M.N. BAVEL, C.M.H. VAN RAHEJA, P.C. Water plant Growth and crop irrigation requirements. In International source book on Irrigation and Drainage of Arid lands in relation to Salinity and Alkalinity Draft. FAO/Unesco Roma–Paris. 1967. pp. 282–342.
6. JENSEN, M.E. Programming Irrigation for Greater Efficiency. In "Optimizing the Soil Physical Environment Towards Greater Crop Yields", D. Hillel (ed.) Academic Press, New York. 1972.
7. _____, SWARNER, L.R. y PHELAN, I.T. Improving Irrigation Efficiencies. In "Irrigation of Agricultural Lands", ed. R.M. Hagan (ed). Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967.

8. MARSHALL, T.I. Efficient Management of Water in Agriculture. In "Optimizing the Soil Physical Environment Towards Greater Crop Yields", D. Hille, (ed). Academic Press, New York. 1972.
9. SANCHEZ, C. Metodología de determinación de uso consumo para datos agroclimáticos restringidos en relación a la tasa de riego de los cultivos. Tesis de Grado, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 1978.
10. SCHMUELI, E. Efficient Utilization of Water in Irrigation. In "Arid Zone Irrigation", B. Yaron, E. Daufors y Y. Vaadia (eds). Springer-Verlag, New York. 1973.
11. VIETS, F.G., Jr. Increasing water use efficiencies by soil management. In "Plant Environment and Efficient Water Use", American Society of Agronomy and Soil Science Soc. of America. 1965. p. 259-274.
12. WATER RESOURCES SCIENTIFIC INFORMATION CENTER. Irrigation Efficiency. A bibliography. Vol. 1, Publication N° PB-220 349, U.S.A. 1973.
13. WATER RESOURCES SCIENTIFIC INFORMATION CENTER. Irrigation Efficiencies. A bibliography. Vol. 2, Publication N° 76-206, U.S.A. 1976.

CAPÍTULO 9

ESTRUCTURAS DE RIEGO EN EL PREDIO AGRÍCOLA

INTRODUCCION

El conocimiento actual de las relaciones entre el suelo, la planta, el agua y la atmósfera permite la operación de sistemas de riego que aporten oportunamente al perfil del suelo las cantidades adecuadas de agua que se requieren para suplir las necesidades de los cultivos. Es evidente que para lograr esta entrega de agua oportuna y eficiente se requiere manejar con exactitud los volúmenes de agua de riego, para lo cual es necesario contar con estructuras de control y medición en el predio agrícola. Asimismo, en el diseño de sistemas de riego se debe efectuar pruebas de infiltración de agua y de avance sobre la superficie; estas pruebas necesariamente deben realizarse con una infraestructura que asegure el uso de un caudal constante durante el procedimiento experimental.

El uso cada vez más intensivo del total del agua de riego disponible en una región y el costo cada vez mayor para su

uso, imponen la necesidad de que el agua se utilice en forma económica y sin pérdidas. El manejo eficiente del agua en el predio agrícola sólo se consigue con infraestructura adecuada que permita controlar los caudales utilizados y, en algunos casos, incluso medirlos cuantitativamente.

Las antiguas tribus del continente americano construyeron ya en la época pre-colombina grandes canales primarios y secundarios para regar miles de hectáreas. Las zonas eran divididas en haciendas familiares o tribales que en ciertos aspectos se parecían mucho a los actuales métodos de parcelación. Los estudios de estas regiones parecen indicar que aquellos antiguos campos fueron cuidadosamente nivelados y regados con resultados efectivos. En tiempos más modernos los sistemas de riego fueron muy sencillos; los primitivos colonos derivaban el agua de una corriente hacia un prado de forraje, un campo de maíz o una huerta; sólo las tierras más favorablemente situadas eran regadas y rara vez más de una o dos fincas se servían de un mismo canal. Con el transcurso del tiempo se contruyeron sistemas mayores que podían abastecer a varios centenares de campos; la ingeniería puso primero su mayor empeño en proyectar las grandes presas, y la técnica del almacenamiento y conducción del agua se desarrolló rápidamente. No obstante, se prestaba poca atención al desmonte y limpieza de las malezas, al drenaje, a la nivelación del suelo, al planeamiento y al trazado de la distribución agrícola, factores todos ellos importantes para transformar las tierras improductivas en campos de cultivo.

La preparación completa de la tierra para el riego no implica solamente el desmonte y la nivelación, sino también la construcción y la instalación de estructuras de control y la excavación de canales de riego y drenaje. La superficie del suelo raras veces es apta para un riego eficiente basado en la fuerza de gravedad, que hace correr el agua hacia los lugares más bajos. La medida en que la superficie de un terreno puede ser preparada para el riego depende de los costos de nivelación y del espesor de la capa vegetal. Una nivelación importante, de alto costo, que requiera grandes cortes, puede estar justificada donde la capa vegetal sea profunda, el precio del agua sea elevado y se siembren cultivos de alto rendimiento, siempre que pueda ser hecha con equipo pesado que reduzca el costo de la nivelación por hectárea. Algunos suelos son poco profundos, de tierra improductiva y sólo permiten una nivelación muy superficial o bien la hacen imposible. Normalmente se hace necesario algún trabajo de nivelación en todo predio regado.

El primer problema que debe considerar el agricultor cuando se dispone a regar es el de la conducción del agua hasta el predio, además de procurar que el terreno se adapte al riego. La planificación técnica, el proyecto y la construcción de presas, presas de derivación y obras principales se efectúan normalmente con gran eficacia. Habitualmente la explotación de tales obras de aporte de agua también es efectiva y está bien organizada, de modo que la cantidad de agua que se pierde en el abastecimiento total suele ser pequeña. Sin embargo los canales secundarios y terciarios y las obras de regulación se ejecutan, algunas veces, con menos esmero; en los canales menores —los que se elaboran a nivel de predio— y en sus estructuras son más frecuentes los casos de mala construcción o de total omisión en los planes de ingeniería. No debe pasarse por alto la circunstancia de que, además de las obras de cabecera y de canales principales, los sistemas de regadío comprenden la construcción de numerosas estructuras menores y pequeñas obras de movimientos de tierras, de diseño poco complicado y que se esparcen por superficies de tierra muy extensas. Con frecuencia se ha descuidado estas obras 'menores', especialmente las necesarias a nivel de predio; para los contratistas no significan mucho beneficio, están dispersas y son difíciles de vigilar. Por último, pero igualmente importante, se da la circunstancia de que las autoridades se muestran algunas veces menos dispuestas a invertir en decenas de millares de esas pequeñas obras diseminadas, que en grandes obras, más significativas para su prestigio. Esto se traduce en multitud de omisiones de obras pequeñas esenciales y en fallas o deficiencias de algunos sistemas de riego, que podrían haberse evitado.

La medición del agua de riego es un factor esencial para su distribución equitativa y uso económico. Sirve para asegurar el mantenimiento de programas adecuados de suministro, determinar las cantidades de agua aportada y advertir las anomalías que se produzcan en su distribución. El conocimiento de la cantidad de agua aportada permite emplearla debidamente en el campo y contar con una base para calcular los importes que deberán cargarse por el servicio de agua, cuando ella proceda. También es útil para averiguar las pérdidas sufridas en la conducción y determinar su origen. Se han creado diversos métodos, dispositivos y obras de aforo en atención a las diferentes condiciones en que haya de cumplirse esta función, es habitual combinar esas obras y dispositivos con otras instalaciones, tales como salidas a nivel del predio, diques de retención y saltos de agua. Algunos de estos medios se han normalizado a escala nacional en distintos países; otros se pueden adquirir en el mercado.

El sistema ideal de riego completamente automático es aquél en que se atiende a las necesidades de agua de las plantas mediante la utilización de dispositivos que miden la humedad del suelo e inician una serie de operaciones para conducir el agua necesaria por la red en el momento oportuno, en la proporción conveniente y con la duración necesaria. Desde el punto de vista técnico, la automatización es mucho más difícil de introducir en redes de cauce abierto que en sistemas de tubería a presión. Por ello, en los proyectos nuevos donde las condiciones de trabajo y de otra índole favorecen el abastecimiento automático de acuerdo con la demanda de los usuarios, se tiende a instalar sistemas de tubería en lugar de sistemas con canales abiertos; los sistemas existentes de canal abierto sin embargo no pueden convertirse inmediatamente en sistemas de tubería. No obstante, los cambios sociales y la evolución de los sistemas de cultivo (cosechas múltiples, utilización de variedades de elevado rendimiento, entre otros) pueden exigir la modificación de las redes tradicionales de circulación por gravedad.

Las estructuras para riego de predios que continúan en su sitio durante más de una temporada de riego se consideran como permanentes; las que se trasladan de un lugar a otro dentro de cada temporada, se denominan portátiles o temporales. Estas instalaciones provisionales y temporales pueden hacerse de madera, metal o plástico, mientras que las obras permanentes se construyen normalmente con sistemas de hormigón o albañilería. Los niveles del agua y los caudales se regulan por medio de alzas móviles de madera, o compuertas de ese mismo material o de acero. En muchos sistemas de riego por gravedad se realiza un mantenimiento inadecuado, lo que motiva una disminución de la eficiencia y también el deterioro de las obras. En el caso de que sea difícil remediar las causas de dicho mantenimiento impropio, la única solución será construir obras sencillas, robustas y con dimensiones mayores que las ordinarias. Cuando técnicamente sea factible deberán emplearse obras con múltiples funciones, tales como saltos, desagües, obras de división de caudal y equipos de aforo.

ESTRUCTURAS DE DERIVACION Y CONDUCCION DEL AGUA

Las obras de toma o reguladores de cabecera son dispositivos hidráulicos construidos en la cabecera de un canal de riego. En ese contexto, los canales de riego incluyen canales principales y canales de derivación o de distribución, canales menores y subdivisiones de

ellos; la finalidad de estos dispositivos es recibir y regular el agua procedente de un canal principal o de fuentes de origen del abastecimiento, tales como un embalse o un río. Estas obras pueden servir también para medir la cantidad de agua que circula por ellas, sobre un metro cúbico por segundo; en los casos en que las descargas de los canales de salida representen más del 25 % de la capacidad del canal principal, las obras de control que regulan el caudal en dos o más canales se denominan 'obras de división del caudal' y en el predio se denominan normalmente 'cámaras de repartición'.

Las estructuras usadas para conducir el agua desde ríos, embalses o canales principales se han adaptado a las condiciones del terreno y los requerimientos de flujo; la conducción más eficiente del agua de riego es un desafío al ingenio de los diferentes técnicos envueltos en esta problemática.

Una vez que el agua ha llegado a través del canal de alimentación correspondiente al predio agrícola, se deriva con un marco partidido o una compuerta —generalmente utilizados además para aforar el caudal de agua recibido— hasta el sistema de conducción interno del predio, y de allí al campo que se está regando.

Las estructuras y dispositivos de salida en el predio se utilizan para desviar agua desde una corriente primaria a una secundaria, o acequia, o desde una acequia de cabecera a un campo. Las estructuras que se utilizan para estos fines generalmente son pequeñas, con capacidades comprendidas entre unos cuantos litros por segundo y la descarga máxima suministrada al predio; el tipo y la capacidad de las salidas de campo dependen principalmente del método de riego. En el riego por tendido, las salidas se espacian a lo largo de los lados de la acequia de suministro. Cada una de las salidas puede dar servicio a una postura o a varias sucesivas, intercomunicadas por compuertas de control; la capacidad de las salidas puede ser tan importante que alcance valores de hasta 500 litros por segundo. Las salidas deben estar provistas de compuertas de corredera o alzas móviles, para poder controlar el caudal y el nivel del agua en los charcos; esto tiene suma importancia en el riego de cultivos como arroz u otros cereales o en el riego de pastos.

En la Fig. 38 se muestra una salida permanente de tubo de hormigón de las que se usan corrientemente para la descarga desde acequias primarias o acequias de campo. Este tipo de instalación se puede emplear también como salida de campo permanente. La Fig. 39 ilustra otro tipo de salida por tubo de hormigón con obturador en uno de los extremos.

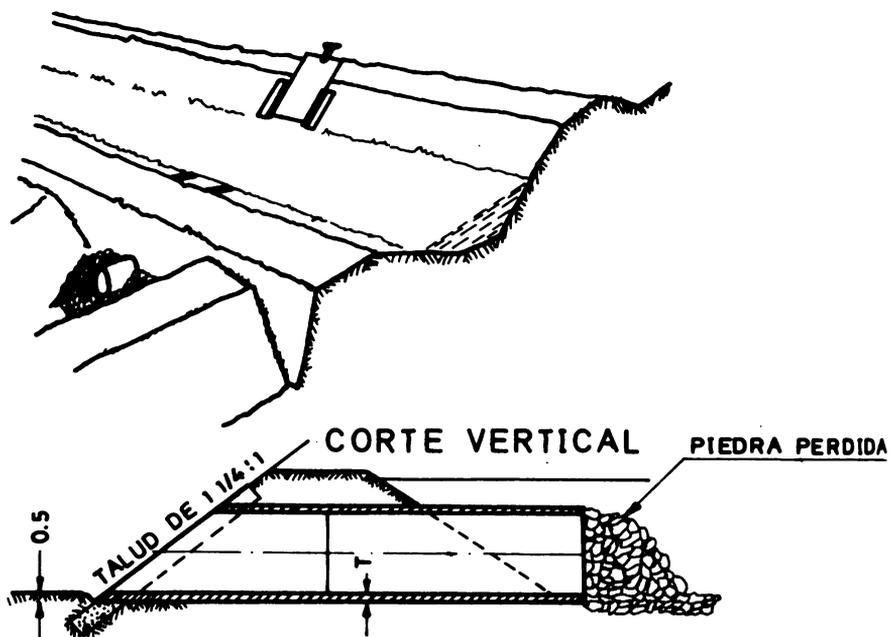


Fig. 38. Salida de tubo de hormigón desde una acequia de conducción a una acequia alimentadora.

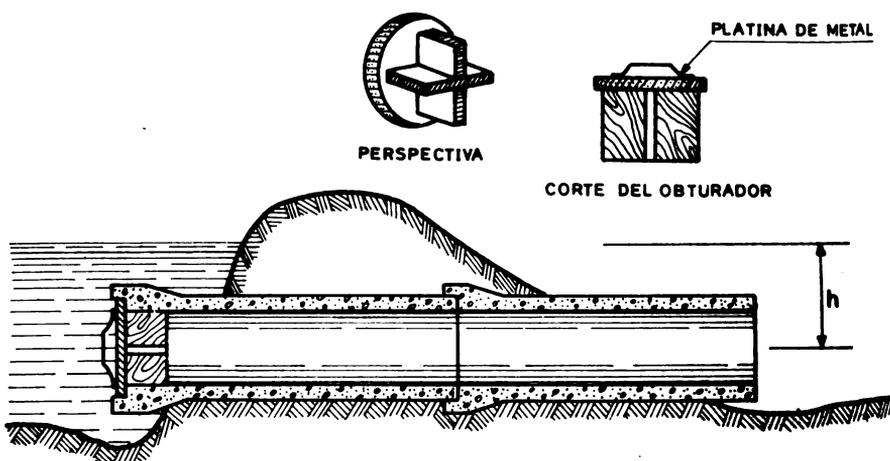


Fig. 39. Salida de tubo de hormigón con obturador en un extremo.

Para derivar agua de un canal lateral normalmente es necesario usar algún tipo de retención que eleve el nivel del agua. En la Fig. 40 se ven dos tipos de retenciones:

1. La de metal, hecha de hierro galvanizado de calibre 16, es muy popular; está ordinariamente provista de una compuerta regulable para dejar pasar parte del caudal. En suelos ligeramente arenosos puede ser necesaria la colocación de un saco de yute donde caiga la corriente para evitar la erosión producida por el agua que pasa por la compuerta. Unas pocas paletadas de tierra sobre el lado de donde viene la corriente mantienen el saco en su posición.
2. La retención de lona es ligera y fácil de llevar de un sitio a otro. El tipo de la muestra consta de un manguito de desagüe para derivar una parte de la corriente; se puede regular abriendo el cordel corredizo.

El control exacto del caudal de riego para los cultivos en hileras es muy importante desde muchos puntos de vista. El uso de compuertas, cajas derivadoras, cajas de toma de madera y otros tipos de construcción permiten un control exacto del caudal y facilitan el trabajo. Algunos agricultores cortan el borde de la acequia con una pala y dejan que el agua fluya hacia los surcos sin ningún sistema de control. Esta costumbre da normalmente como resultado que algunos surcos tengan demasiada agua mientras otros no reciben la suficiente. En determinados suelos y en algunas pendientes pronunciadas es posible que se produzca una fuerte erosión entre los surcos.

La Fig. 41 muestra el riego de cultivos en hilera, con agua procedente de un canal lateral que comunica, mediante cajas derivadoras y cajas de toma de madera, con una acequia de cabecera; el agua entra en el campo por un canal lateral y corre de izquierda a derecha. La acequia de cabecera ha sido abierta con un arado u otra clase de zanjadora. En la acequia de cabecera están colocadas pequeñas retenciones o presas de tierra; su espaciamiento depende del desnivel de los canales laterales. Mientras mayor sea la pendiente, menor debe ser la distancia entre las presas de tierra. La forma de utilizar este sistema es la siguiente:

1. La retención de metal, o de lona, se coloca en el canal lateral con objeto de levantar el agua hasta que pueda ser derivada hacia la acequia de cabecera. Cuando el nivel es suficientemente

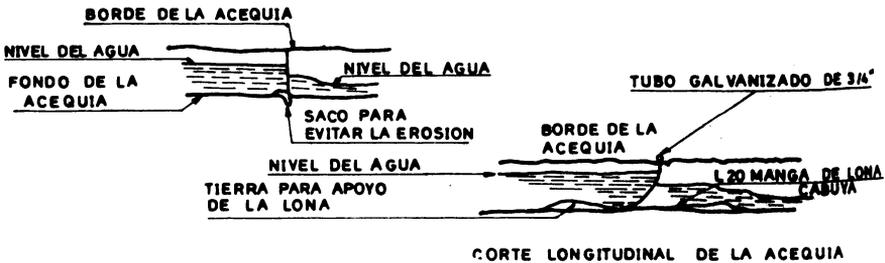
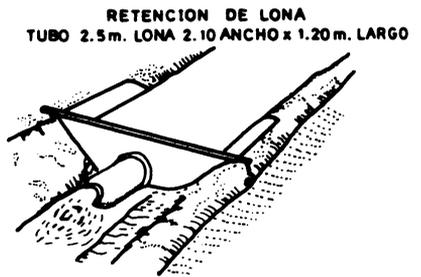
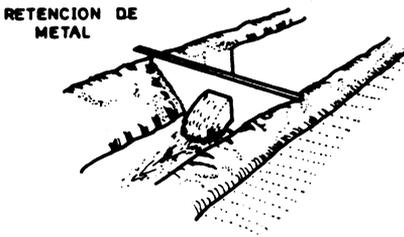
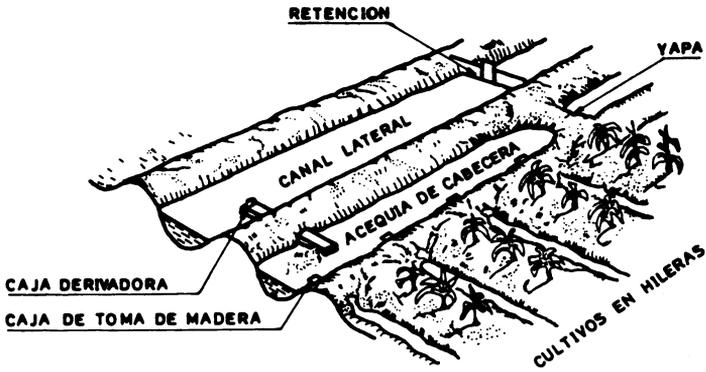


Fig. 40. Retenciones de agua en la acequia alimentadora.

alto se abre la compuerta de metal para permitir que el exceso de agua escurra por el ramal lateral.

2. El borde de la acequia ha sido cortado con una pala y se ha colocado la caja derivadora D, como se ve en la Fig. 41. La caja está bien empotrada con barro para evitar que deje escapar agua; la compuerta de la caja derivadora está abierta para permitir que el agua entre en el compartimiento de regulación H.
3. El agua que queda en la acequia de cabecera forma una línea de espuma que puede ser usada como una guía para colocar las cajas de toma, construidas de listones, a un nivel dado. Cada caja de toma deberá estar colocada, por la parte de la acequia, lo más cerca posible del nivel del agua y pegada al suelo en la parte de los surcos; todas las cajas de toma deben estar bien empotradas con barro. Generalmente se coloca una caja de toma de madera para cada surco, aunque puede servir una salida para dos surcos donde se desee una cantidad menor de agua. Para evitar el peligro de que las cajas de tomas de madera se atasquen con hojarasca, debe procurarse que el agua de la acequia secundaria cubra siempre su orificio de entrada.
4. Una caja derivadora normalmente abastecerá de 12 a 20 cajas de toma. La compuerta de la caja derivadora se gradúa para permitir el paso de la cantidad de agua que se desea salga por las cajas de toma; éstas dejarán pasar un volumen mayor o menor según la altura del agua que esté sobre ellas. La compuerta de la retención A debe entonces regularse con precisión para mantener el nivel apropiado en el canal secundario.
5. Después que ha sido construida una acequia secundaria se repite el mismo proceso para un segundo compartimiento, como se ve en la Fig. 41, y así sucesivamente a lo largo del canal lateral para aprovechar todo su desnivel.

Las cajas derivadoras tienen por objeto permitir el paso del agua de un canal lateral a una acequia de cabecera a través de la berma que los separa; también sirven para controlar la corriente. En la Fig. 42 se ve una caja derivadora de tipo cerrado. Los listones laterales de 2.5 cm por 15 cm son más cortos que las piezas superiores e inferiores. Una tabla de 15 cm x 15 cm se clava en el agujero de salida para que forme dos aberturas laterales. Con esto se evita la erosión de la margen opuesta de la acequia, porque el agua frenada por la tabla poste-

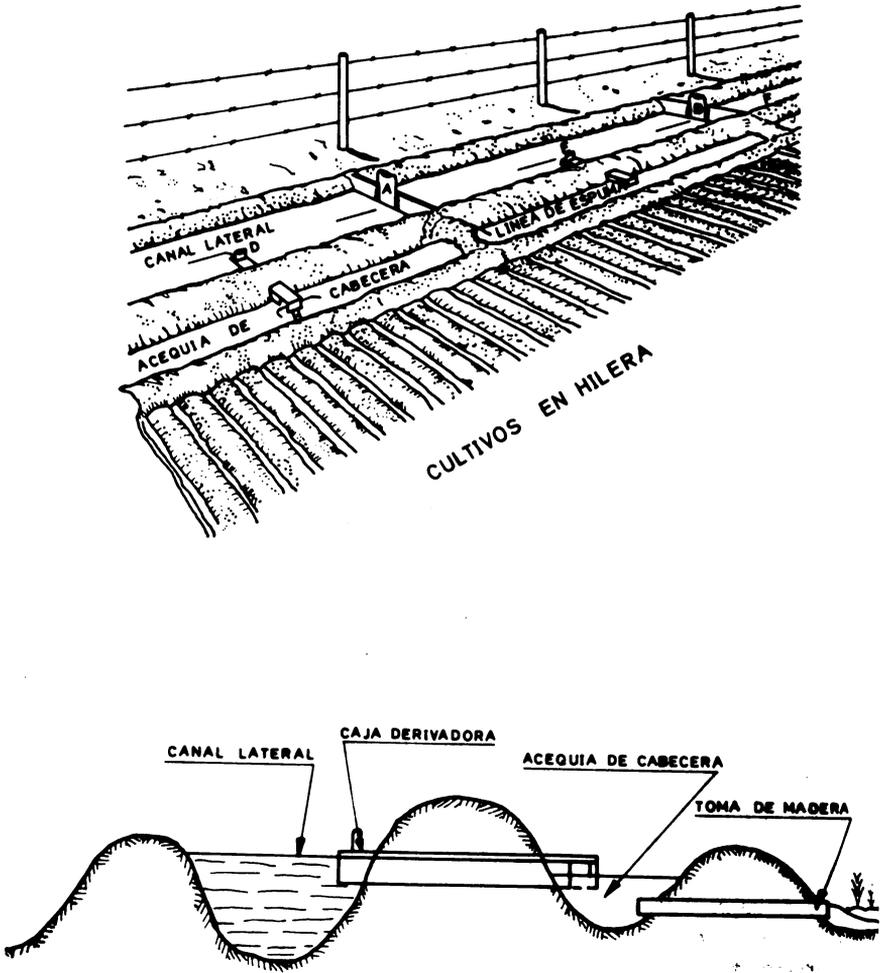
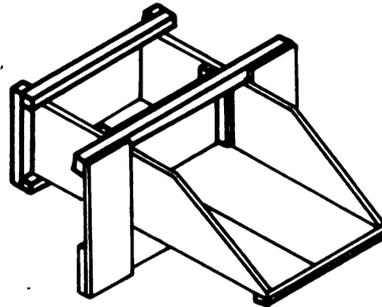
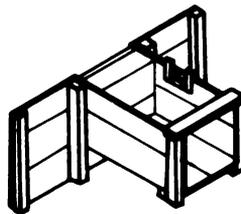


Fig. 41. Riego de cultivos en hilera con cajas derivadoras y tomas de madera.



CAJA DE APLICACION O
TOMA DE TIPO ABIERTO



CAJA REGULADORA

Fig. 42. Cajas de distribución de agua de riego.

rior sale por las aberturas laterales. Levantando y bajando la compuerta de metal de la boca de entrada puede controlarse la cantidad de agua que pasa a la acequia de cabecera.

Los caños sirven para que el agua pase de la acequia de cabecera a los surcos a través del reborde. Existen diversas formas de control que se usan en las zonas de regadío, pero la caja de toma de madera que se indica en este texto es a la vez económica y conveniente. Se construye clavando cuatro listones en toda su longitud, como se ve en la Fig. 42, y se cortan por el centro para formar dos de 60 cm cada uno.

En el riego de cultivos alineados, el uso de la caja derivadora de tipo cerrado, de la acequia de cabecera y de las cajas de toma de madera permite una distribución uniforme y controlada del agua para cada surco y ahorra más trabajo que el viejo método de cortar el camellón y esforzarse en conducir el agua por dentro de cada surco con una pala.

En el caso del riego por surcos, el tipo de dispositivo de derivación más común es el sifón o la caja de distribución. Los sifones generalmente son preformados, de aluminio o de tubo de plástico; algunas veces se construyen con materiales flexibles tales como la goma butílica y el plástico ondulado. Poseen las ventajas de su fácil instalación y retiro sin alterar el margen de la acequia; además, el hecho de ser portátiles hace que el número de sifones requeridos sea menor. El caudal se puede regular variando la altura piezométrica, el tamaño de los sifones o el número de los mismos. Las capacidades de los sifones que se puede adquirir en el mercado se hallan comprendidas entre 1 litro/seg y varias decenas de litros por segundo. Los de tamaño grande se usan algunas veces como salidas de campo o para la desviación del caudal desde acequias revestidas a acequias sin revestimiento. Estos sifones grandes precisan de un dispositivo para su cebado.

En el cuadro N° 15 se indica los caudales que pasan por diversos tamaños de sifones cuando éstos funcionan sometidos a diferentes alturas piezométricas; la altura piezométrica es la diferencia de cota entre la superficie del agua en la acequia de finca y el centro de la salida cuando su derrame es libre, o la superficie del agua por encima de la salida cuando ésta queda sumergida.

Un inconveniente que tiene el sifón es la posibilidad de que pueda quedar descebado durante el funcionamiento por producirse un descenso del nivel del agua o una obstrucción con hojarasca o légamo.

En el cuadro N° 15 se resume la descarga que puede esperarse de sifones de diferente diámetro, para alturas piezométricas variables.

CUADRO N° 15. Caudal para diferentes sifones y condiciones de operación.

Diámetro del sifón (cm)	Altura piezométrica (cm)						
	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
4	0.75	0.91	1.06	1.18	1.29	1.40	1.49
5	1.17	1.43	1.65	1.85	2.02	2.18	2.33
6	1.68	2.06	2.38	2.66	2.91	3.14	3.36
7	2.29	2.80	3.24	3.62	3.96	4.28	4.58
8	2.99	3.66	4.23	4.72	5.18	5.59	5.98
9	3.78	4.63	5.35	5.98	6.55	7.07	7.56
10	4.67	5.72	6.60	7.38	8.09	8.73	9.34

Las Fig. 43 indica la forma y condiciones de operación de los sifones usados en el riego por surco.

Para poner el sifón en funcionamiento se hace lo siguiente:

1. Se sumerge el tubo en el agua del canal hasta que esté lleno.
2. Se cierra uno de los extremos con la mano y se coloca en la posición que indica la Fig. 43.
3. Cuando se quita la mano, se puede regular la corriente levantando o bajando el extremo del desagüe.
4. El extremo de la toma de agua debe colocarse a la suficiente profundidad para evitar que se atasque con la hojarasca flotante.

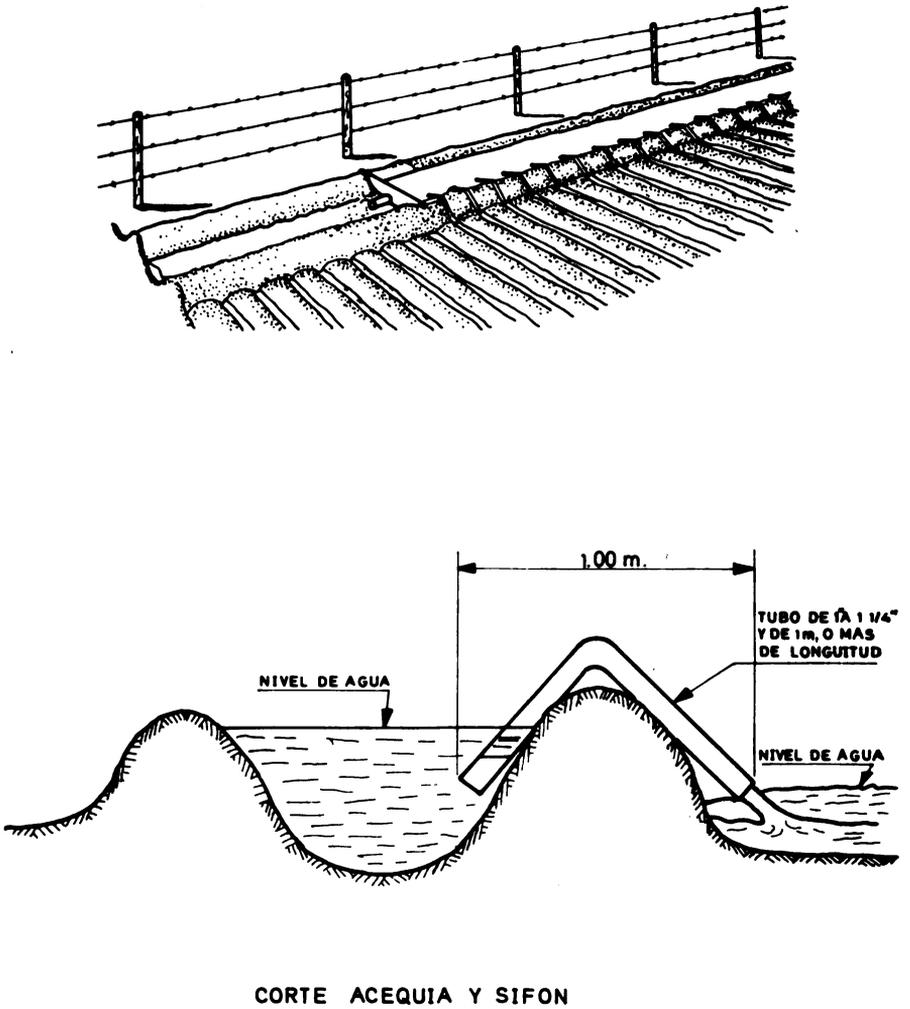


Fig. 43. Uso de sifones en riego por surcos.

CONDUCCION DE AGUA EN EL PREDIO

El agua de riego es conducida en circuitos abiertos o cerrados. Desde el punto de vista hidráulico, los dos métodos son similares; sin embargo, en el cálculo del caudal conducido se emplean fórmulas y ecuaciones diferentes.

El tipo más común de canal de conducción es aquél excavado en tierra a lo largo de la distancia en que debe ser conducida el agua. Cuando los canales son usados sin ningún tipo de recubrimiento se les conoce como 'canales de tierra', en los que una excesiva velocidad del agua puede causar erosión; generalmente la erosión se produce cuando el agua fluye con un caudal superior a 15 litros por segundo. La principal ventaja de los canales de tierra es su costo comparativamente pequeño; sus desventajas son de diverso tipo, como por ejemplo las pérdidas de agua por filtración, el crecimiento de malezas en las orillas, su tamaño comparativamente grande cuando se quiere conducir caudales significativos a baja velocidad y problemas de eventuales roturas.

Las paredes de los canales se construyen con un cierto talud respecto al fondo; la relación más común entre el ancho del fondo (b) y la profundidad del canal (d) es determinada por condiciones topográficas. La sección hidráulica más adecuada, cuando las condiciones estructurales del suelo no son limitantes, está representada en la Ecuación 9.1:

$$b = 2d \tan \frac{\theta}{2}$$

Ecuación 9.1

en que θ es el ángulo entre el talud y la horizontal.

Las pérdidas de agua desde canales de riego constituyen un serio problema, dado que no solamente se pierde agua sino que también se producen problemas de drenaje en los suelos adyacentes al trazado del canal. Parte del agua perdida desde el canal puede ser utilizada en agricultura; hay muchas áreas en que se desarrolla la producción agrícola satisfactoriamente en función de estas pérdidas, pero en algunas ocasiones los problemas de drenaje son tan graves que impiden el cultivo de extensas zonas.

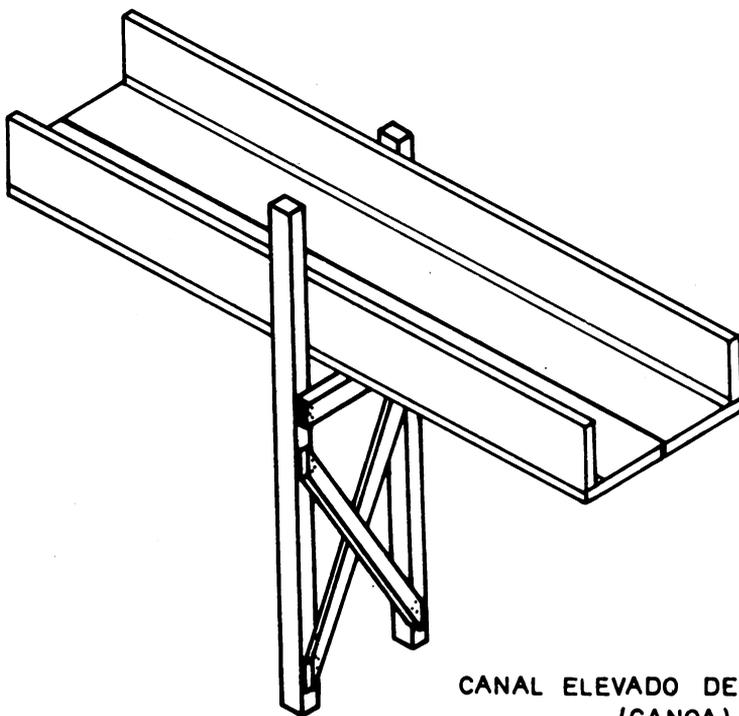
Uno de los problemas de mantenimiento más difíciles de abordar en un canal es tratar de que permanezca libre de malezas. La presencia de malezas en el fondo o en los lados del canal retarda en forma significativa la velocidad del agua y restringe así el caudal que el canal es capaz de conducir. Al mismo tiempo el agua del canal puede infestarse de semillas de malezas que luego son distribuidas sobre los campos regados, causando allí graves problemas de competencia con las plantas cultivadas.

El control de las malezas que se desarrollan en los canales de conducción de agua es una operación costosa que se realiza en forma manual o con maquinaria. Muchas veces no es posible utilizar herbicidas, porque éstos pueden ser acarreados por el agua hasta plantas cultivadas que pueden verse afectadas por el producto químico empleado.

Las malezas que crecen en los canales de riego consumen aproximadamente una cuarta parte del agua utilizada en riego, tanto por la transpiración misma como por la evaporación del suelo húmedo alrededor del canal.

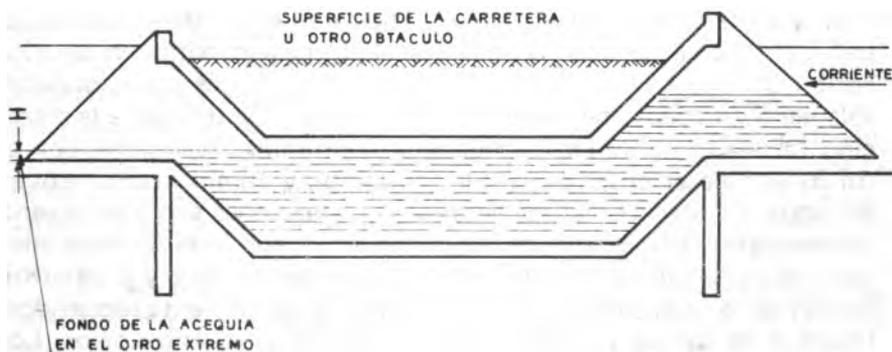
Además de los canales de conducción y de las estructuras de derivación antes analizadas, hay otras estructuras de conducción del agua dentro del predio agrícola; entre ellas es conveniente destacar:

1. Las canoas, que se utilizan para conducir el agua sobre depresiones del terreno o en zonas con mucha pendiente natural. Estas estructuras se construyen en madera o metal, tal como aparece en la Fig. 44.
2. Túneles, que permiten disminuir el largo de un canal de conducción cuando éste tiene que pasar por una zona de cerros o colinas.
3. Caídas o saltos de agua: cuando la pendiente del terreno donde fluye agua por un canal es excesiva, se construyen barreras de madera o concreto dentro del canal con el fin de disminuir la velocidad del flujo de agua; de esta forma la energía cinética del agua es disipada en la caída cada ciertos tramos del canal, y el agua no causa erosión en éste.
4. Sifones invertidos: para atravesar caminos, canales que fluyen perpendicularmente al canal considerado u otras barreras de difícil modificación, el agua se hace atravesar por sifones invertidos, bajo presión, tal como se indica en la Fig. 45.



CANAL ELEVADO DE MADERA (CANOA)

Fig. 44. Un tipo de canoa de conducción de agua en el predio.



SIFON INVERTIDO SECCION DIAGRAMATICA

Fig. 45. Sifón invertido para conducción de agua bajo obstáculos.

ESTRUCTURAS Y DISPOSITIVOS PARA MEDICION DE CAUDALES

Casi todos los tipos de obstáculos que restringen parcialmente la corriente del agua en un canal de riego se pueden utilizar como dispositivos de aforo, siempre que sea posible calibrarlos. Sin embargo, las pruebas de calibración necesarias para llegar a una valoración exacta pueden convertirse en un trabajo bastante costoso, en el que haya que invertir largo tiempo y que solamente está justificado cuando el dispositivo calibrado haya de utilizarse para numerosos fines. Para medir pequeños caudales (como de menos de 1 000 litros/seg) casi siempre es preferible emplear uno de los numerosos dispositivos de aforo normalizados, o las valoraciones ya establecidas. Antes de entrar en la descripción de los diversos dispositivos de aforo, conviene recordar los motivos por los cuales se mide el agua de riego y los lugares del sistema en que tal medición debe realizarse.

La creciente demanda que pesa sobre los recursos de agua disponibles y el constante aumento de los costos que tiene el desarrollo de las redes de riego exigen que el agua se utilice de forma económica, sin desperdiciarla, lo cual no se puede conseguir más que midiéndola. Las mediciones sirven para asegurar el mantenimiento de los programas adecuados de suministro, determinar las cantidades de agua provista, descubrir las anomalías, estimar y averiguar el origen de las pérdidas que se produzcan en la conducción. Los conocimientos más avanzados sobre las propiedades del suelo y las relaciones entre la humedad del suelo y de la planta permiten proyectar sistemas de riego de tal forma que el agua se pueda aplicar en el momento oportuno y en la cantidad precisa en relación con el estado de humedad del suelo, consiguiendo con ello una eficiencia máxima en la utilización del agua y un daño mínimo del suelo. Estos conocimientos solamente pueden tener su más perfecta aplicación mediante la medición razonablemente exacta del agua consumida. Asimismo, con el fin de establecer criterios para la utilización y administración eficaz del agua, es preciso realizar ensayos y evaluaciones sobre el terreno aprovechando los sistemas de riego existentes, con fines diversos tales como la evaluación del rendimiento de las redes de riego y la determinación de las velocidades de toma, tamaños de corriente requeridos, longitud de surcos y camellones, pérdidas de agua, entre otros. Los dispositivos para medición exacta del agua son indispensables en dichas pruebas y evaluaciones.

Ya sea el agua de propiedad pública o privada, su medición es un medio importante para poner en práctica un esquema de distribución

que satisfaga necesidades reales o derechos legales, o ambos, así como también para crear una base lógica de estimación de las facturaciones de agua. Si la facturación que se hace al consumidor se basa en el caudal, será preciso medirlo y llevar los registros convenientes. Cuando las facturaciones se basan en el volumen, hace falta un dispositivo de medición volumétrica o un dispositivo medidor del caudal combinado con otro registrador del tiempo. En teoría, el caudal del agua se debe medir en las tomas de los embalses, en las obras de cabecera de los canales, en puntos estratégicos de los canales y derivaciones laterales de los mismos y en puntos de suministro a los consumidores del agua.

