

UNIDAD N° 7

Métodos de riego gravitacionales. Descripción, observación, diseño, operación y evaluación de métodos de riego gravitacionales (surco, amelgas y taipas arroceras). Eficiencias de riego.

Equipo docente:

Ing. Agr. Leopoldo J. Génova (Dr. M. Sc.), Profesor Titular Ordinario

Ing. Agr. Ricardo Andreau, Profesor Adjunto Ordinario

Ing. Agr. Marta Etcheverry (M. Sc.) Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario

Ing. Agr. Pablo Etchevers, Jefe de Trabajos Prácticos

Ing. Agr. Walter Chale, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Luciano Calvo Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Facundo Ramos, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Cecilia Pascual, Ayudante Alumna

INDICE TEMATICO

1. El riego introducción.
 - 1.1 Objetivos
 - 1.2 Clasificación de métodos de riego.
 - 1.3 Breve descripción de métodos.
- 2 Riego por surcos.
 - 2.1 Introducción
 - 2.2 Elementos técnicos.
 - 2.3 Zona de humedecimiento.
 - 2.4 Forma del surco.
 - 2.5 Espaciamiento entre surcos.
 - 2.6 Pendiente y dirección.
 - 2.7 Ensayo de caudales.

- 2.8 Longitud.
- 2.9 Diseño, operación y evaluación de surcos.
 - 2.9.1 Sin pendiente, sin salida de agua al pie.
 - 2.9.2 Con pendiente y salida de agua por escurrimiento.
 - 2.9.2.1 Ejercicio de diseño.
 - 2.9.2.2 Ejercicio.
 - 2.9.3 Riego por pulsos o caudal discontinuo.
- 3 Riego por melgas.
 - 3.1 Introducción
 - 3.2 Dimensionamiento.
 - 3.2.1 Melgas con pendiente.
 - 3.2.2 Melgas sin pendiente.
- 4. Eficiencias de riego.
- 5. Bibliografía.

1. El riego. Introducción.

De acuerdo con Israelsen (1979) el origen del riego fue Egipto y la época 5000 años antes de la era cristiana. Sin embargo, existen obras de riego en China y en la Mesopotamia asiática coincidentes con esa época.

Los restos encontrados, principalmente represas y canales, indican la majestuosidad de estas obras o, visto de otra manera, son ejemplo de la importancia que el agua tuvo en la vida de estos pueblos.

En América, los aztecas, los mayas, los incas y los indios norteamericanos dejaron restos de grandes obras de ingeniería para la captación y conducción del agua. Domesticaron el maíz 5000 años A.C. y se establecieron en comunidades 3000 AC. Entre las obras mas sobresalientes se encuentran las terrazas y los sistemas de riego.

Resulta interesante observar en estas antiguas zonas de riego problemas de salinidad y aun terrenos estériles ensalitrados, como en el caso del valle de Mesopotamia, el delta del río Nilo o en el norte de Perú.

Este problema ha hecho pensar a algunos técnicos en la temporalidad del riego, ya que al haber acumulación de sales, la agricultura no puede ser permanente.

En el siglo XIX los proyectos de riego a gran escala en la India, Egipto y otras regiones incrementaron el área de riego en seis veces, los progresos de la Ingeniería Hidráulica hicieron enorme impacto en la planificación, diseño y construcción de variados sistemas de riego. En el siglo XX el

progreso del riego ha sido impresionante, sobre todo después de la segunda guerra mundial. (Gurovich, 1999).

El incremento en la superficie regada del mundo se presenta en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1: Incremento del área regada en el mundo

Año	Área regada (10 ⁶ ha)
1800	8
1900	48
1940	92
1959	149
1970	210
1980	235
1990	255
2000	296 (estimada)

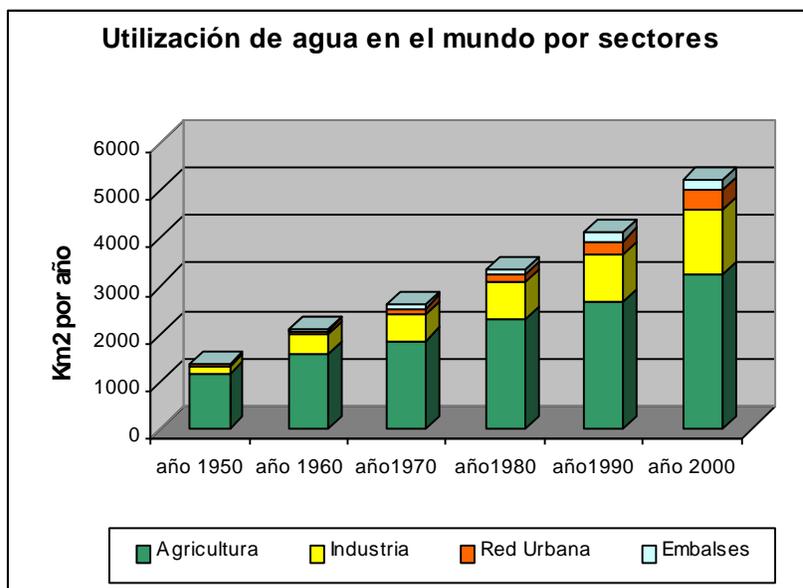
Fuente: Anuario FAO, 1996.

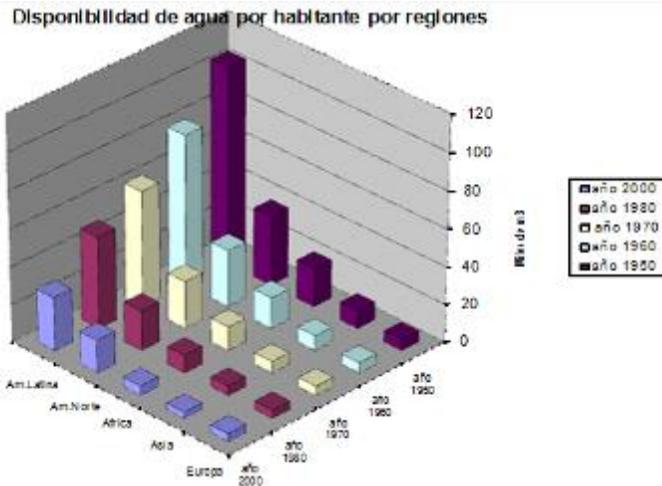
Según la misma fuente, se presentan en el **Cuadro 2** los países con superficies regadas de mayor importancia.

Cuadro 2: Áreas de cultivo y áreas de riego (FAO, 1996).

PAIS	Hectáreas totales 10 ²	% del territorio cultivado	Hectárea cultivadas	% del territorio irrigado	Hectáreas regadas
AFRICA					
Libia	1.759.540	1	1.759.540	11	193.550
Egipto	1.001.449	3	3.004.347	100	3.004.347
EUROPA					
Noruega	385.935	3	1.157.805	11	127.358
Dinamarca	43.077	60	2.584.620	17	439.385
Holanda	33.920	26	8.819.920	0.06	5.500
Rumania	237.500	45	10.687.500	33	3.526.875
OCEANIA					
N. Zelanda	269.057	2	538.114	55	295.963
Australia	7.682.300	6	46.093.800	4	1.843.752
ASIA					
A. Saudita	2.149.690	1	2.149.690	37	795.385
China	9.596.961	10	95.969.610	47	45.105.716
Israel	20.770	21	436.170	49	213.723

Japón	377.643	12	4.531.716	62	2.809.664
AMERICA DEL NORTE Y CENTRAL					
Panamá	77.082	8	539.574	6	32.374
Cuba	110.922	30	3.327.660	27	898.468
EE.UU.	9.363.498	21	196.633.500	10	19.663
México	1.958.201	13	25.456.613	21	5.345.889
AMERICA DEL SUR					
Argentina	2.779.221	13	36.129.873	5	1.806.493
Brasil	8.511.965	9	76.607.685	3	2.298.231
Bolivia	1.098.581	3	3.295.743	5	164.787
Colombia	1.141.748	5	5.708.740	10	570.874
Chile	742.000	6	4.452.000	55	2.448.600
Ecuador	275.800	10	2.758.000	21	579.180
Paraguay	406.752	6	2.440.512	3	73.215
Perú	1.285.216	3	3.855.648	8	308.451
Uruguay	176.215	7	1.233.505	8	98.680





1.1 Definición y Objetivos.

Se define al riego, dentro de un sin número de acepciones posibles, como la aplicación artificial de agua a las tierras cuando las lluvias son insuficientes para proveer totalmente a las necesidades de agua de los cultivos.

El principal objetivo que se persigue mediante la practica del riego es, por lo tanto, normalizar la disponibilidad de agua del suelo para optimizar su utilización por parte de los vegetales.

Este objetivo, si bien es el mas difundido y aceptado, no es el único. De este modo, podemos enumerar un conjunto de objetivos que se persiguen mediante la aplicación de agua, a saber:

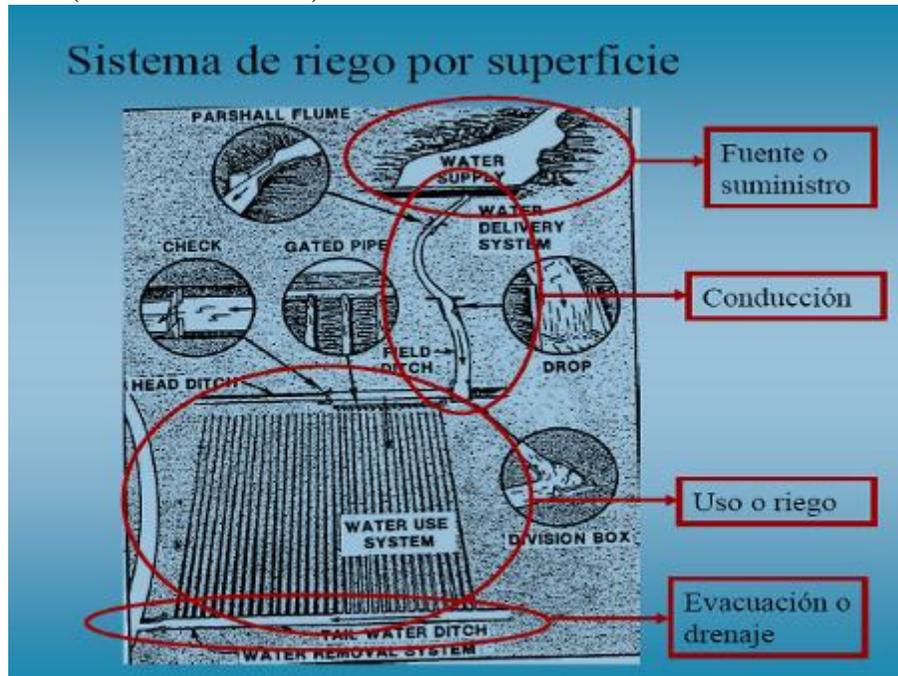
- Dilución y lavado de sales del suelo (hidromejoramiento) y mantenimiento del balance salino (requerimiento de lixiviación).
- Aplicación de fertilizantes (fertiriego) y agroquímicos en general.
- Lucha contra heladas, mediante aspersion sobre la parte aérea del vegetal.
- Ablandar terrones de tierra y aminorar el problema de encostramiento a compactación superficial del suelo.
- Regulación de la temperatura del suelo y de la atmósfera (nebulización), mejorando las condiciones ambientales.
- Control de malezas (arroz).

A su vez podemos clasificar al riego de acuerdo a su necesidad e intensidad en función de la demanda evapotranspirativa y el aporte por precipitaciones como:

COMPLEMENTARIO cuando la lluvia aporta no menos de un 30 % y no mas de un 60 % del total de agua evapotranspirada.

SUPLEMENTARIO las lluvias aportan casi el 100% d la demanda evapotranspirativa, pero con irregularidades en el régimen en lapsos breves (1 a 3 semanas de sequía).

INTEGRAL el periodo y la magnitud del déficit hídrico es significativo, como en el caso del clima árido o en climas subtropicales en donde se alternan estaciones de lluvia y de sequía prolongados (mas de 3 meses).