Las instalaciones para medición de agua pueden requerirse en el sistema terminal de distribución, o ser convenientes en las tomas de canales laterales (distribuidores u otros), o en otros puntos de bifurcación. Está claro que el punto más importante de medición es la salida (o desviación) del predio donde se produce el encuentro de la administración con los consumidores del agua.

La mayor o menor necesidad de disponer de un dispositivo de aforo en la salida está en función del sistema de suministro empleado. El suministro sobre demanda depende de la medición del agua como base para su distribución equitativa, así como para el cálculo de las posibles facturaciones. En los lugares donde el agua se distribuye mediante rotación entre los agricultores a lo largo de una derivación lateral (o canal de distribución, o canal 'menor') y en los cuales la cantidad de agua suministrada a cada agricultor puede ser diferente, se requiere un dispositivo de aforo en la salida. Por el contrario, si los agricultores situados a lo largo de esa derivación lateral reciben agua tomando como base la superficie de tierra o los cultivos regados, la medición no es totalmente necesaria; sin embargo puede seguir siendo conveniente para otros fines, tales como el mejoramiento del rendimiento del riego. De modo análogo, en todos los sistemas que se basan en un caudal constante la medición no es absolutamente necesaria pero puede ser conveniente.

En los lugares donde varios agricultores comparten el agua de cada salida y en los que se da la circunstancia de que el caudal del canal fluctúa considerablemente, cada una de esas salidas debe estar provista de un dispositivo de aforo, incluso si se practica una distribución equitativa entre las salidas; de tal forma cada grupo de agricultores puede conocer en cualquier momento el caudal disponible que puede tomarse de su respectiva salida. Se deduce de lo anterior que

si toda el agua de riego de una salida ha de suministrarse a un campo de una vez, el dispositivo aforador de la salida puede ser el único que se requiera. Pero si el suministro se divide entre dos o más acequias, puede ser conveniente la instalación de alguna clase de dispositivo aforador sencillo en cada toma.

La medición del agua constituye un problema difícil en numerosas zonas de regadío: la altura disponible en el sistema de riego puede ser demasiado pequeña para permitir la realización de una medición exacta; las necesidades variables de agua en los predios y las variaciones del suministro motivan fluctuaciones en los niveles del agua en los canales, alteraciones de la velocidad o ambas cosas a la vez; la presencia de malezas y sedimentos, la dificultad de mantener tolerancias reducidas durante la construcción y otros muchos factores, pueden hacer relativa la exactitud de la medición del agua. Considerando que en un esquema de riego puede haber un gran número de salidas, la introducción de un sistema de suministro basado en la medición del agua en las salidas puede exigir una organización de explotación grande y costosa que entrañará problemas de personal, contratación de mano de obra, adiestramiento, etc. El factor del costo reviste una importancia particular en los lugares en que las fincas son pequeñas o la rentabilidad es baja; en tales casos, debe optarse por utilizar dispositivos sencillos, de menos exactitud.

Métodos, estructuras y dispositivos disponibles

El vertedero es el dispositivo más práctico y económico para medición de agua, siempre que se disponga de suficiente altura; asimismo, las conducciones elevadas de aforo se emplean con gran profusión en las redes de riego, pues son aplicables a casi todas las condiciones de caudal. Sus ventajas más destacadas son las pequeñas pérdidas de carga, una exactitud razonable para una gama grande de caudales, la insensibilidad a la velocidad de aproximación y el reducido efecto que en las mismas tiene el transporte de sedimentos y arrastres; en esta clase de estructuras de aforo se destaca la conducción elevada *Parshall*. Los aforadores de hélice son dispositivos de medición de caudal comerciales que se vienen utilizando hace varios años; son particularmente adecuados para sistemas en los que no pueden permitirse pérdidas de altura para la medición del agua y donde el agua se cobra por volumen.

La evolución de las técnicas y dispositivos para la medición del agua ha tenido lugar de forma independiente en muchas partes del mundo; ello ha dado como resultado una abundancia de tipos de diseños, creados para hacer frente a condiciones locales determinadas. Sin embargo, muchos de estos dispositivos podrían ser útiles también en otras zonas; hay ciertas características convenientes en un dispositivo que se pueden sumar a las de otro para mejorar el rendimiento general. El afinamiento de la exactitud se puede conseguir mejorando la calibración y construyendo estructuras que se ajusten con más rigor a las dimensiones normalizadas; además, las estructuras se pueden modificar de modo que lleguen a ser más baratas y fáciles de realizar, como el caso de la conducción elevada de garganta cortada. Con una mayor normalización y calibración de las estructuras de distribución y control, se podría beneficiar la economía de la medición del agua, como sucedería, por ejemplo, con la utilización de alcantarillas como dispositivos aforadores.

Vertederos de aforo con coronación aguda

Los vertederos probablemente sean los dispositivos utilizados con mayor profusión para medir el caudal de agua en canales abiertos. Se pueden dividir en vertederos con coronación aguda y vertederos con coronación ancha.

Los tiempos de vertederos de coronación aguda corrientemente utilizados para medir agua de riego son los siguientes: vertederos rectangulares contraídos; vertederos rectangulares sin contracción de la vena fluida; vertederos trapeciales con coronación y laterales agudos (*Cipolletti*); vertederos con entalladura en V de 90° con laterales agudos.

Cada uno de ellos posee características apropiadas para su funcionamiento con arreglo a las condiciones de un lugar determinado. El vertedero *Cipolletti* es, quizás, el tipo que se usa con más frecuencia (Fig. 46). Sin embargo, en los sistemas de riego se puede hallar un número considerable de vertederos rectangulares, sobre todo en los predios, dada la sencillez de su construcción y funcionamiento. Los resultados más exactos que se consiguen con el vertedero de entalladura en V de 90° sirven cuando se mide pequeñas descargas, siendo en particular conveniente para la medición de caudales fluctuantes. Los vertederos de aforo requieren una altura relativamente grande, un mantenimiento considerable del vertedero y protección del canal

aguas abajo de la coronación. La exactitud de la medición es relativamente buena. La elección del tipo y las dimensiones del vertedero deben basarse, en primera instancia, en el caudal previsto, o en los límites de caudal en el caso de corrientes fluctuantes. Debe tomarse en consideración lo siguiente:

- La altura no debe ser inferior a 6 cm para el caudal previsto y no debe exceder de 60 cm.
- Para vertederos rectangulares y trapeciales, la altura no debe exceder de un tercio de la longitud del vertedero.
- La longitud del vertedero debe elegirse de forma que la altura para la descarga de proyecto sea la máxima, pero sujeto a las limitaciones indicadas en a. y en b.
- Las coronaciones deben situarse a suficiente altura para que el agua que fluya sobre las mismas caiga libremente, dejando un espacio de aire debajo de los chorro y alrededor de los mismos.

Cuando la superficie del agua, aguas abajo de la retención, está lo bastante alejada por debajo de la coronación como para que el aire se desplace libremente a la zona que queda debajo de la lámina vertiente, se dice que el vertedero es de descarga libre, en cuyo caso el caudal solamente se puede determinar por la varilla de medición de aguas arriba y el conocimiento del tamaño y la forma del vertedero.

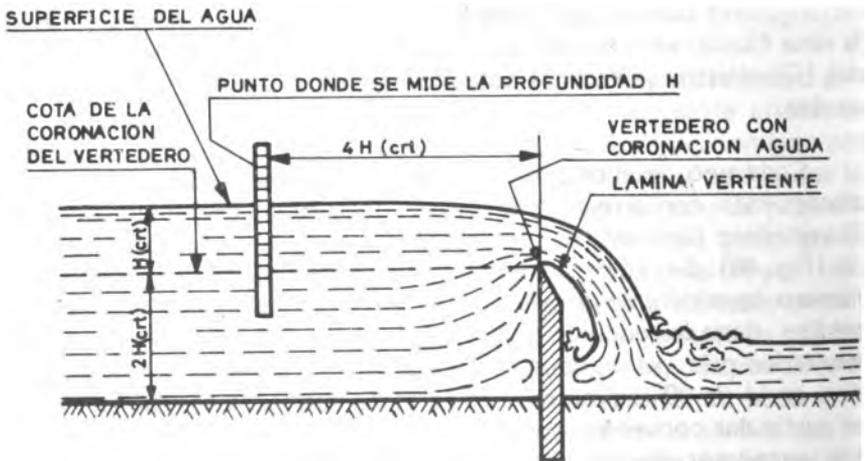


Fig. 46. Esquema de vertedero con contracción lateral y descarga libre.

Si en el sector de aguas abajo del canal la superficie del agua no permite que se forme una aireación libre alrededor de la lámina vertiente, puede suceder que la descarga aumente debido a la baja presión. Cuando el nivel del agua sube por encima de la cota de la coronación, se considera que la corriente es sumergida; esto puede afectar o no al régimen de descarga en un grado mensurable, pero en estas condiciones no pueden esperarse mediciones dignas de confianza. Sin embargo, cuando el nivel del agua aguas abajo se eleva sobre la coronación del vertedero en un 66 % aproximadamente, o más, de la altura sobre la coronación, el grado de inmersión afectará apreciablemente al caudal que pase por la entalladura del vertedero. En estas condiciones de inmersión, el caudal se puede determinar siempre que puedan medirse las alturas tanto aguas arriba como aguas abajo, consultando tablas de flujo sumergido. Los flujos sumergidos y no ventilados no son convenientes para condiciones normales; deben ser evitados, salvo en situaciones excepcionales. En la mayoría de los casos, los vertederos deben situarse, por lo tanto, de forma que se puedan conseguir unas condiciones de descarga ventilada y de derrame libre.

Si la entalladura del vertedero se construye con una chapa relativamente delgada, de modo tal que su borde de aguas arriba sea una arista viva y se monta en el muro de apoyo de forma que el agua no toque el muro al pasar (es decir, que 'salte' al pasarlo), el vertedero se denominará vertedero de coronación aguda. Si la entalladura del vertedero se montase en un muro demasiado grueso para que el agua lo 'saltase' al pasar, el vertedero se clasificaría como del tipo de coronación ancha. Los coeficientes de descarga y las tablas de descarga generalmente se obtienen para vertederos de coronación ancha calibrando el vertedero en su sitio; la mayoría de los vertederos aforadores se construyen como vertederos de coronación aguda.

Cuando las distancias desde los extremos o laterales de la entalladura del vertedero a los laterales del estanque del vertedero son lo bastante grandes como para permitir que la lámina de agua se aproxime a la coronación libremente y sin limitaciones, el agua fluye de modo uniforme y con relativa lentitud hacia los extremos del vertedero. A medida que el agua de los laterales del canal se aproxima a la entalladura, se acelera y gira para pasar por la abertura de la entalladura; ese efecto de giro no puede tener lugar instantáneamente, de modo que se forma un camino o contracción curvada de la corriente, 'saltando' el agua libremente para originar un chorro más estrecho que la abertura del vertedero. Cuando las condiciones del acceso permiten la contracción tanto en los extremos como en la parte

inferior del chorro, el vertedero se denomina vertedero con contracción. Para condiciones de contracción, los extremos del vertedero no deben estar a menor distancia de los laterales del canal que el doble de la altura sobre el vertedero; para que se produzca la contracción completa en el fondo, la coronación del vertedero debe situarse a una distancia no inferior de $2H$ medida desde el fondo del canal.

El vertedero rectangular sin contracción de la vena fluida, normalizado, requiere las mismas condiciones para la exactitud de la medición que el vertedero rectangular con contracción, a excepción de las condiciones que se refieren a la contracción lateral. En el vertedero sin contracción de la vena fluida, los laterales del canal de acceso deben coincidir con los laterales del vertedero y deben prolongarse agua abajo más allá de la coronación, para evitar la prolongación horizontal de la lámina vertiente.

El vertedero trapecial normalizado, tiene forma trapecial (véase la Fig. 47), inclinándose sus lados en la proporción de 1 (horizontal) a 4 (vertical).

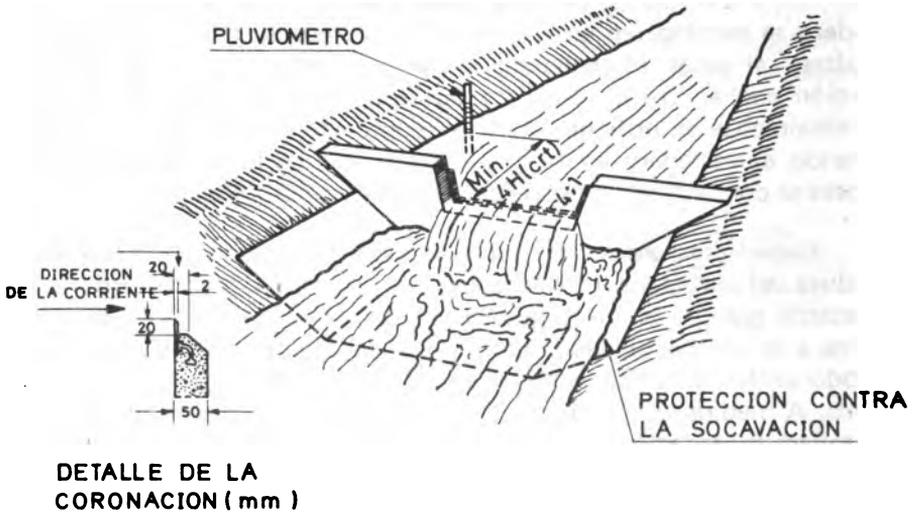


Fig. 47. Vertedero trapecial de descarga libre.

La coronación del vertedero con entalladura en V de 90° , normalizado, consiste en una chapa delgada; los lados de la entalladura están inclinados 45° con respecto a la vertical. Funciona como vertedero de contracción; por tal causa se aplican al mismo todas las condiciones relativas a la exactitud indicadas para el vertedero rectangular con contracción, normalizado. Las distancias mínimas de los laterales de vertedero a las márgenes del canal deben ser, por lo menos, el doble de la altura sobre el vertedero y deben medirse desde los puntos de intersección de la superficie máxima del agua con las aristas del vertedero. La distancia mínima desde la entalladura hasta el fondo del estanque debe ser, por lo menos, del doble que la altura sobre el vertedero, medida desde el punto (cúspide) de la entalladura al suelo del canal.

Debido a la forma de este vertedero, la altura requerida para un caudal pequeño que pase por él es mayor que la requerida en los demás tipos de vertedero con coronación horizontal larga; esto hace que sea particularmente adecuado para medir caudales pequeños con gran exactitud.

Fórmulas hidráulicas y medición de la descarga

Vertedero rectangular con contracción, normalizado

Se han deducido numerosas fórmulas para calcular la descarga de vertederos rectangulares, de coronación aguda, con contracción total. De estas fórmulas, la que está más divulgada y tiene mayor aceptación es la fórmula de *Francis*:

$$Q = 1.84 (L - 0.2H) H^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 9.2

donde

Q = descarga en m^3 por segundo

L = longitud de la coronación en m

H = altura en m o diferencia vertical entre la cota de la coronación del vertedero y la cota de la superficie del agua en el estanque del vertedero.

Vertedero rectangular sin contracción de la vena fluida, normalizado

Para calcular la descarga del vertedero rectangular sin contracción de la vena fluida, normalizado, se utilizan corrientemente las fórmulas de *Rehbock* y de *Francis*.

$$Q = \frac{2}{3} u \quad LH \sqrt{2gH}$$

Ecuación 9.3

donde

Q = descarga en m^3 por segundo

u = coeficiente de descarga

L = longitud de la coronación del vertedero en m

H = altura en m.

El coeficiente de descarga u se determina de la siguiente manera:

$$u = 0.615 \left(1 + \frac{1}{H+1.6}\right) \left\{1 + 0.5 \left(\frac{H}{H+D}\right)^2\right\}$$

Ecuación 9.4

donde

D = distancia desde la coronación al fondo del canal de acceso en milímetros

H = altura en milímetros

Vertedero trapecial (Cipolletti), normalizado

Basándose en la fórmula *Francis*, Cipolletti ha desarrollado la siguiente fórmula para este tipo de vertedero:

$$Q = 1.86 L H^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 9.5

donde

Q = descarga en m³ por segundo

L = longitud de la coronación en m

H = altura en m.

Vertedero con entalladura en V de 90°, normalizado

De las diversas fórmulas bien conocidas que se utilizan para calcular la descarga por vertederos de entalladura en V de 90°, la fórmula recomendada es la siguiente:

$$Q = \frac{8}{15} \quad 2 g C_d H^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 9.6

donde

Q = descarga en m³ por segundo

g = aceleración debida a la gravedad en m/seg²

C_d = coeficiente de descarga

H = altura en m

C_d = es función de H y de la propiedad del fluido.

Conducción elevada Parshall

La conducción elevada *Parshall* es un dispositivo aforador de camino crítico que se puede instalar en un canal, acequia o surco para medir el caudal de agua. Es una forma particular de conducción

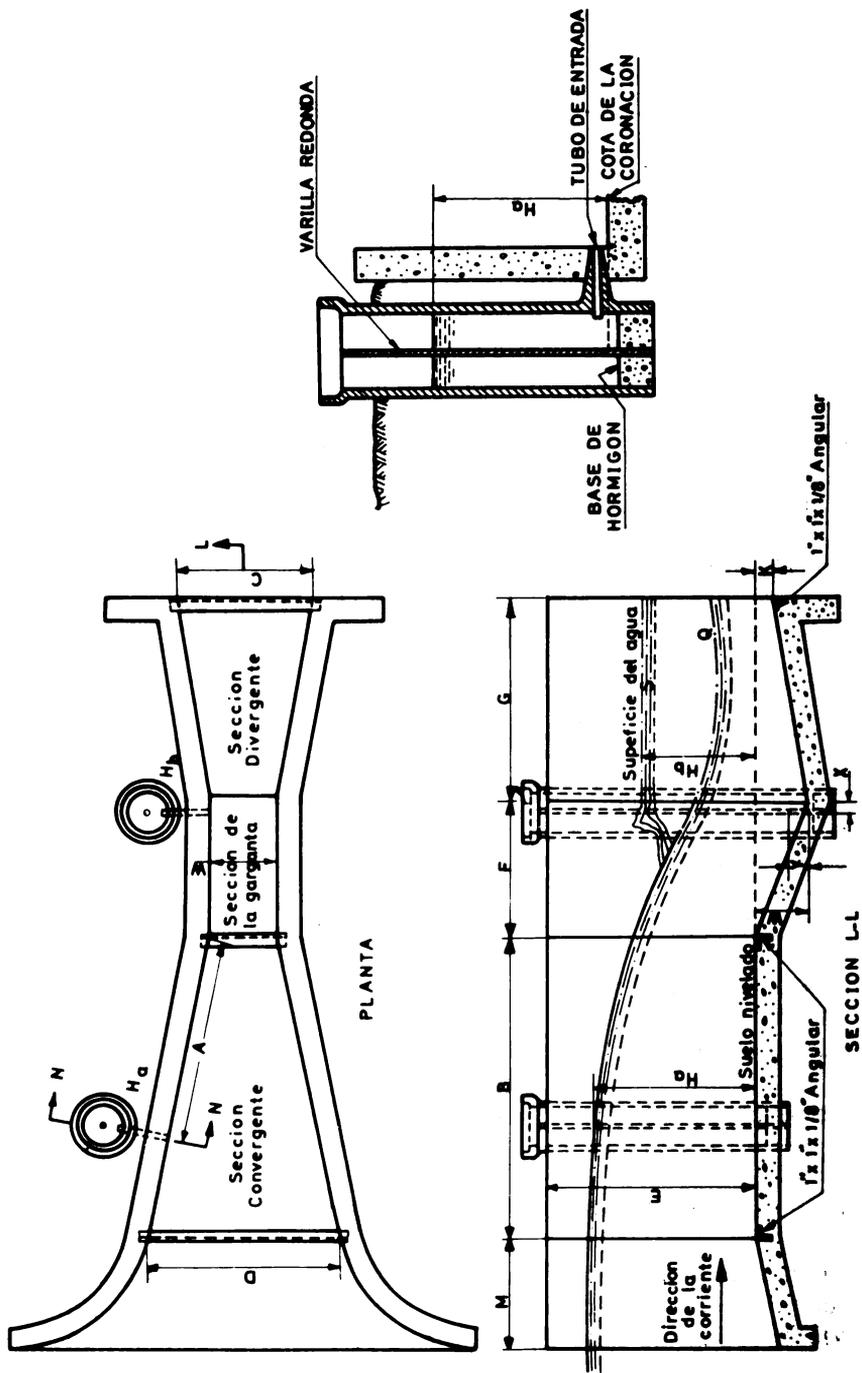


Fig. 48. Conducción elevada de aforo tipo Parshall.

elevada *Venturi* y se denomina como su principal creador. La conducción elevada consta de tres secciones principales: una sección convergente o de contracción en su extremo de aguas arriba; un tramo que conduce a una sección contraída o garganta, y una sección divergente o creciente aguas abajo (Fig. 48). Las conducciones elevadas de dimensiones mayores tienen un suelo de acceso y muros en aleta en el extremo de aguas arriba. El suelo de la sección convergente está nivelado, tanto en sentido longitudinal como transversal; el suelo de la garganta se inclina hacia abajo y el suelo de la sección divergente hacia arriba.

La conducción elevada tiene varias ventajas significativas. Puede funcionar con pérdidas de altura relativamente pequeñas; esa posibilidad permite su utilización en canales de profundidad relativamente pequeña y perfiles planos. Para una descarga, la pérdida de altura con una conducción elevada *Parshall* es solamente alrededor de $\frac{1}{4}$ de la requerida por un vertedero en condiciones similares de derrame libre. La conducción elevada es relativamente insensible a la velocidad de aproximación. Permite, además, realizar buenas mediciones sin inmersión, con una inmersión moderada o incluso con una inmersión considerable aguas abajo. Si se construye y mantiene debidamente, se pueden obtener exactitudes con un margen de error de $\pm 2\%$ para derrame libre y $\pm 5\%$ para derrame sumergido. La velocidad de la corriente es lo bastante elevada como para eliminar virtualmente los depósitos de sedimentos en la estructura durante el funcionamiento. Otra ventaja es que no existe ninguna forma fácil de alterar las dimensiones de las conducciones elevadas ya construidas o de cambiar de algún modo el dispositivo o canal para conseguir una proporción de agua no permitida.

Un inconveniente de la conducción elevada es que las dimensiones normalizadas deben seguirse con unas tolerancias muy pequeñas para poder conseguir una exactitud razonable en las mediciones; ello exige que la construcción se realice con exactitud, empleando mano de obra especializada, lo que motiva que el dispositivo resulte relativamente caro. Otro inconveniente es que las conducciones elevadas no se pueden utilizar en estructuras formadas por la combinación en forma compacta de desviación, dispositivos de control y dispositivos de aforo.

La conducción elevada *Parshall* se puede construir con arreglo a una amplia gama de tamaños para medir descargas comprendidas entre un litro por segundo y más de 100 m^3 por segundo. La anchura

de la garganta se usa para designar el tamaño de la conducción elevada. La descarga por la conducción elevada *Parshall* puede tener lugar en condiciones de derrame libre o derrame sumergido. Para determinar el régimen de descarga se disponen dos limnómetros (H_a y H_b) (Fig. 48). Ambos limnómetros se gradúan con el punto cero en la cota media de la coronación de la conducción elevada.

Cuando se elige la relación correcta entre la anchura de la garganta y la descarga, la velocidad de aproximación queda automáticamente controlada. Este control se realiza eligiendo una anchura de garganta que sea suficiente para adaptarse al caudal máximo que deba medirse, aunque tiene que ser lo suficientemente estrecha para hacer que se produzca un aumento en la profundidad de la corriente aguas arriba. Esto da como resultado una superficie mayor de sección transversal de la corriente de aproximación y, por ende, una reducción de la velocidad.

En condiciones de derrame libre, el régimen de descarga depende únicamente de la longitud de la coronación, W , y de la profundidad del agua en el punto en que se encuentre situado el limnómetro, H_a , en la sección convergente; en esto es similar a un vertedero en el que solamente intervenga en el cálculo de la descarga la longitud de la coronación y la altura. Una de las importantes características de la conducción elevada *Parshall* es su posibilidad de soportar un grado relativamente elevado de inmersión, dentro de una amplia gama de conducciones de agua remansada aguas abajo de la estructura, sin reducción del régimen indicado de derrame libre. La corriente que pasa por la garganta y las secciones divergentes de la conducción elevada pueden fluir en dos etapas diferentes: a) cuando el agua se desplaza a gran velocidad en forma de lámina delgada, adaptándose perfectamente a la inclinación del extremo inferior de la garganta (indicado por Q en la Fig. 48); b) cuando el agua remansada eleva la superficie del agua hasta la Cota S , haciendo que se forme un rizo u onda en el extremo de la garganta o justamente aguas abajo de la misma.

La ecuación que expresa la relación entre H_a , W y Q en unidades inglesas para W con valores comprendidos entre 1 y 8 pies es como sigue:

$$Q = 4 W H_a 1.522 W^{0.026}$$

Ecuación 9.7

donde Q representa pies cúbicos por segundo, y W y H_a representan pies.

En la mayoría de las instalaciones, cuando la descarga se aumenta por encima de un valor crítico la resistencia a fluir en el canal aguas abajo llega a ser suficiente para reducir la velocidad, aumentar la profundidad de la corriente y producir un efecto de agua remansada en la conducción elevada *Parshall*. Podría pensarse que la descarga empezaría a reducirse tan pronto como el nivel de agua remansada H_b sobrepasase la cota de la coronación de la conducción elevada; sin embargo, no sucede así. Los ensayos de calibración revelan que la descarga no se reduce hasta que la razón de inmersión $H_b : H_z$, expresada en porcentaje, sobrepasa los siguientes valores:

Anchura de la garganta (W)	Límite de derrame libre de $\frac{H_b}{H_a}$
15.2 a 23 cm (6 a 9 pulgadas)	60 %
30.5 a 244 cm (1 a 8 pies)	70 %

El límite superior de la razón de la inmersión es 95 %. En este punto la conducción elevada deja de constituir un dispositivo eficaz de aforo, pues la diferencia de altura entre H_a y H_b llega a ser tan pequeña que cualquier ligera inexactitud en alguna de las lecturas de altura se traduce en un gran error en la medición del caudal.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Señale los principales sistemas de medición de agua en los predios agrícolas de su región.
2. ¿Qué tipo de estructuras de derivación y toma de agua son recomendables para los siguientes casos?
 - a. Caudales mayores de 200 litros/seg
 - b. Una toma que abastece simultáneamente varios predios
 - c. Precio del agua significativo en relación al costo del resto de los insumos agrícolas.
3. Compare el uso de sifones con el uso de cajas de derivación para el riego por surcos de cultivos en hileras.
4. ¿Qué caudal entrega un sifón de 7 cm de diámetro cuando la carga piezométrica es de 15 cm, en los siguientes casos?
 - a. salida libre
 - b. salida sumergida.
5. ¿Qué caudal conduce un canal si en un vertedero rectangular con tracción, cuya coronación $L = 1\text{ m}$, se obtiene una lectura $H = 27\text{ cm}$?
6. ¿Cuál es el coeficiente de descarga u y el caudal Q conducido por un canal sobre el que hay un vertedero rectangular sin contracción, con coronación $L = 1.5\text{ m}$, cuando la distancia desde la coronación al fondo del canal de acceso es 20 cm y la altura medida es de 34 cm?

7. En un vertedero tipo *Cipolletti* se ha medido una altura H de 36 cm. ¿Cuál es el caudal del canal?
8. Expresar en el sistema métrico decimal el caudal de una acequia, medido con un aforador *Parshall*, en que la razón de inmersión es 70 % y cuyas dimensiones son: ancho de la garganta = 1 m y $H_g = 90$ cm.
9. ¿Qué altura de agua hay que mantener en un vertedero rectangular con contracción lateral, de largo $L = 1.00$ m para regar una hectárea del suelo que tiene:

$$W = 20 \%$$

$$C.C = 30 \%$$

$$D_b = 1.2 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{prof.} = 1.00 \text{ m}$$

si se dispone de agua durante 3 horas solamente?

BIBLIOGRAFIA

1. KRAATZ, D.B. y MAHAJAN, I.K. Small Hydraulic Structures. Irrigation and Drainage Paper Nos. 26/1 – 26/2. FAO, Roma. 1975. 695 pp.
2. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. A Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow. NBS Special Publication N° 421, USDC. 1975. 89 pp.
3. ROBINSON, A.R. y HUMPHERYS, A.S. Water Control and Measurement on the Farm. In "Irrigation of Agricultural Lands". Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967. p. 828–850.
4. SCS NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. Measurement of Irrigation Water. Irrigation Soil Conservation Service. USDA. Capítulo 9 Sección 15. 1973. 72 pp.
5. SIMONS, D.B. Conveyance and Distribution Systems. In "Irrigation of Agricultural Lands". Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967. p. 786–826.
6. WOOD, I.D. First Aid to the Irrigator. USDA, Miscellaneous Publication N° 624. 1959. 62 pp.

CAPÍTULO 10

ELECCIÓN DEL MÉTODO DE RIEGO

INTRODUCCION

El riego superficial se realiza depositando agua sobre la superficie del suelo o haciendo que el agua fluya sobre dicha superficie. En cualquier caso hay que disponer de algún medio para regular la velocidad con que fluye el agua sobre la superficie, de modo que penetre a la profundidad adecuada dentro del perfil del suelo, con el fin de que pueda distribuirse uniformemente por todas las partes del terreno. Un sistema de riego eficaz debe proporcionar también los medios de evitar pérdidas excesivas de agua por infiltración profunda bajo la zona de raíces o por escorrentía superficial en los extremos del terreno. Los dos criterios fundamentales para que el riego superficial sea eficaz son: adecuación a las condiciones del terreno y eficiencia de aplicación.

Todos los métodos de riego superficiales tienen en común ciertos principios básicos. El agua se aplica al terreno

en su parte más alta y fluye hacia los puntos más bajos, disminuyendo en cantidad o volumen a medida que se infiltra en el suelo, mientras desciende por la pendiente. Podría suponerse que sería imposible conseguir uniformidad en la distribución del agua en estas condiciones porque, inevitablemente, penetraría más cantidad al perfil del suelo en el extremo superior de la zona regada que en el interior; pero es posible reducir la falta de uniformidad que se produce durante el riego sin disminuir la eficiencia de la distribución del agua, en forma comparable con la de otros métodos. Esto se logra dividiendo el área a regar en unidades de tamaño y forma adecuados, y regulando el volumen de la corriente aplicada en la unidad regada según el tipo de suelo, la pendiente y la profundidad de enraizamiento de la planta. Sin embargo, cuando se desea obtener esta uniformidad con suelos que tienen velocidades de infiltración muy grandes, la superficie unitaria regada puede ser tan pequeña o bien el caudal de agua necesario puede ser tan grande que sea impracticable el riego superficial, y deba considerarse entonces el riego por aspersión o el riego por goteo; hay otras circunstancias en las que el riego mecánico (aspersión y goteo) sería preferible a los métodos de riego superficiales.

No siempre es posible expresar en unidades cuantitativas todos los factores que influyen en la uniformidad de la distribución del agua. Algunos son variables; por ejemplo, la velocidad de infiltración de agua en el suelo, la profundidad de enraizamiento de las diferentes plantas, el sistema radicular extendido de los cultivos anuales y los cambios del clima. Otros factores se mantienen constantes, como la pendiente del terreno, la textura y estructura del suelo y sus propiedades de retención de agua. Al proyectar el sistema de riego, es necesario aplicar un criterio que se base en la mejor información disponible referente a estos factores. El encargado del riego posiblemente tendrá que variar algunos factores que están bajo su control, con el fin de conseguir la utilización óptima del agua de riego; entre esos factores están: la superficie unitaria regada, el volumen de caudal empleado para regar cada unidad y el tiempo durante el cual se deja fluir el agua sobre cada área unitaria. Otros dos requisitos de importancia primordial en la utilización de los métodos de riego superficiales son: los sistemas de distribución construidos para proporcionar la regulación adecuada de agua y una preparación del terreno que permita distribuir uniformemente el agua y drenar el sobrante.

Suministro de agua

La procedencia del agua, particularmente en cuanto se refiere al volumen del flujo disponible, influye sobre el método de riego que pueda utilizarse. Un canal grande puede suministrar agua a varios usuarios, una acequia de propiedad privada puede desviar agua de una corriente o un embalse pequeño, o bien el agua puede proceder de un pozo artesiano o con bomba.

La disponibilidad de agua obtenida desviando el curso natural de los cauces fluctúa generalmente durante la temporada de riego y varía de un año a otro; esa disponibilidad es más uniforme cuando el agua que se obtiene puede almacenarse en un embalse o bombearse desde un depósito de agua freática. La cantidad de agua disponible influye sobre el tipo de plantas que pueda cultivarse y determina la superficie que se puede regar. Cuando el suministro es limitado, debe lograrse un método de riego muy eficiente; éste debe ser proyectado para conseguir el máximo aprovechamiento posible del agua. El costo del agua, que depende de la inversión en las obras de riego y de los costos operativos y de mantenimiento, es también importante en la determinación del método de riego. Se acepta, en general, que cuanto mayor es el costo, mayor es el esfuerzo necesario para lograr que el agua se use de modo eficaz.

Métodos de distribución del agua

En la mayoría de las zonas de riego se distribuye entre varios usuarios una fuente de agua común. En tales casos, la distribución del agua puede basarse en prioridades establecidas, o bien los usuarios pueden dividirse el suministro disponible, según el área regada por cada uno. Algunas veces el caudal total se reparte entre los usuarios; cada uno obtiene, en esos casos, una parte en forma de flujo continuo durante toda la temporada, con arreglo a su derecho reconocido. Una costumbre más corriente consiste en establecer un turno para el uso de la totalidad del caudal. El tiempo de cada usuario suele basarse en su superficie regada; se limita su uso de modo que todos dispongan de la oportunidad de participar en el empleo del agua a intervalos razonables.

La distribución del agua basada en un sistema de rotación suele motivar que una gran parte se desperdicie; normalmente, los usuarios utilizan el total del agua que les corresponde en cada turno, indepen-

dientemente de las necesidades de agua de sus cultivos. En algunas zonas con disponibilidades limitadas, una organización de usuarios de agua distribuye al comienzo de la temporada un volumen determinado a cada unidad de superficie regada; para ello se basan en un cálculo de las disponibilidades estacionales totales del agua disponible y del área total que debe regarse. Se miden los suministros de agua y se limita a cada usuario su asignación estacional; se favorece así el mejor aprovechamiento del agua.

Otro método, que se aplica en los proyectos de riego más perfeccionados, consiste en suministrar agua cuando se solicita. Este sistema se suele denominar 'suministro a petición'; requiere mantener un caudal de agua en la totalidad del sistema de canales durante toda la temporada de riego. Para evitar desperdicios, el caudal debe regularse en el origen por medio de un embalse o por algún otro procedimiento de control. Cuando los canales están provistos de compuertas automáticas para regular la altura del agua, los usuarios pueden conseguir el agua en el momento que se necesite. Cuando estos controles automáticos no están instalados, los usuarios deben solicitar el suministro de agua por adelantado; el caudal que entra en los canales se regula de manera que se satisfagan todas las peticiones recibidas. Esto demanda que en las solicitudes se especifique la cantidad, el período y la fecha en que debe comenzar el riego. Se tolera, generalmente, un margen de hasta 24 ó 48 horas entre el momento en que se hace la solicitud y el suministro.

ELECCION DEL METODO DE RIEGO

La elección del método de riego más conveniente para una situación dada es importante para conseguir los máximos beneficios, merced al aumento de la producción de los cultivos. Si se emplea un método inadecuado se puede producir fallas en el riego y posiblemente causarse serios daños al suelo. El abuso del agua de riego puede ocasionar erosión del suelo, encharcamiento, acumulación de salinidad y un gasto inútil del capital invertido en la instalación del sistema de riego. Cada sistema de riego es más o menos idóneo según ciertas circunstancias y características del terreno. El conocimiento a fondo del suelo, la topografía, el abastecimiento de agua y de otros factores que puedan influir en el riego, contribuye a seleccionar el método apropiado. Se ha estudiado la relación que estos factores guardan con los diversos sistemas de riego; cada método tiene ciertas variaciones que pueden emplearse para ampliar su alcance de aplicación.

En los cuadros N^{os} 16 y 17 se resumen las condiciones para las cuales son más adecuados los múltiples métodos de riego que son objeto de los próximos capítulos de este libro:

1. El riego por compartimiento es el más simple y de hecho el más usado en cultivos regados. El algodón, maíz, cereales, garbanzo, alfalfa, pasto y otros cultivos intensivos, así como huertos y plantaciones, se prestan bien a este sistema de riego, cuya principal desventaja es el alto costo de establecimiento en el terreno.

2. El riego por bordes puede ser el método más eficaz para cultivos densos, como la alfalfa, los pastos y los cereales menores; también se utiliza en huertos y en viñedos.

3. El riego por surcos está particularmente diseñado para aquellos cultivos que quedan perjudicados si el tallo o el cuello de la raíz están en contacto prolongado con el agua; los cultivos en hileras o escardados, como hortalizas, algodón, remolacha azucarera, maíz, papas y cultivos de semillas, se riegan por surcos.

Una variante del sistema por surcos es el riego por corrugaciones o surcos pequeños usados con cultivos poco espaciados como cereales, alfalfa y pastos. Se utiliza a veces para cultivos en germinación sembrados a chorro continuo o al voleo.

4. El riego por desbordamiento natural, o riego 'tendido', se usa principalmente para cultivos forrajeros perennes, que protegen el suelo contra la erosión hídrica, así como para cereales.

5. El riego por aspersión tiene grandes ventajas en suelos delgados o muy arenosos, o suelos con pendientes pronunciadas, y puede utilizarse en todos los cultivos.

6. El riego por goteo, aunque se usa para especies cultivadas en condiciones muy variables, es particularmente beneficioso para huertos y viñedos jóvenes, para plantas perennes poco espaciadas, como alcachofas, bananos y otros cultivos valiosos y, cuando el agua escasea o es muy salina, para hortalizas cultivadas en hileras.

CUADRO N° 16: Métodos de riego superficial y condiciones de uso.

Métodos de riego		CONVENIENCIA Y CONDICIONES DE USO			Observaciones
Cultivos	Topografía	Abastecimiento de agua	Suelos		
Compartimientos rectangulares pequeños (tazas)	Granos, cultivos de campo, huertos.	Terreno relativamente llano; la superficie dentro de cada compartimiento tiene que nivelarse.	Puede adaptarse a corrientes de diverso caudal del mismo caudal.	Adecuado para suelos con velocidades de infiltración altas o bajas; no debe emplearse en suelos con tendencia al encharcamiento.	Altos costos de instalación. Se necesita considerable mano de obra para el riego. Cuando se emplee en cultivos tupidos, se usa un gran porcentaje de terreno para diques y acortarse las distancias de distribución. Pueden conseguirse grandes rendimientos en el consumo de agua (alta eficiencia de aplicación).
Compartimientos grandes (estaciones)	Granos, cultivos de campo, arroz, árboles frutales.	Terreno llano; tiene que estar plana de manera que quede uniforme.	Caudales grandes de agua.	Suelos de textura fina con velocidades de infiltración bajas.	Se necesitan menos gastos de instalación y menos mano de obra para riego que con compartimientos pequeños. Requiere diques considerables.
Diques en curvas de nivel (perfiles)	Huertos, granos, arroz, forraje.	Terreno irregular, pendientes de 2% o menos.	Se necesitan caudales mayores de 30 litros por segundo.	Suelos de textura entre media y fina que no se agrieten al secarse.	Se necesita poca explanación del terreno. Los compartimientos pueden inundarse intermitentemente, como para pastos.
Bordes estrechos de hasta 5 m de anchura	Pastos, granos, alfalfa, vides, huertos.	Pendientes uniformes de 7% o más.	Caudales moderadamente grandes.	Suelos de textura entre media y fina.	Los bordes deben estar en dirección de la pendiente máxima. Se necesita una nivelación cruzada exacta entre los diques guía.
Bordes anchos de hasta 30 m.	Granos, alfalfa, huertos.	Terreno nivelado hasta un plano uniforme con pendientes de 0,5%.	Se necesitan caudales grandes, hasta de 600 litros por segundo.	Suelos profundos de textura entre media y fina.	Se necesita una nivelación muy exacta del terreno. Mínimo de mano de obra para riego. Poca interferencia con el empleo de maquinaria agrícola.
Riego por cebozo (tendido)	Pastos, granos.	Superficies irregulares con pendientes hasta de 20%.	Pueden utilizarse caudales continuos pequeños en terrenos más pendientes o caudales grandes en superficies más suaves. Caudales entre pequeños y medios.	Suelos con textura entre media y fina que no se agrieten al secarse.	Se necesita poca nivelación del terreno. Poca costo inicial para el sistema. Adaptación óptima a suelos poco profundos, ya que las pérdidas por infiltración pueden ser altas en suelos profundos permeables.

Bancales en terrazas (bordes en curvas de nivel).	Grandes, cultivos de torrajes, cultivos de campo, huertos, viñas.	Pendientes hasta de 20 %.	Los suelos han de ser lo bastante profundos para que las operaciones de nivelación no perjudiquen el desarrollo de los cultivos.	Hay que tomar precauciones en la construcción de bancales y proporcionar drenajes adecuados para el exceso de agua. El agua de riego debe administrarse cuidadosamente. El exceso de agua puede dar lugar a grave erosión del suelo.
Surcos rectos	Horralizas, cultivos de escarificación, huertos, viñas.	Pendientes uniformes que no exceda de 2 % para plantas cultivadas.	Caudales hasta de 1.5 litros por segundo por surco.	Conveniencia máxima para cultivos que no pueden inundarse. Es posible una gran eficiencia de riego. Bien adaptado para agricultura mecanizada.
Surcos en curvas de nivel	Horralizas, cultivos de centeno, pasto, huertos, viñas.	Terreno ondulado con pendiente hasta de 8 %.	Caudales hasta de 1.0 litro por segundo por surco.	Es esencial combatir los raudales. Peligro de erosión por fuertes lluvias o por agua que escape de los surcos. Se necesita mucha mano de obra para el riego.
Corrugaciones	Cultivos tupidos tal como granos, pasto y alfalfa.	Pendientes uniformes hasta de 10 %.	Caudales hasta de 30 litros por segundo.	Son posibles grandes pérdidas de agua por infiltración profunda o escorrentía superficial. Hay que tener cuidado de limitar el caudal en los surcos para disminuir la erosión del suelo. Se necesita poca nivelación del terreno.
Surcos en compartimientos	Horralizas, algodón, maíz y otros cultivos de escarda.	Terreno relativamente llano.	Caudales hasta de 150 litros por segundo.	Andlago a compartimientos rectangulares pequeños, excepto que los cultivos se plantan sobre lomas.
Surcos en zig-zag	Viñas, bayas de matorral, huertos.	Terreno nivelado a pendientes uniformes de 1 %.	Los caudales empleados son generalmente menores que para surcos rectos.	Este método se utiliza para aminorar el caudal de agua en surcos con el fin de aumentar la penetración de agua en este tipo de suelo.

CUADRO N° 17: Métodos de riego mecánico y sus condiciones de uso

Métodos de riego	Conveniencia y condiciones de uso				Observaciones
	Cultivos	Topografía	Abastecimiento de agua	Suelos	
Aspersión	Todos los cultivos.	Pendientes desuniformes, quebradas o muy pronunciadas.	Caudales entre 40 y 150 litros por segundo.	Todo tipo de suelos; ideal para suelos arenosos o suelos delgados.	Alto costo inicial de instalación. Significativos costos de operación.
Goteo	Cultivos en hileras, huertos, frutales y viñas. Especialmente utilizado en cultivos de alta rentabilidad.	Pendientes desuniformes, quebradas o muy pronunciadas.	Caudales de hasta 100 litros por segundo.	Todo tipo de suelos, especialmente suelos extremos (Muy arenosos, muy arcillosos).	Alto costo inicial de instalación. Puede usarse con agua de baja calidad.

ASPECTOS QUE DEBEN CONSIDERARSE EN LA SELECCION Y DISEÑO DE UN METODO DE RIEGO

Para que un sistema de riego funcione eficazmente, en la selección y diseño tanto el usuario como el diseñador deben considerar los siguientes aspectos:

1. Los beneficios del riego deben incrementar las entradas provenientes de los rubros regados para que se cubran todos los costos de compra, instalación, operación y mantenimiento del sistema de riego; también deben proporcionar una utilidad adecuada a la inversión realizada por el agricultor.

2. La operación del sistema de riego seleccionado debe llevar implícito un manejo del agua de riego que no cause problemas de gasto excesivo de agua, erosión o lavado de nutrimentos.

3. Debe asegurarse la disponibilidad de agua del predio, en cantidad, calidad y distribución en el tiempo.

4. Debe tomarse en cuenta las preferencias del agricultor en cuanto a ocupación de mano de obra (horas por día de riego, días por semana), inversión de capital o tipo de cultivos considerados en la rotación.

5. Aunque se seleccione el riego para una unidad dentro del predio, debe tomarse en consideración las diferentes unidades adyacentes, para no perjudicar su disponibilidad de agua o para su eventual incorporación a los métodos de riego mejorados.

En una primera aproximación, los Cuadros Nos. 16 y 17 pueden ser útiles para establecer métodos de riego susceptibles de ser usados convenientemente en una situación específica; sin embargo, antes de tomar una decisión final —que generalmente implica una inversión significativa y un cambio importante en la técnica de producción— es conveniente consultar con un especialista que sea capaz de evaluar adecuadamente las características señaladas (de caudal, suelo, cultivo, entre otras) y pueda no sólo seleccionar el método más adecuado sino diseñar el sistema de riego y establecer sus normas de operación en terreno. Para lograr este fin se requieren los siguientes parámetros:

1. Un estudio agrológico que separe el suelo a regarse en unidades de manejo, de acuerdo con las características edafológicas del

perfil (textura, estratificación, estructura, profundidad potencial de arraigamiento de los cultivos).

2. Un levantamiento topográfico en una escala adecuada, en lo posible con curvas de nivel cada 50 cm, para establecer las necesidades de nivelación o emparejamiento de la superficie y la dirección del riego.

3. Un estudio de caracterización hídrica de los suelos presentes en el sector a regarse, que incluya la determinación de densidad aparente, valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, capacidad de almacenamiento del suelo por estratas y, además, una evaluación de la variación de velocidad de infiltración del suelo en el tiempo para las diferentes alternativas de métodos de riego que pudieran usarse en el predio en cuestión.

4. Un estudio de posibles problemas de drenaje, salinización del suelo y calidad del agua de riego, cuando ello parezca necesario.

5. Las normas de operación del sistema (frecuencia de riego y tiempo de riego) deben ser establecidas con algún tipo de elemento de fácil acceso y control para el agricultor, como el uso de tensiómetros, bandejas de evaporación o muestreos periódicos del suelo.

Todos los elementos señalados permitirán en conjunto al agricultor, y al especialista que lo asesore, una adecuada selección del método de riego más recomendable y el diseño del sistema, con sus normas de operación, que más se adapte a las condiciones del predio específico.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. Clasifique los métodos de riego presentados en este capítulo de acuerdo con:
 - a. necesidad de inversiones en infraestructura;
 - b. ocupación de mano de obra;
 - c. consumo de energía;
 - d. caudales necesarios para lograr una eficiencia de aplicación del agua adecuada al método.
2. ¿Cuál es el objetivo de reemplazar un método de riego por otro en diferentes situaciones de campo?
3. ¿Cómo se complementan los conceptos de adecuación y eficiencia de los sistemas de riego, en relación a las características hidromecánicas de los suelos?
4. Compare los métodos de riego superficiales con los mecánicos, en relación con la eficiencia agronómica del riego, explicando por qué cada método tiene una eficiencia de diseño diferente, que no es 100 %.
5. Establezca la proporción de áreas regadas de su país en las que se utiliza cada uno de los métodos de riego presentados en este Capítulo.
6. Describa métodos de riego diferentes a los presentados en este Capítulo, indicando las variaciones que se practican en su país o región en la aplicación del agua de riego al campo.

7. Clasifique los métodos de riego en cuanto a los cultivos que se practican en su país o región.

Cultivo	Superficie de las unidades de riego	Pendiente promedio	Caudales disponibles	Método de riego
Alfalfa				
Plátano				
Porotos				
Cacao				
Café				
Maíz				
Algodón				
Dátiles				
Colza				
Cereales				
Sorgo				
Girasol				
Aguacates				
Pomelos				
Naranjos				
Nogales				
Duraznos				
Manzanos				
Trébol + Ballico				
Trébol ladino				
Papas				
Arroz				
Sisal				
Remolacha				
Caña de azúcar				
Tabaco				
Tomate				
Viñas				
Hortalizas verdes				

8. Qué sistema de riego recomendaría Ud. para un predio que tiene los siguientes cultivos:

			Pendiente
a.	Papas	5 hectáreas	6 %
b.	Maíz	15 hectáreas	1 %
c.	Praderas	20 hectáreas	0.5 %
d.	Frutales	15 hectáreas	15 %

Justifique su respuesta en cada caso.

9. Enumere los sistemas de riego que conoce y señale en cada caso cuál es el factor o los factores determinantes para recomendar cada uno de ellos.
10. ¿Qué sistema de riego utilizaría para regar un huerto de aguacates en un suelo de 90 cm, de textura moderadamente fina, con 6 % de pendiente en las direcciones N-S y E-O, plantado a favor de la pendiente, para hacer un riego de la mayor eficiencia y uniformidad?
Justifique la elección del sistema de riego elegido.
11. ¿Cuáles son las diferencias entre período de riego, intervalo de riego, frecuencia de riego y temporada de riego?
12. Se desea planificar con fines de regadío un predio que posee un total de 200 ha; 100 ha corresponden a suelo clase I de riego; 50 ha son clase IIIs de riego, y 50 ha no se riegan por falta de embalse. El suelo clase I posee las siguientes características físicas:
Textura franco, perfil homogéneo, 1.50 m de profundidad.

$$Db = 1.1. \quad CC = 28 \% Pw$$

$$PMP = 16 \% Pw.$$

Por falta de tiempo, no se logró identificar las características hídricas del suelo clase IIIs, obteniéndose sólo las siguientes características del perfil:

0 - 20	franco arcilloso
20 - 40	franco
40 - 60	franco arenoso
60	ripio, con tierra

Pendiente general 1 %

Se desea establecer 60 ha de alfalfa
40 ha de maíz
30 ha de tomates
20 ha de cebollas
50 ha de trigo

Las características climáticas del área son:

Latitud 30° 27'
Longitud 70° 42'
Elevación 520 m

Mes	TM	TD	MA	W10	PM (20 años)
Enero	21.2	10	.52	5.2	10
Feb.	20.0	8	.69	4.5	8
Marzo	17.7	7	.61	3.9	15
Abril	14.5	7	.67	2.5	20
Mayo	11.3	5	.74	1.8	58
Junio	8.5	5	.79	1.3	81
Julio	8.1	5	.80	2.3	73
Agosto	9.5	6	.75	2.6	57
Sept.	11.4	8	.70	3.1	45
Oct.	14.4	11	.65	3.8	30
Nov.	17.4	18	.57	4.8	25
Dic.	19.8	10	.63	5.3	15

Determinar:

- Los requerimientos potenciales del agua de riego del predio.
- Los requerimientos actuales de agua de riego del predio.
- ¿Cuántas acciones extra debería entregársele al predio para regar las 200 ha, considerando que una acción de río corresponde a 15 litros/seg?

- d. ¿Cuántos riegos debería dársele a cada cultivo de acuerdo con una frecuencia óptima, de acuerdo con una óptima extracción de humedad del suelo y considerando los períodos vegetativos críticos de cada cultivo?
- e. Considerando que el agua se ocupa sólo 10 de las 24 horas que corre en el canal, ¿de que tamaño debería considerarse una embalse de acumulación nocturna para regar las 50 ha de secano? Considere el aporte de las lluvias.

Utilice todas las técnicas que Ud. conozca, que impliquen un balance hídrico y un balance hidrológico.

13. Se desea realizar un proyecto de riego para una localidad en que se conocen los siguientes antecedentes:

a. Características del perfil

cm	CC% (volumen)	PMP % (Peso)	D. aparente	D. real
0 - 30	30	14	0.8	2.65
30 - 150	29	13	0.9	2.65

- b. Precipitaciones anuales para el mes de diciembre (promedio de 10 años)
mm 9-7-30-20-45-15-40-20-10-20

c. Características climáticas:

Temperatura Media	H R	t max media	t min media	Viento
18	0.65	25 °C	12 °C	6 km/h

- d. El uso-consumo potencial en el mes de diciembre es 5 mm/día.

- e. Se desea regar cuando se extraiga el 40 % de la humedad aprovechable del suelo.
- f. Los cultivos son: Cebolla 10 hectáreas
 Maíz 10 hectáreas
- g. Las pérdidas por percolación profunda son de 5 %
- h. Las pérdidas por derrames son de 30 %
- i. K_c cebolla = 0,45 K_c maíz = 0,50

Preguntas

- a. Determine cuántos riegos se necesitan dar en el mes de diciembre para ambos cultivos.
- b. ¿Cuánta agua en litros por segundos por ha necesitará el predio?
- c. ¿Qué capacidad debería tener un embalse para asegurar el riego?
14. En el levantamiento topográfico de un *piedmont* con futuro destino agrícola se han determinado los siguientes datos:

Angulo	Grados Centesimales	Trazo	Distancia (m)	Cotas
GAB	86.20	AB	211.25	45.59
ABC	180.00	BC	194.55	30.85
BCD	132.10	CD	221.15	26.09
CDE	97.20	DE	45.90	19.87
DEF	166.00	EF	103.26	22.91
EFG	203.00	FG	154.95	31.21
FGA	110.50	GA	292.86	42.70

a. Dibuje la superficie en escalas: 1:1 000; 1:2 000; 1:5 000.
¿Cuál escala de trabajo es recomendable usar? Determine el área topografiada.

b. Determine las pendientes del terreno y separe en el plano de escala 1:1 000 las superficies que presentan diferencias importantes de pendientes para el manejo.

c. En qué sentido orientaría los surcos de riego o el sistema de riego en las diferentes superficies de manejo, si se destinan a:

Cultivos de hortalizas
Frutales, plantados a 4 x 4 m
Empastadas permanentes

Explique las razones de su elección. De qué modo se modifican sus recomendaciones si se trata de un suelo profundo arcilloso; suelo delgado franco; suelo profundo con alta pedregosidad superficial.

d. Con las cotas determinadas es posible trazar las respectivas curvas de nivel. Explique.

15. ¿Qué mediciones, evaluaciones y determinaciones en terreno necesita Ud. para diseñar un sistema de riego superficial: por tendido, surcos y borde?

Señale qué estructura de riego se requiere para aforar los caudales necesarios para cada método.

16. ¿Cuál de los métodos de riego se recomiendan para las siguientes situaciones de campo? Explíquelos.

a. Suelo delgado a moderadamente profundo; de textura arcillosa en superficie y arcilla densa en profundidad, 40 % de gravas y piedras en superficie; pendiente mayor de 8 % y destinado a producción frutal; uva de mesa de 18 años de producción, plantación a 4 x 4 m.

La evaporación de bandeja máxima en el mes de enero es de 12 mm/día. El agua de riego se obtiene eventualmente de canal y con seguridad de un pozo profundo a 40 m con 8 horas de bombeo diario.

- b. Suelo profundo; franco arcilloso en superficie y arcilla poco densa con gravas en profundidad; pendiente mayor de 1.5 %, y destinado a producción hortícola: ajos y cebollas. La evaporación de bandeja máxima en el mes de diciembre es de 8 mm. La fuente de agua es la red de canales de la zona sin limitaciones de disponibilidad, incluso en los años de sequía.
- c. Suelo muy profundo; arcillo limoso en todo el perfil; pendiente mayor de 2 % y destinado a producción frutal asociada de damascos de 8 años en producción, plantados a 8 x 8 m, con bandas de alfalfa. La evaporación diaria estimada para enero es de 9 mm. La fuente de agua es un pozo profundo de 60 m.
- d. Suelo delgado a moderadamente profundo; franco arcilloso en superficie a franco arenoso en profundidad, con 60 % de piedras en volumen; pendiente mayor de 3 % y destinado a producción frutal: duraznos de 3 años plantados a 6 x 6 m. La evaporación máxima en enero es de 6 mm/día. La fuente de agua es la red de canales de la zona, sin limitaciones de disponibilidad, excepto en los años de sequía.
- e. Suelo muy profundo; derivado de ceniza volcánica; pendiente general de 7 % compleja; destinado a producción de remolacha. La evaporación máxima de enero es de 5 mm/día. El agua se bombea de estanques acumuladores de lluvia y escorrentía superficial y desde canales de desagüe y ríos.

- f. Suelo muy profundo; arcilla poco densa en la superficie y arcilla densa en profundidad; pendiente de 0,5 - 1,0 %, destinado a empastadas de larga rotación. La evaporación estimada para diciembre es de 10 mm/día. El agua se bombea de un pozo de 40 m de profundidad y eventualmente se usa el agua almacenada por la esorrentía de las quebradas del sector.
 - g. Suelo profundo; arcilla densa; pendiente de 1 %; destinado al cultivo de tomates conserveros y pulpa. La evaporación estimada es de 6 mm/día. El agua se obtiene de los canales del sector y de un pozo profundo.
 - h. Suelo profundo; arcilla poco densa en superficie y franco limoso en profundidad; pendiente simple del 1.5 %; destino frutícola: aguacates de 8 años en producción asociados a limones de 6 años. Las distancias de plantación son de 10 x 10 m y de 5 x 5 m. La evaporación estimada es de 8 mm/día. El agua de riego se obtiene de los canales del sector.
17. En un huerto de duraznos ya establecidos se desea conocer las pendientes transversal y longitudinal. ¿Qué tipo de nivelación y qué método emplearía?
18. Ud. quiere planificar el riego de un cultivo de alfalfa; si quiere obtener semilla indique si puede dejar de regar, si esto es conveniente y por qué.

BIBLIOGRAFIA

1. BISHOP, A.A., JENSEN, M.E., HALL, W.A. Surface Irrigation Systems. In "Irrigation of Agricultural Lands". Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967. p. 865-870.
2. BOOHER, L. I. El riego superficial. Cuadernos de Fomento Agropecuario de FAO, N° 95, Roma. 1974. 161 pp.
3. DONEEN, L.D. Irrigation Practice and Water Management. Irrigation and Drainage Paper N° 1. FAO, Roma. 1971. 84 pp.
4. EDE, R. Sistemas de Riego. Editorial Librería General, Zaragoza, España. 1962. 161 pp.
5. SCS NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. Planning Farm Irrigation Systems. Section 15 Irrigation. Capítulo 3, USDA. 1967. 92 pp.

Este Capítulo ha sido preparado por el autor con base en el trabajo de L. I. Booher², para su uso en los cursos de Planificación y Diseño de Sistemas de Riego que dicta en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 11

RIEGO POR TENDIDO Y RIEGO POR BORDES

INTRODUCCION

Los métodos de riego más sencillos utilizados para reponer en el suelo el agua consumida por los cultivos, cuando se requiere mojar toda la superficie, son el riego por tendido y el riego por bordes. La eficiencia de aplicación del agua, en el caso de estos dos métodos de riego, es comparativamente baja; por condiciones de diseño, cuando el suelo tiene una cierta pendiente en el sentido del flujo del agua, se requiere necesariamente que exista una pérdida por percolación profunda en la parte superior del campo y una pérdida por escurrimiento en la parte inferior del campo, para lograr uniformidad en la aplicación a lo largo del campo regado, esto es para mojar todo el perfil del suelo hasta una profundidad adecuada en todos los puntos del terreno, desde el extremo inferior hasta el extremo superior.

La percolación profunda del extremo superior no excede generalmente el

10 % del total del agua aplicada y el porcentaje de pérdida de agua por escurrimiento superficial, cuando el riego es cuidadoso y el sistema de riego está bien diseñado, puede reducirse a un 20 %, de tal forma que la pérdida total de agua puede alcanzar a un 30 % del agua aplicada durante el riego; sin embargo, en la práctica normal de los métodos de riego superficiales —en los cuales el agua cubre toda la superficie del suelo (tendido y bordes)— el agricultor generalmente trata de evitar las pérdidas por escurrimiento superficial, que considera innecesarias, alargando en forma exagerada la longitud del campo regado, utilizando un volumen total de agua inferior al necesario para reponer el agua del suelo consumida por los cultivos o utilizando caudales de riego muy pequeños o muy grandes, ya sea para 'ahorrar agua' o para 'regar rápido'. Si bien con estas prácticas se eliminan las pérdidas por escurrimiento, se incrementa mucho las pérdidas por percolación profunda en el límite superior del campo regado, o se produce un riego no uniforme, en el cual no se alcanza a reponer el agua consumida por los cultivos en extensos sectores del campo, especialmente en la parte inferior (Fig. 1).

De esta forma, los sistemas de riego superficiales aparentemente tienen una alta eficiencia de aplicación; en realidad representan un riego poco adecuado desde el punto de vista de producción de las plantas. Debe insistirse mucho en el hecho de que los métodos de riego superficiales, aplicados en campos con pendientes, necesariamente deben operarse con pérdidas por escurrimiento superficial en la parte inferior del campo con el fin de lograr uniformidad. El diseño del sistema, adecuado a las características de infiltración del suelo, la pendiente y el caudal de agua disponible, y la operación adecuada del mismo, en cuanto a frecuencia de riego y cargas de agua a aplicar (tiempo de riego), permiten minimizar las pérdidas por escurrimiento y percolación profunda, mejorando así la eficiencia del sistema; sin embargo no pueden hacer que ésta alcance valores comparables a los de los métodos de riego mecánicos que se discuten en los últimos capítulos de este libro.

* RIEGO POR TENDIDO

El riego por desbordamiento natural, o riego por tendido, consiste en derramar agua a intervalos frecuentes desde una reguera construida a lo largo del extremo superior de un campo en pendiente. Se deja que el agua descienda libremente por la pendiente y se colocan regueras interceptoras a intervalos en sentido perpendicular al de la

pendiente para recoger el agua, que tenderá a acumularse en las depresiones, con el fin de redistribuirla más uniformemente. Este método de riego se utiliza sobre todo para regar cultivos de poco valor, sobre terrenos con pendiente en los que la uniformidad de distribución del agua no es una cuestión fundamental; también se usa frecuentemente en los suelos más densos de valles con topografía desigual. El éxito de este método depende generalmente del acierto en la elección de los puntos en que el agua se libera en las regueras, y en ajustar el tamaño de los orificios de modo que se libere la cantidad correcta de agua para cubrir el área servida, sin producir la erosión del suelo. Una vez establecido adecuadamente el sistema, se necesita un mínimo de mano de obra para regular el agua de riego.

Este método es el que más se emplea para plantas forrajeras perennes, que protegen el suelo contra la erosión por el agua. Su utilización en suelos poco profundos, tales como los suelos delgados que existen comúnmente en las faldas de las montañas, impide pérdidas excesivas por infiltración profunda resultantes de la falta de uniformidad en la distribución del agua. El riego por tendido se utiliza raras veces en suelos profundos, arenosos, con elevadas velocidades de infiltración, o en suelos con agregados inestables que erosionan fácilmente. No debe emplearse en suelos arcillosos en los que se abren grietas anchas al secarse. La presencia de grandes piedras, que frecuentemente se encuentran en los campos de las laderas de montañas, no perjudica seriamente el empleo de este método de riego. Puede usarse con ventaja pequeños caudales de agua, que a veces existen como corriente continua, sobre todo en pendientes muy pronunciadas; sin embargo, un pequeño embalse de acumulación ayudará a utilizar estas pequeñas corrientes. Puede usarse también grandes flujos para el riego por tendido, cuando la pendiente es poco pronunciada y uniforme en el sentido del movimiento del agua.

Para utilizar este método de riego se necesita un mínimo de nivelación o emparejamiento del terreno. La remoción de tierra puede limitarse a eliminar pequeñas elevaciones y depresiones en la superficie del terreno, procurando un drenaje del exceso de agua superficial y una superficie sobre la cual pueda trabajar la maquinaria agrícola con un mínimo de obstáculos. Esto constituye una ventaja importante cuando los suelos son poco profundos y la cantidad de tierra que puede removerse es limitada.

Regueras

El sistema de distribución necesario para el riego por desbordamiento consiste en las acequias de abastecimiento, que corren usualmente a lo largo de la pendiente, y las regueras de contorno que van transversales a la pendiente. Normalmente, se usa una pendiente de 0.5 por ciento (50 cm por 100 m) para las regueras de contorno. El método usual de construcción consiste en arar a lo largo de la línea de la reguera y luego formarla con una paleta angular unida a un tractor ligero. En pendientes más agudas el reborde se coloca solamente sobre el lado de pendiente descendente de la reguera; en terrenos más planos, se necesitan rebordes a ambos lados de la reguera. Algunas veces las regueras se revisten de hormigón para evitar la erosión, combatir la maleza y eliminar la necesidad de reformarlas cada uno o dos años.

Las regueras de recogida o interceptoras se construyen a intervalos en la pendiente, para la redistribución del agua. A veces hay que conducir más agua desde la acequia de abastecimiento a las regueras interceptoras con el fin de proporcionar un flujo adecuado para regar las partes más bajas del terreno. La práctica corriente es que estas regueras interceptoras estén separadas a intervalos de 30 a 60 m o a diferencias de altura de 2 a 3 m, según cuál distancia sea menor. Las regueras interceptoras deben inclinarse, apartándose de puntos bajos para poder conducir el exceso de agua a los puntos más altos. La pendiente y la separación de las tomas para las regueras interceptoras son iguales que para las acequias transversales de la parte superior del terreno.

El caudal que se necesita llevar a las regueras dependerá de la superficie que se quiere regar y si se está usando un caudal grande intermitente o un caudal continuo. Generalmente se necesita un caudal continuo de 0.7 a 1 litro por segundo por hectárea. Cuando se emplea un caudal intermitente hay que aumentar proporcionalmente la capacidad de las regueras.

Tomas

La distribución uniforme se consigue regulando la salida de agua de las acequias transversales; cuando los rebordes u orillas de la acequia están estabilizados (por ejemplo, mediante el empleo de revestimiento de hormigón) es posible, algunas veces, distribuir el agua por

rebalse sobre las orillas. Esto requiere cuidado en la construcción de los rebordes de la acequia a la altura correcta para obtener un derrame uniforme en las cantidades necesarias dentro de cada tramo de la acequia. La práctica más corriente para regular la salida de agua es disponer de bocas o aberturas a lo largo de la acequia, usualmente separadas 2 a 3 m. Las bocas o tomas pueden hacerse rompiendo con la pala los rebordes de la acequia, colocando piedras o empleando césped para la cresta y los lados de las aberturas, con lo que se contribuye a evitar la erosión. Cuando los canales están revestidos de hormigón se utilizan a menudo pequeñas tomas estriadas en las que pueden colocarse compuertas, como se explicó en el Capítulo 9.

Operación del sistema

La frecuencia del riego se determina por las necesidades de agua del cultivo y por la capacidad de retención de agua del suelo. Si se utiliza un caudal pequeño y continuo para regar, hay que establecer una rotación del agua para regar diferentes áreas del campo. Cuando se usa un caudal grande intermitente, se necesita también algún sistema de rotación del agua. Debe colocarse estructuras reguladoras en las acequias para llevar el agua a cada área que haya que regar como una unidad.

Se necesita considerable experiencia para poner en funcionamiento el método de riego por tendido. Antes de que el sistema pueda utilizarse con la máxima ventaja, hay que hacer muchos cambios en la colocación y tamaño de las tomas y algunos cambios en la colocación de las estructuras de regulación.

RIEGO POR BORDES

El método de riego por bordes o de escurrimiento por tablares, llamado también de fajas con caballones, utiliza diques paralelos que guían una lámina de agua en movimiento a medida que desciende por la pendiente. El terreno entre dos diques se llama tablar, banda, faja o borde. Estas bandas pueden tener una anchura variable entre 3 a 30 m y una longitud de 100 a 800 m.

Este método es el más conveniente para campos que tienen una superficie de 4 ha o más. Se necesita un caudal de agua relativamente grande, el terreno debe tener una pendiente moderada y uniforme, y para su utilización con la máxima eficacia se necesita una preparación

cuidadosa del suelo. Donde las condiciones son adecuadas para el riego por bordes, éste suele ser el método más eficiente para regar cultivos tupidos, tales como alfalfa, pastos, cereales de grano pequeño y otros cultivos de campo; se emplea asimismo para regar huertas y viñas.

Es esencial que el suelo tenga una superficie plana para que el agua pueda fluir descendiendo por la pendiente e infiltrar en el perfil del suelo a una profundidad casi uniforme. Esto requiere que el borde no contenga ninguna pendiente oblicua, surco u otra depresión donde puede acumularse caudal de agua.

Los suelos profundos, de textura media, permeables, son ideales para riego por el método de riego por bordes en el caso de plantas de raíces profundas, tales como alfalfa, huertos frutales y viñas. Las plantas de raíces poco profundas, como pastos y cereales, pueden también regarse eficazmente por este método en suelos de baja velocidad de infiltración o en suelos delgados. Para las plantas de raíces superficiales con suelos arenosos con elevadas velocidades de infiltración de agua, el riego por bordes puede dar lugar a excesivas pérdidas por percolación profunda, a menos que los bordes sean muy cortos; en este caso se parecería al método de riego por compartimientos o tazas.

La velocidad con que se infiltra el agua en el suelo es de mayor importancia en el caso del riego por bordes que en el riego por compartimientos. Como el agua está descendiendo constantemente por los bordes, es preciso regular la velocidad mediante el control del volumen de la corriente para que el agua cubra el suelo durante el tiempo necesario para infiltrar uniformemente en el perfil del suelo. Los suelos arenosos, con alta velocidad de infiltración y baja capacidad de retención de agua, requieren de una colocación muy rápida del agua sobre el borde para que pueda aplicarse una lámina relativamente poca profunda de agua de modo uniforme. Los suelos arcillosos, con una baja velocidad de infiltración y alta capacidad de retención de agua, necesitan una lenta distribución, de modo que pueda aplicarse una mayor carga media de agua. La velocidad de distribución del agua sobre la superficie se regula por el ancho y la longitud del borde, la pendiente, la resistencia al flujo debida a la vegetación o a la aspereza del terreno, y el caudal empleado para regar.

La erosión del terreno no suele ser un problema en el caso del riego por borde, si se tiene cuidado en preparar el terreno de manera que el agua no se acumule en canales estrechos a lo largo de puntos bajos. Haciendo crecer una cobertura de plantas tupidas mediante la humedad del suelo suministrada por las lluvias (siembras de invierno), se contribuye también a proteger el suelo contra la erosión cuando se aplica el riego por este método.

Problemas de pendiente en los bordes

La pendiente en la dirección en que desciende el agua al escurrir por el borde ha de ser uniforme o ligeramente decreciente. Debe evitarse un aumento en la pendiente, ya que haría aumentar la velocidad del flujo de agua y daría origen generalmente a una distribución desigual de la misma y quizás a la erosión del suelo. Una excepción a esta regla general es el primer tramo del borde, a la entrada del agua, que debe ser plano (pendiente 0). La falta de pendiente en los primeros 10 a 15 cm contribuirá a repartir el agua sobre la anchura total antes de que empiece a descender por el borde.

Algunas veces se sigue la costumbre de que no haya pendiente en los últimos 30 a 50 m de cada borde para crear una superficie plana sobre la cual pueda encharcarse cualquier exceso de agua. Esto puede justificarse en suelos permeables con buen drenaje interno, pero no debe emplearse en suelos de textura fina, donde hay probabilidad de que el agua quede encharcada durante períodos de más de 24 horas. En tales suelos, la pendiente debe continuar hasta el final del borde; debe usarse una zanja de drenaje para eliminar cualquier exceso de agua.

Se necesita una pendiente mínima para conseguir el gradiente hidráulico requerido para que el agua descienda por los bordes; esa pendiente permitirá también drenar las aguas excedentes que, en caso contrario, se acumularían en depresiones pequeñas causadas por la sedimentación del suelo o por las irregularidades en el trabajo de nivelación. El drenaje es de particular importancia en suelos de baja velocidad de infiltración donde el agua estancada puede causar daños a los cultivos. Se recomienda una pendiente mínima del 0.2 % cuando se riega alfalfa, huertos o viñas que requieren riegos abundantes relativamente poco frecuentes a causa de sus características de enraizamiento profundo. Se recomienda una pendiente mínima del 0.3 % para cultivos de enraizamiento poco profundo, tales como pastos, que exigen riegos cortos pero frecuentes.

Los suelos franco-arenosos con pendientes hasta de 2 % pueden regarse con buenos resultados por el método de riego por bordes, después del establecimiento de cultivos tupidos, si se usa el caudal adecuado de agua. Los pastos sembrados en suelos arcillosos que forman agregados estables al agua, se riegan por este método con pendientes de hasta el 7 % sin que se haya presentado ningún problema serio de erosión.

En un sistema ideal de riego por bordes no habría pendiente transversal (perpendicular a la dirección de los diques) dentro de una faja. Sin embargo, los diques adyacentes pueden tener alguna diferencia de altura. Esta diferencia no debe pasar de $\frac{1}{4}$ de la profundidad normal de agua cuando desciende por la faja. La profundidad de agua depende del tipo de planta que se está cultivando y de la rugosidad del suelo, pero depende más de la pendiente en la dirección en que el agua está fluyendo. Si la pendiente del suelo es del 0.1 al 0.2 %, la profundidad del agua será de 10 a 12.5 cm, y la diferencia de altura tolerable a través de la faja podrá alcanzar hasta 3 cm. Las profundidades disminuyen marcadamente a medida que aumenta la pendiente, lo cual implica que hay que tener mayor cuidado en la nivelación transversal del borde con terrenos en pendiente que con terrenos planos. Con bordes estrechos, se contribuirá a resolver las dificultades que resultan de la irregularidad de la superficie del terreno.

La mejor manera de evitar la pendiente transversal es hacer que el agua fluya en la dirección de la pendiente máxima. Construir los diques en ángulo recto con respecto a las curvas de nivel del terreno significa que no habrá pendiente transversal natural. Esta es la práctica que se sigue usualmente, pues se ha comprobado que la eliminación de la pendiente transversal es de mayor importancia para reducir la erosión del suelo que la pendiente en la dirección en que fluye el agua.

Para simplificar el riego y otras operaciones de cultivo lo más conveniente, en general, es disponer de diques paralelos a los deslindes del campo. Si el campo tiene una pendiente en ambas direcciones, habrá alguna pendiente a través de las fajas que deben considerarse al proyectar el diseño de riego. Esto puede hacerse eligiendo la anchura adecuada de los bordes o nivelando la superficie del terreno a través de cada borde. Por ejemplo, si la pendiente transversal es del 0.2 % y la diferencia de altura máxima tolerable a través de la banda es de 3 cm, la anchura de las fajas puede aumentar hasta 15 m sin que

necesite ninguna nivelación transversal especial dentro de las mismas. Para pendientes transversales mayores, el ancho de los bordes se haría correlativamente menor. Para mantener los bordes en un ancho conveniente, es factible algunas veces hacer la nivelación transversal dentro de los bordes, de modo que no se sobrepase la diferencia de altura permisible. Por ejemplo, si el terreno tiene una pendiente transversal del 0.5 % y se quieren emplear bordes de escurrimiento de 15 m de anchura con una diferencia de altura tolerable de 3 cm, será necesario mover 2.25 cm de espesor de suelo desde el dique superior hasta el inferior del borde. Esto crearía una diferencia de altura de 4.5 cm entre la superficie del suelo sobre los dos lados de un dique. Esta diferencia no debería exceder de 6 cm cuando se emplea el tipo normal de dique; de lo contrario, hay probabilidad de que se produzca fuga como consecuencia de fallas en el dique, por la acción de animales minadores o el pisoteo de los animales.

Dimensiones del borde

Se ha estudiado algunas de las limitaciones del ancho de los bordes impuestas por la topografía. Comúnmente se emplean anchos de 15 a 20 m en campos relativamente planos y, en condiciones ideales, los bordes pueden ser aún más anchos. Con pendientes del 0.3 al 0.4 %, el ancho no debe pasar de 10 a 12 m. Sobre terreno con pendientes del 0.5 por ciento o más, debe estar limitada a 6-8 m de anchura y, cuando hay que emplear caudales pequeños, este ancho puede reducirse a 4 m para obtener una infiltración adecuada de agua en el suelo.

El caudal disponible para el riego puede ser también un factor limitante en la determinación del ancho. Como sucede con el riego por compartimientos, el flujo de agua tiene que ser suficiente para permitir cubrir todo el borde en un tiempo razonable. Si el caudal es limitado, hay que reducir correlativamente el ancho y también la longitud del borde, de modo que no se pierda el agua por infiltración profunda en el extremo superior, antes de que llegue al extremo inferior. Esta relación se explica más detalladamente en el párrafo sobre necesidades de caudal.

Otro factor que merece considerarse es el ancho de la maquinaria de recolección que se ha de emplear. Por ejemplo, si la longitud de cuchilla que se usará para regar la alfalfa es de 2 m, la anchura del tablar para escurrimiento empleado para riego deberá ser un múltiplo

de 2 m. Dicho de otro modo, en el diseño del sistema de riego siempre se deberá tener en cuenta otras prácticas culturales propias del cultivo a regarse.

Desde un punto de vista económico, los bordes deben ser lo más largos posibles y mantener, no obstante, una eficiencia razonable en la aplicación del agua. Cuanto más largos sean los bordes empleados, menor será el costo del sistema de distribución y la mano de obra necesaria para el riego.

Al decidir la longitud, el primer factor a considerar es el tamaño y forma del campo. Los bordes habitualmente van a lo largo de los terrenos pequeños, pero en los campos más grandes puede ser necesario dividirlos para que las longitudes de los mismos sean $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., de la longitud total del campo. Hay que instalar acequias de abastecimiento o tuberías a través del extremo superior de cada recorrido de riego y debe tenerse en cuenta el costo del sistema de distribución al diseñar el sistema de riego.

La longitud de los bordes debe estar en relación inversa con la velocidad de infiltración del suelo. En suelos con velocidades de infiltración muy bajas, los bordes pueden alcanzar a veces una longitud de hasta 800 m. Estas longitudes son frecuentemente ventajosas, porque permiten que el agua corra un tiempo suficiente para garantizar que penetre sin causar excesiva escorrentía en los extremos inferiores de los bordes. En suelos con velocidades de infiltración muy grandes puede ser necesario limitar su longitud a 100 m o menos.

Hay también otros factores que ejercen influencia sobre la longitud del borde que debe usarse. Normalmente, ella puede aumentarse a medida que aumenta la profundidad de agua que hay que aplicar. Esto está relacionado con la profundidad de enraizamiento de la planta y con la capacidad de retención de agua del suelo; por ejemplo, pueden emplearse bordes más largos para plantas de raíces profundas, cultivadas en suelos arcillosos, que para las de raíces poco profundas cultivadas en suelos arenosos. Todo incremento en la resistencia al flujo de agua, que resulte de la densidad de la cubierta vegetal, de la aspereza del suelo, etc., requerirá una disminución correspondiente de la longitud del borde. Sobre pendientes más suaves (hasta 0.5 a 1 %, según sea la erosión del suelo), la longitud del borde puede aumentarse a medida que aumenta la velocidad de flujo del agua (que está en relación con la pendiente). Sobre pendientes más pronunciadas puede ser necesario limitar la velocidad para evitar la

erosión, y en estos límites de pendiente puede ser necesario disminuir la longitud a medida que aumenta la pendiente. La longitud también puede estar limitada por el caudal disponible, aunque un ajuste de esta naturaleza debe hacerse en la anchura del borde siempre y cuando sea práctico. Cuando se presentan suelos de características muy diferentes en el mismo campo, las longitudes del borde deben ajustarse de manera que sólo se incluyan suelos con velocidades de infiltración similares en un solo borde; de otro modo, la distribución del agua no será uniforme.

Caudal de agua en el riego por borde

El caudal de agua suministrada a cada borde es uno de los factores que puede variar después de que se ha instalado el sistema de riego. Por consiguiente, puede compensar parcialmente las desproporciones de ancho o longitud del borde y los cambios que hayan podido tener lugar en las velocidades de infiltración del suelo o en la profundidad de enraizamiento de las plantas. Sin embargo, el caudal necesario debe determinarse lo más exactamente posible al proyectar el sistema.

Frecuentemente conviene expresar la magnitud de la corriente necesaria en términos de velocidad de flujo de agua por unidad de ancho del borde, por ejemplo en litros por segundo por metro de ancho. Esto suele llamarse unidad de flujo; este valor, multiplicado por el ancho del borde, es el caudal que hay que suministrar a cada borde.

Cuando el agua para riego se lleva a un terreno a velocidad constante, es posible en general variar la cantidad que va a cada borde cambiando el número de los bordes que se riegan de una vez; una excepción se produce cuando la corriente disponible es tan pequeña que hay que emplear todo el flujo en un único borde. Este factor debe tenerse en cuenta al elegir la anchura del borde; para que el sistema de riego pueda funcionar con cierta flexibilidad, se debe disponer de la suficiente agua para que puedan regarse dos o más bordes de una vez.

La altura de agua aplicada puede regularse por el caudal disponible. Se usa un caudal mayor para aplicación de una altura pequeña de agua y un caudal menor para aplicación de una altura grande. Esto es debido a que la cantidad de agua que penetra en el suelo está

relacionada con el tiempo de oportunidad de infiltración, que a su vez está en relación con la rapidez con que puede cubrirse la totalidad del área del tablar con la corriente de agua. Por tanto, si se varía el caudal es posible variar la altura de agua aplicada.

En condiciones favorables puede conseguirse un riego uniforme haciendo penetrar un flujo constante de agua en el borde. Cuando el agua ha alcanzado un punto determinado aguas abajo del borde (generalmente a $\frac{3}{4}$ del largo), se cierra el flujo. El agua que hay por encima de la superficie del terreno sobre la porción mojada del borde fluye hacia el extremo inferior, completando el riego. La uniformidad depende del empleo de un caudal adecuado y de terminar éste en el momento oportuno. Hay varios factores que determinan las condiciones que permiten el uso de un caudal constante, para obtener una distribución uniforme de agua. Un factor importante es el volumen de agua que hay encima del terreno cuando se detiene el flujo, y que está relacionado con la pendiente. La aplicación de un flujo constante proporciona corrientemente los mejores resultados sobre suelos de textura media con pendientes de 0.2 a 0.3 %; en pendientes de más de 0.5 % la profundidad será probablemente demasiado pequeña para una distribución uniforme.

La uniformidad de distribución es sólo uno de los criterios para un buen riego; hay que tener en cuenta también si éste es adecuado. Si la profundidad a que se aplica el agua es excesiva, hay que aumentar la unidad de flujo, acortar la banda o renivelar el terreno para dar una pendiente más pronunciada. Si la profundidad es inadecuada puede reducirse la unidad de flujo, puede alargarse el borde o reducirse el caudal cuando el agua se acerca al final del mismo, continuando con el flujo menor hasta que se ha aplicado el agua a la profundidad necesaria. Quienes riegan prefieren habitualmente un único flujo constante, debido a que así se necesita menos vigilancia. Si se aplica muy poca agua, puede regarse con más frecuencia a profundidades menores para satisfacer las necesidades de agua de la planta.

Formación de los diques

Los diques empleados en el riego por bordes sirven únicamente para guiar el agua según fluye por los bordes. Tienen que ser suficientemente altos para confinar el agua dentro del borde que se está regando, pero no tanto que obstaculicen las operaciones de cosecha;

deben ser de forma tal que los cultivos tupidos sobre ellos puedan obtener humedad del suelo, utilizando así la totalidad del área del campo para la producción.