1.2 Clasificación de métodos de riego.

Según Palacios Vélez (1982), un intento de clasificación de métodos de riego por sus características mas destacadas sería el siguiente:

1. METODOS SUPERFICIALES-GRAVITACIONALES.

A. INUNDACION TOTAL (con o sin pendiente)

- | | |
|-----------------------|--|
| a. Desbordamiento | zanjas en contorno.
zanjas normales curvas de nivel.
Terrazas. |
| b. Secciones grandes. | Rectangulares. |

vean perjudicadas. Se levantan con arado de discos y pala frontal y el método se adapta perfectamente a la siembra directa, lo que además de darle sustentabilidad al sistema permite la estabilización de las terrazas y canales y favorece la rutina de los operarios para el riego. Como ventaja adicional, estas terrazas actúan como controladoras de lluvias intensas, de manera que el potrero escurre los excedentes en forma controlada, lo que da una seguridad adicional al sistema.

En el caso de grandes áreas inundadas, casi exclusivamente referido al riego del arroz, en Argentina no se utiliza la sistematización en áreas rectangulares, que implican trabajos de nivelación con movimientos importantes de tierra, de modo de conformar áreas con pendiente cero (piletas) en ambos sentidos.

El riego en contorno, si bien es exigente en cuanto a la eliminación del microrelieve del lote, no modifica la pendiente natural del mismo. Se trazan y levantan bordos (“taipas”) siguiendo las curvas de nivel con una equidistancia de entre 3 a 10 cm, dependiendo de la pendiente del terreno. De este modo, al no sobrepasar estos límites de desnivel entre taipas, es posible mantener una lámina de agua de riego de entre 7 a 15 cm en la “cancha” (superficie comprendida entre dos taipas) de modo permanente a lo largo de los 100 días aproximados de riego de este cultivo.



El riego en cajas a nivel, es un método por gravedad que entrega agua a superficies niveladas de suelo durante periodos cortos. (Agricultura de las Américas, 1988). Las cajas a nivel comprenden la entrega del agua al suelo

nivelado de una parcela de terreno de cualquier forma, rodeada por un dique o barrera de control.

Difieren del riego por bordes nivelados pues estos tienen pendiente en dirección al riego. La clave consiste en cubrir con agua toda la superficie a regar tan rápidamente como sea posible, para que la diferencia del tiempo de infiltración sea mínima en toda el área de la caja. El avance del agua en la caja puede ser mantiforme o con surcos normales o anchos según el tipo de cultivo que se trate, ya que se adapta a cultivos de cobertura total como alfalfa, forrajeras y cereales menores, como cultivos en línea como algodón, sorgo y maíz. Este método de riego requiere inversiones grandes debido a los trabajos de nivelación y movimiento de tierra.

En el método de corrugaciones, (Bernardo, 1995) el agua se mueve a través de pequeños surcos construidos en la dirección de la máxima pendiente del terreno. Este método se adapta mejor a cultivos densos, tales como alfalfa, forrajeras y cereales. Los mini surcos poseen forma de V o U, con profundidad en torno a 10 cm, espaciados entre 40 a 75 cm. Toda la superficie del suelo es humedecida por el movimiento radial del agua dentro del suelo, por lo tanto se adapta mejor a suelos de textura media que poseen buena capacidad de movimiento horizontal del agua. Se utilizan pequeños caudales unitarios, entre 0,5 a 0,05 l/s lo que origina longitudes del orden de 30 a 180 m como máximo.

Las tazas o palanganas, así como, los surcos en zigzag constituyen casos especialmente adaptados a especies arbóreas y frutales. Estos sistemas favorecen la infiltración de agua en suelos pesados, aumentando la superficie mojada para responder mejor respecto del patrón de distribución de raíces de estas especies. En la **Figura 1** se presentan distintas distribuciones de surcos en zigzag, en cuadras o en dientes.

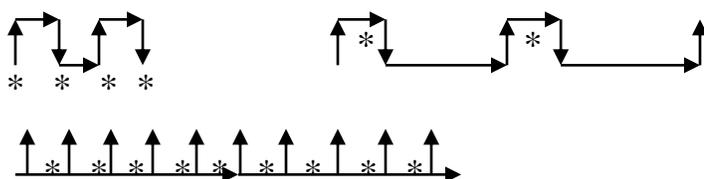


Figura 1

2. RIEGO POR SURCOS

2.1 Introducción.

La aplicación de agua por medio de surcos implica que la zona de raíces en el suelo se humedezca por la infiltración de agua a través del

perímetro mojado de pequeños cauces, los surcos, que constituyen la unidad de riego. Dado un determinado espaciamiento entre surcos, el agua cubre parcialmente el terreno (inundación parcial) y lo humedece por efecto de su avance tanto en profundidad como lateralmente.

El riego por surcos se adapta especialmente a cultivos en línea dado que no solo permite humedecer el suelo explorado por las raíces, sino que también se logra regular la humedad conforme al comportamiento y exigencias del cultivo en sus distintas etapas, ampliando el espaciamiento inicial y modificando el perfil de humedad.

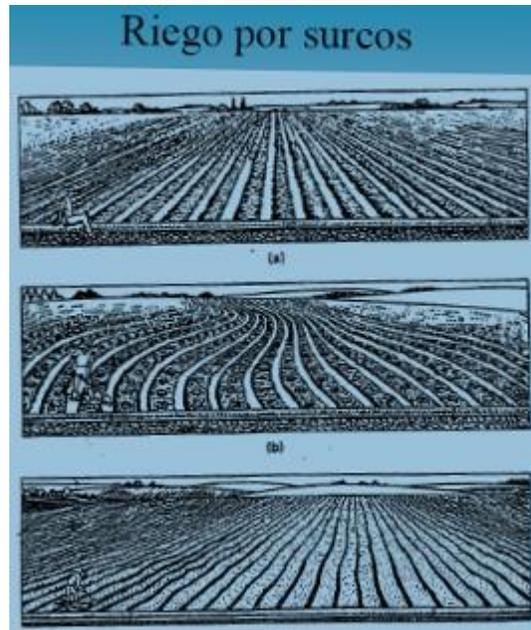
Muchas veces, el surco de riego es consecuencia de las labores culturales, tal es el caso del cultivo de la vid, maíz, etc.

Con respecto al tipo de suelo, este método es indicado para aquellos con buena velocidad de infiltración (aunque no excesiva) y baja erodabilidad. También se presta para suelos con tendencia a formar costras, que impiden la germinación.

La eficiencia del sistema puede considerarse media (cuadro 3) en tanto que los costos de instalación y operación no son elevados pudiéndoselo emplear con escasos trabajos de nivelación, en la implantación de cultivos anuales.

Cuadro 3: Eficiencia del riego por superficie. (Ames, 1962)

Sistema de riego Textura del suelo y topografía	melgas	surcos	melgas en contorno
Arenoso			
1. bien nivelado	60	40-60	45
2. nivelación regular	40-50	35	30
3. quebrado, alta pendiente	xxxx	20-30	20
Medio profundo			
1. bien nivelado	70-75	65	55
2. nivelación regular	50-60	55	45
3. quebrado, alta pendiente	xxxx	35	35
Medio poco profundo			
1. bien nivelado	60	50	45
2. nivelación regular	40-50	35	35
3. quebrado, alta pendiente	xxxx	30	30
Arcilloso			
1. bien nivelado	60	65	50
2. nivelación regular	40-50	55	45
3. quebrado, alta pendiente	xxxx	35-45	30



2.2 Elementos técnicos.

La unidad de riego denominada surco presenta un eje longitudinal, con un tramo inicial por donde ingresa el agua derivada de un canal, acequia o conducto, denominado cabecera y un tramo final, donde puede existir o no desagüe, llamado pie.

Se identifican, además todos los elementos técnicos

Correspondientes a los canales: sección, perímetro mojado, talud, radio hidráulico, etc.

2.3 Zona de humedecimiento.

Una condición muy importante a tener en cuenta es el concepto de velocidad de infiltración, ya que la misma limita la propia aplicación del método.

En suelos cuya velocidad de infiltración básica es menor de 5mm/h o mayor de 75mm, no es aconsejable la utilización de surcos.

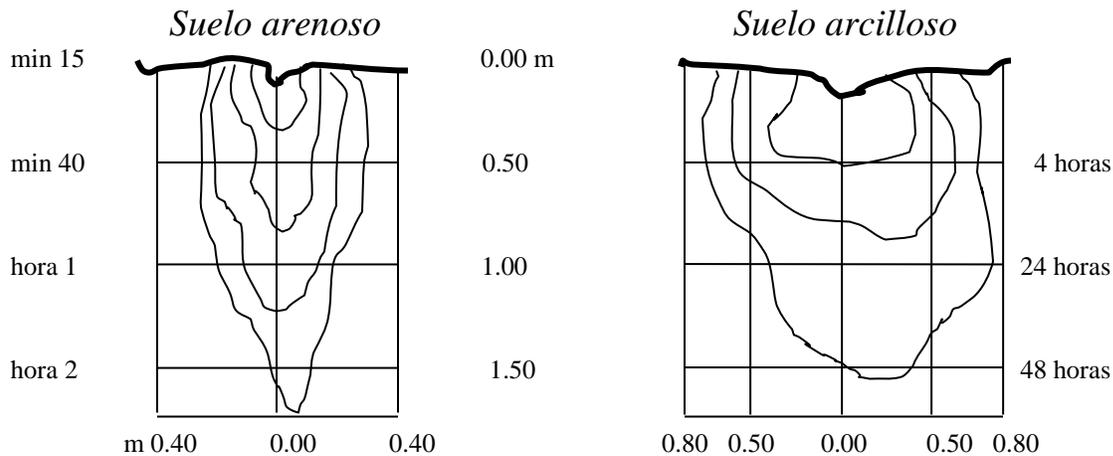
En el **Cuadro 4** se presentan velocidades de infiltración en diferentes tipos estructurales.

Cuadro 4: velocidades en diferentes tipos texturales.(SCS, USDA, 1977)

Textura	velocidad de Infiltración básica (mm/h)
arcilloso; arcillo-limoso arcillo arenoso	2,5 a 7,5
franco- arcillo-arenoso; franco-arcilloso; franco-arcillo-limoso;	6,5-19,0
franco; franco-limoso.	12,5-38,0

franco- arenoso	25,0 a 75,0
arenoso.	mayor 75,0

La forma y dirección de su sección humedecida depende, entre otras cosas, de la textura del suelo, su variación en el perfil, el tiempo de aplicación del agua y la sección hidráulica del surco. **Figura 2.**



Distribución de la humedad del terreno en riego por surcos según la textura del mismo

Figura 2

2.4 Forma del surco.

La forma del surco depende del implemento utilizado para su construcción. Puede ser de forma parabólica, triangular, rectangular.

Las formas parabólicas y triangulares son las más habituales en nuestro medio, realizadas con arado de reja y vertedera, surqueador o escardillo.

La forma deberá mantenerse constante a lo largo de toda la unidad de riego.

Cuando se trata de una sección triangular, en la cabecera del surco la carga hidráulica es mayor que al final del mismo, fenómeno no tan marcado en las formas trapecial o parabólica, por lo que se prefieren estas últimas para el diseño para minimizar las pérdidas por precolación profunda en la cabecera.

De todos modos, la acción del escurrimiento del agua durante el riego acondicionara el perímetro mojado del surco a una forma parabólica más o menos constante a lo largo del eje.

En la **Figura 3** se observa la relación entre cargas hidráulicas en la cabecera y pie del surco, según su sección.

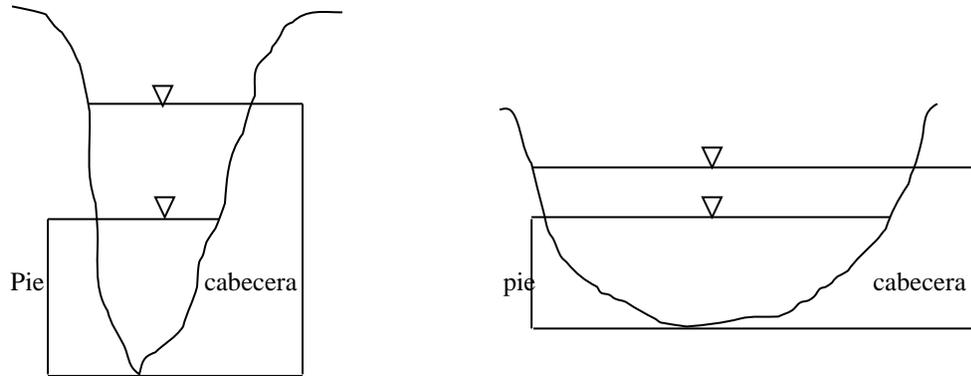


Figura 3

2.5 Espaciamiento entre surcos.

La distancia entre surco y otro (ejes) se denomina espaciamiento y depende de la naturaleza física y profundidad del suelo, asimismo como de las labores culturales en la superficie que se pretende mojar.