Los diques utilizados para regar terreno plano con grandes caudales de agua pueden tener mayor altura que los utilizados sobre terrenos en pendiente con caudales pequeños. La altura debe ser por lo menos 3 cm mayor que la profundidad máxima a que el agua fluye en los bordes; la altura necesaria, después de que el suelo se ha asentado en los diques, puede variar desde 12 a 18 cm.

Los lados de los diques deben tener suficiente pendiente para producir estabilidad al suelo cuando está húmedo. Los diques formados con suelo arcilloso pueden construirse a menudo con anchos de base de sólo 60 cm, mientras que los formados con suelo arenoso suelto pueden exigir anchos de base que lleguen hasta 2.4 m.

Los diques empleados para regar cultivos perennes, tales como alfalfa o pastos, se consideran como semipermanentes, mientras que los utilizados solamente para uno o dos riegos de un cultivo de cereales o en un huerto son provisionales. Hay que tener mayor cuidado al formar los diques que se utilizarán durante varios años que en el caso de los diques provisionales, particularmente en cuando se refiere a la eliminación del surco del que se toma suelo para formar el dique.

La primera operación al instalar el sistema de riego es marcar el campo en que ha de construirse los diques. Puede colocarse como guías en los dos extremos del campo jalones de banderín, separados a la misma distancia que ha sido elegida para el ancho de los bordes. Algunas veces conviene marcar el campo con un pequeño surco donde han de situarse los diques; esto ayudará a asegurar que sean derechos y estén espaciados a la distancia correcta.

Para formar los diques se realizan tres operaciones. Una es recoger suelo de una banda lo más ancha posible y depositarlo en un lomo; la segunda es comprimir y dar forma al dique; la tercera es nivelar el terreno entre diques para llenar todas las depresiones. Se utilizan tres tipos de equipo para efectuar estas operaciones. Para acumular el suelo en los lomos se utilizan alomadores de bastidor en A, amontonadores en forma de V, discos alomadores y varios tipos de traíllas. Para compactar y alisar los diques se utilizan rastrillos de cadena, rulos de anillos y trineos con formadores especialmente contruidos para que los diques resulten del tamaño deseado. Se utilizan

emparejadoras de arrastre y traíllas de paleta angular para nivelar los bordes, con el propósito de reducir cualquier pendiente oblicua y llenar cualquier pequeña depresión.

Los diques se interrumpen generalmente a una corta distancia desde el borde inferior en terrenos que tengan pendientes relativamente suaves. Dejando una holgura de unos 10 m al final y construyendo un dique a través del borde inferior del campo, se conseguirá que cualquier exceso de agua se mueva en la dirección de la pendiente transversal sobre campos adyacentes. El agua que no penetre en el suelo alcanzará finalmente el ángulo más bajo del terreno, donde pueda recogerse y conducirse a una zanja de drenaje o desagüe.

Regulación del agua

El riego eficaz por el método de riego por bordes exigirá una regulación exacta del agua a medida que se está llevando a los bordes. Los dispositivos empleados para regular el flujo deberán proporcionar una capacidad adecuada para entregar el caudal necesario, impedir cualquier fuga de agua cuando estén cerrados y ser de fácil manejo. El agua puede suministrarse a través de una acequia abierta o de una tubería colocada a través de la parte superior, o cabecera, de los bordes. Puede necesitarse también una acequia de drenaje a través de la línea inferior del borde para eliminar cualquier exceso de agua.

Las tomas, desde las acequias hasta los bordes, pueden ser compuertas de madera u hormigón equipadas con compuertas, tuberías colocadas a través de los costados de la acequia con controles de compuerta corrediza, o grandes sifones portátiles colocados sobre el costado de la acequia. El fondo de las tomas debe estar a una altura menor que la superficie del terreno, de manera que el agua descargue en un charco en el extremo, aguas abajo. La práctica de dejar circular agua que vaya a los bordes cortando el reborde de la acequia alimentadora es un mal procedimiento, a causa de que no se puede regular con exactitud la velocidad de flujo, puede producirse una erosión grave y algunas veces es muy difícil cerrar la brecha para detener la salida de agua.

Las tomas deben tener una sección transversal suficiente para que la velocidad del agua no produzca erosión en el suelo cuando entre en el borde. Las elevadas velocidades necesarias para obtener el

flujo deseado a través de tomas demasiado pequeñas tienen un elevado requisito de pérdida de carga, del que frecuentemente no se dispone; por consiguiente, es importante determinar el tamaño correcto de la toma necesaria.

DISEÑO Y EVALUACION DEL RIEGO POR TENDIDO

El riego por tendido no requiere ningún tipo de diseño especial, no emplea mano de obra especializada ni infraestructuras para distribuir el agua. El resultado que se obtiene es, por lo tanto, un riego no uniforme en el potrero y en el perfil, lo que afecta la disponibilidad del agua para las plantas. Este sistema de riego se utiliza muy poco en el mundo, ya que en todas las áreas regadas el agricultor se ha visto forzado a diseñar sistemas de riego más eficientes, pues debe pagar por el agua consumida para el riego; sin embargo, en algunos países es un método muy difundido.

Los antecedentes que deben considerarse para un diseño son los siguientes:

1. La carga de agua a reponer en el perfil del suelo con el riego; ésta puede estimarse a través del uso de ecuaciones empíricas de evapotranspiración, de mediciones de evaporación de bandeja clase A o a través de determinaciones de la humedad del suelo, estableciéndose la carga de agua a reponer en el perfil a través de la relación expresada en la Ecuación 11.1.

$$h = \frac{W_{cc} - W_a}{100} \cdot D^b \cdot H$$

Ecuación 11.1

en que

h = carga de agua a reponer en el suelo (cm)

W_{cc} = contenido de agua gravimétrico equivalente a capacidad de campo (%)

W_a = contenido gravimétrico de agua en el suelo en el momento de hacer la determinación (%)

- D^b = densidad aparente del suelo (gr/cm^3)
- H = profundidad del perfil del suelo hasta el cual se quiere reponer el agua consumida por los cultivos (cm).

2. El tiempo de riego o tiempo de contacto real del agua de riego con el suelo.
Recordando las ecuaciones de infiltración del Capítulo 6,

$$h = IA = CT^b$$

Ecuación 11.2

$$T = \sqrt[b]{\frac{h}{C}}$$

Ecuación 11.3

en que

- h = IA es la carga de agua a reponer en el suelo o la infiltración acumulada (cm).
- C = intercepto de la curva de infiltración acumulada para $T = 1$. **Ecuación 6.3**
- b = pendiente de la curva de infiltración acumulada. **Ecuación 6.3**

3. El largo óptimo del campo regado con una postura del agua se ha establecido como la distancia recorrida por el agua en la cuarta parte del tiempo de riego total necesario para reponer el agua en el perfil del suelo.

Debe contarse con una curva de avance del frente del agua, medida experimentalmente en terreno para el caudal más adecuado a utilizar durante el riego, y cuando el suelo tenga una humedad similar a aquélla que tendrá en un riego normal, tal como se presenta en la Fig. 49.

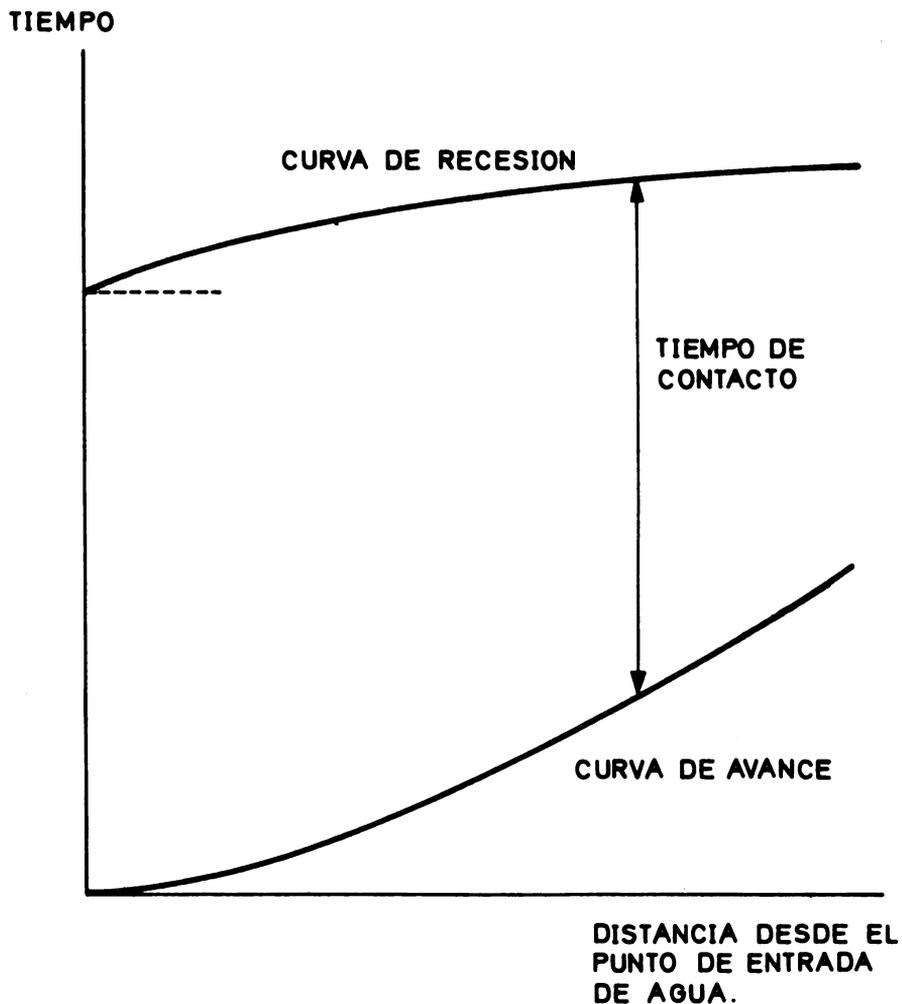


Fig. 49. Curva de avance del frente de agua durante el riego por tendido.

Para comprender el funcionamiento práctico de un riego por tendido específico es necesario evaluar, en el campo, la utilización del método. Se presenta a continuación un ejemplo resuelto de evaluación de un riego por tendido, con datos de campo, que puede servir como base para un trabajo similar que realice el lector como práctica.

Características del campo regado por tendido, en que se evalúa un riego típico

1) Estratificación:

	<u>H (m)</u>	<u>Db (gr/cm³)</u>	<u>Textura</u>
Estrata I	0.40	1.22	franca
Estrata II	0.60	1.35	franco arenosa

2) Curvas características de Humedad:

<u>(bares)</u>	<u>Estrata I w (%)</u>	<u>Estrata II w (%)</u>
— 0.1	39.0	27.0
— 0.3	27.0	20.0
— 0.8	19.0	15.0
— 1.0	18.0	14.0
— 2.0	14.0	12.0
— 5.0	10.0	8.6
— 15.0	7.2	6.2

3) Cilindro infiltrometría:

<u>(T) (minutos)</u>	<u>H (cm)</u>	<u>D (acumulada)</u>
5	13.2	—
10	10.1	3.1
15	8.6	4.7
20	7.7	5.6
30	6.6	6.7
45	5.6	7.7
60	5.0	8.3
90	4.3	9.0
120	3.8	9.5

150	3.5	9.8
200	3.1	10.2

4) Curva de avance y recesión

<u>Distancia desde el origen (metros)</u>	<u>T de llegada (minutos)</u>	<u>T de desaparecer (minutos)</u>
0	0	180
50	10	195
100	25	210
150	50	225
200	80	240
250	120	255
300	180	270

5) Caudal de entrada: 450 litros/seg y es constante

6) Tiempo total en la cabecera: 180 minutos (3 h)

7) Largo del campo: 300 m

8) Ancho del campo: 80 m

9) El riego anterior fue 20 días antes del riego que se evalúa

10) El consumo de agua del cultivo es 7 mm/día (U.C.)

11) Las raíces se encuentran distribuidas:

Estrata I 60 %
Estrata II 40 %

12) Cultivos totalmente desarrollados y todas las raíces absorben igualmente el agua.

Considerar en la evaluación: 1) Oportunidad del riego (frecuencia), Esto debe hacerse de acuerdo a un w (%) por estrata, y también de acuerdo con ϕ ; y considerando el consumo de agua del cultivo. 2) Operaciones cuantitativas que deben realizarse para mejorar la eficiencia de aplicación en un 35 %.

Desarrollo:	<u>% w</u>	<u>h (mm)</u>
Estrata I	27.0	131.7
Estrata II	20.0	162.0

El consumo de las plantas es 7 mm/día, pero como se riega cada 20 días, el consumo total es 140 mm. Por lo tanto después de 20 días; y multiplicando 140 por % Raíces:

$$\text{Estrata I: } 131.7 - (140 \times 0.6) = 47 \text{ mm}$$

$$\text{Estrata II: } 162.0 - (140 \times 0.4) = 106 \text{ mm}$$

Esto expresado en % w queda:

$$W = \frac{h \times 100}{D^b \times H}$$

$$\text{Estrata I } \frac{4.7 \times 100}{1.22 \times 40} = 9.6 \% \Rightarrow -5 \text{ (bares)}$$

$$\text{Estrata II } \frac{10.6 \times 100}{1.35 \times 60} = 13.09 \% \Rightarrow -2 \text{ (bares)}$$

Por lo tanto se está regando con tardanza; si se regara con un criterio de riego de 50 % humedad aprovechable, por ejemplo, quedaría:

Estrata I:

$$h_1 = \frac{(27 - 7.2)}{100} \times 1.22 \times 40 \times 0.5$$

$$(13.17 - 4.83) h_1 = 8.3 \text{ cm } \quad (\%) w = 17.08 \% \Rightarrow -1.0 \text{ bar}$$

Estrata II:

$$h_2 = \frac{(20 - 6.2)}{100} \times 1.35 \times 60 \times 0.5$$

$$(16.2 - 5.589) h_2 = 10.6 \text{ cm } \quad (\%) w = 13.09 \% \Rightarrow -1.7 \text{ bar}$$

Este no es un criterio adecuado, ya que sólo se mejora la primera estrata; es lógico que ésta cuente con menos humedad, ya que es allí donde existe la mayor evaporación y además está el mayor porcentaje de raíces. En el caso de la segunda estrata no existe mayor variación; por lo tanto, deberá fijarse en ese punto el criterio de riego.

En consecuencia, el riego para la situación en estudio debe darse según:

- a) el agua en el suelo
- b) consumo de agua del cultivo

Se riega cada 9 días resulta:

	7 mm/día x 9 días	63 mm
(h)	Estrata I: 131.7 mm	(63 x 0.6)
(h)	% : 93.9 mm	(%) w = 19.24 ⇒ -0.5 bar
(h)	Estrata II: 162.0 mm	(63 x 0.4)
(h)	% : 136.8 mm	(%) w = 16.88 ⇒ -1.0 bar

Con este criterio la ganancia neta es de 11 días, ya que antes se regaba la Estrata I a -5 bares y la Estrata II a -2 bares.

Para evaluar la eficiencia agronómica o de riego y sus componentes se tiene:

$$\text{Eficiencia Agronómica} = \frac{\text{Eficiencia de aplicación} \times \text{Eficiencia de almacenamiento} \times \text{Eficiencia de Distribución}}$$

$$E_{ap} = \frac{\text{Volumen total} - \text{Volumen Perdido}}{\text{Volumen Total}}$$

$$V_T = 450 \text{ litros/seg} \times 3.6 \times 3 \text{ h}$$

$$V_T = 4860 \text{ m}^3$$

pero se necesita conocer el volumen perdido que equivale a:

$$V_T = V_I + V_E$$

$$V_T = V_R + V_P + V_E$$

V_T = Volumen total aplicado
 V_I = Volumen infiltrado
 * V_E = Volumen escurrido
 V_R = Volumen en las raíces
 * V_P = Volumen Percolado
 (*) Pérdidas

Para calcular el volumen infiltrado es necesario conocer:

Tiempo que estuvo el agua en cada punto (tiempo de contacto)
 Lámina de agua que corresponde a ese tiempo.

Para conocer la lámina que equivale a un tiempo determinado, la ecuación de infiltración acumulada permite obtener esta información

$$1) \quad h = C T^b$$

$$\text{Cálculo de } b = \frac{\log. 9.8 - \log. 3.1}{\log. 150 - \log. 10}$$

$$b = 0.42517$$

- b = pendiente
 C = lámina al primer minuto
 h = lámina de agua en cm
 T = tiempo en minutos

Para el cálculo de b también se puede proceder a través de una ecuación de regresión; de esta forma se consideran todos los valores que se presentan en los datos de infiltración acumulada

$$b = \frac{N xy - xy}{N x^2 - (x)^2}$$

$$\text{como } h = C T^b$$

$$\log h = \log C + b \log T$$

$$Y = A_0 + b X$$

por lo tanto

$$Y = \log h$$

$$A_0 = \log C$$

$$X = \log T$$

$$N = 8; xy = 10.34; x = 12.38; y = 6.43; X^2 = 20.14; x^2 = 153.26$$

$$b = \frac{(8 \times 10.34) - (12.38 \times 6.43)}{(8 \times 20.14) - 153.26}$$

$$b = 0.3965$$

Como puede apreciarse, la pendiente calculada b es muy similar por ambos métodos de cálculo, lo que indica que casi todos los puntos caen sobre la recta de regresión.

Para el primer método se tomó 150 minutos, que es el tiempo más cercano a infiltración básica; en cambio, en el segundo método se tomó el tiempo de infiltración básica 120 minutos. Este último tiempo se tomó cuando las diferencias de las láminas dividido por las diferencias de los tiempos era $< 10\%$. Método para infiltración básica:

$$\frac{9.8 - 9.5}{150 - 120} = \frac{0.3}{30} = 0.01$$

$< 10\%$

$$\frac{10.2 - 9.8}{200 - 150} = \frac{0.4}{50} = 0.008$$

Para el cálculo de C se tiene:

$$A_0 = \frac{\Sigma y \cdot \Sigma x^2 - \Sigma x \Sigma xy}{N \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$A_o = \frac{(6.43 \times 20.14) - (12.38 \times 10.34)}{(8 \times 20.14) - 153.26}$$

$$A_o = 0.19 \quad C = 1.55$$

Por lo tanto la ecuación queda:

$$h = 1.55 T^{0.40}$$

Distancia (m)	T de llegada (minutos)	T de desa- parecer (minutos)	T en c/d pto. (minutos)	h (cm)
0	0	180	180	12.37
50	10	195	185	12.50
100	25	210	185	12.50
150	50	225	175	12.23
200	80	240	160	11.80
250	120	255	135	11.02
300	180	270	90	9.37

El valor de la media resulta en forma aproximada la lámina que infiltró: $h = 11.71$ cm; esta lámina, en 2.4 hectáreas da un volumen de: $0.1171 \text{ m} \times 24\,000 \text{ m}^2 = 2\,810.4 \text{ m}^3$.

Por lo tanto, comparando volúmenes:

$$V_T = V_I + V_E$$

$$4\,860 \text{ m}^3 = 2\,810.4 \text{ m}^3 + V_E$$

$$V_E = 2\,049.6 \text{ m}^3$$

$$V_T: 4\,860 \text{ m}^3$$

$$V_I: 2\,810 \text{ m}^3$$

$$V_E: 2\,049.6 \text{ m}^3$$

En el cálculo de la Eficiencia de almacenamiento se requiere:

$$E_{al} = \frac{h \text{ infiltrado}}{h \text{ para llevar a CC}}$$

El valor de h para llevar el suelo a CC se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Estrata I} \quad h_1 &= \frac{(27 - 9.6)}{100} \times 1.22 \times 40 \\ h_1 &= 8.49 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Estrata II} \quad h_2 &= \frac{(20 - 13.9)}{100} \times 1.35 \times 60 \\ h_2 &= 5.59 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$h_T = h_1 + h_2 = 14.09 \text{ cm}$$

$$E_{al} = \frac{11.71 \text{ cm}}{14.09 \text{ cm}} = 0.8312 = 83,12 \%$$

Se puede asumir que no existen pérdidas por percolación profunda, ya que la altura de agua que se necesita para llevar el suelo a CC es 14.09 cm y en ningún punto del campo regado se obtiene esa altura de agua; la mayor es 12.50 cm. El tiempo de riego no es el adecuado, ya que para infiltrar una lámina de 14.09 cm se necesitan:

$$14.09 \text{ cm} = 1.55 T^{0.40}$$

$$T = 248 \text{ minutos}$$

El caudal de riego debe ser menor, ya que hay demasiadas pérdidas por escurrimiento superficial.

Para el cálculo de la eficiencia de aplicación (E_a) tenemos:

$$E_a = \frac{W_s}{W_f} \times 100$$

W_s = Agua almacenada en radicular durante el

$$E_a = \frac{2\,810,4 \text{ m}^3}{4\,860 \text{ m}^3} \times 100$$

W_f = Agua de riego aporta campo.

$$E_a = 0.5782 \times 100$$

$$E_a = 57.82 \%$$

En el cálculo de la Eficiencia de distribución se tiene:

$$E_d = 100 \left(1 - \frac{\sum (h - \bar{h})}{n \bar{h}} \right)$$

\bar{h} = lámina promedio

h = lámina cada pto.

$\frac{h}{\text{(cm)}}$	$\bar{h} = 11.71 \text{ (cm)}$	$\frac{(h - \bar{h})}{\text{cm}}$
12.37		0.66
12.50		0.79
12.50		0.79
12.23		0.52
11.80		0.09
11.02		-0.69
9.37		-2.34
		$\Sigma = -0.18$

$$\frac{\sum (h - \bar{h})}{n \cdot \bar{h}} = -0.00219$$

$$E_d = 100 (1 - 0.00219)$$

$$E_d = 99.7 \%$$

$$\begin{aligned}
 \text{Eficiencia Agronómica} &= E_a \times E_{al} \times E_d \\
 E_{\text{ agronómica}} &= 0.5782 \times 0.8312 \times 0.997 \\
 E_{\text{ agronómica}} &= 0.479 = 47.9 \%
 \end{aligned}$$

Lista de prioridades de operación para mejorar la eficiencia de aplicación:

- 1) Largo de los paños de riego
- 2) Irregularidad superficial del terreno (pendiente y nivelación).
- 3) Espesor de lámina aplicada en cada riego.
- 4) Tiempos de riego y frecuencia de riego.
- 5) Regulación de caudales.
- 6) Instrucción de los operarios.

DISEÑO DEL RIEGO POR BORDES

En esta sección se presenta algunas consideraciones acerca del diseño del riego por bordes, como un antecedente para la solución del problema de diseño que aparece resuelto a continuación.

En el diseño del riego por bordes hay que considerar que se logrará una aplicación adecuada y eficiente del agua cuando se obtenga una combinación óptima de los siguientes factores: velocidad de infiltración, caudal, pendiente y carga de agua constante en cada riego, lo que implica no considerar la zona radicular en los primeros estados de crecimiento. Se calcula una zona radicular máxima, de modo que entre riegos consecutivos nunca falte agua; la profundidad a que llega el agua es siempre la misma, de manera que debe modificarse la frecuencia de riego para no cambiar el diseño.

En cuanto al tiempo de contacto T_c , su expresión se deriva de

$$\frac{dh}{dt} = AT^n \quad -1 > n > 0$$

Ecuación 11.4

$$h = \frac{AT^n + 1}{n + 1}$$

Ecuación 11.5

$$T_c = \frac{h (n + 1)^{1/n + 1}}{A}$$

Ecuación 11.6

El agua demora un cierto tiempo en llegar a los pies del paño de riego. Esto implica tener un tiempo total de riego T_t .

$$T_t = T_c + T_a$$

Ecuación 11.7

en que

T_a = tiempo de avance

La pérdida por percolación existe en este sistema a lo largo de toda la unidad regada, de acuerdo con la Fig. 50

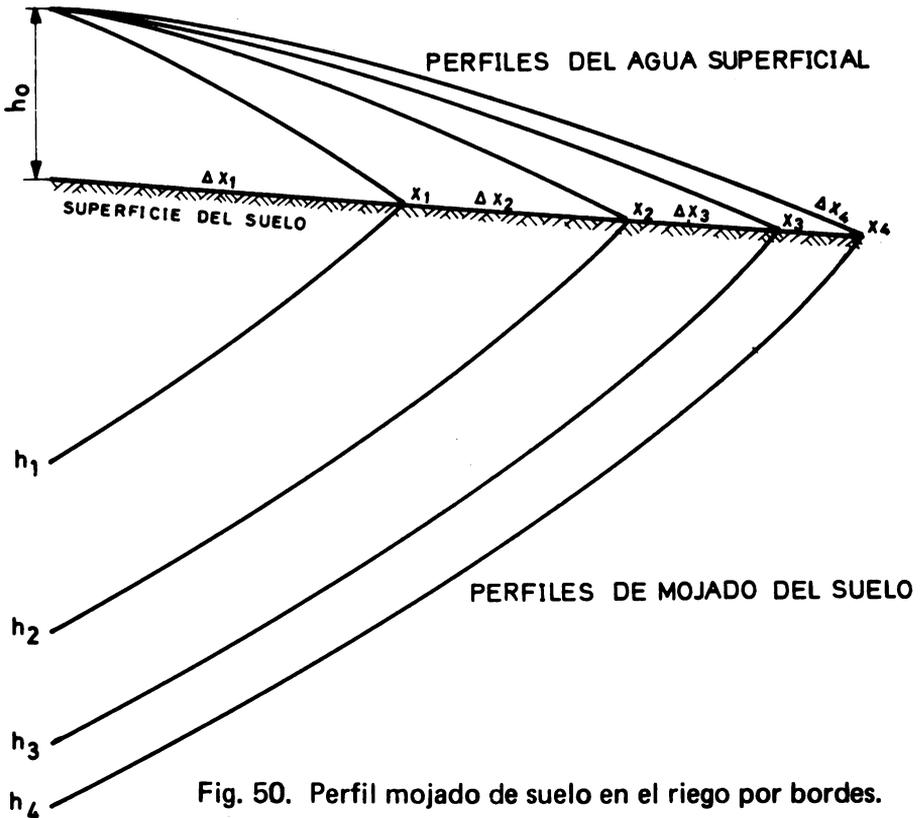


Fig. 50. Perfil mojado de suelo en el riego por bordes.

P = % de pérdida por percolación profunda

$$P = \frac{(R + 1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R + 1)^{n+1} + R^{n+1}} \times 100$$

Ecuación 11.8

$$R = \frac{T_c}{T_a}$$

Ecuación 11.9

en que:

T_c = tiempo de contacto

n = pendiente ecuación de infiltración

Con estas ecuaciones se puede calcular el tiempo de avance, dado un % de percolación predeterminado; conociendo el tiempo de avance, se puede calcular el largo del paño a regar por el método de bordes.

Es posible utilizar un caudal variable en el tiempo, de tal forma que las pérdidas por escurrimiento superficial sean mínimas al ir adecuando el caudal de entrada a la infiltración total acumulada en la unidad de riego, a medida que transcurre el tiempo; en esta situación, se tiene que la eficiencia de aplicación:

$$E_a = 100 - \text{Percolación}$$

Ecuación 11.10

El caudal que se ha de ocupar debe tener las siguientes características:

Caudal máximo y caudal unitario. Están determinados por el grado erosivo del suelo y por el caudal total con que se cuenta en el predio.

Para obtener esto, se ha definido un borde unitario.

Borde unitario = 100 pies de largo x 1 pie de ancho

$$Q_u = \frac{1}{E_a} \times \frac{t_c}{t_c - t_r} \times \frac{h}{7.2 t_c}$$

Ecuación 11.11

cuando:

Q_u (pies 3/seg) es el caudal unitario

h en pulgadas es la carga de agua (pulgadas)

t en minutos es el tiempo (minutos)

E_a (en fracción decimal) es la eficiencia de aplicación

t_r = lag de recesión. Período de tiempo que va entre el momento en que se corta el agua en la cabecera hasta el momento en que desaparece de esta superficie.

El tiempo de riego expresado en horas resulta

$$t = \frac{h}{432 E_a Q_u}$$

Ecuación 11.12

Considerando la erosión, se determina un caudal máximo.

$$Q \text{ máx.} = 0.06 s^{0.75} \text{ pies 3/seg}$$

Ecuación 11.13

El límite que se ocupa va de 0.12-0,15 pies 3/seg. por pie de ancho.

Hay que calcular un caudal mínimo.

$$Q \text{ min} = 0.04 s^{0.5} \text{ pies/seg}$$

Ecuación 11.14

Ejemplo de diseño de un riego por bordes

Un campo de 750 m de largo por 400 m de ancho (30 hectáreas) tiene una pendiente del 1.5 % en el sentido longitudinal, durante los primeros 300 m, y luego del 1.1 % en el resto del campo. En el sentido transversal tiene una pendiente pareja del 0.6 %. La profundidad del suelo alcanza a 1.0 m. Se dispone de un caudal total de 450 litros por segundo durante un tiempo máximo de 8 horas. El resto del tiempo el caudal es de 150 litros/seg.

Diseñe un sistema de riego por bordes para este potrero, si las características hidromecánicas del suelo son:

1. Prueba de infiltración (cilindro infiltrómetro)

Tiempo	Altura del agua en la reglilla	Tiempo	Altura del agua en la reglilla	Tiempo	Altura del agua en la reglilla
0	20.00	30	20.00	150	17.65
5	18.60	45	19.03	200	16.00
10	17.93	60	18.19		
15	17.40	90	16.75		
20	16.95	90	20.00		
30	16.17	120	18.76		

2. Curva característica de humedad

Potencial (bares)	Contenido de agua en base a peso (%)	Potencial (bares)	Contenido de agua en base a peso (%)
0.1	47.09	1	17.10
0.3	29.04	2	12.60
0.5	23.19	5	8.42
0.8	18.86	10	6.20
		15	5.19

3. Densidad aparente 1.2 gr/cm³
4. Criterio de riego. Reponer el agua cuando se ha consumido del suelo una carga de agua tal que la tensión con que está retenida el agua remanente sea de 1.5 bares.
5. Se permite una percolación profunda no superior al 6 % del agua infiltrada en el paño de riego.
6. El lag de recesión es de 25 minutos (tiempo que demora en desaparecer el agua en la cabecera del borde una vez que se corta el caudal).
7. Se cultivará alfalfa y el ancho de la segadora es de 3 m.

El diseño del riego por borde debe considerar:

1. El largo y el ancho de cada borde.
2. La altura de la lámina de agua dentro del borde.
3. La necesidad de nivelar dentro del borde, con el cálculo del movimiento de tierras (m³ a remover).
4. El caudal inicial a utilizar y la forma de reducirlo hacia el final del riego.
5. La eficiencia de aplicación alcanzada.
6. Curva de avance y recesión:

Metros desde el origen	Tiempo de llegada (m)	Tiempo de desaparecer (m)
0	0	180
50	10	195
100	25	210
150	50	225
200	80	240
250	120	255
300	180	270

Desarrollo del problema

1) Cálculo de la lámina acumulada:

$$h = C T^b$$

$$\log h = \log C + b \log T$$

$$Y = A_0 + b x$$

$$A_0 = \frac{y \sum x^2 - \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}; b = \frac{N \sum xy - \sum x y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Y	X	XY	X ²
0	0	0	0
0.1461	0.699	0.1021	0.4886
0.3160	1.001	0.3163	1.0020
0.4136	1.174	0.4879	1.3782
0.484	1.302	0.630	1.6952
0.584	1.479	0.8637	2.1874
0.682	1.652	1.1266	2.7291
0.752	1.778	1.3370	3.1612
0.850	1.956	1.6626	3.8259
*0.921	2.081	1.9166	4.3305
0.976	2.179	2.1267	4.7480
1.046	2.30	2.4058	5.2900

* Infiltración básica

$$\sum Y = 5.1507$$

$$\sum x = 13.122$$

$$\sum x^2 = 20.7958$$

$$(\sum x)^2 = 172.186$$

$$\sum xy = 8.4431$$

$$N = 9$$

$$A_0 = \frac{5.1507 \times 20.7958 - 13.122}{9 \times 20.7958 - 172.186} \times 8.4431$$

$$b_1 = \frac{9 \times 8.4431 - 13.133 \times 5.1507 \times 5.1507}{9 \times 20.7958 - 172.186}$$

$$h = 0.568 \times T^{0.560}$$

$$A_0 = -0.2455$$

$$C = 0.568$$

$$b = 0.560$$

2) Cálculo de altura de agua a reponer:

La tensión 1.5 bares está entre dos porcentajes de agua con base volumen 20.52 % y 15.12 % respectivamente. Existen dos formas de saber el contenido de humedad retenido a 1.5 bares:

- graficando los valores para obtener el contenido y humedad; y
- aplicando una transformación logarítmica a los valores extremos entre los cuales se encuentra el valor buscado (de este modo se interpola linealizando la curva)

<u>(bar) ϕ</u>	<u>log ϕ</u>	<u>(%) θ</u>	<u>log θ</u>
1.0	0	20.52	1.312
2.0	0.303	15.12	1.179

Al interpolar estos valores se obtiene:

$$\phi = 1.412$$

$$\% \theta = 17.59 \%$$

$$w = 14.66 \%$$

$$h = \frac{(29.04 - 14.66)}{100} \times 1.2 \times 100$$

$$h = 17.256 \text{ cm}$$

$$1725.6 \text{ m}^3 / \text{ha}$$

Cálculo del tiempo de contacto:

$$h = C T^b \quad h = 0.568 \quad T^{0.560}$$

$$17.256 = 0.568 T_c^{0.560}; T_c = 444 \text{ minutos}$$

Cálculo de R:

$$p = \frac{(R + 1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R + 1)^{n+1} + R^{n+1}} \times 100$$

$$\left(\frac{R + 1}{R} \right)^{n+1} = \frac{-(100 + P)}{P - 100}$$

$$R + 1 = R \left(\frac{-(100 - 6)}{6 - 100} \right)^{1/0.56}$$

$$R = 4.18$$

Cálculo del tiempo de avance

$$R = \frac{T_c}{T_a} \quad T_a = \frac{T_c}{R} \quad T_a = \frac{444.10}{4.18}$$

$$T_a = 106 \text{ (min)}$$

Tiempo total de riego:

$$T_t = T_c + T_a \quad T_t = 444 + 106$$

$$T_t = 550 \text{ (min)}$$

Cálculo del ancho y largo de la platabanda:

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Tolerancia}}{\text{Gradiente (transversal)}}$$

Considerando una tolerancia de 5 cm (extrema) entre pretilos y una gradiente transversal no modificada (0.6 %) se tiene:

$$\text{Ancho} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.006 \text{ m/m}} \qquad \text{Ancho} = 8.3 \text{ metros}$$

A estos 8.3 debe sumarse 1 metro de base de cada pretil (ya que esto es lo que se exige para cultivos de cortes). Por lo tanto en total quedan 10.3 metros ~ 10 metros de ancho.

El número total de platabanda con sus respectivos pretilos es:

$$\text{Nº de Platabandas transversales} = \frac{400 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 40$$

El largo del borde se calcula a través del criterio $4 \times T_a$, lo que da:

$$t = 4 \times 106.24 \qquad t = 425.0 \text{ min}$$

con este valor se entra al gráfico resultante de la curva de avance y se obtiene un largo de:

$$L = 398 \text{ m} \sim 400 \text{ m}$$

Cálculo del Caudal Unitario (Q_u):

$$Q_u = \frac{1}{E_a} \frac{T_c}{T_c - T_r} \frac{h}{7.2 T_c}$$

$$Q_u = \frac{1}{0.94} \frac{444,10}{444,10 - 25} \frac{6.9}{7.2 \times 444,10}$$

$$Q_u = 2.43257 \times 10^{-3} \text{ pies } 3/\text{seg}$$

$$Q_u = 2.43257 \times 10^{-3} \times 3,3 \times 28.32$$

$$Q_u = 0.2273382 \text{ litros/seg. por metro de ancho}$$

Considerando en forma aproximada 9 m de ancho (8.3 ~ 9) queda:

$$Q = 2.046 \text{ litros/seg}$$

El caudal unitario debe corregirse cuando la pendiente longitudinal sea mayor de 0.5 %. Esto no ocurre en este caso, ya que se ha considerado nivelar a 0.5 % longitudinalmente, debido a que los bordes quedan en forma permanente y el cultivo de alfalfa se adapta a esta pendiente en forma óptima. El costo que implica esta nivelación está compensado, y es la única forma de mejorar la eficiencia y aumentar con ello los rendimientos en cantidad y calidad.

Cálculo del Caudal máximo no erosivo:

$$Q \text{ máx: } 0.06 \times 0.5^{0.75} \text{ pies}^3/\text{seg}$$

$$Q \text{ máx: } 0.03567 \text{ pies}^3/\text{seg}$$

$$Q \text{ máx: } 3.33 \text{ litros/seg. por metro de ancho}$$

$$Q \text{ máx: } 30.3 \text{ litros/seg. por 9 metros de ancho}$$

Uso de Maquinaria:

El ancho del borde debe ser un múltiplo de la maquinaria; en este caso la segadora tiene 3 metros, por lo cual el ancho elegido es múltiplo (9 cm). Esto debe encuadrar con el límite de tolerancia utilizado

$$\begin{array}{r} 0.6 \text{ m} \quad \text{————} \quad 100 \text{ m} \\ X \quad \quad \quad \text{————} \quad 9 \text{ m} \\ \hline X = 5.4 \text{ cm} \end{array}$$

(Tolerancia: 5 cm)

(Q) Caudal inicial por borde.

Q máx: 30.3 litros/seg. Este caudal es calculado con 0.5 % de pendiente y en suelos descubiertos, por lo tanto en un suelo cubierto puede aumentarse incluso en un 50 %.

Por lo tanto el caudal a aplicar por borde queda (aumentado un 40 %):

$$Q \text{ máx: } 42.42 \text{ litros/seg}$$

$$Q \text{ reducido: } 14.14 \text{ litros/seg}$$

Cálculo de la eficiencia de aplicación:

$$E_a = \frac{\text{Volumen de agua en raíces (Vr)}}{\text{Volumen Aplicado}}$$

$$V_r: \quad h \text{ (a reponer)} \times \text{Area (del borde)}$$

$$V_r: \quad 0.17 \text{ m} \times (9 \times 400) \text{ m}^2$$

$$V_r: \quad 612 \text{ m}^3$$

$$V_a: \quad Q \text{ inicial} \times T_a + Q \text{ reducido} \times T_c$$

$$V_a: \quad (42.12 \times 3.6) \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{(106)}{60} \text{ h} + (14.14 \times 3,6) \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{444}{60} \text{ h}$$

$$V_a: \quad 647 \text{ m}^3$$

$$V_a + 6\% \text{ Percolación} = 686 \text{ m}^3$$

$$E_a = \frac{621.288 \text{ m}^3}{686.01 \text{ m}^3}$$

$$E_a = 0.905639$$

$$E_a = 90.56\%$$

Es importante enfatizar que se puede variar el caudal y ajustarlo a las necesidades; en este caso se ha querido utilizar este caudal para resaltar las pérdidas por escurrimiento superficial. Este caudal puede bajarse hasta que entregue justo lo necesario, de tal modo que las pérdidas por escurrimiento sean las mínimas.

Cálculo de altura de agua sobre la platabanda:

se tiene 0.15 pies³/seg 7 pulgadas (h)

$$\begin{array}{r} 127.39 \text{ litros/seg} \quad \text{—————} \quad 17.78 \text{ cm} \\ 42.42 \text{ litros/seg} \quad \text{—————} \quad X \end{array}$$

$$X = 5.9 \text{ cm}$$

La altura del borde será:

$$H_b = 5.9 \text{ cm} + 5.4 \text{ cm (límite de tolerancia)}$$

$$H_b = 11.3 \text{ cm}$$

Cálculo del Movimiento de tierras:

$$\text{Area del triángulo: } \frac{99.98 \times 1.5}{2} = 74.985 \text{ m}^2$$

$$\text{Area del triángulo: } \frac{99.99 \times 0.5}{2} = 24.997 \text{ m}^2$$

$$74.985 \text{ m}^2 - 24.997 \text{ m}^2 = 49.985 \text{ m}^2$$

$$\text{m}^3 \text{ a remover: } 49.985 \text{ m}^2 \times 400 \text{ m (largo)}$$

$$\text{a remover (m}^3\text{): } 199.94 \text{ m}^3$$

Este ejemplo de diseño de riego por borde corresponde a un caso real de campo en el cual ciertas características permiten el establecimiento del sistema con un costo relativamente bajo. No siempre se produce esta situación; algunas veces el costo de nivelación y construcción de bordes alcanza valores muy significativos. Sin embargo, no es posible establecer un límite en el cual esta inversión deje de ser rentable; ello depende del cultivo regado y de los rendimientos y precios posibles de obtener por la cosecha.

Al estudiar los costos del sistema de riego por bordes debe considerarse su vida útil, considerando que la inversión inicial se depreciará en el número de años que se espera que duren los bordes en funcionamiento en el campo; con prácticas anuales de mantenimiento, esa duración puede estimarse entre 10 y 15 años.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y EJERCICIOS

1. ¿En qué consiste el diseño de un riego por bordes?
2. Calcule la altura media de agua después de 1 hora en un borde de las siguientes dimensiones

ancho = 5 m

largo = 50 m

Q = 15 litros/segundo

VI = 2 cm/hora

3. Se hizo un ensayo de riego por bordes, en un suelo franco con infiltración básica de 2,5 cm/hora. El borde tenía las siguientes dimensiones: largo 300 m, ancho 6 m y pendiente 0,5 %.

Se requiere aplicar una carga de agua de 10 cm.

El Cuadro N° 18 presenta las curvas de velocidad de infiltración para este suelo y el Cuadro N° 19 las curvas de avance y recesión de la lámina de agua en el borde.

Analice las informaciones entregadas en cuanto a:

- a. Profundidad del perfil que se moja con la carga de agua aplicada.
- b. Uniformidad del riego.
- c. Eficiencia del riego.