Grassi (1972) estudiando relaciones entre la profundidad y la sección humedecida con relación a al carga de agua en el surco y el tiempo de riego, determinó la siguiente ecuación para calcular el espaciamiento en un suelo franco- limoso de Mendoza, la cual puede usarse para estimar espaciamientos:

$$E = 1,73 D \quad \text{donde} \quad \begin{array}{l} E = \text{espaciamiento en m} \\ D = \text{profundidad radicular en m} \end{array}$$

Como se observa en la figura siguiente- **Figura 4**- el espaciamiento de los surcos admite un modelo en el cual ocurre una interrupción en la zona húmeda continua (A) y otro en el cual se superponen las zonas de humedecimiento (B).

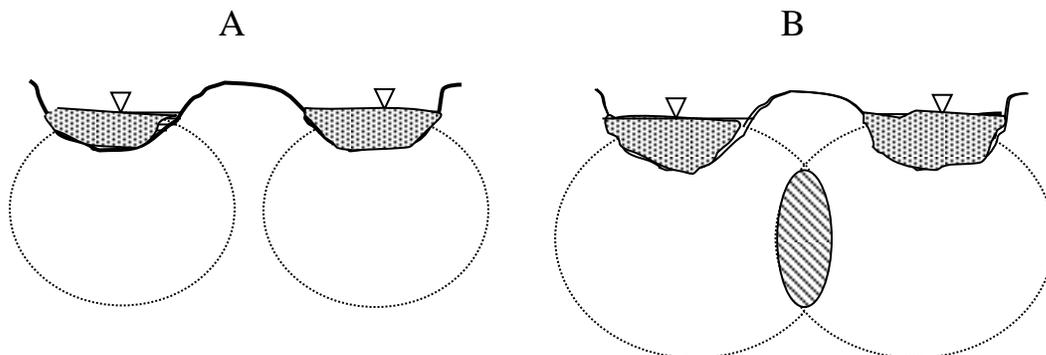


Figura 4

En el **Cuadro 5** se presentan valores estimados de distanciamiento entre surcos para suelos de diferentes características texturales.

Cuadro 5: distanciamiento entre surcos en función de la textura del suelo.

TIPO DE SUELO	DISTANCIA ENTRE EJES (m)
Arena gruesa	
Perfil uniforme	0,30
Subsuelo compactado	0,40
Arena fina	
Perfil uniforme	0,60
Subsuelo compactado	0,75
Franco arenoso	
Perfil uniforme	0,90
Subsuelo compactado	1,00

2.6 Pendiente y dirección.

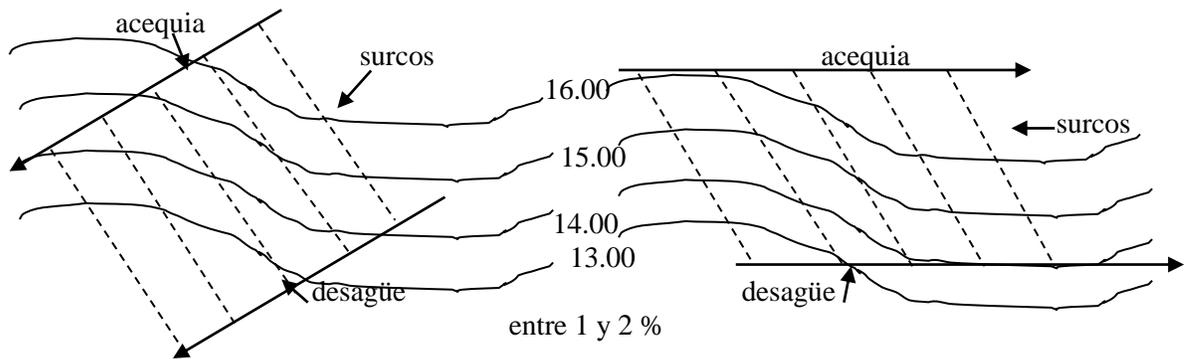
Los surcos pueden construirse sin pendiente alguna o con pendiente. En el primer caso no se produce escurrimiento de agua al pie, mientras que en el segundo sí.

La fuerza erosiva del agua condiciona, en definitiva, la pendiente aceptable de los surcos; cuando esta se aleja de esos valores, es posible cambiar la dirección de los mismos. En esa situación se aceptan dos variantes:

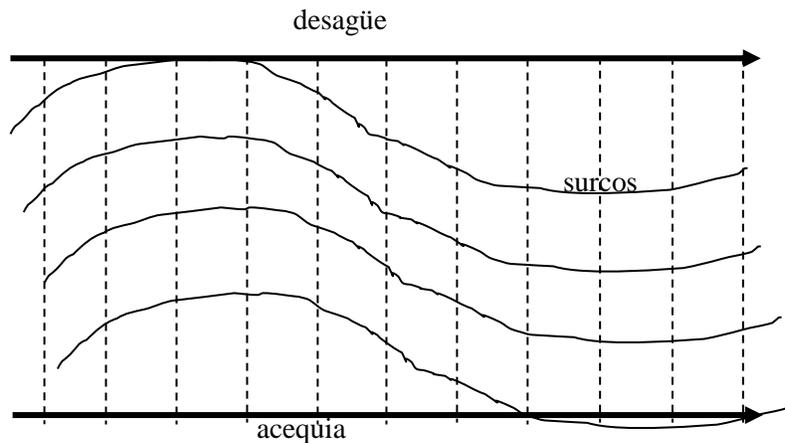
- a. Surcos en dirección diagonal a la máxima pendiente.
 - b. Surcos en dirección normal a la máxima pendiente.
-
- a. La pendiente de los surcos se puede reducir siguiendo la diagonal que conduce a un recorrido mas largo para la misma diferencia de nivel. Cuando se elige una determinada pendiente de los surcos (S), es posible calcular el ángulo alfa que deberán desviarse estos con respecto a la línea de máxima pendiente (Sn).

$$\text{Así: } S = S_n \times \cos \alpha \quad \text{y luego} \quad \cos \alpha = S / S_n$$

b. Cuando la pendiente del terreno (S_n) es elevada, el ángulo alfa se amplia y prácticamente los surcos responden a trazos rectilíneos de las curvas de nivel. Ello si bien reduce los peligros de erosión en los surcos, obliga al trazado de la acequia de cabecera en la dirección de máxima pendiente, circunstancia que dificulta las tareas de control y regulación del caudal a aplicar en las unidades de riego. **Figuras 5a y 5b.**



**Surcos en dirección diagonal a la máxima pendiente.
Figura 5a.**



**Surcos en dirección perpendicular a la máxima pendiente.
Figura 5b**

2.7 Ensayo de caudales.

El caudal que puede conducir un surco depende de la sección, sus condiciones hidráulicas, de la pendiente del terreno y de los factores asociados a la erodabilidad del suelo.

Criddle (1956) ha presentado una ecuación para determinar el Caudal Máximo No Erosivo (QMNE) en función de la pendiente (S):

$$QMNE = 0,63 / S \quad QMNE \text{ en l/s; pendiente en \%}$$

También puede utilizarse, para suelos medios, la llamada grafica o ábaco de Lawrence. **Figura 6.**

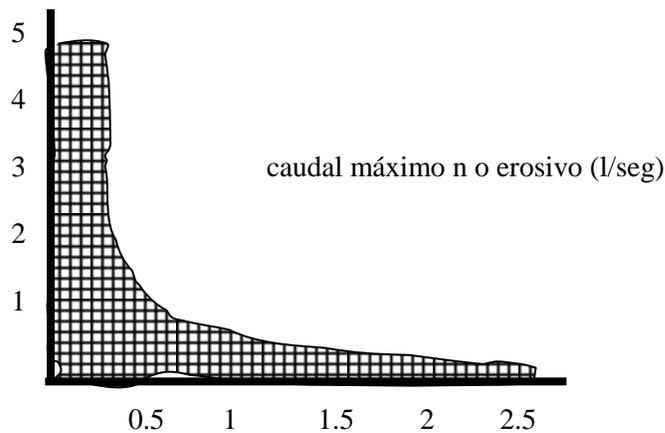


Figura 6

Dado que la velocidad de infiltración decrece espontáneamente en función del tiempo (ver TP infiltración), debería regarse con caudales decrecientes para evitar pérdidas por escurrimiento.

En la práctica, resultan suficientes dos caudales. Uno para cubrir el tiempo de avance (t_a) del agua en el surco y otro, menor que el anterior, para satisfacer la necesidad de infiltración (t_i) incorporando la lámina de reposición al perfil.

El ensayo de caudales consiste en realizar una prueba de campo con el objeto de seleccionar un caudal óptimo de manejo.

En primer término, se utiliza la expresión de Criddle para estimar el QMNE (en l/s) en base al dato de pendiente (en %).

Se selecciona un conjunto de surcos representativos del lote a regar, los cuales se unen a una acequia de cabecera de manera tal de poder aforar y regular el agua derivada a cada uno de ellos; es muy común la utilización de sifones u otro elemento que pase por sobre o dentro del bordo de la acequia. El caudal del sifón depende de su sección, la carga y la naturaleza del material constructivo, cuantificado a través del coeficiente de gasto. Es

necesario mantener la carga constante para obtener un gasto uniforme. De este modo se aplica el caudal estimado, así como caudales mayores y menores a ambos lados del mismo.

La erodabilidad de los caudales se determina visualmente a partir de la cabecera del surco, luego de transcurridos 3 a 5 minutos desde el comienzo de la aplicación del agua, observando si hay transporte de material a lo largo del surco. El QMNE será en orden decreciente el que le siga al caudal erosivo. **Figura 7.**

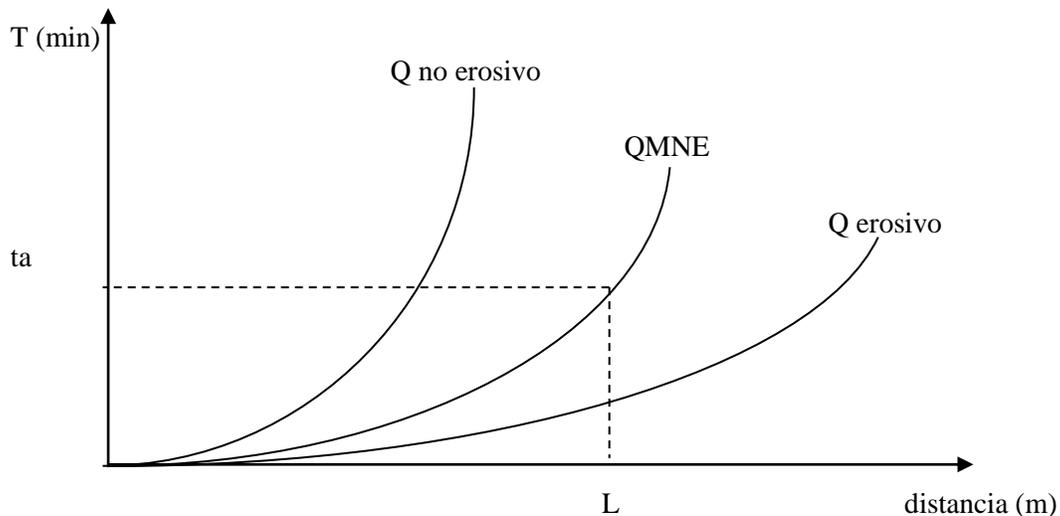


Figura7

Para reducir las pérdidas de agua por percolación profunda puede:

- a- aumentarse el caudal aplicado.
- b- reducirse la longitud de los surcos.

Como el caudal está limitado al QMNE, será la longitud la variable final de ajuste.

2.8 Longitud. Ensayo de avance.

Al determinar el largo del surco se deberá realizar un cuidadoso análisis de los factores agronómicos que intervienen en su selección:

- Tipo de suelo y pendiente: en líneas generales, la longitud será menor en suelos de textura gruesa respecto a aquellos de textura fina. Para una misma textura de suelo, la longitud disminuye a medida que aumenta la pendiente.
- Caudal a aplicar: como se a dicho, el caudal a aplicar define la longitud del surco en la medida que no deben conducirse caudales que provoquen erosión.

- Tiempo de infiltración y tiempo de avance: El conocimiento del tiempo es decisivo para elegir un tamaño en el que una determinada lámina de riego a aplicar sea compatible con las longitudes de las unidades de riego.
- Estructura parcelaria existente: cuando se tengan que establecer unidades de riego en terrenos previamente sistematizados, es necesario respetar las estructuras ya existentes en cuanto a tamaño de parcelas, caminos, acequias, desagües, etc. Se recomienda que la longitud de los surcos sea múltiplo de la longitud de los lotes o unidades parcelarias a regar.



La evolución del diseño y operación de surcos ha significado un aumento de su longitud desde 70- 80 m hasta más de 1000m en la actualidad. Esto ha permitido maximizar no solo las eficiencias de riego, sino obtener un mayor aprovechamiento de la superficie y de la mano de obra.

En nuestro País, en general, los surcos no pasan de los 200 m de largo. En Mendoza, por ejemplo, es común el cartel de viña de 120 m de longitud.

El ensayo de avance puede realizarse simultáneamente al ensayo de caudales explicado previamente. En este caso, se considera por separado para facilitar su comprensión.

El objetivo de este ensayo es obtener datos de avance del agua en el surco para poder seleccionar la longitud óptima del mismo.

En el terreno previamente emparejado y nivelado, se trazan los surcos. Se colocan estacas cada 10 m, para poder determinar en que momento llega el agua derivada. Se aplica entonces el QMNE ensayado previamente en tres a seis surcos de modo de poder establecer una media. Se apuntan los datos de los tiempos en que el agua tarda en recorrer la

distancia entre las estacas, obteniendo pares ordenados de datos tiempo-distancia.

El ajuste de los valores de avance (pares ordenados de tiempo y distancia) responde a la expresión de Fok- Bishop denominada función de avance:

$$L = a \times t^x$$

donde: L = avance, en m
 a y x = parámetros
 t = tiempo, en minutos

La resolución de los parámetros a y x se realiza, a partir de los datos de campo, por el método gráfico (papel log- log) o por el método analítico (Mínimos Cuadrados) ya utilizados en la resolución de la función de infiltración (ver TP infiltración). En la **Figura 8** se observan funciones de avance para diferentes caudales aplicados.



CURVAS DE AVANCE. ENSAYO DE CAMPO

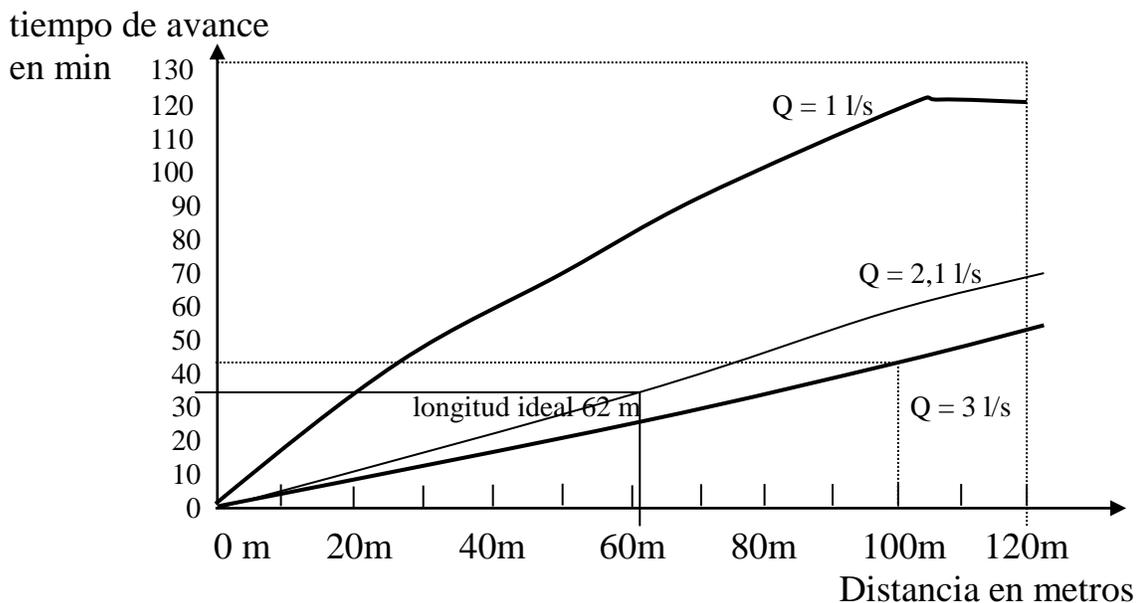




Figura 8

2.9 Diseño, operación y evaluación de surcos.

2.9.1 Sin pendiente, sin salida de agua al pie.

La fuerza erosiva del agua esta relacionada exclusivamente con el caudal que se derive en los surcos, cuando las condiciones del terreno no presentan pendiente. Por lo tanto, a través de ensayos de caudales para escoger el caudal máximo no erosivo (QMNE) y luego la construcción de la función de avance, se logra, experimentalmente, seleccionar el único caudal de manejo y la longitud del surco optima.

La operación de riego durante la cual se aplicara el QMNE, se establece calculando el tiempo (t), a partir de la **ecuación de las igualdades volumétricas**:

$$t(\text{seg}) = \frac{l \text{an}(\text{mm}) * \text{área}(\text{m}^2)}{QMNE(\text{m}^3 / \text{s})}$$

donde: lámina de riego, mm
 área (e x L), m²
 tiempo (de riego), seg

2.9.2 Con pendiente y salida de agua por escurrimiento.

Debido a la existencia de gradiente, la energía potencial del sistema incrementa la fuerza erosiva del agua, por lo que es necesario establecer un QMNE mediante ensayo de campo y encontrar la longitud optima también experimentalmente.

La hidrodinámica del sistema de surcos es compleja, ya que se manifiestan principalmente dos direcciones de flujo: a) en el sentido del riego (escurrimiento encauzado) y b) verticalmente (fenómeno de **infiltración**).

Ambos procesos varían en el tiempo.

La infiltración decrece no linealmente con el tiempo y su intensidad variable condiciona, a su vez, al escurrimiento.

El propósito del riego es almacenar uniformemente una lámina de agua que cubra el déficit de humedad del suelo, minimizando las pérdidas. Las pérdidas de agua de interés por su magnitud son: a) las debidas a la percolación profunda (agua que supera la profundidad de raíces) y b) aquellas que salen de la unidad de riego por escurrimiento al pie de surco (que si son reutilizadas no constituirán nítidamente pérdidas en todo el sistema).

Surge entonces como deseable que el manejo del riego intente controlar las pérdidas, de tal modo que se produzca un rápido escurrimiento inicial hasta cubrir todo el eje del surco formando una determinada carga hidráulica. En este caso, al disminuir el tiempo de oportunidad de infiltración en la cabecera se minimizan las pérdidas por percolación profunda.

Entonces, durante un tiempo, definido como de avance o de escurrimiento (t_a), con valor $\frac{1}{4}$ del tiempo de infiltración (t_i), se deberá aplicar el máximo caudal(QMNE) que la pendiente y demás condiciones hidráulicas admita el terreno. Así queda:

$$t_a = \frac{1}{4} t_i \quad \text{derivando durante el } t_a \text{ el QMNE.}$$

Una vez mojado el cauce, debería aplicarse el caudal que el suelo esta en condiciones de infiltrar. Entonces se calcula un segundo caudal, inferior al QMNE, que se derivará durante el tiempo de infiltración.

Lo anterior constituye el fundamento de los métodos de diseño de riego por surcos. En nuestro caso, adoptaremos la metodología propuesta por el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) para la construcción y manejo de surcos, cuyo procedimiento y ejemplo se desarrolla a continuación.

2.9.2.1 Ejemplo de diseño.

A. Información básica.

- Suelo: arcillo-limoso.
- Espaciamiento de surcos: 70 cm
- Perímetro mojado del surco: 50 cm (para el Q elegido)
- Lámina de riego requerida: 39,6 mm
- Profundidad de raíces considerada: 40 cm
- Pendiente: 0,1%

B. datos experimentales.

Ensayo de caudales: se obtuvo un QMNE =1,4 l/s

Función de avance. Se ajustaron los datos a la expresión de Fok-Bishop:

$$L(m) = 20,21 t(\text{min})^{0,5843} \qquad L = A * t^x$$

Función de infiltración. Se ajustaron los datos a la expresión de Kostiacov:

$$I (\text{cm/h}) = 3,974 t(\text{min})^{-0,255} \qquad I = k * t^n$$

Función lamina acumulada. Integrando la función de infiltración se obtuvo:

$$Lac (\text{cm}) = f(I)$$

$$Lac = K * t^N$$

$$Lac (\text{cm}) = \frac{k}{n + 1 (60)} t^{n+1}$$

$$Lac (\text{cm}) = \frac{3,974}{-0,255 + 1 (60)} t^{-0,255+1}$$

$$\text{Lac (cm)} = 0,0889 \text{ t(min)}^{0,745}$$

C. Cálculos.

1. Tiempo de infiltración (ti) de la lámina de reposición.

$$t_i = (\text{Lámina acumulada} / K)^{1/N}$$

$$t_i = (3,96\text{cm} / 0,0889)^{1/0,745}$$

$$t_i = (44,54)^{1,3422} = 163 \text{ minutos}$$

2. Tiempo de avance (ta).

$$t_a = \frac{1}{4} t_i$$

$$t_a = \frac{1}{4} 163 \text{ minutos} = 41 \underline{\text{minutos}}$$

3. tiempo total (Tt) de riego.

$$T_t = t_a + t_i$$

$$T_t = 163 + 41 = 204 \underline{\text{minutos}}$$

4. Longitud (L) óptima del surco.

$$L \text{ (m)} = 20,21 t_a \text{ (min)}^{0,5843}$$

$$L \text{ (m)} = 20,21 * 41^{0,5843} \text{ (min)} = 177 \text{ metros.}$$

5. Caudal de infiltración (Qi).

El Qi puede calcularse de varias maneras. Una de ellas, simplista, consiste en utilizar la mitad del caudal de avance. **Otra manera** es utilizar el valor de velocidad de infiltración promedio (Ip):

$$I_p \text{ (cm/h)} = \text{Lámina} / \text{tiempo.}$$

$$I_p \text{ (cm/h)} = L_a c / \text{tiempo} = K t^N / \text{tiempo}$$

Para un T_t de 204 minutos, la I_p se calcula:

$$I_p = \frac{0,089 * 204^{0,745}}{204 \text{min}} * 60 \text{min/h} = 1,37 \text{cm/h}$$

Sabiendo que: $Q \times t = \text{lámina} \times \text{área}$

$$Q_i = I_p \times \text{área}$$

$$\text{Área del surco} = 0,7 \text{ m (espaciamiento)} \times 177 \text{ m} = 123,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Luego: } Q_i = 1,37 \text{ cm/h} \times 123,9 \text{ m}^2 = 1,69 \text{ m}^3/\text{h} = 0,47 \text{ l/s}$$

Realizando las conversiones de unidades (m/cm; l/m³ y hora/ seg):

$Q_i = 0,47 \text{l/s}$, que constituye el segundo caudal de manejo.