- d. Pérdida por percolación profunda y/o escurrimiento superficial.
- e. Unidad de gasto ($Q_u = \frac{Q}{W.L.}$)

CUADRO N° 18 Velocidad de infiltración

Tiempo (minutos)	VI (cm/hora)
5	24.0
10	20.0
15	14.4
20	12.0
30	10.8
60	7.2
80	4.8
110	2.4
140	2.4
170	2.4

CUADRO N° 19 Curvas de avance y recesión

Estaca	Tiempo del agua que está en el terreno				Medida del agua			
	Avance de la lámina		Recesión de la lámina		Entrada		Salida	
	Tiempo	Tiempo acumulado (min)	Tiempo	Tiempo acumulado	Tiempo	Caudal litro/seg	Tiempo	Caudal litro/seg
0	8:00	0	11:50	230	8:00	comienzo	—	sin derrame
1	8:12	12	11:56	236	8:05	28.5	—	—
2	8:27	27	12:07	247	9:00	28.5	—	—
3	8:47	47	12:18	258	11:30	28.5	—	—
4	9:10	70	12:33	273	11:50			
5	9:36	96	12:49	289				
6	10:10	130	13:07	307				
7	10:45	165	13:20	320				
8	11:28	208	13:32	332				
9	12:14	254	13:42	342				
10	13:00	300	13:48	348				

BIBLIOGRAFIA

1. BISHOP, A.A., JENSEN, M.E. y HALL, W.A. Surface Irrigation. In "Irrigation of Agricultural Lands". Agronomy N° 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A. p. 865–884. 1967.
2. BOOHER, L.I. El riego superficial. Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 95, FAO, Roma. 1974. 162 pp.
3. HALL, W.A. Estimating Irrigation Border Flow. Agric. Engineering 37: 263–265. 1956.
4. MARR, I.C. The border method of irrigation. University of California, Agricultural Extension Service. Circular 408. 1958.
5. SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA. Border Irrigation. SCS National Engineering Handbook Section 15. 220 pp.

Algunos conceptos y metodologías desarrolladas en este Capítulo, han sido especialmente adaptados por el autor de Booher² y Bishop *et. al*¹.

CAPÍTULO 12

RIEGO POR SURCOS

INTRODUCCION

El método de riego por surcos se realiza haciendo fluir agua en pequeños canales (surcos) que conducen el agua a medida que desciende desde puntos altos hacia sectores de cotas inferiores del campo. El agua se infiltra en el fondo y los lados de los surcos, reponiéndose así el agua del suelo consumida por los cultivos; la nivelación cuidadosa del terreno para obtener una pendiente uniforme es esencial para que este método tenga una eficiencia y adecuación convenientes.

Los surcos son particularmente apropiados para regar plantas que están expuestas a daños por el agua que cubre la parte alta o los tallos de las plantas. Los cultivos en hileras, tales como hortalizas, algodón, remolacha azucarera, maíz, papas, cultivos de semillas, entre otros, se riegan por surcos trazados entre las hileras de plantas. Las huertas y las viñas pueden regarse trazando uno o más surcos entre las hileras de árboles o vides

para mojar la porción principal de la zona radicular. Una variación del método de surcos consiste en usar pequeñas corrugaciones en la superficie del terreno para regar cultivos tupidos, tales como cereales, alfalfa y pastos en general.

En contraste con la inundación que ocurre en el riego por tendido, el riego por surcos no moja la totalidad de la superficie del suelo; en consecuencia, la eficiencia del riego por surcos depende del movimiento lateral del agua desde los surcos. Este movimiento es importante no sólo en cuanto se refiere al mojado del suelo: hay que prestar también atención al movimiento de sales solubles, fertilizantes y herbicidas arrastrados por el agua. La mano de obra necesaria es, generalmente, mayor para este método que para cualquier otro sistema de riego superficial, excepto quizás cuando se riega en compartimientos pequeños. Se necesita tener considerable experiencia para dividir el agua llevada por la acequia de abastecimiento en los caudales necesarios para cada surco y para mantener las velocidades de agua correctamente hasta conseguir un riego adecuado.

CARACTERISTICAS DEL METODO DE RIEGO POR SURCO

Formas del surco y del lomo

La forma de los surcos y de los lomos puede ejercer una influencia considerable sobre la oportunidad y eficiencia del riego por surcos; la sección transversal de los surcos debe ser suficiente para conducir la cantidad de agua necesaria para obtener su distribución uniforme por toda la longitud del surco.

La forma más corriente de surco es el tipo en V. Estos surcos, de 15 a 20 cm de profundidad y 25 a 30 cm de anchura en la parte superior, conducirán normalmente un flujo aproximado de 2 litros por segundo en pendientes relativamente suaves. El agua, moviéndose a una profundidad de 15 cm en un surco de este tipo, tendrá una sección transversal de unos 250 cm². Esto equivale a una profundidad de 2.5 cm si se esparce uniformemente sobre el área entre surcos adyacentes separados por 1 m.

Los riegos empleados para la germinación de semillas requieren que el suelo cercano a la superficie de los lomos que contienen las semillas esté completamente mojado. Los surcos superficiales de 10 a

15 cm de profundidad facilitarán la penetración del agua en la superficie de los lomos. Estos surcos requieren nivelar cuidadosamente el terreno en pendiente uniforme, de manera que puedan llenarse profundamente con agua sin que rebasen los lomos, lo cual podría causar formación de costras en la superficie del suelo. Otro método consiste en emplear pendientes relativamente suaves (del orden del 0.05 %), que permitirán que el agua fluya profundamente en surcos de dimensiones normales sin erosionar el suelo.

Cuando se riegan plantas perennes o plantas anuales en pleno desarrollo, y por lo tanto con sistemas radiculares profundos, el objetivo principal es reponer el agua consumida de la totalidad de la zona radicular. Para tales plantas pueden usarse surcos más profundos; la pendiente del surco no es un factor tan importante en ese caso como con las plantas de raíces superficiales.

Los surcos de base ancha se utilizan a veces en terrenos que absorben el agua lentamente, o sea de baja velocidad de infiltración. Aumentando el perímetro mojado, el agua dispone de mayor superficie para infiltrar en el suelo. Estos surcos son aproximadamente en forma de U; generalmente tienen una anchura de fondo de 15 a 25 cm, aunque se han empleado anchuras de 60 cm o más para riego de huertas, viñas y cultivos muy espaciados, como tomates y melones.

El agua modificará las formas del surco a medida que desciende por la pendiente. En las pendientes pronunciadas, el agua tiende a formar un canal más estrecho; en pendientes más suaves forma un canal más ancho. Estas tendencias son más acusadas sobre los suelos arenosos que sobre los arcillosos. Para contribuir a mantener el agua esparcida sobre todo el ancho del surco, puede hacerse los fondos más rugosos o con ondulaciones, e incluso puede trazarse dos surcos menores en el fondo de un surco de base ancha.

La forma del lomo para cultivos escardados regados por surcos es normalmente plana o ligeramente redondeada. En cada lomo puede plantarse una o dos hileras de plantas; las cosechas de invierno o de principios de primavera en zonas más frías pueden tener lomos en pendiente para aumentar la exposición al sol.

La excesiva salinidad del suelo o del agua de riego puede crear problemas graves de germinación en el riego por surcos. Las sales solubles son arrastradas por el agua y tienden a acumularse en la

superficie y en el centro de los lomos. Estas sales impiden frecuentemente la germinación de las semillas y pueden causar daños graves a las plantas sensibles a la salinidad; como las sales tienden a moverse hacia el punto más elevado, los caballones se aloman a veces para controlar el sitio en que pudieran acumularse las sales. El lomo se forma cerca del centro del lecho en el caso de cultivos de doble hilera, o en un borde en el caso de plantas en hilera simple. Las semillas se siembran a lo largo de los bordes inferiores, lejos del lomo donde se acumulan las sales.

Separación de surcos

La separación de los surcos dependerá de la planta que haya de regarse, del tipo de maquinaria agrícola empleada y de la clase de humedecimiento que se obtenga por el movimiento lateral del agua en el suelo.

Muchos cultivos se plantan en hileras simples separadas de 75 a 105 cm para facilitar las operaciones de siembra, cultivo y recolección. Otros cultivos, particularmente hortalizas, se suelen plantar en dobles hileras sobre cada caballón; las plantas están separadas 40 cm sobre ellos y 60 cm entre lomos. El espaciado de surco en tales casos sería de 1 m. Suele utilizarse a veces una anchura tipo entre surcos para riego de varias plantas diferentes que admiten la misma maquinaria de cultivo; esto elimina la necesidad de cambiar la separación de los dispositivos de enganche del instrumento cuando se traslada el equipo de un cultivo a otro.

El movimiento lateral del agua desde los surcos en suelos con perfiles uniformes depende principalmente de la textura de suelo; en las arcillas, la imbibición es más amplia que en las arenas. Para obtener un humedecimiento completo de los suelos arenosos a profundidades de 1.2 a 1.8 m, los surcos no deben trazarse de ordinario con una separación mayor de 50 cm. En suelos arcillosos uniformes podría conseguirse el mojado completo a iguales profundidades separando los surcos 120 cm o más.

Los suelos de perfil no uniforme tendrán, en general, un movimiento lateral del agua mayor que los de perfil uniforme. El movimiento lateral aumenta siempre en suelos que descansan sobre capas menos permeables o de transición abrupta en la textura del suelo. El movimiento lateral del agua aumenta también por los altos niveles de la capa freática o las condiciones del agua estancada.

El objetivo principal al seleccionar la separación de los surcos es asegurar que el movimiento lateral del agua entre surcos adyacentes mojará la totalidad de la zona radicular de la planta antes de que llegue más allá de las profundidades desde las cuales las raíces pueden extraer el agua del suelo. Los tipos de mojado pueden determinarse fácilmente excavando una trinchera a través de un surco después que ha sido regado, a condición de que el suelo estuviera seco hasta una profundidad considerable antes de regar. Los exámenes de varios surcos en los que ha circulado el agua durante diferentes períodos suele ser el mejor método para elegir separaciones de surco para cada suelo particular.

Pendientes del surco

El modo más eficaz para aplicar el agua se logra cuando los surcos tienen una pendiente uniforme. Las pendientes no uniformes dan lugar, generalmente, a profundidades no uniformes de riego a lo largo de los surcos y pueden motivar que, como consecuencia de la erosión en las partes con más pendiente, se deposite tierra en las más bajas. Existe igualmente el peligro de que resulten dañadas las plantas porque el agua rebalse los lomos, si hay lugares bajos en el terreno donde pueda encharcarse agua.

Un surco es, en realidad, un pequeño canal; los principios que rigen el flujo de agua en canales abiertos son aplicables a los surcos. La velocidad del agua que fluye en un surco está relacionada con la raíz cuadrada de su pendiente. También influyen en la velocidad del agua la forma y la rugosidad del surco y la cantidad de agua transportada.

Para hacer que fluya el agua se necesita una pendiente que dé el gradiente de energía necesario. Si el fondo del surco es plano, como sucede frecuentemente con surcos cortos, la pendiente de la superficie del agua que está fluyendo da el gradiente de energía necesario. El agua continuará fluyendo mientras haya una pendiente respecto de la superficie del agua. Sin embargo, la pendiente del fondo del surco se usa normalmente para indicar la inclinación del surco. La pendiente se suele expresar como porcentaje (metros por 100 m). La pendiente no sirve solamente para hacer que el agua fluya en el surco; es necesaria además para que escurra por la superficie del terreno el exceso de agua de las lluvias o de riego.

La erosión del suelo es una limitación importante para el uso del método de riego por surcos; el sistema deberá proyectarse de modo que evite las circunstancias que pudieran contribuir al arrastre del suelo. La erosión está relacionada con la capacidad de erosión del suelo y con la velocidad del agua a medida que penetra en el surco o desciende por él. La capacidad de erosión no puede relacionarse con una única característica, pero guarda una cierta relación con la textura. Generalmente la máxima capacidad de erosión la presentan los suelos no cohesivos, en los cuales predominan las partículas de arena fina y de limo. Los suelos arcillosos se erosionan generalmente menos que los arenosos, pero esto depende de que las partículas de arcilla se dispersen por la acción del agua o formen agregados estables en el agua. Para evitar una erosión excesiva cuando se riega plantas de cultivo, la pendiente del surco en la dirección del movimiento del agua no debe exceder del 2 %. En zonas en las que llueve intensamente, las pendientes mayores del 0.3 % pueden dar como resultado la erosión del suelo.

Siempre que sea factible, los surcos deben ser rectos y paralelos a una orilla del campo. Si la topografía es tal que no sea económicamente factible nivelar el terreno de modo que la pendiente principal no exceda del máximo permisible para riego por surcos, habrá que tener en cuenta el cambio de dirección de éstos para que el agua fluya en la dirección de la pendiente menor, o bien los surcos puedan atravesar diagonalmente el terreno para conseguir la pendiente deseada. La explanación uniforme de un terreno con pendientes en dos direcciones es particularmente conveniente donde se practica la rotación de cultivos. Los cultivos escardados regados por surcos pueden plantarse cuando las hileras están en la dirección de la pendiente menor, y los cultivos tupidos pueden regarse por el método de bordes cuando los diques están en la dirección de la pendiente mayor. Esto exige cambiar la acequia de abastecimiento de una orilla del campo a otra, para poder llevar agua al extremo de cabecera de los recorridos de riego cualquiera que sea el método de riego que se esté empleando.

Surcos en curvas de nivel

En terrenos con pendientes no uniformes u ondulares no se pueden emplear generalmente surcos derechos con una pendiente uniforme. En tales casos, suele construirse surcos sobre una pendiente predeterminada; su dirección depende de la topografía. Estos surcos se llaman surcos en curvas de nivel.

Los tipos de surcos sobre terreno desigual suelen ser complicados, porque para mantener una separación apropiada entre surcos es necesario en ocasiones comenzar o terminar los surcos en el interior del campo. Cuando se emplea para regar cultivos anuales es preciso trazar de nuevo los surcos para cada cultivo. El límite de las pendientes del terreno que puede usarse para regar cultivos de campo y de hortalizas con surcos en curvas de nivel es del 8 al 10 %.

Generalmente se lleva el agua a los distintos surcos por medio de canales con compuertas o tuberías. A cada surco se conducen flujos unitarios relativamente pequeños, para evitar el rebalse que podría producir erosión grave. Esto exige emplear pendientes más pronunciadas y longitudes más cortas que las adoptadas corrientemente en campos nivelados de modo uniforme.

Hay que disponer de medios para drenar el exceso de agua de lluvia o de riego que pudiera acumularse en los surcos; para ello puede emplearse conducciones cubiertas de hierba situada en las zonas bajas, tubos de hormigón o zanjas revestidas, con entradas adecuadas.

No debe regarse por el método de surcos en curvas de nivel los suelos en que se abren grietas anchas al secarse. Se necesitará combatir los roedores con el fin de evitar fugas de agua desde los surcos más altos a los más bajos. El regador debe tener, además, gran cuidado de evitar que salga el agua de los surcos por rotura de éstos; cualquier descuido en la distribución del agua donde se utilice el riego por surcos en curvas de nivel presenta un grave problema potencial de erosión.

Surcos en zigzag

Algunas veces se emplea surcos en zigzag para aumentar la longitud que tiene que recorrer el agua para llegar al extremo del recorrido de riego. Aumentando la longitud se reduce la pendiente media y la velocidad del agua; esto significa que un flujo determinado de agua fluirá a más profundidad por los surcos, aumentando la infiltración en suelos poco permeables.

El método utilizado para construir surcos en zigzag dependerá del equipo disponible. En los huertos, los surcos se forman a veces en sentido descendente de la pendiente y a través de ésta, con máquinas;

el bloqueo necesario para dirigir el flujo de agua se hace con pala, a mano. Actualmente, máquinas especiales pueden realizar, en una sola operación, el recorrido completo que se diseña para los surcos en zigzag.

Longitudes de surcos

Hay que elegir con cuidado la longitud de surco. Las exigencias de mano de obra y los costos del riego aumentan a medida que los surcos van siendo más cortos, mientras que la uniformidad en la aplicación del agua suele disminuir a medida que los surcos van siendo más largos. Por consiguiente, los surcos deben alcanzar toda la longitud que permita la eficiencia razonable en la aplicación del agua.

Los surcos cortos exigen que las acequias de abastecimiento o las tuberías estén separadas a intervalos cortos; esto aumenta considerablemente el costo de instalación del sistema. Una gran parte del terreno puede quedar inutilizada para la producción a causa de la superficie ocupada por las acequias muy juntas. Los surcos cortos requieren regular cuidadosamente los flujos y un cambio frecuente de la corriente desde un surco a otro; los surcos cortos dificultan también el uso del equipo mecanizado en las operaciones de siembra, cultivo y recolección.

Si los surcos son demasiado largos, puede penetrar en el suelo una cantidad excesiva de agua por el extremo superior del recorrido de riego antes de que el extremo inferior esté convenientemente regado; esto es particularmente probable con suelos permeables, con grandes velocidades de infiltración. Las lluvias fuertes que caen en suelos con bajo índice de absorción pueden dar lugar a la acumulación de una cantidad excesiva de agua en los tramos más bajos de los surcos, si éstos son demasiado largos. Esto podría crear un peligro de erosión sobre los terrenos más pendientes, o producir daños en los cultivos por inundarse los caballones en los extremos más bajos de los surcos.

El tamaño y la forma del campo puede limitar la longitud de surco. Si hay que regar solamente una superficie pequeña, las longitudes pueden determinarse por la longitud del campo; si la superficie es grande, conviene que los surcos sean de una longitud igual a una fracción exacta de la longitud total del campo.

Las longitudes han de ajustarse teniendo en cuenta los cambios en el tipo de suelo cuando, en el mismo campo, los suelos tienen velocidades de infiltración diferentes. También hay que tener en cuenta los cambios bruscos de pendiente dentro del campo; cada recorrido de riego debe confinarse a suelos similares y tener una pendiente uniforme.

Las operaciones de cultivo en cada zona podrán influir en la longitud de los surcos. Donde se dispone de trabajo abundante y se construyen a mano los surcos y lomos, puede convenir mucho los surcos muy cortos; esto sucede frecuentemente en terrenos en que se cultivan diversos tipos de hortalizas. Cuando la agricultura está mecanizada, lo más económico puede ser construir los surcos largos, incluso sacrificando en parte la eficiencia del riego. Esto sería posible si se dispusiera de agua abundante, si su costo fuese pequeño y no hubiera peligro de crear una napa freática alta.

Los factores principales al determinar las longitudes máximas de los surcos son: el tipo de suelo, la pendiente y la planta que ha de cultivarse. Si bien el caudal que debe llevarse a cada surco es asimismo un factor importante, está sujeto a la regulación y, en consecuencia, es preciso tenerlo en cuenta sólo cuando el flujo podría estar limitado por la pendiente, las condiciones del suelo o el tamaño del surco empleado.

Con pendientes suaves (menores del 0.3 al 0.5 %), la longitud de recorrido puede aumentarse, generalmente, a medida que aumenta la pendiente. Sin embargo, con pendientes de más del 0.5 % hay que disminuir la longitud a medida que aumenta la pendiente, ya que debe reducirse la unidad de flujo para evitar la erosión.

Los surcos deben ser más cortos para suelos arenosos, que absorben rápidamente agua y tienen baja capacidad de retención de la misma, que para suelos arcillosos, con velocidad de infiltración pequeña y alta capacidad de retención de agua. Las longitudes pueden aumentarse a medida que aumenta la profundidad media de agua que debe aplicarse. Como la cantidad a aplicar está en relación con la capacidad de retención de agua del suelo y con la profundidad de enraizamiento de la planta, puede usarse surcos mucho más largos para plantas de raíces profundas sobre suelos arcillosos que para las de raíces superficiales en suelos arenosos.

Para determinar las longitudes de surco más convenientes para diferentes pendientes y condiciones del terreno, se recomienda que se haga ensayos en campo, probando varias velocidades de flujo de agua en surcos de diferentes longitudes. Las evaluaciones de la velocidad de descenso del agua por el surco y las profundidades medias de agua aplicada son datos que puede utilizarse para determinar la longitud del surco que el riego más adecuado y uniforme proporcionará; no se puede aplicar en todos los casos criterios generales para proyectar sistemas de riego por surcos. En el Cuadro N° 20 figuran algunas longitudes máximas de surcos propuestas, que pueden emplearse como base para establecer pruebas en campo.

Medida del gasto o caudal

El gasto, o unidad de flujo, es el caudal suministrado a cada surco; se mide generalmente en litros por segundo. La unidad de flujo es uno de los factores que puede variarse, una vez que se ha instalado el sistema de riego por surcos; el caudal apropiado en los surcos es de la máxima importancia para aprovechar eficazmente el agua de riego.

Generalmente, la máxima uniformidad en la distribución se consigue empezando el riego con el máximo flujo unitario que pueda llevarse al surco en condiciones de seguridad. Con surcos cortos y lisos se usa un caudal grande para llenarlos rápidamente; se corta el flujo y se deja que el agua encharcada se infiltre en el suelo. Con surcos largos en pendiente, es preciso en general regular de nuevo el flujo durante el riego. Para obtener el humedecimiento conveniente del suelo, siempre que sea posible el agua debe alcanzar el extremo del surco en $\frac{1}{4}$ del tiempo total en que habría que llevar agua al surco.

El gasto máximo permitido al comienzo del riego se determina por la necesidad de prevenir el escurrimiento, el rebalse de los lomos y la erosión del suelo. En algunas zonas se ha utilizado el concepto de 'gasto máximo no erosivo', basado en la pendiente del surco. Aunque interviene también la capacidad de erosión del suelo, el gasto o caudal máximo no erosivo en surcos puede calcularse a partir de la ecuación:

$$Q_m = \frac{C}{S}$$

Ecuación 12.1

CUADRO N° 20 Longitudes máximas propuestas de surcos cultivados para diferentes suelos, pendientes y profundidades de agua (metros de largo máximo del surco).

Pendiente del surco %	Carga media de agua aplicada (centímetros)											
	7.5	15	22.5	30	5	10	15	20	5	7.5	10	12.5
0.05	300	400	400	400	120	270	400	400	60	90	150	190
0.1	340	440	470	500	180	340	470	470	90	190	190	220
0.2	370	470	530	620	220	370	530	530	120	250	250	300
0.3	400	500	620	800	280	400	600	600	150	280	280	400
0.5	400	500	560	750	280	370	530	530	120	250	250	300
1.0	280	400	500	600	250	300	470	470	90	220	220	250
1.5	250	340	430	500	220	280	400	400	80	190	190	220
2.0	220	270	340	400	180	250	340	340	60	150	150	190

en que S es la pendiente expresada en porcentaje y C es 0.60 cuando Q_m está dado en litros por segundo. En el Cuadro N° 21 figura un análisis de gasto no erosivo para varias pendientes críticas.

La medida del gasto debe a veces ajustarse para mantener el flujo sin perder agua por escurrimiento superficial al extremo del surco. Esto se consigue reduciendo el flujo al mínimo necesario cuando el agua se aproxima al final del surco. El gasto reducido bajo esta circunstancia ideal es igual a la velocidad con que el agua se infiltra en el lomo y los lados del surco. Como la velocidad de infiltración disminuirá en general con el tiempo que el agua corra en el surco, se necesita una claridad de juicio considerable por parte del que riega para disminuir el flujo a la velocidad apropiada.

Las altas capacidades iniciales de infiltración de algunos suelos declinan, al cabo de poco tiempo, hasta velocidades de absorción muy bajas. En tales casos es cuestionable la necesidad de reducir la unidad de flujo. El riego puede iniciarse con una unidad de flujo considerablemente menor que la capacidad segura del surco y dejar que continúe fluyendo a la misma velocidad hasta que se ha regado convenientemente la totalidad de la longitud del surco. Con frecuencia esto reduce la mano de obra necesaria para el riego, sin reducir particularmente la eficiencia del riego.

CUADRO N° 21 Relación entre gasto máximo no erosivo y pendientes críticas en surcos.

Pendiente del surco S	Gasto máximo Qm	Observaciones
<u>Porcentaje</u> 0.1	<u>Litros/segundo</u> 6.0	El gasto indicado es aproximadamente el doble de la capacidad transportadora de la mayoría de los surcos en uso normal en pendiente de 0.1 %. La erosión es insignificante en surcos con flujo a plena capacidad sobre esta pendiente.
0.3	2.0	Una pendiente de 0.3 % está cerca del límite superior en que el flujo en los surcos a plena capacidad no producirá erosión grave.
0.5	1.2	Los surcos cultivados con 0.5 % de pendiente se erosionarán, a menos que el gasto sea considerablemente menor que la capacidad del surco.
2.0	0.3	Esto indica la reducción del gasto necesaria para evitar erosión grave sobre pendientes del 2 %. Se considera que ésta es la pendiente máxima permisible para surcos cultivados.

Es posible aprovechar el exceso de agua que alcanza los extremos de los surcos estancándola en éstos, dejando que retroceda hasta los surcos secos adyacentes o llevándola a una zanja de drenaje en el borde inferior del campo. En este último caso es conveniente disponer de algún medio de regular el agua desperdiciada, de modo que pueda volver a usarse para regar.

En algunas de las zonas de riego más desarrolladas, el agua se recoge en el ángulo inferior del campo y se la hace retroceder al extremo de entrada a través de una tubería por medio de una bomba,

para volver a utilizarla en el mismo campo. Estos sistemas de retorno disminuyen grandemente la cantidad de mano de obra necesaria para regular el flujo de agua en los surcos.

Regulación del flujo de agua que va a los surcos

Para regular el flujo de agua que va a cada surco se utilizan varios dispositivos. Como habitualmente interesa suministrar un flujo casi igual a varios surcos al mismo tiempo, se utiliza el concepto hidráulico de que las tomas de iguales dimensiones que funcionan bajo la misma carga hidrostática tendrán flujos iguales. Las velocidades de flujo se cambian durante el riego alterando las dimensiones de las tomas.

Cuando el suministro de agua al campo se hace desde una acequia abierta, el tipo más popular de toma es el tubo de sifón de riego. Estos se preforman en general a base de tubos de aluminio o de plástico, pero a veces son de caucho flexible; tienen la ventaja de una fácil colocación y retirada que no daña los costados de la acequia y, por ser portátiles, se necesitan en menor número. El flujo puede regularse cambiando la carga hidrostática, variando el tamaño o el número de sifones empleados en cada surco o ajustando una compuerta corrediza unida al extremo de entrada de cada sifón. El método más satisfactorio consiste en usar varios sifones pequeños para suministrar la corriente máxima no erosiva a cada surco al comienzo del riego y, cuando el agua llega al extremo, eliminar varios sifones, ajustando así el flujo deseado en el surco hasta que se ha terminado de regar.

También pueden usarse tubos cortos colocados a través de los lomos de la acequia, instalados desde el comienzo de la temporada de riego hasta que termina. Esto requiere emplear un tubo para cada surco; deben ser suficientemente grandes para suministrar a cada surco el flujo máximo necesario. El flujo se regula obstruyendo parcialmente el extremo de entrada, lo que puede hacerse colocando un listón o por algún otro medio. Hay que tener cuidado al instalar los tubos, de modo que estén a la altura adecuada para lograr que el mismo flujo llegue al mismo tiempo a todos los surcos que se están regando.

En el Cuadro N° 22 se indica el flujo a través de sifones y tubos cortos cuando trabajan bajo diferentes cargas hidrostáticas. La carga

hidrostática es la diferencia de altura entre la superficie del agua en la acequia y el centro del desagüe (si fluye libremente), o la superficie del agua por encima del desagüe (si está sumergido). (Fig. 38)

CUADRO N° 22 Caudal a través de pequeños sifones y tubos cortos (en litros por segundo).

Diámetro del sifón o tubo	Carga hidrostática (centímetros)							
	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
Centímetros								
1	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09
2	0.13	0.19	0.23	0.23	0.26	0.30	0.32	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

No debe utilizarse cortes abiertos en los lomos de la acequia para conducir agua a los surcos, a menos que se utilice una acequia auxiliar (llamada a veces cámara de agua). Se trata de una acequia corta, construida paralelamente con la acequia de abastecimiento y por debajo de la misma, desde donde puede soltarse el agua para llevarla a varios surcos. Para regular con seguridad la liberación de agua desde la acequia de abastecimiento hasta la acequia auxiliar, se coloca una compuerta en las orillas de la acequia. También puede emplearse sifones y tubos cortos para llevar agua desde la acequia auxiliar hasta los surcos; se utiliza igualmente acequias auxiliares con canales elevados y tuberías utilizados en la conducción de agua de riego a los campos.

Para distribuir agua desde las tuberías a los surcos se utiliza varios métodos. Si las tuberías están enterradas, se colocan normalmente elevadores con válvulas a intervalos frecuentes para liberar el agua en la superficie del terreno. Puede construirse regueras provisio-

nales entre las válvulas, y el agua puede llevarse desde éstas hasta los surcos por medio de sifones o tubos cortos. La tubería portátil de metal, plástico o caucho, con las compuertas de salida, puede conectarse a las válvulas por medio de bocas de riego. Las compuertas de salida están espaciadas a la misma distancia que los surcos y disponen de correderas u otros medios para regular el flujo que va a los surcos. En el caso de huertas o viñas, bocas de riego de distribución especiales aplicadas sobre las válvulas liberan agua por 4-8 surcos. Estas bocas de riego pueden ser fijas o portátiles, y suelen colocarse alineadas con las hileras de árboles o viñas.

Altura media del agua aplicada

La altura media del agua aplicada durante un riego puede calcularse por la siguiente ecuación, si se conoce el gasto, la duración del riego y el área regada (separación entre surcos multiplicada por la longitud del surco):

$$\text{Milímetros por hora} = \frac{\text{litros por segundo} \times 3600}{S_m \times L_m}$$

Ecuación 12.2

donde S_m es la separación entre surcos en metros, y L_m es la longitud de surco en metros.

Por ejemplo, se riegan surcos separados 0.9 m, de 210 m. de largo, con un gasto inicial de 2.2 litros por segundo durante 1.5 horas y luego se reduce a 0.5 litro por segundo durante 5.3 horas. La velocidad con que se está aplicando el agua durante el período inicial es:

$$\frac{2.2 \times 3600}{0.9 \times 210} = 42 \text{ mm por hora}$$

y, durante el período final, la velocidad de aplicación es:

$$\frac{0.5 \times 3600}{0.9 \times 210} = 9.5 \text{ mm por hora}$$

La altura media de agua aplicada es:

$$\begin{aligned} 1.5 \text{ horas} \times 42 \text{ mm/h} &= 63 \text{ mm} \\ 5.3 \text{ horas} \times 9.5 \text{ mm/h} &= \underline{50 \text{ mm}} \\ \text{Altura total aplicada} &= 113 \text{ mm} \end{aligned}$$

Esta es la altura media de agua aplicada durante el riego, y no significa que se haya aplicado uniformemente 113 mm de altura a cada sección del surco. Para comprobar la uniformidad de penetración del agua en diferentes puntos a lo largo del surco puede usarse muestras de suelo.

Si se utiliza sifones o tubos cortos para conducir a los surcos el caudal indicado en el ejemplo y la carga hidrostática disponible es de 10 cm, puede determinarse el tamaño necesario de los sifones por el Cuadro N° 22. Podría usarse 4 sifones de 3 cm de diámetro para iniciar el riego y después de que el agua hubiera alcanzado el final del surco podría disminuirse el flujo quitando tres de los sifones.

DISEÑO DE UN RIEGO POR SURCOS

Diseñar y evaluar un sistema de riego por surcos para un terreno de las siguientes características generales:

1. Dimensiones: Largo 600 m
Pendiente longitudinal: 2 %
Ancho: 350 m
Pendiente transversal: 2.5 %
2. Caudal disponible (Q): 66.66 acciones del río en forma continua, equivalentes a 1 000 litros/seg.
3. Mano de Obra: 6 regadores
4. Cultivo: Maíz, a una distancia de 0.9 metros
5. Frecuencia de Riego: Inferior a una vez por semana en el período de máximo uso-consumo
6. Carga de agua en cada Riego (h): 10 cm
7. Surco Infiltrometría (en 50 metros) con un Caudal (Q) constante de entrada: (Q = 1.5 litros/seg).

Q (de salida) (litros/seg)	Tiempo Promedio (Minutos)
0.4	14
0.5	24
0.6	35.
0.7	53
0.8	84
0.9	120
1.0	180
1.1	240
1.26	305

8. Curva de Avance:

Largo (metros)	Tiempo (minutos)
10	4
20	9
30	14
40	17
50	20
60	30
70	40
80	45
90	52
100	60
125	80
150	100
175	140
200	180
225	200
250	260
275	300
500	360

9. Al realizar experiencias de velocidad de infiltración por surcos, se obtiene los resultados contenidos en el Cuadro N° 23.

CUADRO N° 23 Resultados obtenidos en experiencias de velocidades de infiltración por surcos

CAUDAL DE ENTRADA (Constante) 1.5 litros/seg Dist. = 0.80 Largo = 50 m	CAUDAL DE SALIDA	TIEMPO (minutos)	(tiempo entrada + tiempo salida)			
			AVANCE	TIEMPO	AVANCE	TIEMPO
	0.40	14	10	4	125	80
	0.50	24	20	9	150	100
	0.60	35	30	14	175	140
	0.70	53	40	17	200	180
	0.80	84	50	20	225	200
	0.90	120	60	30	250	260
	1.00	180	70	40	275	300
	1.10	240	80	45	300	380
	1.25	305	90	52		
		401	100	60		

Considerar en el diseño:

- a. Dirección de surcos
- b. Largo óptimo de surcos
- c. Caudal máximo no erosivo
- d. Tiempo de Riego

Considerar en la evaluación:

- a. Pérdidas por percolación
- b. Pérdidas por escurrimiento
 - 1) sin disminuir el caudal
 - 2) optimización de la disminución del caudal
- c. Eficiencia de Aplicación.

Desarrollo del ejemplo

I. Cálculo de ecuaciones de Velocidad de Infiltración (VI) y Lámina Acumulada (D)

Q entrada (litros/seg)	Q salida (litros/seg)	Q infiltrado (litros/seg)	(m ³ /h)	T (min)	VI (cm/h)
1.5	0.4	1.1	3.96	14	8.79
1.5	0.5	1.0	3.6	24	7.99
1.5	0.6	0.9	3.24	35	7.19
1.5	0.7	0.8	2.88	53	6.39
1.5	0.8	0.7	2.52	84	5.59
1.5	0.9	0.6	2.16	120	4.79
1.5	1.0	0.5	1.80	180	3.99
1.5	1.1	0.4	1.44	240	3.19
1.5	1.26	0.24	0.864	305	1.91

$$VI \frac{(m/h)}{(m/h)} = \frac{Q \frac{(m^3/h)}{L(m) A(m)}}{L(m) \times A(m)} \quad \text{ó} \quad VI \text{ (cm/h)} = \frac{Q \text{ litros/seg} \times 360}{L(m) \times A(m)}$$

$$\text{Como: } VI = K T^n$$

$$\log VI = \log K + n \log T$$

$$Y = A_0 + n x$$

$$A_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}; \quad n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$\sum Y$	$\sum X$	$\sum YX$
0.9439	1.1461	1.0818
0.9025	1.3802	1.2456
0.8567	1.5440	1.3227
0.8055	1.7242	1.3889
0.7474	1.9242	1.4382
0.6803	2.0791	1.4145
0.6009	2.2552	1.3551
0.5037	2.3802	1.1991
0.2810	2.4842	0.6981
<u>6.3220</u>	<u>6.9179</u>	<u>1.1444</u>

$$\begin{aligned}
 \Sigma x &= 16.9179 \\
 (\Sigma x)^2 &= 286.215 \\
 \Sigma x^2 &= 33.5250 \\
 \Sigma y &= 6.3220 \\
 \Sigma xy &= 11.1444
 \end{aligned}$$

$$A_o = \frac{6.3220 \times 286.215 - 16.9179 \times 11.1444}{9 \times 33.5250 - 286.215}$$

$$A_o = 1.5091688$$

$$K = 32.297492$$

$$n = \frac{9 \times 11.1444 - 16.9179 \times 6.3220}{9 \times 33.5250 - 286.215}$$

$$n: -0.4291663$$

$$VI = K T^n$$

$$VI = 32.3 \times T^{-0.43}$$

$$VI = \frac{1}{60} 32.3 \times T^{-0.43} \quad / \frac{1}{60} \text{ para transformar el tiempo en metros.}$$

$$h = \frac{1}{60} * \frac{32.3 \times T^{-0.43} + 1}{(-0.43 + 1)}$$

$$h = 0.9429 T^{0.5718}$$

II. Cálculo del Tiempo Total de Riego

$$T_T = T_c + T_a$$

Dado que se aplicará una lámina de 10 cm, el tiempo de contacto es:

$$10 \text{ cm} = 0.9429 T_c^{0.572}$$

$$T_c^{0.572} = \frac{10}{0.9429}$$

$$T_c^{0.572} = 10.60$$

$$0.572 \log T_c = \log 10.60$$

$$\log T_c = \frac{1.0253}{0.572}$$

$$\log T_c = 1.7925$$

$$T_c = 62.0 \text{ min.}$$

El tiempo de Avance (T_a) se calculará a través de la siguiente expresión:

$$R = \frac{T_c}{T_a}$$

$$\% P = \frac{(R + 1)^{n + 1} - R^{n + 1}}{(R + 1)^{n + 1} + R^{n + 1}} \times 100$$

$$P(R + 1)^{n + 1} + P R^{n + 1} = 100(R + 1)^{n + 1} - 100 R^{n + 1}$$

$$(R + 1)^{n + 1} (P - 100) = R^{n + 1} (-100 - P)$$

$$\frac{(R + 1)^{n + 1}}{R} = \frac{(-100 - P)}{(P - 100)}$$

$$\frac{R + 1}{R} = \frac{(-100 - P)^{n + 1}}{P - 100}$$

Permitiendo un porcentaje de percolación profundo de un 6 %:

$$\frac{R + 1}{R} = \frac{-100 - 6^{0.572}}{6 - 100}$$

$$\frac{R + 1}{R} = (1.1276)^{1.748}$$

$$R + 1 = R (1.2336)$$

$$R = 4.280$$

$$4.280 = \frac{62.0}{T_a}$$

$$T_a = 14.5 \text{ min}$$

$$T_T = 76.50 \text{ min.}$$

$$4 \times T_a \quad 4 \times 14.5 = 58 \text{ min}$$

Entrando en la Curva de Avance con 4 veces T_a se obtiene un largo de 98 metros de surco.

III. Dirección de los Surcos

El caudal máximo no erosivo (Q máx) con estas pendientes es:

$$Q \text{ máx} = \frac{2.25}{\%S} \text{ (en m}^3/\text{h)}$$

En sentido longitudinal:

$$Q \text{ máx} = \frac{2.25}{2\%} \quad Q \text{ máx} = 1.125 \text{ m}^3/\text{h} = 0.3125 \text{ litros/seg}$$

En sentido transversal:

$$Q \text{ máx} = \frac{2.25}{2.5\%} \quad Q \text{ máx} = 0.9 \text{ m}^3/\text{h} = 0.25 \text{ litros/seg}$$

El caudal de 1 000 litros/seg debe aprovecharse al máximo, de tal modo que no se pierda agua; ello sólo se logra aumentando la eficiencia del regador. Se supondrá que cada uno de los seis hombres encargados de regar podrá ocuparse de 40 surcos al mismo tiempo.

Por lo tanto:

$$\frac{1 \text{ 000 litros/seg}}{6 \text{ hombres}} = 166.6 \text{ litros/seg por regador}$$

$$\frac{166.66 \text{ litros/seg}}{40 \text{ surcos}} = 4.2 \text{ litros/seg en un surco}$$

Si usásemos los caudales iniciales se perdería demasiada agua. Por lo tanto debe encontrarse una nueva pendiente de tal modo que optimice el riego y permita que los 4.2 lts/seg no sean erosivos.

$$4.2 \text{ litros/seg} \times 3.6 = 15.2 \text{ m}^3/\text{h} = \frac{2.25}{\% S}$$

$$\% S = \frac{2.25}{15.2} = 0,15 \%$$

Por lo tanto 0.15 % de Pendiente permite que los 4.2 litros/seg no erosionen. El sentido del riego puede ser longitudinal o transversal.

$$\% S \text{ actual} = \% S \text{ máx.} \times \cos \theta \quad (\% S = \text{pendiente})$$

En sentido longitudinal:

$$0.15 \% = 2 \% \times \cos \theta$$

$$\cos \theta = 0.075 \quad \theta = 85.7^\circ \quad (85.698 \sim 85.7)$$

En sentido transversal:

$$0.15 \% = 2.5 \% \times \cos \theta$$

$$\cos \theta = 0.06 \quad \theta = 86.56^\circ$$

De esta forma, resulta adecuado trazar los surcos de riego con un ángulo de 86° con respecto a la dirección de la acequia alimentadora o de cabecera.