D. Relación de volúmenes calculados y aplicados.

Aplicando el riego de acuerdo a : Q_{MNE} durante el t_a
 Q_i durante el t_i

El volumen total derivado será:

$$\begin{aligned} Vol_d &= ((1,4 \text{ l/s} \times 41 \text{ min}) + (0,47 \text{ l/s} \times 163 \text{ min})) \times 60 \text{ s/min} \\ &= 8040 \text{ litros} = 8,04 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

La lámina calculada (39,6mm) supone un volumen calculado (Vol_c) de:

$$Vol_c = 0,0396 \text{ m} \times 123,9 \text{ m}^2 = 4,9 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, la Eficiencia de Riego será:

$$Ef = Vol_c / Vol_d = 4,9 \text{ m}^3 / 8,04 \text{ m}^3 = 61\%$$

Esto debe interpretarse como que para almacenar la lámina deseada (calculada) se aplicará una lámina de:

$$\text{Vol}_d/\text{área} = 8,04 \text{ m}^3 / 123,9 \text{ m}^2 = 64,9 \text{ mm}$$

E. Pérdidas por percolación profunda y escurrimiento.

El planteo teórico de la estimación de pérdidas por percolación profunda (Ppp) se fundamenta en la relación de tiempos de infiltración y avance.

$$R = t_i/t_a \text{ quedando } R = 163/41 = 3,97$$

$$P_{pp} = \frac{(R+1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R+1)^{n+1} + R^{n+1}}$$

$$P_{pp} = \frac{(4,97)^{-0,255 \cdot 1} - 3,97^{-0,745}}{(4,97)^{-0,255 \cdot 1} + 3,97^{-0,745}} = \frac{0,51}{6,09} * 100 = 8,37\%$$

Las pérdidas por escurrimiento (P_{esc}) se evalúan considerando el caudal de escurrimiento (Q_{esc}), que debería aforarse. Con este dato, se pueden calcular:

$$P_{esc} = (t_i / t_i + t_a) \times (Q_{esc} / Q_e) \times 100$$

F. Síntesis de los valores de proyecto y operación.

- Surcos de 177m de longitud, espaciados 0,70 m
- QMNE = 1,4 l/s que se derivará durante $t_a = 41$ min
- $Q_i = 0,47$ l/s que se derivará durante $t_i = 163$ min
- Pérdidas por percolación profunda estimadas = 8 %

2.9.2.2 Ejercicio. Dimensionar un sistema de surcos en base a los siguientes datos:

Lámina neta: 65 mm

Pendiente del terreno: 0,3 %

Espaciamiento entre surcos: 50cm

Función de Infiltración acumulada $I_{ac} = 0,58 t^{0,48}$

Función de avance: $L = 22,55 t^{0,534}$

QMNE = coincide con la expresión de Criddle.

2.9.3 Riego por pulsos o caudal discontinuo.

A partir de la década del 80, en los Estados Unidos se desarrollaron técnicas para la utilización del riego por gravedad buscando eficiencias mayores a las del riego por surcos tradicional. Se desarrolla así esta técnica, denominada “Surge - flow” en origen, con más de un millón trescientas mil hectáreas en la actualidad. En Argentina se incorpora a partir de 1995 en varias localidades cordobesas al comienzo y luego se difunde en todo el país (Cinplast, 2000).

En el sistema por surcos convencional ya descrito, el agua ingresa por el extremo más elevado y se calcula el largo del surco y el caudal de ingreso de manera tal que el agua no alcance velocidades erosivas. Este largo dependerá principalmente de la pendiente del terreno y la textura, que será la principal determinante de la infiltración. A modo de referencia y para condiciones medias, los largos de surcos no superan los 150m y ello hace que, para extensiones superiores a 60 hectáreas, la mano de obra se convierta en un insumo importante y el manejo se complique.

Por otra parte, la infiltración de agua a lo largo del surco no es uniforme, el agua infiltra mucho más en la cabecera que en el final del surco, lo que obliga a tomar una decisión de compromiso, donde se realiza un riego en exceso al principio y con algún déficit al final. La otra opción (la más frecuente) es regar en exceso, perdiéndose agua por percolación profunda y por escurrimiento al pie.

Los dos elementos mencionados, alta dependencia de mano de obra y una desigual distribución de agua en el perfil del suelo son los responsables de la baja eficiencia en estos sistemas.

El concepto de riego por pulsos implica manejar el ingreso de agua en el surco mediante sucesivos cortes y aperturas (en lugar de un ingreso continuo) logrando equiparar la infiltración a lo largo del surco. En los sucesivos ciclos se logra el mojado inicial del surco para uniformar la

infiltración y el riego propiamente dicho, incorporando la lámina deseada. Otra ventaja adicional es que al realizar cortes y aperturas, el agua no alcanza velocidades erosivas, lo que permite prolongar el largo del surco a distancias superiores a los 500 o 700 m y mas, de acuerdo a la textura y gradiente del terreno, lo que trae el consiguiente ahorro de mano de obra y facilidad de manejo (Pozzolo, 2001).

En este sistema, la conducción y aplicación de agua a los surcos se realiza mediante cañerías, comúnmente de PVC con acople desmontable las cuales, en este último caso, poseen compuertas o esclusas corredizas dosificadoras de caudal separadas a una distancia igual a la distancia entre surcos.

La cañería de conducción desemboca en una “T” en donde el agua es desviada a dos alas perpendiculares. Sobre la “T” se dispone una válvula “by pass” que comanda el ingreso a uno u otro ramal perpendicular. Esta válvula posee un panel solar que alimenta una batería interna. Posee un controlador que permite programar los tiempos de apertura y cierre o mejor dicho, del movimiento del “by pass” hacia uno u otro ramal de riego.

La operación del riego se realiza por ciclos de avance y remojo. Avance es el número de ciclos que permite el humedecimiento del surco y la reacomodación de partículas para sellar la superficie y regular la infiltración. Remojo es el número de ciclos que completa el riego, siendo posible trabajar con fertirrigación. Estos ciclos, y el fertirriego son programados y comandados por el controlador en forma automática. La programación se basa exclusivamente en el dato de las horas de riego que tarda el agua en recorrer la totalidad del surco. Luego el programa organizará el número de ciclos necesarios para lograr el avance e incorporación de la lámina de riego, así como el momento de ejecutar el fertirriego.

Dentro de las ventajas del sistema se menciona: a) eficiencia de conducción del 100% (conducción por cañería o mangas plásticas); b) bajo consumo de energía; el sistema funciona con menos de $0,5 \text{ kg/cm}^2$ (5 mca) lo que implica presiones muy bajas, comparativamente con un sistema de aspersión; c) riego mas uniforme, se han reportado eficiencias del 85%; d) surcos mas largos (1000 metros en condiciones óptimas) y e) aplicación eficiente de fertilizantes.



2.9.3.1 Cálculos de dimensionamiento para caudal discontinuo.

Datos necesarios: Caudal disponible
 Superficie a regar
 Pendiente del lote
 Textura de los suelos
 Distancia a la fuente de agua

Respecto de las pendientes de aplicación, las mismas se ubican entre 0,1 y 3%. Con pendientes mayores los surcos deberán ser sensiblemente mas cortos (70 a 200m) y con pendientes cercanas al 0% los surcos deberán ser mas profundos para tener mayores tirantes de agua.

Para estimar el largo del surco, se recomienda partir del doble de lo que indica la tabla de Merrian (1970). Esta recomendación deberá ser ajustada por el usuario en base a su experiencia con este método. A continuación se presenta la tabla de Merrian:

PENDIENTE %	CAUDAL l/s	LONGITUD SURCOS (m) SEGÚN TEXTURA					
		GRUESA		MEDIA		FINA	
		LAMINA DE AGUA(mm)					
		50	100	50	100	50	100
0,25	2,50	150	220	250	350	320	460

0,50	1,20	105	145	170	245	225	310
0,75	0,85	80	115	140	190	175	250
1,00	0,60	70	100	115	165	150	230
1,50	0,40	60	80	95	130	120	175
2,00	0,30	50	70	80	110	105	145
3,00	0,16	40	55	65	90	80	120
5,00	0,11	30	40	50	70	65	90

caudal discontinuo

Ejemplo: Caudal disponible: 200m³/ h
 Distancia entre surcos 70 cm
 Superficie: 80 ha
 Pendiente: 0,3 %
 Lámina aplicar: 50 mm (500m³/ha)
 Textura: franco arcillo limosa

$$Q*t=Lam*A$$

$$\text{Tiempo de aplicación (Ta)} \quad Ta = \frac{80Ha * 500m^3 / ha}{200m^3 / ha} = 200 \text{ horas}$$

$$QMNE \text{ (Criddle)} = 0,63 / i \%$$

$$QMNE \text{ (Criddle)} = 0,63 / 0,3 = 2,1 \text{ l/s} \times 3600 \text{ s/hora} = 7560 \text{ l / hora} \times \text{surco}$$

$$\text{Longitud de surco (Merrian x 2)} = 320 \text{ m} \times 2 = 640 \text{ metros}$$

El predio a regar será: 1260 m (630m + válvula + 630m) x 640 m = 80,64 ha.
 N° de compuertas regantes para el caudal disponible: 200 m³/h/7,560 m³/h = 26

Van a ser 52 compuertas por posición (26 a cada lado) dispuestas surco por medio, por lo tanto el ancho de labor será de 72,8 m

Cada compuerta abastece a dos surcos

Para 1260 m son: 1260 m / 72,8 m/ posición = 17 posiciones

$$Q*t=Lam*A$$

$$\text{Tiempo por compuerta} = \frac{640m * 1,4m * 50mm}{7,56m^3 / h} = 6 \text{ horas}$$

Tiempo en cada posición: 200h / 17 posiciones = 12 horas/ posición
1260m / 72,8(m/día)=17 días para regar la totalidad del lote

3. Riego por melgas.

3.1 Introducción.

Las melgas son superficies del terreno que quedan limitadas entre dos bordos, con anchos y longitudes variables. Generalmente se trata de una superficie rectangular, definida por bordos en donde el ingreso de agua se produce por uno de los lados menores. El método consiste en incorporar agua provocando un anegamiento controlado, que no debe prolongarse en el tiempo, cuya duración depende del grado de pendiente de la melga.

En el caso de pendiente cero, la presencia de agua en superficie se prolonga mas tiempo en comparación con los modelos con pendiente.

Las melgas, con o sin pendiente longitudinal, no poseen pendiente transversal o la misma es mínima, aceptándose una tolerancia de desnivel entre bordos de 3 cm (gradiente: 0,03). El ancho de melga mínimo es 5 m, ya que sino tendríamos demasiados bordos y el máximo difícilmente sobrepase los 20 m. Una pendiente transversal del 6 por mil seria el límite aceptable.

La incorporación de agua se realiza en la cabecera a partir de varios puntos de ingreso de modo de obtener un avance parejo del frente de agua que cubra todo el ancho de melga. Importa que el agua avance rápido pero sin provocar erosión, guardando un equilibrio entre lo que ingresa y lo que infiltra.

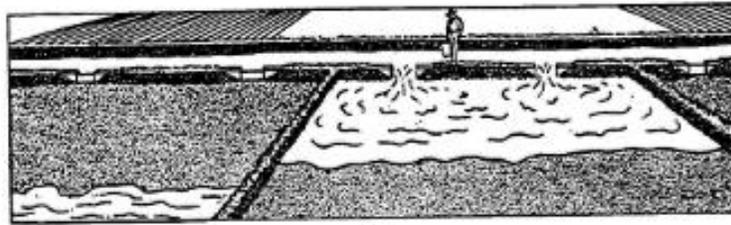
El riego por melgas es utilizado en almácigos, pasturas, aromáticas, cereales densos y también viñedos y frutales.

La velocidad de infiltración debe ser media, si los terrenos son de textura gruesa el método no se adapta, al igual que el caso de texturas muy finas y baja velocidad de infiltración que origina tiempos de riego muy prolongados.

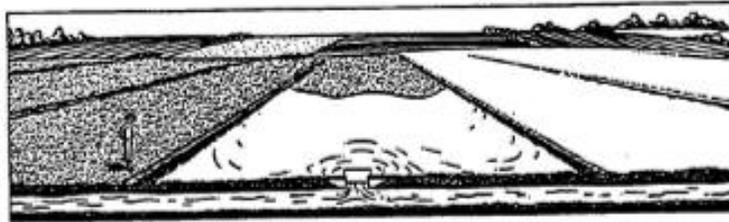
Normalmente no deben exceder pendientes del orden del 0,5 %, las que podrán superarse si los cultivos son densos y no hay peligro de erosión, pudiendo alcanzar valores límite de pendientes del orden del 2%.

Las eficiencias de riego que se alcanzan son aceptables cuando los diseños son correctos, siendo los costos en mano de obra bajos en comparación con el riego por surcos. La topografía no debe ser muy irregular y los trabajos de nivelación y eliminación del microrelieve son imprescindibles para una buena implementación del método.

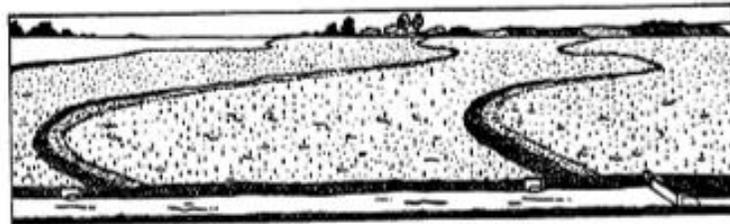
Riego por melgas



(a)



(b)



3.2. Dimensionamiento de melgas.

En el **Cuadro 6** se presentan valores tabulados de melgas para distintas condiciones, se resalta que en ningún caso los anchos de melgas superan los 15m.