IV. Pérdidas por escurrimiento sin disminuir el caudal (Q)

Volumen Escurrido = Volumen aplicado - Volumen Infiltrado

$$\text{Volumen Aplicado} = 1.2 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{62}{60} \text{ h} = 15.7 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Infiltrado} = 98 \times 0.9 \times 0.1 = 8.82 \text{ m}^3$$

(largo) (ancho) (lámina)

$$\text{Volumen escurrido} = 6.88 \text{ m}^3$$

Pérdidas por escurrimiento con el caudal reducido.

$$T_a = 14.5 \text{ min} \quad T_c = 62 \text{ min.}$$

$$VI = 32.3 T^{-0.43} \text{ a los } 14.5 \text{ min (cabecera) } VI = 10.23 \text{ cm/h}$$

$$\text{al } 1^{\text{er}} \text{ min (pies) } \quad VI = 32.3 \text{ cm/h}$$

$$0.1023 \text{ m/h} \times 98 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} = 9.002 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$0.323 \text{ m/h} \times 98 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} = 28.48 \text{ m}^3/\text{h}$$

Volumen al cual debe reducirse:

$$\frac{28.48 - 9.022}{2} = 9.729 \text{ m}^3/\text{h}$$

2^{da} Reducción:

$$\text{a los } 45' \text{ a los pies } \quad VI = 6.28 \text{ cm/h}$$

$$Q = \frac{6.28}{100} \times \text{m/h} \times 98 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$$

$$Q = 5.54 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{a los } 30' \text{ en la cabecera } \quad VI = 7.48 \text{ cm/h}$$

$$Q = 6.59 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\frac{6.59 - 5.54}{2} = 0.54 \text{ m}^3/\text{h} \text{ debe reducirse al Caudal (Q)}$$

Se riega durante 15' (T_a) con un caudal de 15.2 m³/h

$$15.2 \text{ m}^3/\text{h} \times \frac{15 \text{ min}}{60} (\text{h}) = 3.75 \text{ m}^3$$

Además se riega 30' con $9.729 \text{ m}^3 / \text{h}$

$$.729 \text{ m}^3 / \text{hr} \times \frac{30}{60} (\text{h}) = 4.8645 \text{ m}^3$$

y durante 18' con $0.54 \text{ m}^3 / \text{h}$

$$0.54 \text{ m}^3 / \text{h} \times \frac{18}{60} \text{ h} = 0.162 \text{ m}^3$$

Volumen total aplicado: 8.772 m^3

V. *Pérdidas por Percolación Profunda de 6 % sobre el Volumen Aplicado*

$$15.7 \text{ m}^3 \times 0.06 = 0.943 \text{ m}^3$$

VI. *Cálculo de la Frecuencia de Riego*

El cultivo de maíz tiene un período vegetativo de 150 días; en la Zona Central de Chile la fecha de siembra aproximadamente es en octubre, regándose hasta febrero. El uso-consumo del maíz, con base en la evapotranspiración potencial ET_p , estimada a partir de datos climáticos, y el coeficiente K_c para diferentes períodos de desarrollo del cultivo, es:

Uso consumo para Maíz

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
ETp (mm)	101.177	142.126	178.982	183.647	137.234
Kc	0.20	0.4	0.65	0.9	0.75
ETa (mm)	20.23	56.85	116.338	165.28	102.92
				Marzo	Abril
				104.873	59.853
				0.45	0.30
				47.19	17.95

En el período total de riego el cultivo necesita:

$$\begin{aligned} \text{Octubre a febrero} &= 526.758 \text{ mm/temporada} \\ &= 5267.58 \text{ m}^3/\text{temporada} \end{aligned}$$

La Frecuencia de riego en el período es:

$$Fr = \frac{h}{UC} \text{ (láminas máx en el período)} \quad Fr = \frac{10 \text{ cm}}{0.592 \text{ cm/día} \times 0.9}$$

$$Fr = 18.7 \text{ días}$$

$$\text{El número de Riegos} = \frac{P. \text{ Vegetativo}}{Fr} = \frac{150 \text{ ds}}{18.7 \text{ ds}} = 8.0 \text{ riegos}$$

Esta frecuencia no considera períodos críticos

VIII. *Cálculo de la eficiencia de aplicación*

Se hará el cálculo para el sistema no optimizado:

$$Ea = \text{Volumen Aplicado}$$

$$Ea = \frac{\text{Volumen Aplicado} - (\text{Volumen Percolado} + \text{Volumen escurrido})}{\text{Volumen Aplicado}}$$

$$Ea = \frac{15.7 \text{ m}^3 - (0.943 \text{ m}^3 + 6.88 \text{ m}^3)}{15.7 \text{ m}^3} \times 100$$

$$Ea = 50.17 \%$$

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. ¿En qué consiste el diseño del riego por surcos?
2. Se cuenta con un caudal de 100 litros/seg durante 48 horas para regar maíz por el sistema de surcos rectos. ¿En cuántos surcos al mismo tiempo se puede poner el agua, qué superficie se cubre por postura y cuál es la carga de agua aplicada?
3. Clasifique los tipos de diseño de riego por surco que conoce y señale cuándo se utilizaría cada uno de ellos.
4. De la superficie regada de su país o región, ¿qué proporción se riega con el método de riego por surcos?
5. Señale un diagrama secuencial de las mediciones de terreno, de laboratorios y de cálculos necesarios para diseñar un sistema de riego por surcos.
6. ¿Cómo es el perfil de mojado de un suelo regado por surcos? ¿Cómo afecta la diferencia en magnitud de la infiltración vertical y horizontal la forma en que se distribuye el agua bajo un surco individual?
7. ¿Qué forma tiene el perfil de mojado del suelo a lo largo de una unidad de riego, si esta operación:
 - a. tiene una duración mayor que la adecuada
 - b. tiene una duración menor que la adecuada
 - c. se utiliza un caudal muy grande

y si el diseño es:

- d. más largo que el óptimo
 - e. más corto que el óptimo?
8. ¿Porqué puede esperarse una mayor eficiencia de aplicación del agua de riego en el método por surco que en el método por tendido?

BIBLIOGRAFIA

1. BOOHER, L.I. El Riego Superficial. Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 95, FAO, Roma. 1974. 162 pp.
2. LOPEZ, J.E. Riego por Surcos. Apuntes de un Curso de Entrenamiento en Riego. Petrolina, Brasil. 1975. 46 pp.
3. MARR, J.C. Furrow Irrigation. University of California, Agricultural Extension Service. Manual N° 37. 1967.
4. SAPIR, E. Furrow Irrigation. Extension Service, Ministry of Agriculture, State of Israel. 1975. 56 pp.
5. SMERDON, E.T. y HOHN, C.M. Relationship Between the rate of advance and intake rate in furrow irrigation. College Station, Texas A&M University. Publication MP-509. 1961.

El texto de este Capítulo, en lo referente a la descripción del método de riego por surco, ha sido tomado de Booher¹ y el ejemplo de diseño del método corresponde a un ejemplo de una situación real de campo.

CAPÍTULO 13

RIEGO POR ASPERSIÓN

INTRODUCCION

El sistema de riego por aspersión es relativamente nuevo, si se compara con los métodos superficiales presentados en los dos capítulos anteriores; su desarrollo acelerado empezó después de la segunda guerra mundial, cuando se abarató el aluminio, elemento constituyente del sistema de conducción de agua en cañerías. En este método de riego el agua se aplica en forma de llovizna, producida mediante el paso de agua a presión a través de tuberías, de las que sale por pequeños orificios. Esta presión se obtiene normalmente por medio de una bomba centrífuga; también se puede aprovechar cargas debidas a diferencias de nivel.

Debido a la flexibilidad de su uso y el eficiente control en la aplicación del agua el método por aspersión permite el riego de una amplia gama de suelos que no pueden ser regados adecuada y eficientemente con métodos de riego superficiales; tal es el caso de suelos muy are-

nosos o muy arcillosos, de alta o de baja velocidad de infiltración, suelos con pendientes pronunciadas que no pueden ser nivelados por la escasa profundidad del perfil, entre otros. Asimismo el riego controlado mediante el riego por aspersión, para la germinación, emergencia y establecimiento de empastadas, ha demostrado resultados sorprendentes al eliminar los problemas de arrastre de semilla, compactación del suelo y encostramiento de la superficie.

Algunas de las ventajas del método de riego por aspersión son:

1. Alta eficiencia de aplicación del agua y uniformidad en su penetración en el perfil del suelo; ello hace recomendable su uso cuando hay una disponibilidad limitada de ese recurso o cuando el terreno tiene una alta velocidad de infiltración. En estos suelos se hace muy difícil y deficiente el riego por métodos superficiales, porque es difícil obtener una buena distribución de la humedad. Aunque los métodos de riego superficiales permiten obtener una alta eficiencia de aplicación si están bien diseñados, en el método de riego por aspersión la aducción se hace frecuentemente por tuberías, eliminando las pérdidas por conducción.
2. Puede utilizarse prácticamente en suelos de cualquier pendiente, con peligro muy remoto de erosionar los suelos y sin necesidad de nivelación. Mientras más irregular sea la topografía, más difícil es controlar el escurrimiento y la erosión con métodos de riego superficiales, lo que implica una baja eficiencia de mano de obra y de uso del agua; en este caso la aspersión resulta sin lugar a dudas más conveniente.
3. Puede ser usado prácticamente en todo tipo de suelos, en algunos de los cuales no debe utilizarse los métodos superficiales, tales como suelos de alta velocidad de infiltración. También puede utilizarse en suelos poco profundos, en los cuales no se puede nivelar sin peligro de que se elimine totalmente el horizonte superficial.
4. En la aplicación de agua para germinación de las semillas aventaja a los métodos superficiales, pues para obtener una germinación homogénea en el campo se requiere riegos muy suaves, muy difíciles de aplicar por los métodos superficiales comunes. En ese sentido, durante la aspersión sólo debe tenerse cuidado de que las gotas caigan finamente divididas, de modo que no remuevan a las semillas de su ubicación en el suelo.

5. Es más fácil el control de la lámina de riego, lo que permite regar mejor y satisfacer los requerimientos de lavado.
6. Los costos de preparación de suelos para el riego disminuyen notablemente. El terreno se divide menos, ya que se construye menor número de canales, acequias y desagües. Esto facilita el mejor uso de maquinaria para las diversas labores agrícolas y aumenta además la superficie servida; asimismo se eliminan los costos de nivelación.
7. Se puede aplicar junto con el riego fertilizantes líquidos o solubles y sustancias de uso fitosanitario. De este modo, los fertilizantes se distribuyen mucho mejor y su aplicación es más económica. El tratamiento de insecticidas y herbicidas puede hacerse siempre que éstos no sean corrosivos y se disponga de sistemas de dosificación adecuados.
8. Se economiza mano de obra, pues el operador no necesita estar presente durante todo el tiempo de aplicación, lo que sí ocurre generalmente con los métodos de riego superficiales. Sin embargo, muchas veces el traslado de tubería, los daños y consecuentes reparaciones de bomba y aspersores, así como otros factores administrativos dentro del predio, inducen a que el rendimiento de los regadores sea bajo.
9. Puede ser el método más recomendable en muchas zonas altas que, debido a condiciones climáticas, conviene aprovechar para producción de cultivos de zonas templadas y en las que, por problemas topográficos, hay que descartar los métodos de riego superficiales.
10. Es más fácil incorporarlo a plantaciones permanentes ya establecidas.

Así como el riego por aspersión tiene ventajas, existen algunas limitaciones para su uso en forma extensiva en los predios agrícolas; entre estas limitaciones resulta importante señalar:

1. Su costo inicial comparativamente alto; esta es la limitación más importante del riego por aspersión. Debe considerarse por una parte los costos fijos, tales como depreciación anual, interés sobre el capital invertido y mantenimiento, y por otra los costos de la energía necesaria para que el sistema opere y la mano de

obra para mover los laterales. Sin embargo, al comparar económicamente este método con los métodos superficiales hay que tomar en cuenta la posibilidad de obtener ingresos adicionales por un aumento significativo de los rendimientos, lo que podría justificar su uso.

2. El viento puede distorsionar por completo la distribución del agua en el suelo e igualmente disminuir el agua que llega al suelo, lo que implica una baja eficiencia de riego. Asimismo, las pérdidas de agua por evaporación son mayores que en los métodos superficiales corrientes, pues en el riego por aspersión la lluvia sale bajo la forma de pequeñas gotas que, en conjunto, tienen una gran superficie.
3. Algunas veces el riego por aspersión puede crear condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fungosas y reducir la efectividad de la aplicación de herbicidas e insecticidas, al ser estos lavados y transportados desde el follaje de los cultivos al suelo.
4. El impacto de la lluvia en las flores puede, en algunas ocasiones, causar su caída y por lo tanto hacer que disminuyan los rendimientos.

En atención a sus ventajas y limitaciones, el riego por aspersión no debe ser considerado como una alternativa de los métodos de riego superficiales, sino más bien como un sustituto de éstos en ciertos casos específicos (por ejemplo problemas de relieve o de velocidad de infiltración de los suelos agrícolas en que no pueda aplicarse con éxito los métodos de riego superficiales). En el caso de suelos planos sin problemas de infiltración, el uso económico del método de riego por aspersión dependerá del cultivo que se desee regar y de las disponibilidades de mano de obra, agua y capital con que cuente el predio agrícola.

COMPONENTES DEL RIEGO POR ASPERSION

Un sistema de riego por aspersión es una red de tuberías o cañerías que cuenta con orificios para pulverizar el agua que circula a presión y aplicarla en forma de lluvia sobre el suelo. Según el tipo de red de tuberías, los sistemas pueden ser permanentes, semipermanentes o portátiles. En los permanentes, la tubería se ubica en el

campo regado, generalmente enterrada, y no se desplaza de esa ubicación; los altos costos iniciales se compensan, a lo largo de la vida útil del equipo, con el ahorro en mano de obra, con la calidad y cantidad de la producción obtenida, y con las economías en la aplicación de fertilizantes, pesticidas y el control eventual de heladas. Los sistemas semipermanentes tienen las tuberías principales de la red enterradas permanentemente en el campo; las tuberías secundarias, o laterales, donde se ubican los aspersores, son transportadas de un campo a otro durante la temporada de riego. En los sistemas portátiles, todos los componentes, desde el punto de bombeo o fuente de presión hasta el último aspersor, son transportables de un punto a otro en el campo regado.

Un sistema de riego por aspersión está integrado por muchos componentes. Si se analiza desde el punto de salida del agua pulverizada hasta la fuente de presión, se encuentra los aspersores o pulverizadores, los reguladores de flujo y de presión, el tubo elevador, las uniones, las cañerías y las conexiones derivadoras; el conjunto de estos elementos constituyen la parte del sistema que se llama **lateral**, conectada con una válvula a la tubería principal, que a su vez termina conectada a la fuente de agua a presión. Como el agua debe salir del sistema en forma de lluvia, se hace pasar por aspersores, orificios o perforaciones a alta velocidad, para lo cual se utiliza unidades aspersoras rotatorias, unidades aspersoras fijas, u orificios o perforaciones directas en las cañerías; sin embargo, casi todos los sistemas modernos de aspersión utilizan unidades aspersoras rotatorias para pulverizar el agua en el momento que ésta abandona el sistema. Estas unidades pueden ser de giro rápido, de giro lento o de pistón regador giratorio (*boom-type*), cuya utilización depende del cultivo del tipo de suelo y de la presión y disponibilidad de agua con que se cuenta en el predio agrícola. En general, las presiones bajas, de 20 a 40 libras por pulgada cuadrada, están asociadas con diámetros pequeños de los orificios del aspersor, con pequeñas superficies cubiertas en cada postura del equipo y con una baja descarga.

INFORMACION BASICA PARA EL DISEÑO DEL RIEGO POR ASPERSION

El primer paso en el diseño de un sistema de riego por aspersión para un predio agrícola es realizar un inventario de los recursos, entre los que debe considerarse:

1. tamaño y forma del área a regar

2. topografía de la superficie a regar
3. tipo de suelos
4. disponibilidad de agua
5. condiciones de clima
6. ubicación del agua
7. energía disponible y su costo.

El segundo paso en el diseño es la determinación del sistema de producción que se va a emplear en el área a regar, ente cuyos factores debe estudiarse:

1. operaciones culturales
2. tipo de operación de cosecha
3. uso de mano de obra
4. uso de maquinaria agrícola.

El tercer paso es el diseño del sistema, que debe satisfacer las necesidades del campo a regar, incluyendo los aspectos de costos de inversión y costos de operación de los sistemas. Este tercer paso consta de dos etapas: el diseño preliminar y los ajustes a este diseño. El diseño preliminar determinará:

1. la cantidad de agua a aplicar en cada riego
2. la frecuencia de riego para la época de mayor demanda evapotranspirada
3. la capacidad del sistema
4. el rango de descargas
5. el diseño de ubicación de las cañerías principales y laterales.

Los ajustes al diseño se realizan para adaptar al diseño preliminar aspectos relacionados con:

1. operaciones del predio
2. limitaciones económicas.

Pasos preliminares de diseño

1. Determinación de la cantidad neta y bruta de agua a aplicar en cada riego

- a. capacidad de almacenamiento del suelo
- b. requerimientos de nivel de humedad del suelo para el cultivo (criterio de riego)
- c. carga neta de agua a aplicar (a) - (b)
- d. sistema de cultivo y superficie a regar
- e. eficiencia de riego estimada o calculada.

2. Determinación de la frecuencia de riego

- a. Uso consumo máximo diario (promedio para el mes de mayor demanda evaporativa)
- b. Intervalo en días = $\frac{\text{carga neta}}{\text{uso consumo máximo}}$
- c. Determinar lo anterior para cada cultivo.

3. Determinación de la capacidad del sistema

- a. Cantidad bruta de agua a aplicar e intervalo de riego

$$Q = 453 \frac{AD}{FH}$$

Ecuación 13.1

en que

Q = capacidad del sistema de aspersión en galones por minuto

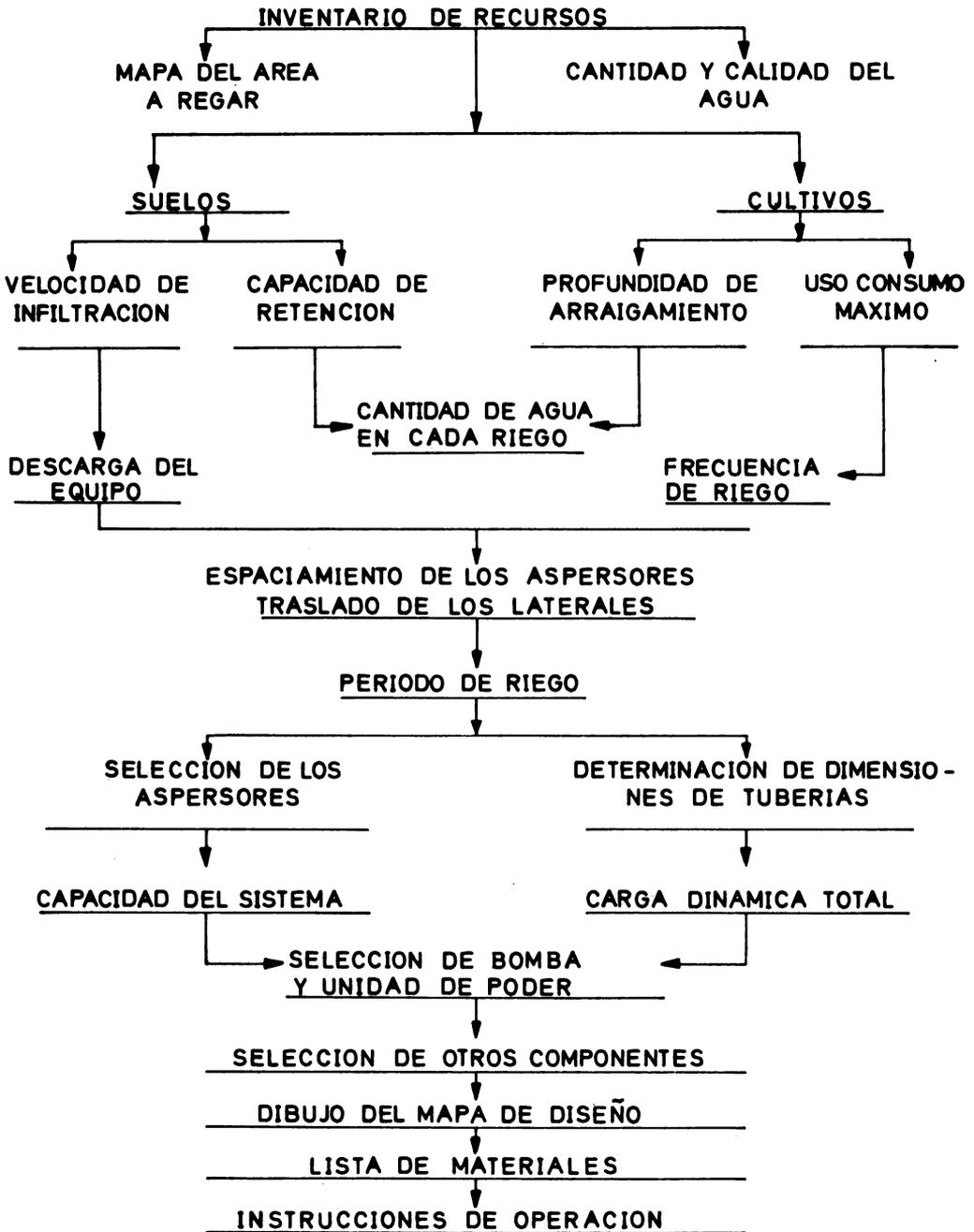


Fig. 51. Diagrama de diseño para un sistema de riego por aspersión.

- A = Superficie en acres
- D = Carga de agua a aplicar en pulgada-acre por acre
- F = Número de días permitido para completar un riego
- H = Número de horas que el equipo es operado por día.

La Fig. 51 indica un diagrama de diseño para un sistema de riego por aspersión.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSION

Con fines prácticos, la explicación se hará simultáneamente con un ejemplo de diseño. Como ya se mencionó, primero hay que resumir la información básica, que en el ejemplo es la siguiente:

1. Topografía

- a. Pendiente: uniforme, con $S_n-s = 1\%$ (subiendo)

$$S_{e-o} = 0\%$$

- b. area y dimensiones: 16 ha (400 x 400 m).

2. Cultivos:

- a. clase: maíz
- b. profundidad efectiva de las raíces = (Pr) 0.90 m
- c. uso consumo máximo (U.C.) = 0.60 cm/día durante el mes de enero.

3. Suelo

- a. textura franco-arcillosa
- b. capacidad de campo = 20.5 % Punto de marchitez permanente = 10 %
- c. densidad aparente (D_b) = 1.4 gr/cm³

- d. infiltración básica (E.B.) = 1.50 cm/h
- e. eficiencia de distribución = 80 %
- f. porcentaje de agotamiento (criterio de riego, P_w) = 50 %

4. Abastecimiento de agua

- a. cantidad: sin limitaciones
- b. calidad: buena (C_1S_1)
- c. fuente de agua: en el medio del extremo Norte
- d. distancia vertical de la bomba al agua: 1 m.

5. Clima

- a. pérdidas por viento: 15 %*
- b. vientos: regulares de dirección variable de aprox. 6 kph.

6. Operación

- a. días de riego por semana: 6
- b. cambios diarios: 2**
- c. horas de operación por cambio: 11.

Una vez obtenida esta información, puede diseñarse el sistema:

1. Requerimiento bruto diario.

$$R.B. = \frac{UC}{Ef.}$$

Ecuación 13.2

(*) Generalmente en los diseños se supone una eficiencia de riego de 70 %. Será objeto de evaluación posterior saber cuales son las pérdidas por viento y por distribución en el diseño del riego por aspersión.

(**) El diseñador asigna estos valores o puede haber una rectificación posterior.

$$R.B. = \frac{0.60}{0.80 \times 0.85} \text{ cm/día} = 0.89 \text{ cm/día}$$

2. Volumen de agua requerido por día

$$V/\text{día} = R.B. \times A$$

Ecuación 13.3

$$V/\text{día} = 0.0089 \text{ m/día} \times 160 \text{ m}^2 = 1\,430 \text{ m}^3/\text{día}$$

3. Volumen corregido por día

En vista de la alta inversión que representa un equipo de aspersión, lo ideal es lograr su máxima utilización, de modo que con la misma inversión se cubra la mayor superficie. Por esto, en países desarrollados y cuando la dotación de agua es continua, frecuentemente se trabaja el máximo número de horas por día. Esto es difícil en regiones menos desarrolladas, ya que el agricultor no está acostumbrado a ello; se requiere cambios nocturnos y con frecuencia la dotación de agua no es continua. En cada diseño se plantea, pues, el problema de establecer el número de horas de operación diaria y días de trabajo a la semana; por los motivos arriba indicados pocas veces sobrepasa las 12 horas diarias. Por problemas administrativos, frecuentemente no se trabaja los días domingos y a veces incluso sábados de tarde. Dado que la planta naturalmente continúa consumiendo durante ese tiempo, es necesario corregir los cálculos de manera tal que se dote, repartida en todos los días de riego, la cantidad usada durante los días en que el equipo no opera. De esta manera el volumen corregido por día será:

$$V_c/\text{día} = V/\text{día} \times \frac{\text{N}^\circ \text{ de días de la semana}}{\text{N}^\circ \text{ de días que opera/semana}}$$

Ecuación 13.4

En el ejemplo se tiene

$$V_c/\text{día} = 1\,430 \text{ m}^3/\text{día} \times \frac{7}{6} = 1\,668 \text{ m}^3/\text{día}$$

4. Caudal requerido por hora

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{Vc/día}{horas/día}$$

Ecuación 13.5

$$Q = \frac{1668 \text{ m}^3/día}{22 \text{ h/día}} = 75.8 \text{ m}^3/h$$

5. Lámina neta a aplicar por riego

Naturalmente, la lámina dependerá de las constantes físicas de humedad y de la planta, de modo que:

$$IN = \frac{CC - PMP}{100} \times Da \times \%AAU \times Pr$$

Ecuación 13.6

$$IN = \frac{20.5 - 10.0}{100} \times 1.4 \times 0.5 \times 0.9 = 6.60 \text{ cm}$$

6. Frecuencia de Riego

Se requiere, por supuesto, al intervalo de riego de cada punto.

Según la fórmula ya conocida:

$$F = \frac{L.N.}{U.C.}$$

Ecuación 13.7

$$F = \frac{6.60 \text{ cm}}{0.60 \text{ cm/día}} = 11 \text{ días}^*$$

(*) Cuando en el resultado se obtiene decimales, el redondeo se hace generalmente por debajo, a menos que el cultivo permita agotamientos superiores, en cuyo caso hay que devolverse a 3a. para hacer un ajuste de lámina.

La ronda, o vuelta de los laterales, deberá hacerse en ese tiempo, o mejor aún en uno algo menor, de modo que no se atrase el riego en caso de interrupciones.

7. Localización de la tubería

El diseñador, como es lógico suponer, debe tratar de distribuir las líneas laterales y principales, en tal forma que el sistema opere a una máxima eficiencia y al mínimo costo. Al escoger la distribución más adecuada, hay que tomar en cuenta una serie de factores. Cualquiera de éstos, por sí solo, puede indicar una determinada distribución diferente a la que indique otro factor. Dependerá entonces del criterio y experiencia del diseñador sopesarlos y escoger el mejor.

- a. La fuente de agua; siempre que sea posible, debe estar ubicada en el centro del campo. De esta forma el agua circulará menos por las tuberías. Si el campo que se va a regar ya tiene localizada su fuente de agua, deberá tratar de trazarse la línea principal de tal manera que permita una menor longitud de la tubería de aducción principal.
- b. Pendiente: este factor es de suma importancia para una buena uniformidad de aplicación. Para ello debe tratar de colocarse los laterales en sentido normal respecto a la máxima pendiente, en forma tal que el primer y último aspersor se encuentren aproximadamente a la misma altura. Los mencionados ramales podrán ponerse en la dirección de la pendiente cuando haya ganancia de carga por cambio de elevación. Como se deberá colocar los laterales en el sentido de la mínima pendiente, la tubería principal se dispondrá en el de la máxima. El motivo de este requisito es que la presión de operación de los aspersores sea similar y, de esa manera, también lo sea el caudal que aplican.
- c. Dirección de los vientos predominantes: en los casos de viento fuerte, la mejor eficiencia de distribución en el riego se logra si tanto la línea principal como los laterales se disponen a 45° de la dirección predominante de los vientos. Algunas veces esto no es recomendable en virtud de los otros factores que intervienen para definir la ubicación más conveniente. En este caso es preferible colocar los laterales en sentido normal respecto a la dirección de los vientos predominantes, como se indica en la Fig. 52.

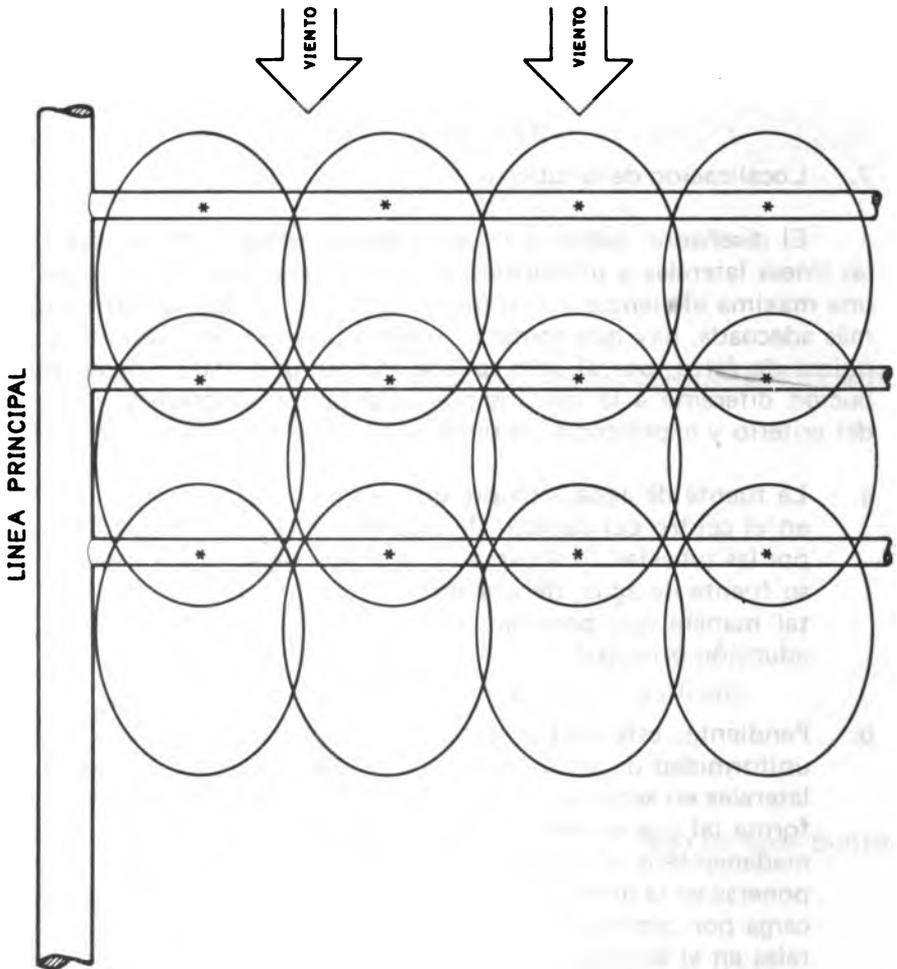


Fig. 52. Ubicación de la línea principal en relación con la dirección del viento dominante.

La razón de esto es que bastaría con acortar la distancia entre aspersores para lograr una buena distribución; la alternativa opuesta —colocarlos en la dirección del viento— implica franjas de suelos que no se mojarán adecuadamente o bien la necesidad de tener más posiciones de laterales, lo cual encarece el diseño y/o la operación del sistema. Cuando la distribución del viento durante el día no sea uniforme (por ejemplo, que haya más viento en la mañana que en la tarde), es preferible hacer sólo un

movimiento diario, en lugar de dos o tres; de ese modo se logra una mejor uniformidad de aplicación. En general, vientos superiores a 15 ó 20 km/hora hacen poco recomendable el riego por aspersión.

- d. Dimensiones del terreno y frecuencia de riego: hay que diseñar la colocación de laterales y su espaciamento para que se ajusten lo mejor posible a las dimensiones del terreno y al intervalo de riego. En general los tendidos de una ronda deben terminarse en un tiempo menor que el de la frecuencia teórica de riego, de forma que haya un margen de seguridad para no sobregotar el terreno. Esto es importante especialmente para eventuales dilaciones debidas a reparación y mantenimiento. En forma matemática, el concepto arriba indicado puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{N}^\circ \text{ de posiciones/lat.} = \text{N}^\circ \text{ mudanzas/día} \times \text{Frecuencia}$$

Ecuación 13.8

o sea que el número total de posiciones de las líneas laterales debe ser inferior al número de cambios diarios de laterales multiplicado por la frecuencia de riego. Para los cálculos de espaciamento entre ramales y entre aspersores es necesario recordar que las tuberías normalmente en existencia son de 6 metros (a veces las hay de 9 m). Por lo tanto los mencionados espaciamentos deberán ser múltiplos de este valor; en los equipos convencionales de mediana presión los más corrientes son de 24, 18 y 12 m.

En el ejemplo dado:

Campo cuadrado de 400 m x 400 m, con la fuente en el medio del extremo norte del campo y una pendiente de 1 % en el sentido sur-norte. De acuerdo a la localización de la fuente de agua, se podría pensar en tener laterales de 400 m, poniendo la línea principal en el extremo norte en el sentido este-oeste, o colocando la línea principal por el medio del campo en el sentido norte-sur y con laterales de 200 metros. En cuanto a las dimensiones del terreno, es indiferente cualquiera de estas dos soluciones, ya que es cuadrado. Igual consideración puede hacerse en lo que respecta a vientos, pues en este caso son de dirección variable.

Hay dos consideraciones favorables a la segunda posibilidad; por un lado la máxima pendiente es en el sentido norte-sur, por lo cual los laterales deben ir colocados de este a oeste; por el otro, se considera que en esta forma los ramales son más cortos y, por ende, sus pérdidas de carga por fricción, a un diámetro dado, serán menores.

En general debe haber cierta correspondencia entre los espaciamientos de aspersores y laterales, siendo generalmente el primero igual o algo menor al segundo.

Ciertas características de la explotación, como puede verse al pie del Cuadro N° 24, condicionan el tipo de aspersor, el cual a su vez determina el rango de espaciamiento de aspersores y laterales.

En general la mayoría de los diseños de equipos portátiles corresponden a aspersores y espaciamientos intermedios, por ejemplo 18 x 18 m. Esto puede variar de acuerdo con el tipo de explotación; por ejemplo huertos pequeños y viveros requerirán distancias y equipos menores y en diseños para áreas grandes prevalecerá el criterio opuesto.

Para determinar el espaciamiento adecuado entre laterales puede probarse las alternativas 12 y 18 metros, con 2 movimientos por día. En estos casos el tiempo para cubrir todo el campo será:

Para S = 12 m

$$T = \frac{400 \text{ m}}{12 \text{ m/mov.} \times 2 \text{ mov/día}} = 16.6 \text{ días} > 11 \text{ días}$$

Luego no sirve, pues dicho tiempo será mayor que la frecuencia de riego.

Para S = 18 m

$$T = \frac{400 \text{ m}}{18 \times 2} = 11 \text{ días}$$

Esto es aceptable según lo explicado en (d).

Otra alternativa sería: tres movimientos por día y 12 m de espaciamento:

$$\frac{400}{12 \text{ m} \times 3 \text{ mov./día}} = 11 \text{ días}$$

Pero hay más facilidad operativa de la mano de obra en el segundo caso.

8. Número requerido de aspersores

$$N = \frac{\text{distancia total de los laterales en metros}}{\text{espaciamento entre aspersores en metros}}$$

Ecuación 13.9

Como el espaciamento entre aspersores debe ser igual o algo menor que la distancia entre los laterales, debe probarse con 12 y 18 m.

Para 18 m se obtiene:

$$N = \frac{400 \text{ metros}}{18 \text{ metros/asp.}} = 22 \text{ asp.}$$

9. Caudal por aspersor

$$q = \frac{Q \text{ Total}}{N^{\circ} \text{ asp.}}$$

Ecuación 13.10

$$q = \frac{75.8 \text{ m}^3/\text{h}}{22 \text{ asp.}} = 3.45 \text{ m}^3/\text{h/asp.}$$

10. Selección de los aspersores

En la selección de los aspersores hay que tomar en cuenta varios factores, como se puede ver en el Cuadro N° 24; los más importantes son: el espaciamento (diámetro de tiro), la presión de trabajo y la tasa de aplicación.

CUADRO N° 24 Tipos de aspersores según presión en libras/pulg.

TIPO DE ASPERSOR PRESION EN ATM.	BAJA (Jardín)	MODERADA	INTERMEDIA	ALTA	MUY ALTA	L.A. (Ángulo bajo para árboles).
	0.3 - 1	1 - 2	2 - 4	3 - 7	6 - 8	1 - 3
DIAMETRO DE TIRO METROS	6 - 15	18 - 24	24 - 36	30 - 72	60 - 120	12 - 27
TASA DE APLICACION MINIMA RECOMENDADA EN CM/H.	1.00	0.5	0.625	1.25	1.65	0.85
CARACTERISTICAS DEL CHORRO. BOQUILLA ADE- CUADA	GOTAS GRANDES DEBIDO A BAJA PRE- SION	GOTAS DE TAMAÑO REGULAR	BUENA EN TODO EL DIAMETRO DE TIRO	BUENA EN TODO EL DIAMETRO DE TIRO	GOTAS MAS BIEN PULVERIZADAS	GOTAS DE TAMAÑO REGULAR
DISTRIBUCION DE HUMEDAD EN EL SUELO. ESPALDAMIENTO, PRESION Y BOQUILLA ADECUADA	REGULAR	REGULAR ALGO BUENA EN EL LIMITE SUPERIOR DE PRESION.	MUY BUENA	BUENA EXCEPTO CON VIENTOS DE MAS DE 6 KM/H	ACEPTABLE SIN VIENTOS, DISTORCIONANDOSE SEVERAMENTE CON EL VIENTO	BUENA
ADAPTACIONES Y LIMITACIONES	SOLO PARA AREAS PEQUEÑAS Y SUELOS LIVIANOS CON COBERTURA VEGETAL BUENA Y R.I. 1.25 cm/hora Jardines, etc.	PRINCIPALMENTE PARA ASPERSION BAJA ARBOLES PEQUENOS. Por ejemplo Café.	PARA TODO TIPO DE CULTIVOS Y SUELOS EXCESIVO VIENTO	IGUAL AL ANTERIOR EXCEPTO EN EXCESIVO VIENTO	PARA CULTIVOS DE ALTA COBERTURA SOLO PARA SUELOS DE ALTA R.I.B.	PARA FRUTALES. AVENTAJA A LOS OTROS ASPERSORES CUANDO HAY MUCHO VIENTO CON BAJA PRESION DISPONIBLE.

- a. Tasa de aplicación: como ya se mencionó, la razón de aplicación neta debe ser menor que la de infiltración.

$$\text{T.A. en cm/h} = \frac{\text{m}^3/\text{h} \times 100}{\text{Sep.Lat.} \times \text{Sep.asp.}}$$

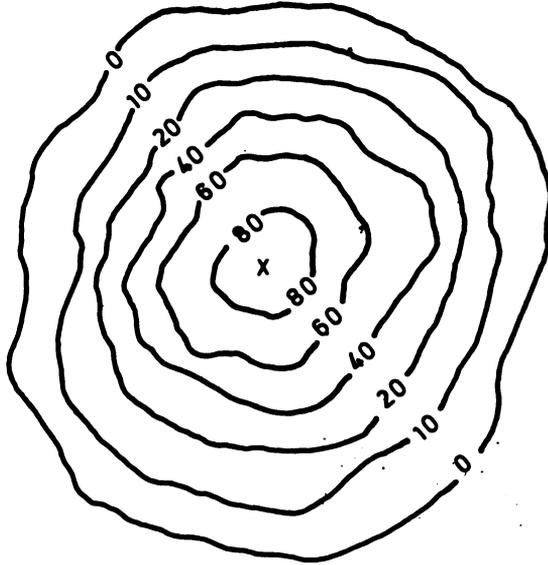
Ecuación 13.11

Si T.A. es mayor que E.B., será necesario hacer un nuevo diseño en el cual se deberá aumentar el tiempo de aplicación. Para ello habrá de seleccionar un diferente tipo de boquillas y/o aumentar el espaciamiento.

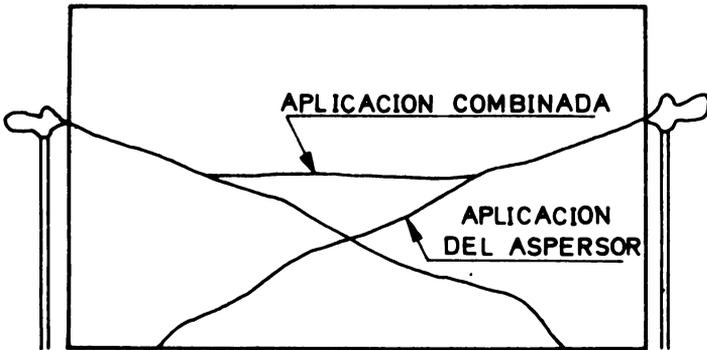
En el ejemplo:

$$\text{T.A. cm/h} = \frac{3.45 \times 100}{18 \times 18} = 1.06 < 1.5 \text{ cm/h}$$

- b. La presión es importante porque es un factor determinante en los costos de operación. Mientras menor sea ésta, más bajos serán los gastos de energía. Cualquier boquilla podría operar a baja presión con fines de ahorrar energía, pero esto generalmente implica una mala distribución del riego. Las fábricas manufactureras indican normalmente la presión óptima de trabajo para cada boquilla. En la selección de los aspersores deberá, pues, buscarse la que opere más económica y eficientemente.
- c. Espaciamiento: es necesario hacer esta consideración, ya que la razón de aplicación que acabamos de obtener es solo un promedio; los aspersores no aplicarán el agua uniformemente, es decir con una lámina igual en todo su diámetro de tiro, sino que ésta será deferente y tendrá una distribución irregular, entregando más agua cerca del aspersor y menos en la periferia. Esto obliga a diseñar la distancia entre los aspersores en forma tal que haya cierto cruce entre el tiro de uno y el de los adyacentes, de modo que resulte una mejor uniformidad de distribución, semejante a la presentada en la Fig. 53.



a. DISTRIBUCION DE APLICACION TIPICA DE UN ASPERSOR



b. DISTRIBUCION DE APLICACION DE DOS ASPERSORES CUYO TIRO SE CRUZA

Fig. 53. Distribución de la aplicación de agua desde aspersores.

Las determinaciones de campo han demostrado que para obtener un coeficiente de uniformidad adecuado, el % del diámetro de tiro al cual deben estar espaciados los aspersores, debe disminuir en la medida en que aumenta el viento, de acuerdo con el Cuadro N° 25.

CUADRO N° 25 Factor de disminución del diámetro de tiro de los aspersores de acuerdo con la velocidad del viento.

Velocidad del viento en km/h	Espaciamiento de los aspersores menor que:
Poco o ningún viento	65 % del diámetro de tiro
Hasta 9.5	60 % del diámetro de tiro
Hasta 12.5	50 % del diámetro de tiro
Sobre 12.5	30-50 % del diámetro de tiro

En el ejemplo, los aspersores están espaciados a 18 m y hay viento de 6 km/h; en consecuencia el diámetro de tiro (dt) debe ser:

$$dt > \frac{18}{0.60} > 30 \text{ m}$$

Una vez obtenidos la razón de aplicación por aspersor y el diámetro de tiro, se ubica en las tablas de operación de aspersores para ver cuál de ellos pueden seleccionarse.

$$q = 3.45 \text{ m}^3 / \text{h/asp.} \quad dt \geq 30 \text{ m}$$

En este caso lo ideal es tener una amplia disponibilidad en el mercado, a fin de seleccionar aquél que en buenas condiciones de operación permita el menor costo, especialmente en cuanto se refiere a presión. Tendrá una operación correcta cuando la distribución del agua a aplicar sea uniforme y cuando, sin producirse considerables pérdidas por el viento, la gota se parta lo suficientemente como para que no cause un daño físico, ni a la superficie del terreno, ni a plántulas que recién están germinando. Para lograr todo esto, la presión no debe caer por debajo de límites establecidos para cada aspersor.

TUBERIAS USADAS EN EL RIEGO POR ASPERSION

Las tuberías son normalmente de aluminio, fácilmente transportable debido a su poco peso; sin embargo, puede usarse otros materiales, tales como: acero, que tiene la ventaja de ser más duradero y estar protegido contra la corrosión, pero es algo más caro y pesado; plástico (P.V.C.), que es bastante liviano y compite en precio, y asbestocemento. En algunos casos se emplea también mangueras de caucho reforzadas.

Procedimientos de diseño de tuberías

Para que las tuberías, tanto principales como laterales, trabajen de acuerdo con su movimiento, el diseño puede hacerse como portátiles, semiportátiles o permanentes. Sin embargo, usualmente se diseña para que los laterales sean del primer tipo, con el fin de comprar menos tubos y reducir el costo del equipo, y las principales de los tipos permanentes o semipermanentes, con el propósito de utilizar menos mano de obra. Recientemente, en países con alto costo de mano de obra se ha incorporado diseños de equipos sólidos donde incluso los laterales son permanentes.

El aspecto más importante en el diseño de cualquier sistema de tuberías es la pérdida de carga por fricción. El problema en el diseño que aquí se presenta es seleccionar el diámetro de las tuberías y sus accesorios, que den un balance positivo entre los costos de éstos y los de bombeo, de modo que se obtenga a fin de cuentas el menor gasto posible en la aplicación de agua con una máxima uniformidad.

Los laterales deben diseñarse de tal manera que las pérdidas de carga totales no excedan del 20 % de la presión de trabajo de los aspersores, asegurando así que las descargas entre el primer y último aspersor de una línea no varían entre sí más de un 10 %. Las pérdidas de carga por fricción en un lateral son menores que las de una tubería principal de igual diámetro. Esto se debe a que el flujo por la tubería lateral se va reduciendo en la medida que el agua se mueve por ella.

Generalmente los ramales laterales se diseñan de un sólo diámetro; de ese modo el equipo es más uniforme y ellos pueden entonces intercambiarse sin dificultad. Hay varias formas de determinar las pérdidas de carga en tuberías; la más clásica sería aquella que emplea

fórmulas hidráulicas conocidas, tales como la de Scobey, la de Hazen-Williams y otras.

En vista de que el cálculo de las pérdidas de carga por esas fórmulas es muy difícil, debido a los exponentes fraccionarios que incluyen, en la literatura existen numerosas tablas, ábacos y nomogramas en los que, para un determinado coeficiente de rugosidad, basta contar con el caudal y el diámetro de la cañería para encontrar la pérdida de carga correspondiente. Sin embargo, en las líneas laterales, en la medida que el agua lleva al aspersor, va reduciéndose el gasto $-q-$ que sigue circulando por el lateral; de esta manera el caudal conducido a través de un lateral es variable y por lo tanto habría que hacer el cálculo por trechos de tubería y gasto variable.

Esta última consideración, como se ve, hace demasiado largo y laborioso el cálculo, por lo cual Christiansen desarrolló un método que consiste en determinar las pérdidas de carga por fricción mediante una de las fórmulas arriba mencionadas, considerando la tubería sin salidas de agua; es decir, que desde el comienzo hasta el final de la tubería el gasto es el mismo y luego se multiplica la pérdida de carga resultante por un factor de corrección, para gasto variable, obtenida mediante una fórmula empírica que, al desarrollarse, dé los valores que se exponen en el Cuadro N° 26.

Continuando el cálculo del ejemplo, y siguiendo el procedimiento de Christiansen, se tiene:

$$Q = 37.9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{lateral}, L_{\text{lat}} = 200 \text{ m } P_{\text{asp.}} = 2.75 \text{ atm.}$$

$$N_{\text{asp./lat.}} = 11$$

$$H_1 = 0.20 \times 2.75 \times 10.33 \text{ m.} = 5.68 \text{ m}$$

$$\phi = 89 \text{ mm}$$

$$H_f = 4.0 \text{ m}/100 \text{ m}$$

$$H_1 = 4.0 \text{ m}/100 \text{ m} \times 2 \times 0.38 = 3.04 \text{ m.} < 5.68 \text{ m}$$

$$\phi = 70 \text{ mm}$$

$$H_f = 13 \text{ m}/100 \text{ m}$$

$$H_1 = 13 \text{ m}/100 \text{ m} \times 2 \times 0.38 = 9.88 \text{ m} > 5.68 \text{ m}$$

Se escogerá entonces los laterales de $\phi = 89$ mm, porque las pérdidas de carga en tuberías de 70 mm sobrepasan el límite de 5.68 m.

CUADRO N° 26 Factor de Christiansen por el cual hay que multiplicar H_1 en tuberías para obtener H_1 en las líneas laterales con aspersores.

N° de Aspersores	F	N° de Aspersores	F
1	1.000	16	0.365
2	0.625	17	0.363
3	0.518	18	0.361
4	0.469	19	0.360
5	0.440	20	0.359
6	0.421	22	0.357
7	0.408	24	0.355
8	0.398	26	0.353
9	0.391	28	0.351
10	0.385	30	0.350
11	0.380	35	0.347
12	0.376	40	0.345
13	0.373	50	0.343
14	0.370	100	0.338
15	0.367 + de	100	0.333

La función de la tubería principal es llevar el agua hasta los laterales. Como ya se expuso, el factor más importante en el diseño es la pérdida de carga por fricción. Sería posible establecer de una manera exacta el diámetro económico de tuberías, es decir aquél que entregue el balance más positivo en los costos de bombeo y costo inicial. Al respecto hay varios procedimientos en los que mediante ábacos y nomogramas se determina la alternativa más económica para un determinado interés sobre el capital y vida útil de la tubería, cuando se conocen los costos de energía y de los tubos. Sin embargo, tal precisión pocas veces es necesaria; en general la práctica ha demostrado que dicho diámetro corresponde a aquél cuyas pérdidas por fricción están entre los 3 y 10 m. Se acerca más al primer valor cuando la tubería es corta, de precio bajo y la energía cara, y más al último cuando las condiciones son opuestas. En predios de pequeña superficie es corriente usar una pérdida permisible de 7 m.

La pérdida de carga por fricción se puede encontrar mediante fórmulas, ábacos y tablas.

Hay diferentes tipos de diseño de la tubería principal, según los laterales. Estos tipos de diseño son:

1. Con un solo lateral
2. Con dos laterales
3. Con laterales múltiples en rotación.

1. **Con un solo lateral:** en este caso toda el agua que pasa por la cañería principal entra al lateral a una misma altura, por lo cual el diámetro de la tubería principal puede seleccionarse de tablas; el diámetro adecuado es aquél cuya pérdida de carga por fricción está más cercana al límite permisible sin excederlo, cuando el lateral está operando en la parte más alejada a la fuente de agua.

2. **Diseño con dos laterales:** en este caso, una línea principal atraviesa el campo; a partir de ella salen dos ramales. En este tipo de diseño pueden ocurrir dos casos:

- a. Que los laterales obtengan el agua a la misma altura, es decir que se vayan moviendo ambos en la misma dirección. En tal caso, el cálculo del diámetro adecuado se hace exactamente igual que en 1. Esto es poco frecuente y constituye una alternativa menos económica.
- b. Que cuando un lateral está en un extremo del campo, el otro se encuentra en el opuesto. Cada uno por su lado, se van moviendo a medida que se sucedan los riegos, en forma tal que uno se va cambiando en una dirección y el otro en la contraria. En este caso ocurre casi siempre que la mitad del agua se toma en el primer lateral y la otra mitad continúa por la tubería principal hasta llegar al otro lateral.

Es evidente que las condiciones extremas de operación serán:

- a. Los dos laterales se encuentran en el medio del campo y por lo tanto el agua pasa por una longitud de tubería principal igual a $L/2$ y un gasto total de A .

- b. Un lateral está operando en el punto más alejado y el otro en el más cercano. Por lo tanto, el agua deberá pasar a lo largo de toda la tubería (L) con un gasto de $Q/2$. En este caso el procedimiento más sencillo que debe seguirse para determinar el diámetro adecuado del principal es el de calcular la pérdida de carga por fricción para varios diámetros, primero asumiendo un caudal Q y una longitud $L/2$ y, luego un gasto $Q/2$ y una longitud L .

El método de diseño más sencillo consiste en determinar un solo diámetro para toda la principal. A tal fin se escoge aquél en el cual la pérdida de carga por fricción máxima obtenida en ambos casos está lo más cerca posible de la pérdida de carga por fricción admisible, sin excederla. Hay un procedimiento algo más complicado; tiene por objeto que el costo inicial sea lo más bajo posible, sin que ello signifique, por supuesto, que se deje aparte los costos de bombeo. Este método consiste en diseñar la línea principal con tuberías que vayan paulatinamente decreciendo en diámetro, en forma tal que se aproveche completamente la pérdida de carga permisible. La distribución de las tuberías consiste —como el caso 2.b., anteriormente explicado— en dos laterales que se rotan alrededor de la línea principal. La Fig. 54 ilustra el problema del diseño de la tubería principal; en ese caso, como ocurrió en el anteriormente explicado, en una oportunidad toda la cantidad de agua Q deberá ser llevada a la distancia $L/2$ (de A hasta B) y no habrá flujo más allá de B. En los demás casos, el gasto pasará de B, sin exceder generalmente un valor mayor de $Q/2$. Cuando un lateral esté operando en C requiriendo un flujo de $Q/2$, el otro estará en A, y por lo tanto pasará un gasto $Q/2$ a lo largo de toda la tubería. La mejor forma de estudiar este método es utilizar un ejemplo. Para el que se ha venido estudiando se tiene:

$$Q = 75.8 \text{ m}^3/\text{ha} \quad L = 400 \text{ m} = L_1 + L_2$$

$$L_1 = \overline{AB} = 200 \text{ m} \quad L_2 = \overline{BC} = 200 \text{ m} \quad S = 1 \%, \text{ luego}$$

$$E_1 = E_2 = 1 \times \frac{200}{100} = 2 \text{ m}$$

$$H_{L_1} = H_L \text{ permisible} + E_2$$

$$H_{L_1} = H_{L_2} + E_2 = 7 + 2 = 9 \text{ m}$$

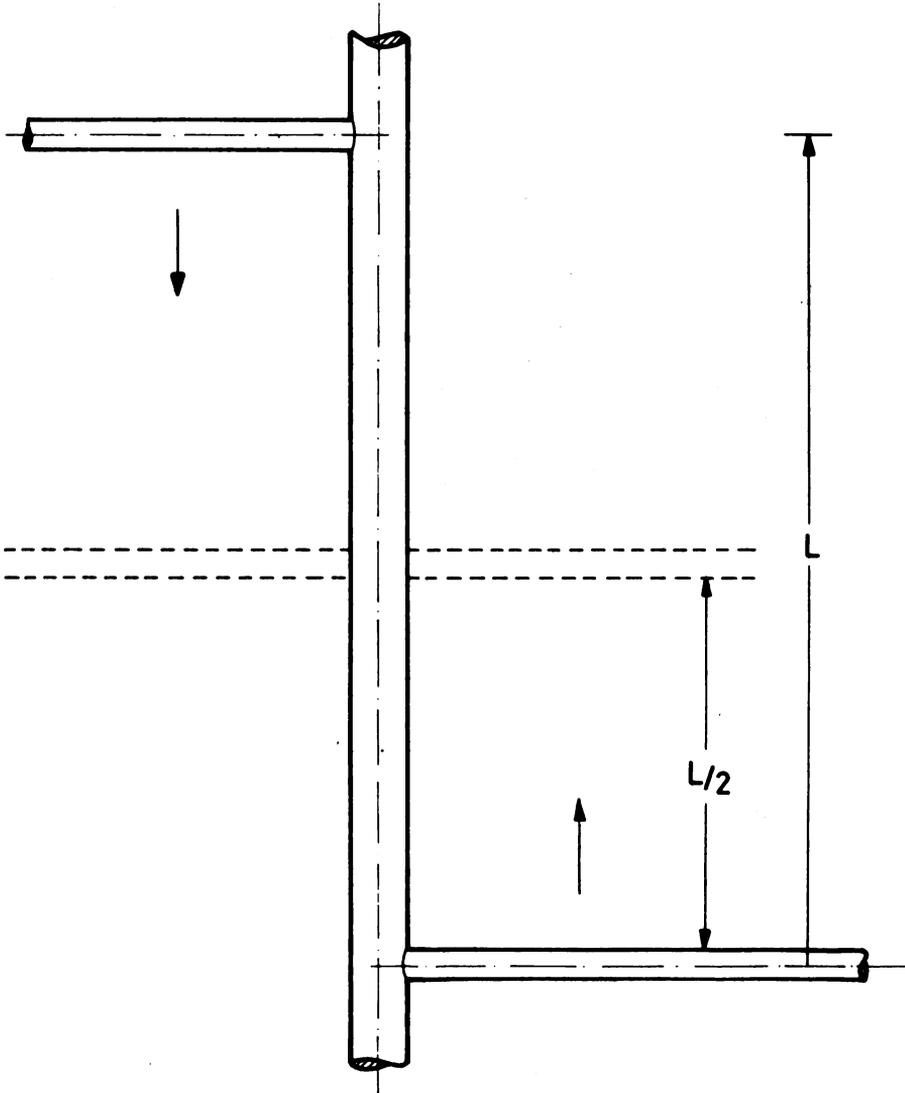


Fig. 54. Ubicación de la línea principal y recorrido del agua para el caso de dos laterales.

Primer caso: Ambos laterales operando en el medio del campo (en b).
O sea:

$$Q = 75.8 \text{ m}^3/\text{h} \quad L/2 = 200 \text{ m}$$

La pérdida de carga promedio por 100 m. de longitud es:

$$Hu_1 = \frac{HL_1 \times 100}{L_1} = 9 \times \frac{100}{200} = 4.5 \text{ m}/100 \text{ m}$$

Ecuación 13.12

Deberá buscarse en el diagrama las tuberías que en tales condiciones de diseño produzcan en forma combinada la pérdida de carga unitaria que se encontró arriba. Estas serán:

$$\phi \text{ 108 mm } hu_1 = 5.1 \text{ m}/100 \text{ m}$$

$$\phi \text{ 133 mm } hu_1 = 1.9 \text{ m}/100 \text{ m}$$

Siendo X la longitud de la tubería de 133 mm, podrá establecer la siguiente ecuación de pérdidas de carga y longitudes:

$$5.1 \frac{(200 - X)}{100} + 1.9 \frac{X}{100} = 9$$

$$X = 37.5 \text{ m.}$$

Redondeando, con margen de seguridad, se podrá usar 7 tubos de ϕ 133 mm, es decir 42 m; la diferencia de 200 m, o sea 158 metros, será de 108 mm.

Segundo caso: Laterales operando en los extremos del campo (uno en A y el otro en C), en cuyo caso las condiciones de diseño serán:

$$Q/2 = 37.9 \text{ m}^3/\text{h} \quad H_{L2} = 7 \text{ m}$$

Del diagrama se observa que las pérdidas de carga por unidad de longitud para tuberías que más corresponden son las siguientes:

$$\phi \text{ 133 mm} \quad hu = 0.70 \text{ m}$$

ϕ	108 mm	hu =	1.60 m
ϕ	89 mm	hu =	3.70 m

Llamando Y a la longitud de la tubería de ϕ 89 mm y conocidos ya los diámetros de primer tramo, puede establecerse la ecuación:

$$\frac{(42)}{100} 0.70 + \frac{(158)}{100} 1.60 + \frac{(200-y)}{100} 3.70 = 7$$

$$y = \frac{700 - (29 + 253 + 320)}{2.1}$$

Lo cual, para mayor seguridad, y haciendo múltiplo al largo comercial de tubos, da 96 m de ϕ 89 mm. La tubería de ϕ 108 mm, después de B será igual a:

$$200 \text{ m} - 96 \text{ m} = 104 \text{ m}$$

Por lo tanto, la tubería principal estará compuesta de la siguiente manera:

42 m de	ϕ 133 mm
158 + 104 = 262 m de	ϕ 108 mm
96 m de	ϕ 89 mm

3. Diseño de laterales múltiples en rotación: el diseño de laterales múltiples en rotación se basa en el mismo principio aquí expuesto, con la diferencia de que en lugar de ser dos los ramales su número es mayor.

Elección de la bomba

La elección de las bombas se debe hacer conociendo el gasto de agua necesario y la carga dinámica total. Esta última se determina sumando todas las cargas parciales, a saber: carga de succión o distancia vertical entre la fuente de abastecimiento y la bomba (H), pérdida de carga por fricción en la tubería principal (H_L), pérdida de carga por fricción de los laterales (H_1), diferencia de elevación entre la bomba y el sitio de descarga más elevado (H_e), altura de los aspersores sobre el nivel del suelo (H_a), presión de trabajo requerida por los

aspersores (P_a) y pérdidas de carga menores producidas en codos, reducciones, acoplamientos y otros (H_m).

$$H_T = H_s + H_L + H_1 + H_e + H_a + P_a + H_m$$

Ecuación 13.13

Pocas veces se calcula el último valor, por requerir mucho tiempo y esfuerzo y ser de poca magnitud. En su lugar los gráficos nomogramas de pérdidas de carga en tuberías se preparan incluyendo cierto margen de seguridad que toma en cuenta las pérdidas en conexiones.

Expresado en metros, en el ejemplo se tendrá:

$H_s =$		1.00
$H_L =$		7.00
$H_1 =$		3.04
$H_e =$	1 % x 400 m	4.00
$H_a =$		0.60
$P_a =$	2.75 Atm x 10,33	<u>28.40</u>
		44.00

Una vez conocidas la carga dinámica total y el caudal requerido, se podrá escoger la bomba que trabaje con mayor eficiencia.

La potencia será igual a:

$$P = \frac{Q \text{ (en litros/seg)} \times H \text{ (en m)}}{76 \times \text{Ef.}}$$

Ecuación 13.14

Si en nuestro ejemplo se estima una eficiencia de la bomba de 70 % se tendrá que:

$$P = \frac{75.8 \times \frac{1000}{3600} \times 44}{76 \times 0.7} = 17.4 \text{ HP}$$

Esta será la potencia de diseño si el equipo es eléctrico y, por lo tanto, a aceleración constante. El motor de dicha bomba deberá ser mayor (~ 21 HP) a fin de que trabaje con un margen de seguridad. En los equipos de combustible conviene que la bomba no trabaje sobrecargada y por ello deberá comprarse una mayor. Si se estima que su condición normal de trabajo va a ser de 70 % de la aceleración máxima, deberá adquirirse una capacidad aproximada de:

$$P = \frac{17.4 \text{ HP}}{0.70} = 25 \text{ HP}$$

TEMAS PARA DESARROLLAR Y EJERCICIOS

1. Señale tres situaciones en las que el riego por aspersión sea más ventajoso que cualquier otro sistema de riego.
2. Enumere las partes de un riego por aspersión.
3. Diseñe un sistema de riego por aspersión para una superficie de 10 ha cuyas características fije Ud. mismo.
4. ¿Qué proporción del área regada de su país se riega por aspersión? ¿Cuáles son los equipos de aspersión más comunes?
5. ¿Qué elementos y operaciones consideraría Ud. en el cálculo de costos de un sistema de riego por aspersión?
6. Compare las ventajas e inconvenientes del método de riego por aspersión y por bordes en el riego de pastizales o empastadas.
7. ¿Qué mediciones de terreno y laboratorio y qué cálculos es necesario hacer para evaluar el funcionamiento de un equipo de riego por aspersores?
8. Establezca una relación entre presión y costo de operación de un sistema de riego por aspersión.

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Minimum requirements for design, instalation and performance of sprinkler irrigation equipment. Agr. Eng. Yearbook 1975. p. 509–511.
2. F.A.O. El riego por aspersión. Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 65. Roma. 1960.
3. F.A.O. El empleo del riego por aspersión. Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 88. Roma. 1965.
4. LOPES, I. Riego por aspersión. Apuntes de un Curso de Entrenamiento en Riego. Petrolina, Brasil. 1975. 33 pp.
5. PAIR, CH. ed. Sprinkler Irrigation. 4 Ed. Sprinkler Irrigation Association. 1975. 615 pp.

Partes de este Capítulo corresponden a un ejemplo de diseño desarrollado por Lopes⁴ en un curso de entrenamiento en Riego dictado en Petrolina, Brasil, que ha sido adaptado por el autor para los cursos de Diseño y Planificación de Métodos de Riego que dicta en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

CAPÍTULO 14

RIEGO POR GOTEO

INTRODUCCION

El riego por goteo es un sistema que proporciona agua filtrada y fertilizantes directamente sobre el suelo al lado de la planta. Este sistema elimina la aspersión y el agua que fluye sobre la superficie del suelo; permite que el agua, liberada a baja presión en el punto de emisión, moje el perfil del suelo en una forma predeterminada.

El agua de riego es transportada a través de una extensa red de cañerías o tuberías plásticas hasta cada planta; el aparato que emite el agua en el suelo se denomina emisor o gotero. Los emisores disipan la presión que existe en la red de cañerías por medio de un orificio de pequeño diámetro, o por medio de un largo camino de recorrido; de esta forma disminuye la presión del agua y permite descargar desde el sistema hacia el suelo solamente unos pocos litros por hora por cada gotero. Después de dejar el emisor, el agua es distribuida gracias a su movi-

miento normal a través de todo el perfil del suelo, tal como se discutió en el Capítulo 5. De esta manera el volumen del suelo que puede ser mojado por cada punto emisor está limitado por las restricciones del movimiento horizontal y vertical del agua en el perfil del suelo.

COMPONENTES DEL RIEGO POR GOTEO

La red de laterales o líneas de emisores habitualmente está colocada en el suelo; existen también sistemas de riego por goteo subsuperficiales o enterrados, aunque consideraciones técnicas y económicas favorecen la instalación superficial de las cañerías. Los sistemas superficiales son usualmente fijos, por lo cual se les llama también sólidos; en la Fig. 55 se presenta el esquema de un sistema fijo de riego por goteo.

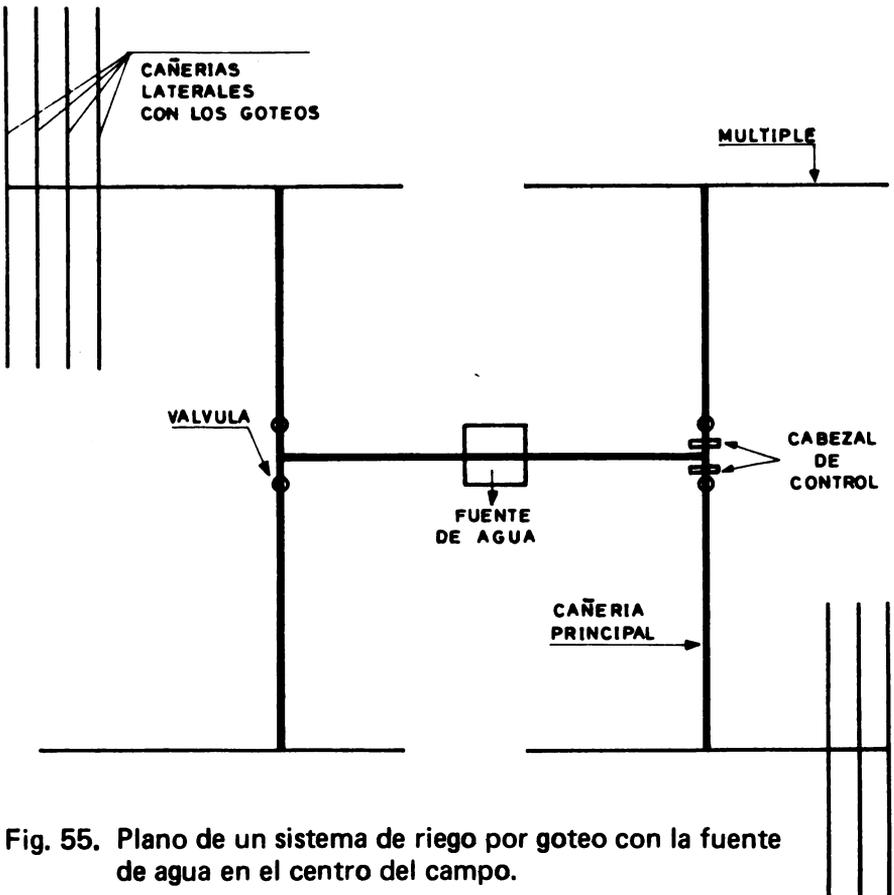


Fig. 55. Plano de un sistema de riego por goteo con la fuente de agua en el centro del campo.

Un sistema sólido implica que la línea lateral, con todos sus emisores, no se mueve entre riegos, sino que se mantiene en forma permanente a lo largo de toda la temporada de cultivo sobre el suelo en una posición fija. Sin embargo, es posible agregar o sacar líneas laterales, según el deseo de mojar mayor o menor superficie del suelo.

Existen muchos métodos para controlar la operación de un sistema de riego por goteo; varían desde una operación completamente manual a una operación completamente automática. Los métodos básicos para proporcionar un sistema de control son el control del tiempo, el control del volumen y el control de retroinformación. Un sistema de control de tiempo permite que el agua circule por el sistema o no circule, en lapsos de tiempo predeterminados; un sistema de control por volumen permite que el agua circule o deje de circular de acuerdo con el volumen de agua que ha sido entregado por el sistema; un sistema de *feedback* o de retroinformación permite que el agua circule por el sistema de acuerdo con aparatos sensitivos de humedad del suelo colocados en la zona regada, como tensiómetros, bloques de resistencia eléctrica u otros indicadores.

Un sistema típico de riego por goteo incluye los siguientes componentes, además del emisor:

1. La línea lateral, generalmente de 12 a 32 mm de diámetro y construida en PVC flexible o en una cañería de polietileno. No se usan líneas laterales de PVC rígido, salvo cuando son enterradas. Los emisores se ubican en espaciamientos predeterminados sobre la línea lateral y están conectados a los laterales por distintas formas. Existen otros tipos de líneas laterales que combinan la función de línea y emisor al mismo tiempo; entre ellos se incluye las cañerías de doble pared, las cañerías porosas y las cañerías con pequeñas perforaciones. La Fig. 56 indica alguna de las formas típicas en que se conecta los emisores a las líneas laterales.
2. Líneas distribuidoras: permiten conectar líneas laterales a ambos lados; pueden ser flexibles si están ubicadas sobre la superficie o rígidas si están enterradas bajo la superficie.
3. Línea principal: conecta las líneas distribuidoras a la fuente de agua. Puede estar construida de cualquiera de los siguientes materiales: cañería de polietileno, cañería rígida de PVC, cañería de acero inoxidable o cañería de asbesto-cemento; cualquiera

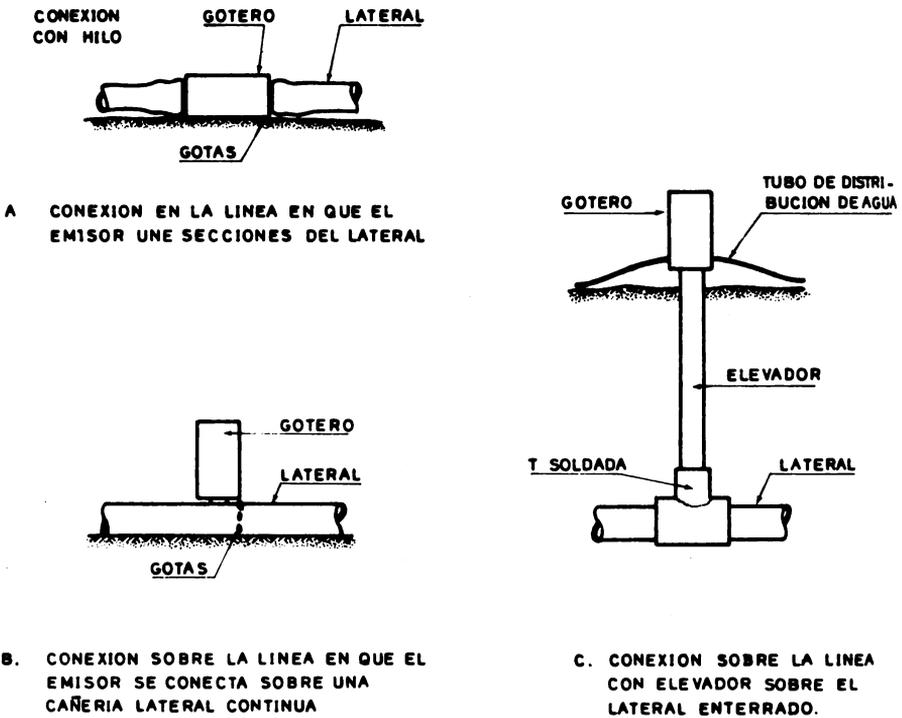
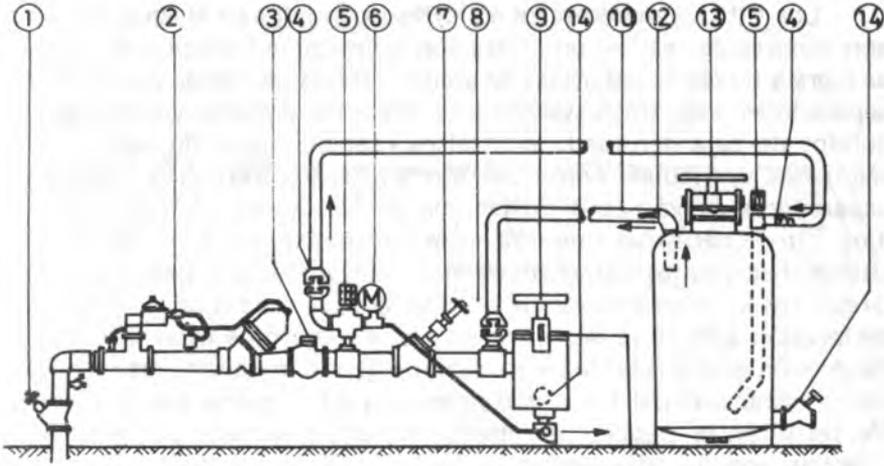


Fig. 56. Formas típicas en que se conecta los emisores (gotos) a los laterales.

que sea el material usado, debe ser corrosivo para prevenir problemas de contaminación desde dentro del sistema de cañerías.

4. **Cabezal de control:** se ubica generalmente al lado de la fuente de agua. Está constituida por los instrumentos de medición del agua: válvulas, inyectores, controles automáticos, controles de presión y filtros necesarios para facilitar la operación del riego por goteo.

Generalmente se colocan a la entrada de las líneas laterales controles adicionales de presión y filtros secundarios; se trata de una precaución de seguridad, diseñada para remover materiales extraños del agua y para proveer controles adicionales de presión dentro del sistema; un cabezal de control típico como el que se presenta en la Fig. 57 contiene reguladores de presión y reguladores de flujo, un separador de vértice para la arena, un equipo automático de filtrado y un sistema de inyección de fertilizantes.



COMPONENTES DE UN CABEZAL DE CONTROL TÍPICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

1. Válvula de conexión a la red de agua
2. Válvula volumétrica con medidor
3. Válvula de una sola salida
4. Agua al tanque fertilizante
5. Válvula de vacío
6. Manómetro diferencial
7. Válvula principal de control de presión
8. Entrada de fertilizante al sistema
9. Filtro principal
10. Línea de agua
11. Línea de agua
12. Salida de fertilizante
13. Depósito de fertilizante
14. Válvula de lavado

Fig. 57. Un típico cabezal de control de un equipo de riego por goteo.

Los filtros remueven los sólidos suspendidos en el agua, pero no son capaces de realizar una filtración química; la filtración de sólidos se logra a través de columnas de arena, a través de mallas y a través de separadores más finos. Cuando se presenta grandes volúmenes de sólidos de baja densidad, lo ideal es usar columnas de arenisca; las pequeñas partículas, como por ejemplo arena muy fina, requieren separadores de vértice o mallas con perforaciones muy pequeñas. Los filtros necesitan limpieza cada cierto tiempo, a menos que se utilice mecanismos automáticos de limpieza o lavado. Las válvulas de presión y los manómetros de presión se usan para medir diferencias de presión a lo largo del filtro; el conocimiento de estas diferencias de presión es importante para estimar el grado de sellamiento o pérdida de capacidad del filtro y la necesidad de limpieza. Las soluciones de fertilizantes pueden ser inyectadas en el sistema por pequeñas bombas; son vertidas dentro de la bomba misma o colocadas en un tanque de presión y drenadas dentro del sistema por una diferencial de presión a lo largo de un orificio o venturímetro.

MODELOS DE MOJAMIENTO DEL SUELO EN EL RIEGO POR GOTEO

Un sistema típico de riego por goteo moja solamente una porción de la superficie del suelo en un cultivo plantado en un espaciamiento grande, como por ejemplo viñas o huertos frutales. Este mojado parcial tiene muchos beneficios y algunos problemas. Las diferencias en potencial del agua del suelo permiten el movimiento del agua desde el emisor a lo largo del perfil del suelo, tal como indican las líneas presentadas en la Fig. 58, que representan zonas de igual contenido de humedad; las líneas que se alejan del emisor muestran la dirección del movimiento del agua del suelo.

En general las raíces de las plantas tienden a concentrarse donde las condiciones de absorción de agua son las mejores, o sea donde se encuentra un adecuado potencial del agua del suelo, con buena aereación y baja salinidad.

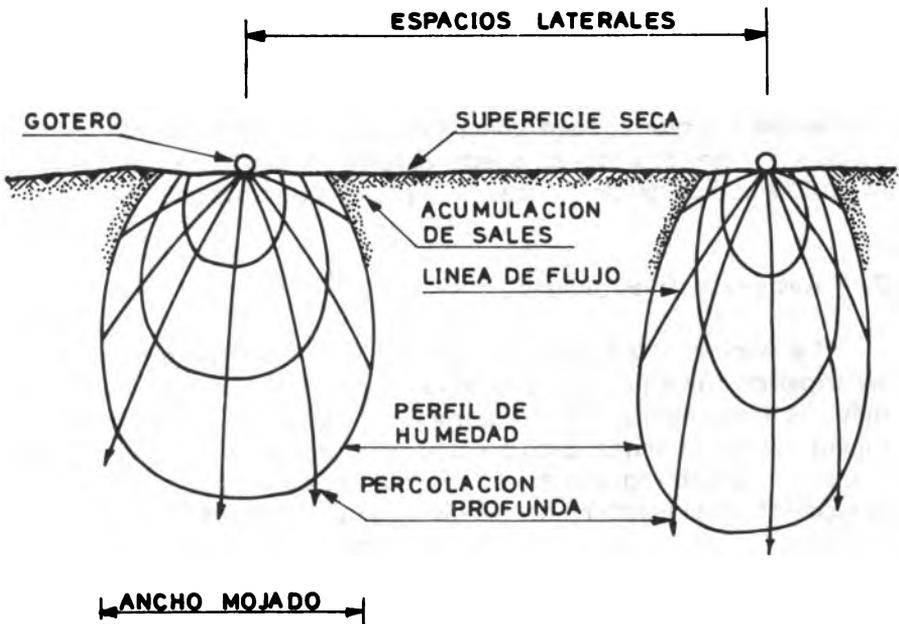


Fig. 58. Flujo de agua en el suelo a partir de un gotero.

LOS BENEFICIOS DEL RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo ofrece beneficios potenciales en el uso eficiente del agua, en la respuesta de las plantas, en el manejo del cultivo y en los rendimientos agronómicos de los cultivos. Estos beneficios no son exclusivos del sistema de riego por goteo, ya que otros sistemas de riego pueden producir beneficios similares; sin embargo, la combinación de ventajas analizadas a continuación es única para el riego por goteo.

1. Uso eficiente del agua de riego

En el riego por goteo las pérdidas directas por evaporación se llevan a un mínimo, no existe movimiento de gotas de agua a través del aire, no hay un mojamiento del follaje de las plantas y no hay evaporación desde la superficie del suelo fuera de aquella mojada al lado del gotero o emisor; además, el riego por goteo limita el crecimiento de las malezas y, por lo tanto, el uso consumo no beneficioso

del agua por parte de estas malezas. Un sistema de riego por goteo bien diseñado y bien manejado no produce pérdidas por escurrimiento superficial. Por otra parte se puede regar toda un área hasta los bordes sin que queden zonas mojadas fuera del área plantada o zonas sin mojarse. También puede lograrse un ahorro de agua, ya que es posible aplicar cargas de agua muy precisas durante cada riego.

2. Respuesta de las plantas

La respuesta de las plantas sometidas al riego por goteo parece ser superior que en otros sistemas de riego. Algunas veces se obtiene mayores rendimientos de los cultivos y una mejor calidad y uniformidad del rendimiento. Esto ha sido demostrado en muchas instalaciones comerciales agrícolas y en muchos experimentos; esa respuesta es especialmente válida en hortalizas y en huertos frutales.

a. El ambiente de las raíces. Un sistema de riego por goteo bien manejado permite una aireación del suelo efectiva, una provisión de suficientes nutrimentos y fertilizantes inyectados en el agua y una constante baja tensión del agua del suelo.

b. Enfermedades y plagas. Al minimizar el humedecimiento de la superficie del suelo y el follaje de la planta, el riego por goteo reduce la posibilidad de ataque de plagas y el desarrollo de enfermedades y problemas fungosos. Además se mejora notablemente la eficiencia de las pulverizaciones para el control de enfermedades.

c. Salinidad. Cuando deben usarse aguas salinas para el riego, es muy conveniente utilizar sistemas de riego por goteo de alta frecuencia, para mantener continuamente un alto contenido de agua en el suelo; de esta manera la concentración de sales en el agua del suelo puede ser mantenida más baja que aquélla que pueda producir daño a las plantas; en cultivos sensibles, puede producirse quemaduras de las hojas al concentrarse las sales sobre la parte aérea del cultivo cuando se utiliza un sistema de riego por aspersión; esto no ocurre con el sistema de riego por goteo.

d. Malezas. En zonas áridas los huertos frutales regados por goteo se han mantenido prácticamente libres de malezas, ya que éstas no crecen en la superficie del suelo que se mantiene seca entre las hileras; en las áreas húmedas y sombreadas, alrededor de los árboles y cerca de los emisores, las malezas crecen en forma retardada.

3. Beneficios agronómicos

Es posible obtener varios beneficios al mojar solamente una parte del suelo y mantener otra parte de la superficie seca por medio del riego por goteo. En primer lugar, las actividades de riego no interfieren seriamente con otro tipo de trabajo agronómico como la preparación del suelo, la pulverización, la cosecha y el embalaje. Además, el riego por goteo reduce la necesidad de cultivar, o sea de escardar el suelo, ya que hay mucho menos malezas, hay menos encostramiento del suelo y pocos problemas de compactación en comparación con otros sistemas de riego. Las posibilidades de que se produzca escurrimiento superficial son reducidas a un mínimo. Esto es importante, ya que permite un control efectivo de la aireación del suelo.

La fertilización es otro beneficio agronómico que no es necesariamente exclusivo del riego por goteo; puede formar parte del sistema de riego por la posibilidad de distribuir el fertilizante y llevarlo hasta la zona de raíces en forma controlada. La inyección de fertilizantes es eficiente en términos de mano de obra y cantidad de fertilizantes usados.

4. Beneficios de manejo y beneficios económicos

Para regar cultivos ampliamente espaciados y plantados en hileras, como por ejemplo árboles frutales, el costo de un sistema de riego por goteo diseñado correctamente es bajo en relación con cualquier otro sistema de riego permanente. En huertos frutales el costo de un sistema de riego por goteo puede ser menor que el costo de riego por aspersión que tenga un sistema de automatización similar. Además, cuando no se producen problemas de taponamiento de los goteros y el mantenimiento de las líneas de emisores es mínimo, los costos de operación y de mantenimiento del sistema de riego por goteo son generalmente muy pequeños. Sin embargo, en la plantación de cultivos en hileras o en viñas, donde la distancia promedio entre las líneas de emisores debe ser menos de tres metros, el costo del riego por goteo es relativamente alto.