Cuadro 6: Dimensiones recomendadas de melgas según textura de suelos, pendiente y lámina aplicada por riego (Granados,1971)

TEXTURAS	PENDIENTES (%)	LAMINA (mm)	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	CAUDAL l/s
Gruesa	0,25	50	150	15	225
	0,25	100	245	15	200
	0,25	150	400	15	170
	1	50	90	12	35
	1	100	150	12	70
	1	150	275	12	70
	2	50	60	9	35
	2	100	90	9	30
	2	150	185	9	30
Media	0,25	50	245	15	200

	0,25	100	400	15	170
	0,25	150	400	15	100
	1	50	150	12	70
	1	100	350	12	70
	1	150	400	12	70
	2	50	90	9	30
	2	100	185	9	30
	2	150	305	9	30

3.2.1 Melgas con pendiente.

Criddle y colaboradores (1956) propusieron una expresión para estimar el caudal de entrada de agua a la cabecera de melga (QMNE) al cual denominaron Caudal Unitario (Q_u) por metro de ancho de melga a regar.
 $Q_u \text{ l/s.m ancho de melga} = 5,57 i^{-0,75}$ donde $i =$ pendiente (%)

Este es un caudal máximo no erosivo (QMNE) que multiplicado por el ancho de melga da el caudal de riego.

A partir de la ecuación anterior se puede construir una sencilla tabla para caudales en función de pendientes. **Cuadro 7.**

Pendiente, en %	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Caudal, en l/s . m	18,62	13,74	11,07	9,37	8,17	7,28

Cuadro 7. QMNE en l/s/m de ancho de melga para suelo sin vegetación.

Otra variante sería determinar la longitud para un ancho fijado previamente. En este caso se pueden usar los gráficos, también elaborados por Criddle para el sistema métrico decimal y recogidos en el Manual 82 del Servicio de Conservación de Suelos, USDA, Estados Unidos.

En estos gráficos se relaciona lámina neta de riego con infiltración básica en mm/hora, para fijar el caudal en l/s por cada 100 m² de melga. Mediante un gráfico complementario se obtiene un “coeficiente de ajuste” según la pendiente real de la melga ya que la fuerza erosiva del agua es mayor o menor según esa pendiente. Se transcriben los gráficos adaptados al sistema métrico decimal por Granados (1971). **Grafico 1.**

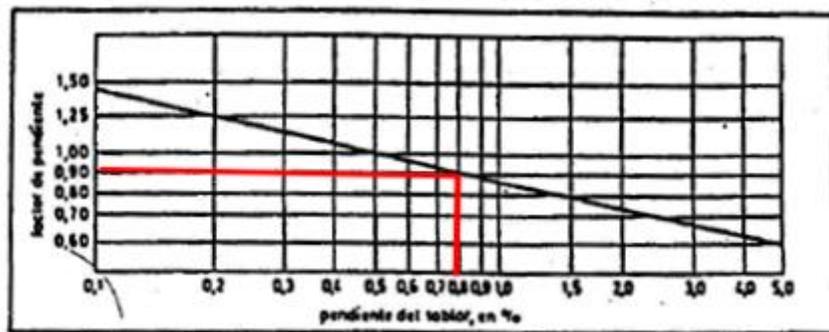
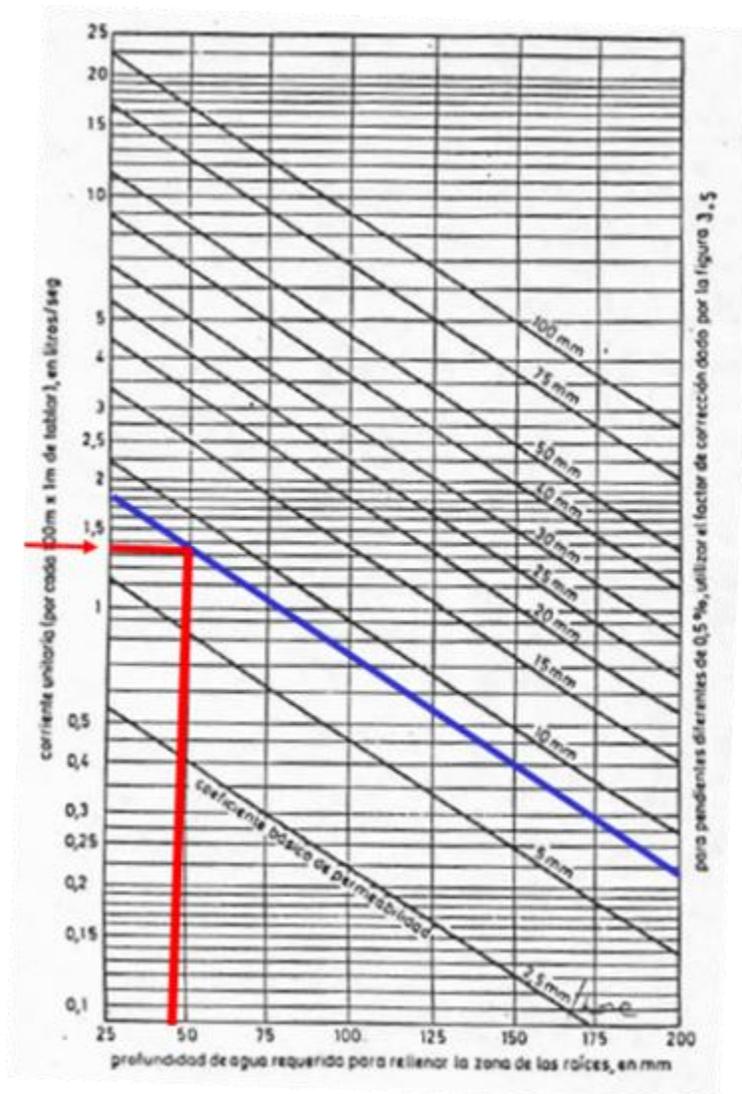


Gráfico 1

Haciendo uso de los gráficos y ecuación de Criddle es posible estimar la longitud ideal de la melga con pendiente cuando se adopta previamente un ancho y se conoce el dato de infiltración básica del suelo.

Ejemplo de dimensionamiento: Supongamos que la pendiente es del 0,8 %, la $I_b = 8$ mm/h y el ancho de melga se fija en 10 m, siendo de 50 mm la lámina neta a aplicar.

Cálculos: QMNE según ecuación de Criddle = $5,581 \cdot 0,8^{-0,75} = 6,59$ l/s.m

Caudal (gráfico 1) $Q_u = 1,3$ l/s por cada 100 m^2

Corrección para $i = 0,8\%$ que es la pendiente del ejemplo:

$$1,3 \text{ l/s.m} \times 0,9 = 1,17 \text{ l/s por cada } 100 \text{ m}^2 \text{ o bien } Q_u = 0,0117 \text{ l/s.m}^2$$

Como lo que quiere determinarse es la longitud, ya que el ancho se ha fijado en 10 m, se propone la siguiente igualdad en la que la incógnita es precisamente la longitud:

$$6,59 \text{ l/s} = 0,0117 \text{ l/s.m}^2 * (\text{longitud} * 10\text{m})$$

$$\text{longitud} = \frac{6,59 \text{ l/s}}{0,0117 \text{ l/s.m}^2 * 10 \text{ m}} = 56 \text{ m}$$

La metodología del gasto unitario (USDA) se basa en calcular:

1) El caudal unitario: Q_u (l/s . 10m^2 ancho de melga)

$$\text{Para pendientes (S) de 5 por mil} \quad Q_u = 0,295 \cdot I_b \text{ (cm/h)} \cdot e^{-0,119 \text{Ln}(\text{cm})}$$

Donde: $e = 2,71$ (base log n); $I_b =$ velocidad infiltración básica

Para pendientes distintas de 5 por mil se calcula $F = 0,859 S^{-0,22}$

Luego, el Q_u corregido es = $Q_u \cdot F$

$$2.1) \text{QMNE(l/s . m ancho de melga)} = 5,581 \cdot S \text{ (\%)}^{-0,75}$$

2.2) Q máximo que no comprometa la estabilidad de los bordos:

$$Q \text{ máx} = 1000/n * d^{5/3} * S(\%)^{1/2}$$

donde:

$d =$ carga hidráulica o tirante de la melga (m)

$n =$ coeficiente de rozamiento

Tabla 2.

n	Condición
0,04	suelo desnudo
0,1	trigo en hileras
0,15	trigo al voleo
0,25	pasturas densas

3) Tiempo de aplicación.

$$T_a (\text{hs}) = L_n(\text{cm})/36 \cdot Q_u (\text{l/s} \cdot 10 \text{ m}) \cdot \text{Ef. Aplic.}$$

4) Caudal para toda la melga (previa definición del ancho y el largo)

$$Q_{\text{melga}} = Q_u \cdot \text{ancho} \cdot \text{largo}$$

5) Verificación y selección caudal de melga

6) Relaciones volumétricas

7) Operación y evaluación para realizar ajustes.

Ejemplo de dimensionamiento.

Datos: $I_b = 2,5 \text{ cm/h}$
 $N = 0,1$

$S = 4,4 \text{ por mil}$
 $L_n = 90 \text{ mm}$
 $d (\text{tirante}) = 0,15 \text{ m}$

1. Cálculo del gasto unitario

$$Q_u = 0,295 \cdot I_b(\text{cm/h}) \cdot e^{-0,119 \cdot L_n(\text{cm})}$$

$$Q_u = 0,295 \cdot (2,5) \cdot 2,71^{-0,119 \cdot 9} = 0,2535 \text{ l/s} \cdot 10 \text{ m}^2 \text{ de melga}$$

como la pendiente es distinta de 5 por mil calculamos el F:

$$F = 0,859 \cdot (i\%)^{-0,22} = 1,029$$

$$F = 0,859 \cdot (0,44)^{-0,22} = 1,029$$

$$Q_{uc} = Q_u \cdot F = 0,2608 \text{ l/s} \cdot 10 \text{ m}^2$$

2. Cálculo del Q admisible.

$$Q_{MNE} = 5,581 \cdot (i\%)^{-0,75}$$

$$Q_{MNE} = 5,581 \cdot (0,44)^{-0,75} = 10,33 \text{ l/s} \cdot \text{m de ancho de melga}$$

3. Cálculo del tiempo de aplicación de riego.

$$T_a = L_n(\text{cm})/36 \cdot (Q_{uc}) \cdot 0,7$$

donde 0,7 es la eficiencia

$$T_a = 9\text{cm}/36 \cdot (0,2608 \text{ l/s} \cdot 10 \text{ m}^2) \cdot 0,7 = 1,37 \text{ hora} = 82 \text{ minutos}$$

4. Caudal de la melga.

$$b=10 \text{ m} \quad L = 100 \text{ m}$$

$$Q_{\text{melga}} = Q_{\text{uc}} * b(\text{ancho}) * L(\text{largo})$$

$$= 0,2608 \text{ l/s} * 10 \text{ m} * 100 \text{ m} = 26,08 \text{ l/s} = (26 \text{ l/s})$$

5. Verificación de caudales.

$$\text{Para } b = 10 \text{ m y } L = 100 \text{ m}$$

$$Q_{\text{MNE}} = 103,3 \text{ l/s} = 10,33 \text{ l/s} * 10 \text{ m ancho}$$

$$Q_{\text{max}} = 28,10 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{1000}{n} * d^{\frac{5}{3}} * i^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{1000}{n} * 0,15 \text{ m}^{\frac{5}{3}} * 0,44^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_{\text{melga}} = 26,08 \text{ l/s}$$

Como el Q_{melga} es menor que el Q_{MNE} y menor que el Q_{max} , se acepta el diseño.

6. Relaciones volumétricas.

$$V_t = Q_{\text{melga}} * t_a$$

$$= 26 \text{ l/s} * 82 \text{ minutos} * \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} * 60 \text{ seg/ min} = 128 \text{ m}^3$$

$$L \text{ aplic.} = \text{Vol} / A = 128 \text{ m}^3 / 10 \text{ m} * 100 \text{ m} = 128 \text{ mm}$$

$$\text{Relación volumétrica} = L_n / \text{aplic}$$

$$= 90 \text{ mm} / 128 \text{ mm} = 70 \%$$

Método empírico: Se basa en ensayos de campo.