El riego por goteo es ideal para regar cultivos bajo cubierta plástica, porque las líneas de emisores pueden ser colocadas bajo las cubiertas. Además, la operación del sistema de riego no es afectada por el viento, lo cual es una ventaja muy importante sobre el sistema

de riego por aspersión. El sistema de riego por goteo puede ser adaptado para terrenos con pendientes quebradas o pendientes no uniformes más que cualquier otro sistema de riego. Finalmente, el riego por goteo requiere, además, presiones relativamente bajas y descargas constantes y su eficiencia de aplicación es generalmente alta; esto reduce el tamaño de las cañerías y el uso de energía.

PROBLEMAS POTENCIALES DEL RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo está sujeto a tres problemas potenciales importantes: la taponadura de los emisores, problemas de salinidad alrededor de las plantas y una mala distribución de la humedad en el suelo.

1. Sensibilidad al tapamiento o taponamiento de los goteros

El taponamiento del paso del agua en los emisores es el problema más serio que debe considerarse en el riego por goteo. Las causas más comunes de taponamiento son las partículas de arena y los crecimientos orgánicos; la filtración del agua de riego es la mejor defensa contra estos problemas, pues es bastante difícil y caro detectar un emisor tapado. El taponamiento paulatino puede deberse a una deposición de precipitados de productos químicos o de arcilla y a un incremento en la cantidad de limo en los emisores; se generan así problemas de mala distribución a lo largo de los laterales, lo que puede dañar muy severamente a un cultivo, si los emisores están tapados por un tiempo largo antes que sean descubiertos y reparados.

2. Desarrollo de condiciones de salinidad del suelo

Todas las aguas de riego contienen algunas sales disueltas; como la planta absorbe solamente el agua, una gran parte de la sal es dejada en el suelo. Lo mismo ocurre en el proceso de la evaporación. Estas sales son generalmente empujadas hacia los bordes de la masa de suelo humedecida durante la estación de crecimiento. Por medio de una aplicación mayor de agua que la cantidad consumida por las plantas, la mayor parte de las sales puede ser empujada o lavada fuera de las zonas de raíces; sin embargo, es imposible evitar que se produzca algunas áreas donde se acumule la sal, siendo las zonas más críticas de acumulación las que se producen alrededor de los bordes de la

línea de la superficie mojada, tal como lo indica la Fig. 58. Una lluvia ligera puede mover estas sales acumuladas, dentro de la zona de intensa actividad de las raíces, y dañar en forma severa a las plantas; para reducir este peligro al mínimo, el sistema de riego por goteo debe ser operado durante el período lluvioso, con el fin de lavar las sales hacia abajo en el perfil. En aquellas áreas en que la precipitación sea menor de 250 mm al año, será necesario hacer aplicaciones suplementarias de agua a través de sistemas de aspersión, o superficie, para eliminar los niveles críticos de acumulación de sales; esto es especialmente importante cuando se usa agua de riego salina.

3. Distribución de humedad

El sistema de riego por goteo normalmente humedece solo una parte del volumen de suelo necesario para el crecimiento de las raíces; por lo tanto, el desarrollo del sistema radicular de un cultivo está limitado al área de humedad alrededor de cada emisor. No está claramente definido como esto afecta a la planta y a los rendimientos; a pesar de que los cultivos pueden crecer en un perfil de suelo parcialmente mojado, parece que existe un mínimo volumen de suelo necesario para un crecimiento óptimo; el tamaño de este volumen mojado es una función de la descarga de los emisores, de la distancia de los emisores y del tipo de suelo. La distribución de la humedad debe ser una de las principales preocupaciones en el diseño de un riego por goteo, ya que es muy difícil hacer cambios más adelante. En áreas ventosas puede ocurrir un fenómeno extraño: una cierta cantidad de polvo puede depositarse sobre las hileras y cubrir los cultivos hasta llegar a una situación tal que llegue a dañarlos; este polvo puede provenir de las hileras de suelo seco que se ubica entre las hileras del cultivo.

EJEMPLO DE DISEÑO DE RIEGO POR GOTEO

Se desea regar por goteo un predio con las siguientes características generales relativas al diseño:

Superficie: $804.6 \text{ m} \times 804.6 \text{ m} = 64.75 \text{ h}$

Pendiente: 0.25 % hacia el oeste (bajando)

Fuente de Agua: Pozo ubicado al centro del lado este, con un gasto de 95 litros/seg

Tipo de Suelo: Franco arcilloso

Velocidad de Infiltración Básica: 6 litros/h

Cultivo: Huerto frutal de 7 años plantado en hileras de norte a sur y a una distancia entre árboles de 6.1 x 6.1 m

Uso Consumo Máximo: 7.6 mm/día y un requerimiento neto de 812 mm por año

Precipitación: 203 mm/año

Area de Cubrimiento de los árboles maduros: 72 % (cuando el sol está directamente sobre ellos)

Se ha decidido que se requiere entre 4 - 6 puntos de emisión por árbol

% máximo de agotamiento que se permitirá: 30 % de la humedad aprovechable

Equipo disponible: Cañerías de 0.58 pulgadas de polietileno y líneas secundarias de PVC que soportan hasta 100 psi

Goteros: tienen un coeficiente de variación de 0.033 y provocan una pérdida de carga (ΔH) en el lateral de 1.6 m.

Desarrollo del procedimiento de diseño:

Para desarrollar este sistema se procederá en el siguiente orden:

1. Selección y posición de los emisores
2. Ubicación del sistema
3. Diseño de laterales y otros
4. Selección de la línea principal y requerimientos de la bomba.
5. Costo.

1. Selección y Posición de los Emisores:

Los emisores y número de puntos de emisión por árbol son seleccionados con base en los requerimientos de riego.

a. Se aplica el procedimiento:

$$T = ET \times \frac{Ps}{85}$$

Ecuación 14.1

T = Uso consumo promedio diario (mm/día)

Ps = Area ocupada por el cultivo, como un porcentaje del área total

ET = Uso consuntivo en (mm/día)

$$T = 7.6 \times \frac{72}{85} = 6.5 \text{ (mm/día)}$$

Los requerimientos anuales netos (IDn) se calculan en forma similar:

$$IDn = 812 \times \frac{72}{85} = 688 \text{ (mm)}$$

b. Porcentaje de suelo humedecido:

$$P = \frac{100 \cdot n \cdot \text{Sep} \cdot S_w}{S_t \cdot S_r}$$

Ecuación 14.2

P = Porcentaje de suelo humedecido en (%)

n = Número de Puntos de emisión por árbol

Sep = Espaciamiento entre puntos de emisión (m)

Sw = Ancho de humedecimiento (m) (Cuadro 27)

St = Distancia entre árboles (m)

Sr = Distancia entre hileras (m).

CUADRO N° 27 Porcentaje de suelo humedecido por varias descargas y espaciamientos de una línea lateral única, con goteros uniformemente separados, al aplicarse 40 mm de agua.

Espaciamiento entre laterales (S ₁) m	Descarga del gotero																			
	Menos de 1.5 l/hora				2 litros/h				4 litros/h				8 litros/h				Más de 10 litros/h			
	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi	Ar.	Fi		
	0.2	0.5	0.9	0.3	0.7	1.0	0.6	1.0	1.3	1.0	1.3	1.7	1.3	1.6	2.0					
	Espaciamiento de los goteros sobre la línea lateral (S _e) m.																			
	Porcentaje de suelo humedecido																			
0.8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
1.0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
1.2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
1.5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100		
2.0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100	100	100	100		
2.5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100	80	100	100		
3.0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80	67	80	80		
3.5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68	57	68	68		
4.0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60	50	60	60		
4.5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53	44	53	53		
5.0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48	40	48	48		
6.0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40	34	40	40		

Fuente: Keller y Karmelli⁵

Para el caso en estudio, según el Cuadro 27, se debe interpolar los valores, ya que la descarga se ubica entre 4 -5 (litros/h). En el Cuadro N° 27 se ubica la descarga del emisor (litros/h) y luego, de acuerdo con la textura (para este caso corresponde una textura fina) se obtiene:

$$\text{Sep} = \frac{1.3 + 1.7}{2} = 1.5$$

Ecuación 14.3

$$\text{Sw} = \frac{1.5 + 2}{2} = 1.75$$

(Se interpola igual que en el caso anterior; y además se considera $P = 100 \%$).

$$\text{St} = 6.1 \text{ m}$$

$$\text{Sr} = 6.1 \text{ m}$$

Reemplazando en la ecuación 14.2:

$$P = \frac{100 \times 6 \times 1.5 \times 1.75}{6.1 \times 6.1}$$

$$P = 42 \%$$

Por lo tanto se obtuvo un 42 % de humedecimiento con dos filas y seis puntos de emisión. Las filas deberían estar espaciadas 0.88 m a cada lado de la hilera de árboles; los árboles están a 6.1 m separados entre ellos sobre la fila y dos Puntos de emisión a 1.5 m, de acuerdo con la Fig. 59.

c. Lámina de Riego:

Con el criterio de 30 % de la humedad aprovechable y según el Cuadro N° 28, Z (Profundidad Radicular), según el tipo de cultivo para este caso: $Z = 1.5 \text{ m}$. Además, según Cuadro N° 28, a partir de la textura se encuentra el Rango de humedad aprovechable entre Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente, transformándose este valor a mm/m.

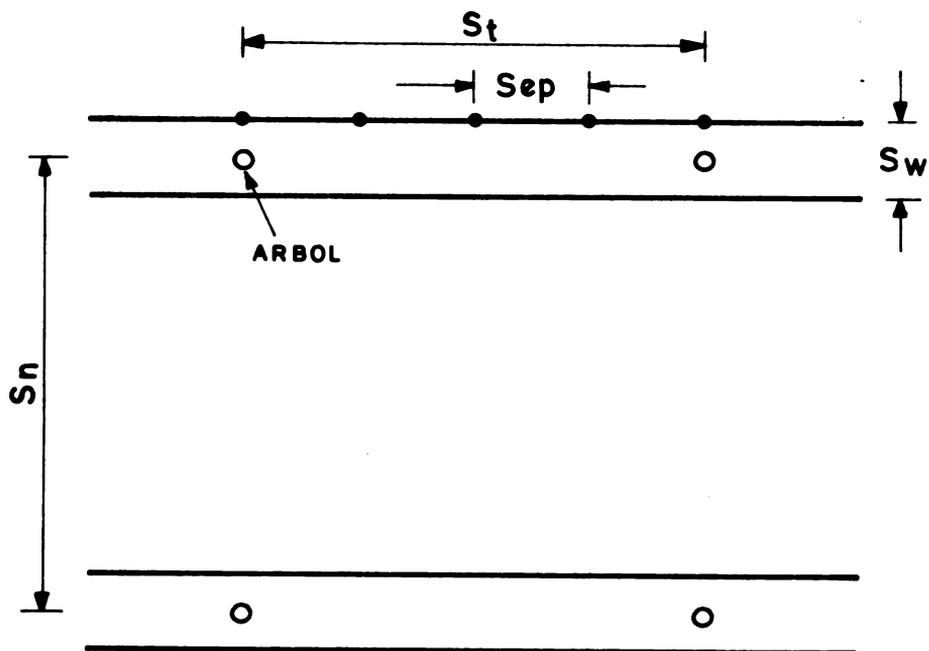


Fig. 59. Diseño del sistema de riego por goteo.

CUADRO N° 28 Profundidad de enraizamiento y espaciamiento entre plantas, usados comúnmente en el diseño de sistemas de riego por goteo

Cultivo	Profundidad de raíces (m)	Espaciamiento entre plantas (m)	Espaciamiento entre hileras de plantas (m)
Tomates	1.0 - 1.2	1.0	1.0 - 2.0
Hortalizas varias	0.3 - 0.6	1.0	1.0 - 2.0
Citrus	1.0 - 1.2	3.0 - 6.0	5.0 - 7.0
Frutales de hoja caduca	1.0 - 2.0	2.0 - 8.0	4.0 - 8.0
Viñas	1.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 4.0

Para las condiciones del ejemplo:

$$(CC - WP) \text{ ——— } (31 - 22) \text{ ——— } 108 \text{ mm/m}$$

$$I_{dx} = Y \cdot (CC - PMP) \cdot Z \cdot P/100$$

Ecuación 14.4

- Y** = es la porción de la humedad aprovechable que se ha agotado y que se desea regar.
- CC - PMP)** = Es el Rango de Humedad aprovechable entre Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente expresada en mm/m.
- Z** = Es la profundidad Radicular considerada (m). (Cuadro N° 28)
- P** = Es el área humedecida como un porcentaje del área total. (Ecuación 14.2).
- I_{dx}** = $0.30 \times 108 \times 1.5 \times 42/100$
- I_{dx}** = 20.4 (mm)

La frecuencia de riego (li)

$$li = \frac{I_{dx}}{T} = \frac{h}{UC}$$

Ecuación 14.5

$$li = \frac{20.4 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm/día}} > 3 \text{ días}$$

I (dn), la lámina neta de agua, se calcula a partir de la Frecuencia de Riego y el máximo uso-consumo

$$I(dn) = \text{Frecuencia} \times UC \text{ máximo}$$

Ecuación 14.6

$$I(dn) = 3 \text{ días} \times 6.5 \text{ mm/día} = 19.5 \text{ mm}$$

Se recomienda láminas más pequeñas e intervalos más pequeños para aumentar la productividad, ya que las aplicaciones pueden ser controladas con mayor precisión y las pérdidas por evaporación serán mínimas. En tales casos, con una frecuencia de uno o dos días pueden asumirse igual lámina neta e igual transpiración diaria. Frecuentemente, las aplicaciones altas no afectan la capacidad del diseño hidráulico.

- d. Para determinar la carga a aplicar en cada riego debe hacerse una estimación de la eficiencia de aplicación, la cual es función de las pérdidas bajo la zona radicular y la uniformidad de aplicación.

La carga de agua en cada riego es igual a la lámina neta dividida por la eficiencia de aplicación.

$$I_d = \frac{100 I_{dn}}{TR \cdot EU}$$

Ecuación 14.7

I_d = carga de agua en cada riego (mm)

I_{dn} = es la lámina neta de riego (mm)

TR = es la razón entre transpiración y aplicación

EU = es la uniformidad de aplicación.

La uniformidad de aplicación (EU) da una estimación del porcentaje de la profundidad media de aplicación. Bajo un buen manejo puede esperarse perder aproximadamente 10 % del agua, ya sea por evaporación o percolación; por lo tanto TR = 0.90. Para este caso se ha asumido un valor de EU = 92 %, el cual es posible de corregir mediante:

$$EU' = 100 \frac{qn'}{qa'}$$

Ecuación 14.8

- EU' = Corresponde a la uniformidad de emisión (control) expresado en porcentaje
- qn' = Es el promedio de descarga (litros/h) del cuarto más bajo de los emisores
- qa' = Es el promedio de descarga (litros/h) de todos los emisores.

Aplicando la Ecuación 14.7 (Id) se obtiene:

$$Id = \frac{100 \times 19.5}{0.90 \times 92}$$

$$Id = 23.6 \text{ mm}$$

- e. Duración del Riego: Cuando se utilizan 6 emisores por árbol, se obtiene un promedio de descarga total $qa = 34.1$ litros/h, con igual espaciamiento entre laterales ($S1$) y entre emisores (Se) de 6.1 m.

$$I_t = \frac{K \text{ Id } Se \text{ S1}}{qa}$$

Ecuación 14.9

$$I_t = \frac{1.0 \times 23.5 \times 6.1 \times 6.1}{34.1}$$

$$I_t = 25.75 \text{ h}$$

- K = es una constante igual a 1.0 en unidades métricas y 0.623 para unidades inglesas.
- Id = carga de agua en cada riego para cada aplicación (mm)
- Se = es la distancia entre emisores sobre la línea
- $S1$ = es el espaciamiento promedio entre líneas (m)
- I_t = es el tiempo total de operación para cada unidad operacional durante cada ciclo de riego (h).

El valor de I_t encontrado debería mejorarse para una óptima eficiencia operacional. Así, si se toma $I_t = 24$ h y se reemplaza en la Ecuación 14.9, el grado de ajuste a la descarga del emisor es:

$$q_a = \frac{1.0 \times 23.6 \times 6.1 \times 6.1}{24}$$

$$q_a = 36.6 \text{ litro/h}$$

En el diseño se supuso que el volumen relativo de suelo humedecido provenía suficiente seguridad para la frecuencia dada. Sin embargo, I_t puede ser reducido si un sistema de captación adicional es puesto en marcha. En muchos sistemas, existe una lenta disminución de q_a en el tiempo de uso de estos. En este caso, no se obstruirán debido a que la calidad del agua es excelente. Además, el tipo de emisores utilizado (salida múltiple), tiene un flujo semiturbulento, que impediría en cierta medida el depósito de sales o de otros materiales.

- f. Selección del emisor: El emisor seleccionado descarga 31.4 litros/h a 10.0 m y 41.2 litros/h a 15.24 m de presión (altura) de acuerdo con las tablas proporcionadas por el fabricante (Fig. 60). Con base en la Ecuación 14.10, el exponente de descarga del emisor es:

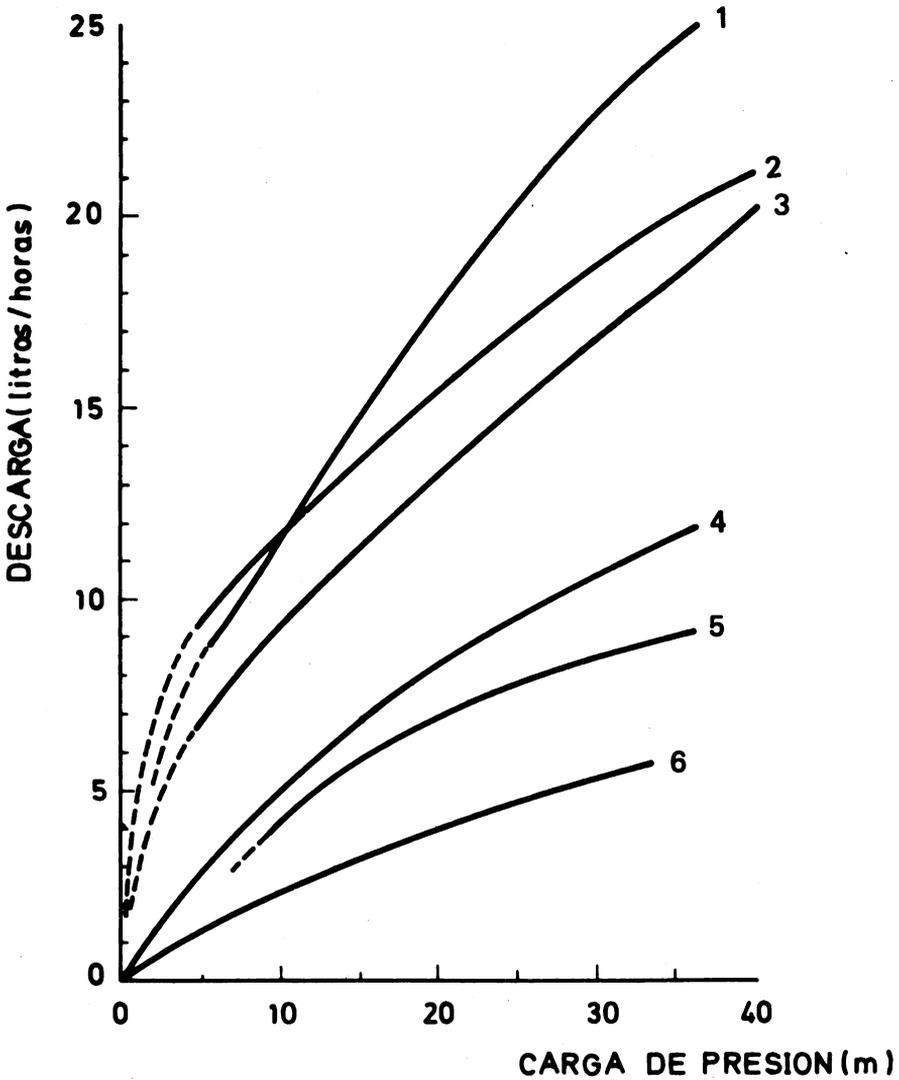
$$X = \frac{\log (q_1/q_2)}{\log (H_1/H_2)}$$

Ecuación 14.10

$$X = \frac{\log (31.4/41.2)}{\log (10.0/15.3)}$$

$$X = 0.64$$

Cuando la temperatura del agua es sólo 10° C, la curva de descarga nominal para el emisor debería ser aproximadamente 5 % más baja. Cuando la temperatura es 35° C, la curva de descarga nominal del emisor debería ser aproximadamente 7 % más alta. Estas pequeñas variaciones en la descarga no deberían ser un problema, ya que la mayor descarga ocurrirá en el período de mayor demanda.



- 1 EMISOR DE CAMINO LARGO 10 LITROS / HORA
- 2 EMISOR DE ORIFICIO 10 LITROS / HORA
- 3 EMISOR DE LAMINA LARGO 8 LITROS / HORA
- 4 EMISOR DE CAMINO LARGA 4 LITROS / HORA
- 5 EMISOR DE SALIDA MULTIPLES 3 LITROS / HORA
- 6 EMISOR DE CAMINO LARGO 2 LITROS / HORA

Fig. 60. Descarga de diversos tipos de emisor para diferentes cargas de presión.

Una solución alternativa para seleccionar la descarga del emisor es determinar T y estimar EU del siguiente modo: si se supone que la frecuencia de riego (l_i) = 1 día, se seleccionan valores aceptables para Se (distancia de emisores sobre la hilera) y S1 (distancia entre hileras), y se ensaya diferentes valores l_t (tiempo de riego) tales como 24; 12; 8 ó 6 horas utilizando la Ecuación 14.11.

$$q_a = K \frac{T \text{ Se } S1}{0.9 \text{ EU}/100} \frac{l_i}{l_t}$$

Ecuación 14.11

T = Valor máximo de transpiración (mm/día)

Se = Distancia de emisores sobre la línea (m)

S1 = Distancia de las líneas (de tuberías)

EU = Uniformidad de emisión (%)

l_i = Frecuencia de riego (días)

l_t = Tiempo de riego (horas)

q_a = Descarga del emisor (litros/h)

$$q_a = \frac{1.0 \times 6.5 \times 6.1 \times 6.1}{0.9 \times 92/100} \times \frac{1}{8}$$

$$q_a = 36.6 \text{ (litros/h)}$$

La capacidad del sistema es la misma de las descargas de muchos emisores que operan simultáneamente.

2. Ubicación del Sistema

El tamaño y número óptimo de subunidades se seleccionan con base en razones de tipo económico y de operación eficiente, mientras se reúnen los requisitos necesarios del riego:

a. Es importante mantener al mínimo los costos y los caudales; para esto es conveniente diseñar el sistema para los períodos de ma-

yor demanda y para los períodos de mayor tiempo de operación, que normalmente coinciden con los de mayor demanda. Para el diseño en estudio, que está basado en $l_t = 24$ h; $li = 3$ días, el número de estaciones de operación (o unidades) es:

$$N = \frac{li \cdot 24}{l_t}$$

Ecuación 14.12

$$N = \frac{3 \times 24}{24} = 3 \text{ unidades}$$

b. Considerando el punto anterior, cada una de las 3 estaciones o unidades es dividida en 8 subunidades. El área de cada una de las 24 subunidades es:

$$A_s = \frac{64.75 \times 10.000}{24} = 26.980 \text{ m}^2$$

Para el cálculo del largo óptimo del lateral se usa la Ecuación 14.13, en donde la constante $K = 0.685$ para unidades métricas.

$$L_1 = K A_s^{0.45}$$

Ecuación 14.13

A_s = Área de la subunidad

L_1 = $0.685 (26.980)^{0.45}$

L_1 = 67.6 m

El largo óptimo para las líneas principales es aproximadamente:

$$L_m = K A_s^{0.55}$$

Ecuación 14.14

K es un coeficiente que se ajusta para discrepancias dimensionales y es igual a 1.0 para unidades métricas y 0.888 para unidades inglesas.

Cuando los laterales van en ambas direcciones de la línea principal, puede utilizarse un valor de $K = 0.685$ (en unidades métricas); al mismo tiempo para estas mismas condiciones puede utilizarse $K = 0.730$ (en unidades métricas) para la línea principal.

$$L_m = 0.730 (26.980)^{0.55}$$

$$L_m = 199.7 \text{ m.}$$

Estas dimensiones coinciden con el diseño del problema en estudio e indican que la ubicación y las medidas dadas resultan económicas.

c. En los campos con pendientes la posición más económica para la Bomba es el punto más alto.

3. Diseño de Laterales y Líneas Principales

Se realizará el siguiente procedimiento:

a. Las subunidades con subidas, ya sea el principal o los laterales, implican normalmente una gran variación de presión. Para el ejemplo se seleccionará la subunidad en la esquina noroeste, la cual es operada como parte de la estación número 3 (Fig. 61).

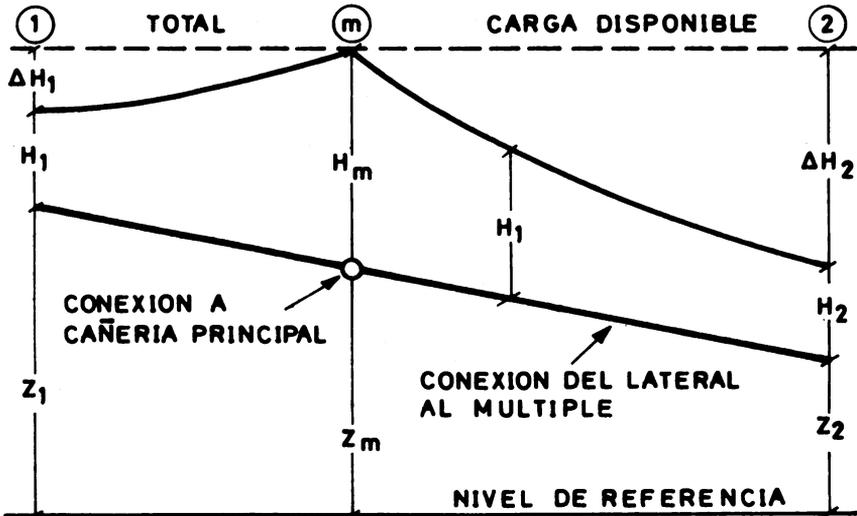


Fig. 61. Cargas de presión en la red de cañerías en el sistema de riego por goteo (superficie con pendiente).

b. $EU = 92\%$ (fue asumido anteriormente)

c. $q_a = 36.6$ (litros/h) (fue calculado)

d. El largo del lateral es 67 m y se obtiene de tablas o gráficos proporcionados por los fabricantes, en los que se relaciona el flujo con la pérdida de carga para diferentes tipos de cañerías. El diseño está basado en: a) emisor con 6 salidas por árbol b), $S_t = S_e = 6.1$ m y c) el número de emisores por lateral es $n = 11$.

El flujo promedio en el principal:

$$Q_a = K n e q_a$$

Ecuación 14.15

$$Q_a = \frac{1}{3600} \times 11 \times 36.6$$

$$Q_a = 0.112 \text{ (litros/seg)}$$

e. El largo del principal según las tablas antes mencionadas es 201.6 m. El diseño está basado en $S_r = S_l = 6.1$ m y el número de laterales es $N_l = 33$. El flujo promedio en el principal con los laterales extendidos en ambas direcciones es:

$$Q_m = N_l 2 Q_a$$

Ecuación 14.16

$$Q_m = 33 \times 2 \times 0.112$$

$$Q_m = 7.4 \text{ (litros/seg)}$$

f. Las pérdidas de carga en la línea principal se calculan con la siguiente ecuación:

$$H_1 = \frac{J n e (1 + 1f) F}{100}$$

Ecuación 14.17

H_1 = pérdida de carga en el lateral (m)

J = es el gradiente de pérdidas por fricción en tubo (cañería) m/100 m.

n_e = es el número de emisores sobre el lateral

l = largo de la cañería entre emisores

l_f = pérdida de carga originada por los goteros

F = Coeficiente de compensación para la descarga a lo largo de la cañería

$$H_1 = \frac{39. \times 11 \times (6.1 + 1.6) \times 0.369}{100}$$

$$H_1 = 1.3 \text{ m}$$

La pérdida de carga en el Principal; con cañerías del tipo 3-in IPS y que soporta hasta 100 psi, en la cual $J = 1.65\text{m}/100 \text{ m}$ y $F = 0.36$

$$H_m = \frac{J L_m F}{100}$$

Ecuación 14.18

$$H_m = \frac{1.65 \times 201.6 \times 0.36}{100}$$

$$H_m = 1.2 \text{ m.}$$

En algunas oportunidades las cañerías principales pueden ser diseñadas igual que las laterales y normalmente el costo es menor. Sin embargo, esto no siempre ocurre y depende del diámetro de cada tubería.

g. La altura de Presión promedio de la subunidad es $H_a = 12.2 \text{ m}$; $q_a = 36.6$ (litros/h). La diferencia de elevación entre el punto más bajo y más alto de la tubería principal es:

$$EI = \frac{\% \text{ pendiente}}{100} Lm$$

Ecuación 14.19

$$EI = \frac{+ 0.25}{100} \times 201.6$$

$$EI = 0.5 \text{ m.}$$

La pérdida de carga total en la subunidad es:

$$H = H1 + Hm + EI$$

Ecuación 14.20

$$H = 1.3 + 1.2 + 0.5$$

$$H = 3.0 \text{ m.}$$

La razón de la mínima descarga en la subunidad es:

$$(qn/qa)_s = 1.00 - Rfn' \cdot X \cdot \frac{H1 + Hm + EI}{Ha}$$

Ecuación 14.21

$$(qn/qa)_s = 1.00 - 0.22 \times 0.64 \times \frac{1.3 + 1.2 + 0.5}{12.2}$$

$$(qn/qa)_s = 0.965$$

X = exponente de descarga del emisor

Rfn' = Se selecciona si EI es mayor o menor que 1/4 (H1 - Hm).
Corresponde a un ajuste al flujo mínimo y depende del diámetro usado.

h. La uniformidad de emisión de la subunidad es:

$$EU_s = 100 \left(1.0 - \frac{1.27 V}{e} \right) (qn/qa)_s$$

Ecuación 14.22

EU_s = Uniformidad de emisión de la subunidad; se expresa en porcentaje

e = es 1.0 ó el número de emisores por planta en el caso de que sean más de uno ($Se \cdot S1/St \cdot Sr$)

V = coeficiente de variación (de fabricación)

qn = es la descarga mínima calculada con la mínima presión; utilizando la relación nominal entre descarga del emisor y altura de presión

qa = es la descarga media del emisor (considerando todos los emisores)

$$EU_s = 100 \left(1.0 - \frac{1.27}{1} \right) 0.33 \times 0.965$$

$$EU_s = 92.5 \%$$

i. El diseño de prueba es aceptable, ya que $EU_s = 92,5 \%$ es muy próximo al asumido $EU = 92 \%$.

j. Mientras los valores de EU no están malos, los valores de qa ; Qa , $H1$; Hm ; y Ha necesitan ser recalculados.

La presión de entrada para el flujo promedio en el lateral es igual al promedio de presión sobre el principal, $H1 = Ha$, y para laterales con tamaño de cañería uniforme.

$$Ha = H_1 = Ha + 0.77 (H_1 \pm E1/2)$$

Ecuación 14.23

$$Ha = 12.2 + 0.77 \times 1.3 + (0.5/2)$$

$$Ha = 13.2 \text{ m.}$$

La altura de presión de entrada a la cañería principal puede ser calculada con la ecuación 14.24, dejando $R_h = 0.77$.

$$H_m = H_a + R_h \cdot (H_m \pm E1/Z)$$

Ecuación 14.24

$$H_m = 13.2 + 0.77 \left(1.2 + \frac{0.5}{2} \right)$$

$$H_m = 14.4 \text{ m.}$$

H_m = presión de entrada en la tubería principal

H_a = es la altura de presión promedio en principal

R_h = es la razón de ajuste a la pérdida de carga que depende del número de cañerías de diferente diámetro.

Debido a que existe una pérdida de carga por causa de la adición de válvulas o filtros, la presión de entrada a la tubería principal debe ser ajustada. Las pérdidas de carga debida a estas singularidades o *fittings* se estiman en 1.5 m aproximadamente. Esto no afecta a EU y no es acumulativo.

$$H'm = 14.4 + 1.5$$

$$H'm = 15.9 \text{ m}$$

k. La razón de flujo en las subunidades y las alturas de presión requeridas son:

$$Q_s = Q_m = 7.4 \text{ litros/seg}$$

$$H_s = H'm = 15.9 \text{ m}$$

La razón de máxima descarga para la subunidad es:

$$(q_x/q_a)_s = 1.00 + R_{fx} \cdot X (H_1 + H_m \pm E1)/H_a$$

Ecuación 14.25

$$(qx/qa)_s = 1.00 + 0.58 \times 0.64 \left\{ (1.3 + 1.2 + 0.5)/12.2 \right\}$$

$$(qx/qa)_s = 1.09$$

Entonces, cuando $EU_s = 92,5 \%$ es usado en cálculos de requerimientos de riego, el área de humedecimiento sólo recibe $1.09 \times 100/92,5 = 1,18$ veces lo requerido para la profundidad de aplicación. Esto no debería causar problemas con la precipitación.

La uniformidad de emisión absoluta para la subunidad es:

$$(EUa)_s = 100 \left\{ 1.0 - \frac{1.27}{e} v \right\} \cdot \frac{1}{2} \left((qn/qa)_s + (qa/qx)_s \right)$$

Ecuación 14.26

$$(EUa)_s = 100 \left(1.0 - \frac{1.27}{1} \cdot 0.033 \right) \cdot \frac{1}{2} (0.965 + 1/1.09)$$

$$(EUa)_s = 90 \%$$

la cual es aceptable, ya que cae dentro del rango recomendado para el diseño.

4. Selección de la Línea Principal y Requerimientos de la Bomba

Esta selección debe hacerse pensando en el costo del tamaño de la línea principal y de la Bomba. Con una válvula de control de presión a la entrada de cada subestación se controlarían las diferencias de presión posibles.

a. La capacidad del sistema debería ser suficiente para abastecer las 8 sublíneas principales de cada subestación (8 subestaciones cada una con una línea principal).

$$Q = 8 Q_m$$

Ecuación 14.27

$$Q = 8 \times 7.4$$

$$Q = 59.2 \text{ (litros/seg)}$$

Esto también puede ser calculado con el uso de la Ecuación 14.28.

$$Q = K \cdot A/N \cdot qa/SeS1$$

Ecuación 14.28

$$Q = 2.78 \times 64.75/3 \times 36.6/6.1 \times 6.1$$

$$Q = 59 \text{ (litros/seg)}$$

K = es una constante igual a 2.78 para unidades métricas

A = es el área que será regada

N = es el número de estaciones de operación

b. Se debe seleccionar el tamaño más económico de la cañería; para esto debe ser estimado el número promedio de horas de operación por año.

Las horas de operación requeridas para suplir el requerimiento total IDN = 690 mm son:

$$I_T = N \frac{IDN}{Idn} \cdot I_t$$

Ecuación 14.29

I_T = número de horas de operación en toda la temporada.

N = número de estaciones de operación

IDN = requerimientos netos totales

Idn = profundidad neta de aplicación (lámina)

I_t = tiempo de riego

$$I_T = 3 \times \frac{690}{19.5} \times 24$$

$$I_T = 2548 \text{ (h)} = 106 \text{ días de riego efectivo}$$

c. El flujo en la línea principal entre la Bomba y el Punto A es $Q = 59.2$ (litros/seg). En la línea subprincipal entre A y B el flujo es $Q_m = 14.8$ (litros/seg)

d. Las pérdidas de carga en la línea principal de 8 pulgadas con $J = 1.1$ (m/100 m) de las Tablas que relacionan pérdidas de carga con diámetro en cañería de diferentes materiales:

$$H = \frac{JL}{100}$$

Ecuación 14.30

$$H = \frac{1.1 \times 200}{100}$$

$$H = 2.2 \text{ m}$$

y las pérdidas por fricción en los 335 m de la línea subprincipal es:

$$H = \frac{0.7 \times 335}{100}$$

$$H = 2.3 \text{ m}$$

e. La carga dinámica total para la descarga de la bomba es la suma de lo siguiente:

Hs de la subunidad crítica	15.9 m
Altura adicional para compensar deterioro del emisor o pequeños obstáculos	0.0 m
Pérdidas por fricción en línea principal	2.2 m
Pérdidas por fricción en subprincipal	2.3 m
Pérdidas por fricción en control automático de la válvula (para válvulas con flujo $2 Q_m$).	4.6m
Pérdidas por fricción en el regulador de presión	0.0 m
Pérdidas por fricción en el filtro principal y control de altura	3.5 m

Pérdidas por fricción en metros de flujo	1.0 m
Pérdidas por fricción debidas al inyector de fertilizante	0.0 m
Diferencia de altura entre la bomba y el punto más alto	-0.5 m
Otro tipo de pérdidas (10 % de pérdidas por fricción y otras).	<u>1.4 m</u>
H_T	30.4

f. Los requerimientos de descarga de la Bomba son:

$$Q = 59.2 \text{ (litros/s) y}$$

$$H_T = 30.4 \text{ m}$$

La potencia de la bomba, requerida para el sistema, con una eficiencia del 80 % es:

$$\text{Pot} = \frac{Q H_T}{K \text{ Eff}}$$

Ecuación 14.31

$$\text{Pot} = \frac{59.2 \times 30.4}{0.76 \times 80}$$

$$\text{Pot} = 29.5 \text{ BHP}$$

$K =$ Constante que para unidades Inglesas es 39.6

5. Costo del Riego

La estimación de los beneficios netos debe ser determinada para cada situación (o alternativa); ya que el costo del riego anual es la sumatoria de: potencia de la bomba fijada, manejo, labores y mantención, calidad y cantidad de agua, y costos de inyección de fertilizante.

a. El costo anual de la bomba puede ser calculado ya que $\text{Pot} = 29.5 \text{ BHP}$; $I_T = 2548 \text{ h}$. La relación de ambos proporciona el

consumo unitario de combustible; posteriormente, conociendo el costo de combustible, se calcula el costo total de uso de la bomba.

b. El costo anual del sistema puede ser estimado a través de la suma de costos del capital (tiempo en que se recobra). Cada componente del sistema tiene un capital invertido y el tiempo que demore en recobrar ese capital depende del largo de vida del componente; por lo tanto, debe asignársele una depreciación por cada año de uso.

c. Los costos de manejo, de labores y de mantención deben basarse sobre experiencias locales. La precipitación anual de 203 mm está concentrada en un período de 3 meses en el año y el agua de riego es de excelente calidad, lo que implica no realizar prácticas adicionales relacionadas con un control de salinidad del suelo.

d. El agua y su costo (al mismo tiempo que el costo de inyectar fertilizante) son afectados por la eficiencia de riego. Para este diseño, la eficiencia de aplicación promedio del riego puede ser calculada por:

$$E_a = TR \cdot EU$$

Ecuación 14.32

$$E_a = 0.90 \cdot 0.925$$

$$E_a = 83 \%$$

y el volumen de agua requerida para el riego es:

$$VI = K \cdot A \cdot \frac{IDN}{0.90 \cdot EU}$$

Ecuación 14.33

$$VI = 1\,000 \times 64.75 \cdot 688 / (0.90 \times 0.925)$$

$$VI = 535\,111 \text{ m}^3$$

Este volumen puede ser reducido (dada la excelente calidad del agua) con un cuidadoso manejo del agua. Esto requeriría una aplicación puntual y cuidadosa del agua de tal modo de obtener una alta $TR = 0.95$

$$Ea' = 0.95 \times 92.5 = 88 \%$$

y

$$V'I = 506\,947$$

Esto equivale a un ahorro de 28 164 m³ en la temporada.

TEMAS PARA DESARROLLAR Y PREGUNTAS

1. ¿En qué consiste el riego por goteo?
2. Enumere los componentes de un riego por goteo.
3. Explique cómo funcionan los diferentes tipos de goteros.
4. Señale cuál será la distribución de sales en el perfil del suelo cuando se usa el sistema de riego por goteo. Discuta esta distribución desde el punto de vista de las plantas y compare la situación producida con el riego por surcos.
5. Diseñe un sistema de riego por goteo para un huerto frutal de 5 ha cuyas características sean establecidas por Ud. mismo.
6. Investigue la superficie de riego por goteo en su país o región, los principales problemas que se han presentado, las perspectivas futuras de este método de riego, el costo unitario y los cultivos susceptibles de regar.
7. Cómo podría diseñarse un sistema de riego por goteo de acuerdo con las características de conducción de agua en el suelo para mantener, en vez de bulbos mojados, fajas del terreno humedecidas.
8. Haga un diagrama de flujo del procedimiento de cálculo para el diseño de un sistema de riego por goteo.

BIBLIÓGRAFIA

1. BRANDT, A. y BRESLER, E. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 675—682. 1971.
2. BRESLER, E. y BRANDY, A. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 683—689. 1971.
3. ESPAÑA. OFICINA DE ESTUDIOS HIDROGRAFICOS. Riego por Goteo, su Fundamento, Elementos y Dispositivos. Madrid. 1975. 97 pp.
4. F.A.O. Riego por Goteo. Estudios sobre Riego y Drenaje N° 14. Roma. 1974. 160 pp.
5. GOLDBERG, D., GORNAT, B., RIMON, D. Drip Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices. Drip Irrigation Scientific Publication. Israel. 1976. 296 pp.
6. KELLER, I. y KARMELI, D. Trickle Irrigation Desing Rain Bird Sprinkler Manufacturing Company, Glendora, California. U.S.A. 1975. 133 pp.
7. PAIR, C.H. Sprinkler Irrigation. Drip Irrigation. Sprinkler Irrigation Association. Capítulo 20. 1975. 50 pp.

El ejemplo desarrollado en este Capítulo ha sido adaptado y resumido del que presentan Keller y Karmeli ⁶.

**Este libro se terminó de imprimir en los
talleres gráficos de EDITORIAL TEXTO
LTDA., en el mes de mayo de 1985. San
José, Costa Rica, C. A.**