1) Cálculo del ancho de melga (b).

$$b = 0,03 / \text{gradiente transversal}$$

2) Ensayo de avance (Fórmula de Criddle)

$$Q_{\text{MNE}} = 5,57 i^{-0,75} \quad \text{donde } i = \text{pendiente } (\%)$$

3) Curva de avance para el Q_{MNE} estimado, Se realiza un ensayo como el ya explicado para el caso de surcos.

4) Curva y modelo de infiltración. Se aconseja utilizar el método del doble anillo.

5) Cálculo del tiempo de infiltración (t_i)

$$t_i = (L_n/K)^{1/N}$$

6) Cálculo del tiempo de avance (t_a)

$$t_a = \frac{1}{4} t_i$$

7) Cálculo de la longitud óptima. Expresión de Fok- Bishop. Se realiza ensayo como el ya explicado para surcos.

$$L(m) = a \cdot t^x$$

8) Cálculo del caudal de infiltración (Q_i). Necesitamos expresar la I_p en $l/s \cdot m^2$

$$I_p (l/s \cdot m^2) = cm/h \cdot h / 3600 s \cdot m / 100 cm \cdot 1000 l/m^3 = 1/360 \cdot cm/h$$

$$Q_i = I_p \cdot L$$

$$Q_i(l/s \cdot m) = l/s \cdot m^2 \times m$$

9) Cálculo del tiempo de receso de la lámina. Concepto.

El tiempo que puede computarse entre el momento de corte del suministro de agua y el momento en que no hay mas agua en superficie en toda la unidad de riego se conoce como tiempo de receso (T_r). El agua va a desaparecer de la superficie desde la cabecera hacia el pie, puesto que allí es donde se acumulará preferentemente. Conviene, por lo tanto, anticipar el corte para evitar el sobreriego al pie. El ensayo se realiza estaqueando la melga longitudinalmente y cronometrando los tiempos en que va desapareciendo el agua de superficie en cada estaca. El receso es mas rápido que el avance.

El calculo del tiempo de corte (T_{co}) será:

$$T_{co} = t_a + t_i - T_r$$

$$\text{Siendo el tiempo total de riego (TTr)} = t_a + t_i + T_r$$

Con los ensayos efectuados es posible graficar las diferentes curvas. En el **Gráfico 2** se presenta un esquema de lo anterior.

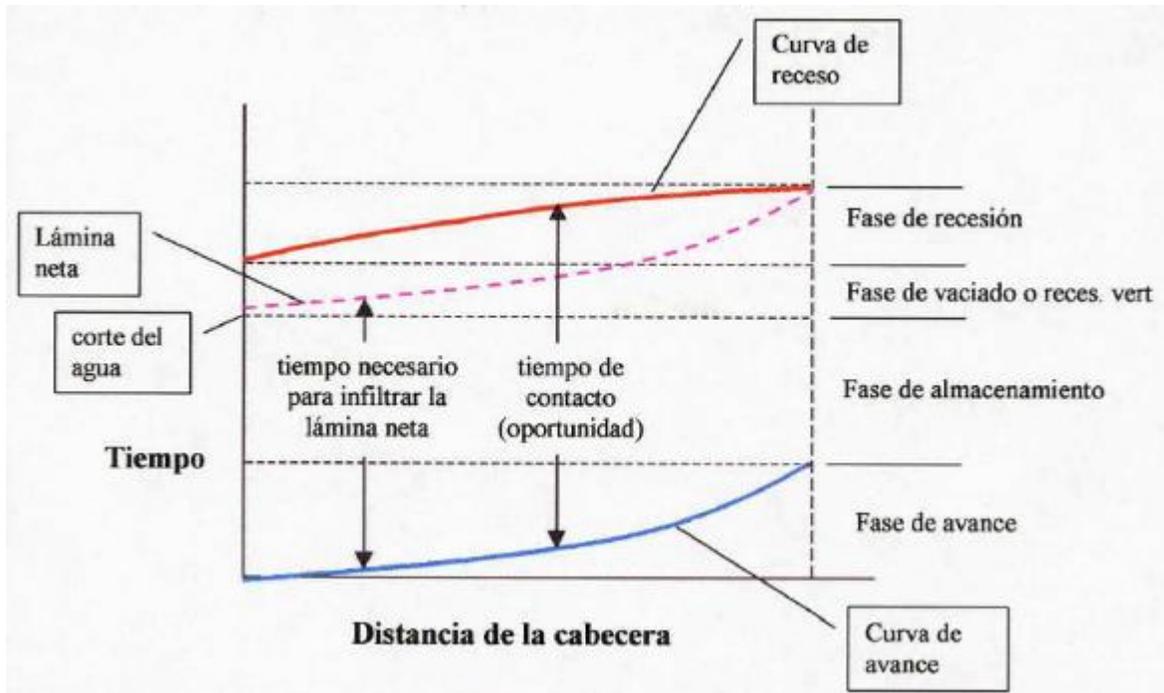


Gráfico 2

10) Operación de riego.

QMNE durante el t_a = tiempo de mojado

Q_i durante $t_i - T_r$ = tiempo de aplicación

11) Relación de volúmenes, de láminas y evaluación de eficiencias.

Ejercicio de aplicación.

Datos:

pendiente longitudinal: 0,4 por mil

pendiente transversal: 0,3 por mil

L_n : 90 mm

QMNE (seleccionado x ensayo) = 3 l/s.m

$$I \text{ (cm/h)} = 18,14 \cdot t^{-0,44}$$

$$I_{ac} \text{ (cm)} = 0,54 \cdot t^{0,56}$$

$$L \text{ (m)} = 6,71 \cdot t^{0,64}$$

3.2.2 Melgas sin pendiente.

Una melga sin pendiente y con retención al pie puede considerarse, con sentido práctico, como una “pileta” que se inunda en forma intermitente, pero que no debe retener agua en superficie sino un corto tiempo.

En este caso, el dimensionamiento puede resolverse a partir de la ecuación de igualdades volumétricas:

$$Q \cdot T = \text{lámina} \cdot \text{Área}$$

Si se fija a priori longitud y ancho de melga, la eficiencia que pretende alcanzarse y al lámina de agua de reposición, se puede calcular la lámina bruta a partir de la neta. Como no hay pendiente, se puede trabajar con mayores caudales, de alrededor de 30 l/s para que el agua llegue rápidamente al pie.

El cálculo sería:

$$T = \frac{(\text{Ln} \cdot 1/E_f) \cdot \text{Área}}{Q}$$

Este sería el tiempo necesario en que debe ingresar agua a al melga para garantizar la reposición de la lámina en forma pareja en todo el volumen de raíces. Como no hay escurrimiento en el pie y si el agua alcanza rápidamente a cubrir toda la melga es posible alcanzar alta eficiencia.

7. EFICIENCIA DE RIEGO

Implica estimar que porcentaje del agua total utilizada ha servido para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos.

Cuando se planea, diseña u opera un sistema de riego, constituye un problema fundamental estimar que valor de eficiencia considerar al momento de calculo, por un lado, y por el otro evaluar las eficiencias reales del sistema una vez que se encuentra operando.

En el primer caso, es práctica común según Bos (1976), adoptar arbitrariamente una cierta eficiencia o tomar la de los sistemas de riego existentes. Es obvio que la eficiencia establecida de este modo no se adapta en general a las condiciones del área del proyecto, en el estado en que vaya a operar en el futuro, pero si los cálculos y estimaciones son acertados, no se debería incurrir en desajustes demasiado importantes. La tendencia general frente a la incertidumbre, consiste en dar a los canales y estructuras una mayor capacidad de las que serían necesarias, y a la operación de riego se le imputan eficiencias alejadas del máximo posible para cada sistema, todo lo cual tiende a establecer un margen de seguridad demasiado amplio, que conduce a la realización de inversiones que pueden ser notablemente mayores de las que serían necesario en otros casos.

La evaluación y monitoreo de las eficiencias una vez que el sistema se encuentra operando resulta imprescindible para tomar decisiones operativas y ajustar la metodología de trabajo. En áreas bajo riego, operativas desde tiempo atrás, la evaluación experimental de las eficiencias de riego servirá para mejorar las obras existentes y los métodos en uso.

A. EFICIENCIA DE CONDUCCION

Como en el riego por gravedad el agua debe ser conducida en canales hasta parcelas es casi imposible evitar que se produzcan pérdidas, filtraciones, derrames imprevistos, etc. La evaluación de las pérdidas por filtración en canales de tierra es no solo un factor esencial para la formulación de un análisis económico que contemple la posibilidad de revestir los mismos, evaluando las ventajas(reducción de pérdidas, mejoras en la operación, aumento del área de riego, reducción de costos por conservación, etc, como la fuerte inversión necesaria, sino que es, asimismo, una de las etapas iniciales de los proyectos para evaluar las eficiencias de operación de los Distritos de Riego. (Palacios Velez, 1970).

Esta eficiencia se expresa con la siguiente fórmula:

$$\text{Ef. Conducción} = \frac{\text{Volumen entregado en chacra}}{\text{Volumen captado en boca toma}} \times 100$$

El volumen captado en boca toma o casa de bombas o extremo del canal en donde ingresa originariamente el caudal a conducir, llegará luego de un determinado trayecto, al lugar de ingreso a la chacra o finca. Es en este tramo de conducción en donde se pueden producir importantes pérdidas de agua, las cuales deberán ser evaluadas.

Los métodos de evaluación de la magnitud de estas pérdidas son dos:

a) Métodos directos o de campo:

1. Método de entrada menos salida: se establecen dos secciones de aforo, en caso de bifurcación del canal se tendrán dos secciones de aforo aguas abajo. Este método es considerado patrón por su exactitud pero requiere mucho tiempo y mano de obra especializada. No puede usarse en Distritos de Riego en proyecto.

2. Método del estanque: se aísla un tramo del canal mediante diques o terraplenes impermeables. Se llena de agua y se lleva un registro de las

variaciones del nivel de agua en el tiempo. Con un cálculo sencillo, se calculan las pérdidas por evaporación y filtración. Aparte de las limitaciones del método anterior, se suma que el canal queda fuera de operación mientras dura la prueba.

3. Método del infiltrómetro: es una modificación del permeámetro de carga. El aparato está diseñado para efectuar las pruebas durante la operación del canal. Posee la desventaja que los valores son “puntuales”, es decir solo pueden ser extrapolado a las inmediaciones del lugar donde se haga la prueba.

4. Método del permeámetro: es un aparato para medir la velocidad de infiltración sobre el terreno, coincidente con la rasante del canal a construir y con la misma carga o tirante del proyecto. A pesar de que no tiene en cuenta las condiciones reales de flujo del canal, permite pronosticar la magnitud de las filtraciones cuando aun no se ha construido el mismo.

B. EFICIENCIA DE APLICACION

Las láminas se calculan a partir del método edafológico (valores hídricos referenciales, umbral de riego y profundidad de raíces), mientras que la lámina bruta se calcula dividiendo la lámina neta por la eficiencia de aplicación. Esta se obtiene relacionando la lámina almacenada (que puede o no coincidir con la L_n acumulada) con la lámina entregada o derivada a la unidad de riego.

La lámina almacenada se determinará realizando muestreos del suelo antes (W_{act}) y después del riego (24 a 72 hs después, próximo a W_{cc}), a lo largo de la unidad de riego y hasta la profundidad de raíces. Estos datos gravimétricos de humedad del suelo, se afectarán por la densidad aparente del suelo y la profundidad de raíces obteniéndose la lámina efectivamente almacenada.

La lámina derivada se obtiene afectando los caudales de ingreso a la unidad de riego por los tiempos de aplicación y relacionando esto con el área regada.

$$(W_{48h} - W_{act}) * dens * D$$

$$Ef. aplicación = \frac{\text{Lámina media almacenada en zona radical}}{\text{Lámina derivada}} \times 100$$

Los valores medios de eficiencia de aplicación en zonas bien regadas por métodos gravitacionales son del orden del 50%. Las pérdidas mas

comunes son las que se producen por percolación profunda y por escurrimiento superficial. No son importantes, en este caso, las pérdidas por evaporación.

B.1 EFICIENCIA DE APLICACIÓN DEL CUARTO INFERIOR

Es una variante de la evaluación de la eficiencia de aplicación, que utiliza una media tensada en vez de la media aritmética. Considera, de todos los datos de lámina almacenada en la zona de raíces, aquellos que constituyen el 25 % de los menores, o sea el cuarto inferior de la serie de datos. La expresión final queda:

$$\text{Ef. aci} = \frac{\text{Promedio del 25 \% de láminas menores almac. ZR}}{\text{Lámina derivada}} \times 100$$

C. EFICIENCIA DE ALMACENAJE

Surge de relacionar la lámina media almacenada en zona de raíces con la lámina neta calculada previamente:

$$\text{Ef. almacenaje} = \frac{\text{Lámina media almacenada en zona radical}}{\text{Lámina Neta de reposición calculada}} \times 100$$

D. EFICIENCIA DE DISTRIBUCION (Cu: Coeficiente de Uniformidad)

Se han visto las complejidades técnicas del riego por gravedad en cuanto a la necesidad de garantizar una lámina uniforme en toda la zona radical. Si la distribución subsuperficial del agua es notoriamente desuniforme, se notará un crecimiento desigual de los vegetales dentro de la parcela.

Se hace uso de la fórmula propuesta por Christiansen en 1942, cuya expresión es la siguiente:

$$Cu = 100 \times \left(1 - \frac{\sum \text{desvios respecto al valor medio}}{\text{Valor medio} \times N^{\circ} \text{ de observaciones}} \right)$$

E. ESQUEMAS GRAFICOS SOBRE DISTRIBUCION DE AGUA Y EFICIENCIAS.

Se representan gráficamente – **Grafico 3** – distintas situaciones de penetración del agua al perfil en riego superficial y las eficiencias resultantes.

Los dibujos han sido adaptados de Israelsen y Hansen (1979) y no se consideran escorrentías para la eficiencia de aplicación.

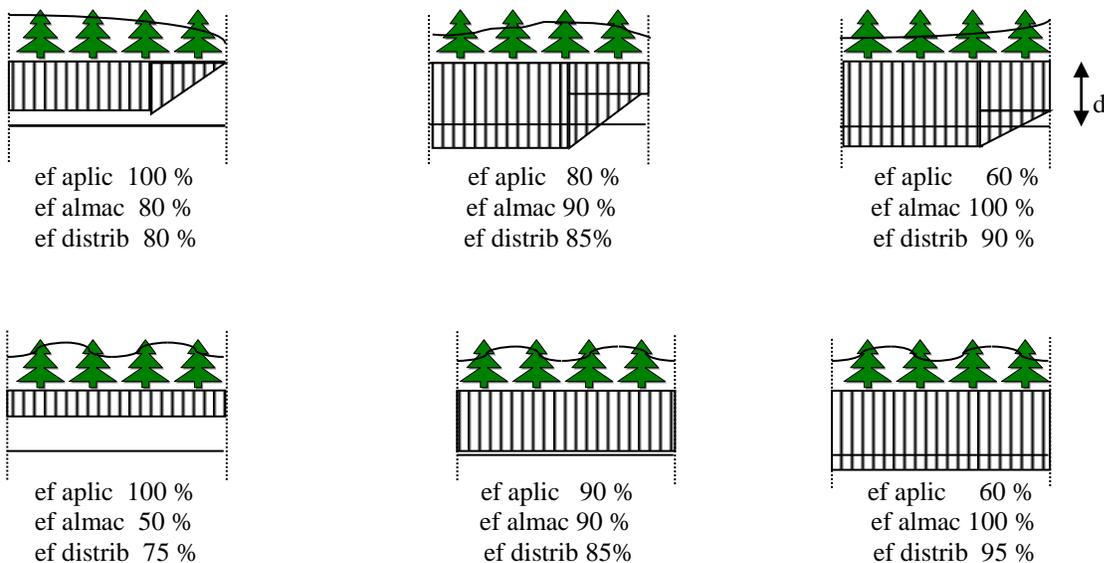


Grafico 3

D = profundidad de raíces

Rayado = almacenaje de humedad

8. Bibliografía.

Agricultura de las Americas. 1988. Riego por cajas a nivel. Pp38-45

Bos, M.G. 1976. Sobre las eficiencias de riego. Memorando Técnico N° 350. Dirección General de Distritos y Unidades de Riego. México.

Cinplast División Riego. 2000. Sistema de riego por caudal discontinuo. Hojas técnicas 1 a 4.

Criddle, W. 1956. Methods of evaluation irrigation systems. Agricultural Handbook N°82. SCS, USDA.

Granados, A.H. 1971. Métodos modernos de riego por superficie. Ed. Aguilar, España.

Grassi, C.J. 1972. Métodos de riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Gurovich, L.A. Riego superficial tecnificado.1999. Ed. Alfaomega.

Israelsen, W.O y Hansen, V.E 1979. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverte S.A.

Palacios Velez, E.1970. Evaluación de las pérdidas por filtración en canales de tierra. Memorandum Técnico N° 278. Dirección General de Distritos y Unidades de Riego. México.

Palacios Velez, E. 1982. Cuanto, cuando y como regar. Memorandum Técnico N° 195. Dirección General de Distritos y Unidades de Riego. México.

Pozzolo, O. 2000. Riego por terrazas. Súper Campo. Año VII, N° 74. Ed. Perfil . Argentina.

Pozzolo, O. 2001. La hora del caudal discontinuo. In.: Súper Campo. Año VII, N° 76. Ed. Perfil Argentina.

Bernardo, S. 1995. Manual de irrigación. 657p. UF Vicosa, Brasil.

Ejercicios:

1) Se deben recalcular los valores de algunas variables en un sistema de surcos USDA para controlar el diseño.

Eficiencia de aplicación 70%

Longitud óptima 112,25 m

Ec avance $L(m) = 30^{0.5}(\text{min})$

Lámina neta 49mm

Espaciamento 70 cm

Q infiltración 0,8 l/s

Calcular QMNE y pendiente en 0/00

2) Se dispone de los siguientes modelos para diseño de riego por surcos

$$L = 26^{0.499}$$

$$I = 23^{-0.6}$$

$$Iac = 0,95^{0.4}$$

Se desea conocer el volumen en m^3 que se aplicará a cada surco de longitud óptima 130 metros durante el período de avance cuando se deriva el QMNE de 2 l/s

3) Calcular la Eficiencia de aplicación y de almacenaje en la unidad de riego (surco) en base a los siguientes datos

Wactual% p/p=20

Wcc% p/v= 49

Dens aparen= 1,25(gr/cm^3)

Contenido hídrico 48 horas después del riego= 47% p/v

Lámina neta acumulada= 150mm

Profundidad de raíces= 0,4 m

Largo surco= 90 m

Escurrecimiento al pie= 10%

Qe= 3 l/s

Tiempo de riego= 85 minutos

Espaciamento= 0,75m

4) Determinar la uniformidad de aplicación en un test realizado para un espaciamento de 18m por 18m . Los volúmenes recibidos en cm^3 son:

69-91-111-108-111-104-89-86-104-99-105-79-89-104-93-87-85-101-85-101-106-86-96-66-113-79-76-74-97-106-89-86-92-108-103-103

5) Dimensionar un sistema de surcos en base a los siguientes datos:

A. Información básica.

- Espaciamiento de surcos: 50 cm
- Lámina de riego requerida: 65 mm
- Pendiente: 0,3%

B. datos experimentales.

Función de avance: Se ajustaron los datos a la expresión de Fok- Bishop:

$$L(m) = 22,55 t(\text{min})^{0,534} \qquad L = A * t^x$$

Función lamina acumulada.

$$Lac (cm) = f (I) \qquad Iac (cm) = 0,58 t(\text{min})^{0,48}$$

Función de infiltración. Se ajustaron los datos a la expresión de Kostiacov:

$$K = \frac{k}{(n+1) 60}$$

$$0,58 = \frac{k}{(-0,52+1) 60}$$

$$k = 16,7$$

$$N = n + 1$$

$$0,48 = n + 1$$

$$n = - 0,52$$

$$I = k * t^n \qquad I (\text{cm/h}) = 16,7 t(\text{min})^{-0,52}$$

$$QMNE (l/s) = 0,631/0,3\% = 2,1 l/s$$

C. Cálculos.

1. Tiempo de infiltración (ti) de la lámina de reposición.

$$t_i = (Lámina / K)^{1/N}$$

$$t_i = (6,5\text{cm} / 0,58)^{1/0,48}$$

$$t_i = (11,20)^{2,08} = 152 \text{ minutos}$$

2. tiempo de avance (t_a).

$$t_a = \frac{1}{4} t_i$$

$$t_a = \frac{1}{4} 152 \text{ minutos} = 38 \text{ minutos}$$

3. tiempo total (T_t) de riego.

$$T_t = t_a + t_i$$

$$T_t = 38 + 152 = 190 \text{ minutos}$$

4. Longitud (L) óptima del surco.

$$L \text{ (m)} = 22,55 t_a \text{ (min)}^{0,534}$$

$$L \text{ (m)} = 22,55 * 38^{0,534} \text{ (min)} = 157 \text{ metros.}$$

5. Caudal de infiltración (Q_i).

El Q_i puede calcularse de varias maneras. Una de ellas, simplista, consiste en utilizar la mitad del caudal de avance. Otra manera es utilizar el valor de velocidad de infiltración promedio (I_p):

$$I_p \text{ (cm/h)} = \text{Lámina} / \text{tiempo.}$$

$$I_p \text{ (cm/h)} = \text{Lac} / \text{tiempo} = K t^N / \text{tiempo}$$

Para un T_t de 190 minutos, la I_p se calcula:

$$= \frac{0,58 * (190)^{0,48}}{190 \text{ minutos}} \times 60 \text{ min/ hora} = 2,27 \text{ cm/h}$$

Sabiendo que: $Q \times t = \text{lámina} \times \text{área}$

$$Q_i = I_p \times \text{área}$$

$$\text{Área del surco} = 0,5 \text{ m (espaciamiento)} \times 157 \text{ m} = 78,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Luego: } Q_i = 2,27 \text{ cm/h} \times 78,5 \text{ m}^2 = 1,075 \text{ m}^3/\text{h} = 0,29 \text{ l/s}$$

Realizando las conversiones de unidades (m/cm; l/m³ y hora/ seg):

$Q_i = 0,29 \text{ l/s}$, que constituye el segundo caudal de manejo.

D. Relación de volúmenes calculados y aplicados.

Aplicando el riego de acuerdo a : Q_{MNE} durante el t_a
 Q_i durante el t_i

El volumen total derivado será:

$$\begin{aligned} \text{Vol}_d &= ((2,1 \text{ l/s} \times 38 \text{ min}) + (0,29 \text{ l/s} \times 152 \text{ min})) \times 60 \text{ s/min} \\ &= 7432,8 \text{ litros} = 7,432 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

La lamina calculada (39,6mm) supone un volumen calculado (Vol_c) de:

$$\text{Vol}_c = 0,065 \text{ m} \times 78,5 \text{ m}^2 = 5,1 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, la Eficiencia de Riego será:

$$E_f = \text{Vol}_c / \text{Vol}_d = 5,1 \text{ m}^3 / 7,432 \text{ m}^3 = 68\%$$

Esto debe interpretarse como que para almacenar la lámina deseada (calculada) se aplicará una lámina de:

$$\text{Vol}_d / \text{área} = 7,432 \text{ m}^3 / 78,5 \text{ m}^2 = 94,6 \text{ mm}$$

E. Pérdidas por percolación profunda y escurrimiento.

El planteo teórico de la estimación de pérdidas por percolación profunda (P_{pp}) se fundamenta en la relación de tiempos de infiltración y avance.

$$R = t_i / t_a \text{ quedando } R = 152 / 38 = 4$$

$$P_{pp} = \frac{(R+1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R+1)^{n+1} + R^{n+1}}$$

$$= \frac{5^{-0,52+1} - 4^{0,48}}{5^{-0,52+1} + 4^{0,48}} = \frac{0,22}{4,10} \times 100 = \underline{5,36 \%}$$

Las pérdidas por escurrimiento (P_{esc}) se evalúan considerando el caudal de escurrimiento (Q_{esc}), que debería aforarse. Con este dato, se pueden calcular:

$$P_{esc} = (t_i / t_i + t_a) \times (Q_{esc} / Q_e) \times 100$$

F. Síntesis de los valores de proyecto y operación.

- Surcos de 157m de longitud, espaciados 0,50 m
- QMNE = 2,1 l/s que se derivará durante $t_a = 38$ min
- $Q_i = 0,29$ l/s que se derivará durante $t_i = 152$ min
- Pérdidas por percolación profunda estimadas = 5 %