

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 elimina 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 cespel 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.

*Rotación?
de aguas?*

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

299

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 $\frac{1}{4}$ 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;

301
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).

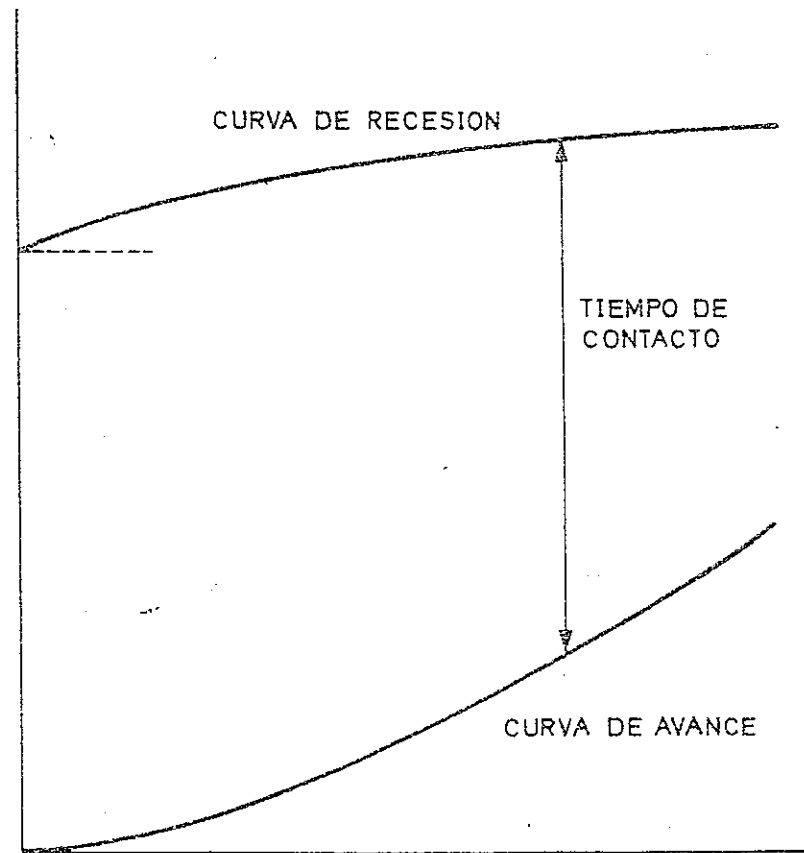
C = intercepto de la curva de infiltración acumulada para $T = 1$. Ecuación 6.3

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.

TIEMPO



DISTANCIA DESDE EL
PUNTO DE ENTRADA
DE AGUA.

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:

	H (m)	Db (gr/cm ³)	Textura
Estrata I	0.40	1.22	franca
Estrata II	0.60	1.35	franco arenosa

2) Curvas características de Humedad:

(bares)	Estrata I w (%)	Estrata II w (%)
- 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:

(T) (minutos)	H (cm)	D (acumulada)
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

Distancia desde el origen (metros)	T de llegada (minutos)	T de desaparecer (minutos)
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:

	% w	h (mm)
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:

$$h_1 = \frac{(27 - 7.2)}{100} \times 1.22 \times 40 \times 0.5$$

$$(13.17 - 4.83) h_1 = 8.3 \text{ cm } (\%) w = 17.08 \% \Rightarrow -1.0 \text{ bar}$$

Estrata II:

$$h_2 = \frac{(20 - 6.2)}{100} \times 1.35 \times 60 \times 0.5$$

$$(16.2 - 5.589) h_2 = 10.6 \text{ cm } (\%) w = 13.09 \% \Rightarrow -1.7 \text{ bar}$$

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:

$$7 \text{ mm/día} \times 9 \text{ días} = 63 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{(h) Estrata I: } & 131.7 \text{ mm} & (63 \times 0.6) \\ \text{(h) \% : } & 93.9 \text{ mm} & (\%) w = 19.24 \Rightarrow -0.5 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(h) Estrata II: } & 162.0 \text{ mm} & (63 \times 0.4) \\ \text{(h) \% : } & 136.8 \text{ mm} & (\%) w = 16.88 \Rightarrow -1.0 \text{ bar} \end{aligned}$$

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:

$$\text{Eficiencia Agronómica} = \frac{\text{Eficiencia de aplicación} \times \text{Eficiencia de almacenamiento} \times \text{Eficiencia de distribución}}{\text{Eficiencia de aplicación} \times \text{Eficiencia de almacenamiento} \times \text{Eficiencia de distribución}}$$

$$E_{ap} = \frac{\text{Volumen total} - \text{Volumen Perdido}}{\text{Volumen Total}}$$

$$V_T = 450 \text{ litros/seg} \times 3.6 \times 3 \text{ h}$$

$$V_T = 4860 \text{ m}^3$$

pero se necesita conocer el volumen perdido que equivale a:

$$V_T = V_I + V_E$$

V_T = Volumen total aplicado

V_I = Volumen infiltrado

* V_E = Volumen escurrido

$$V_T = V_R + V_P + V_E$$

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

$$1) \quad h = CT^b$$

$$\text{Cálculo de } b = \frac{\log. 9.8 - \log. 3.1}{\log. 150 - \log. 10}$$

$$b = 0.42517$$

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

$$b = \frac{N \sum xy - \sum x y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Como $h = CT^b$

$$\log h = \log C + b \log T$$

$$Y = A_0 + b X$$

por lo tanto

$$Y = \log h$$

$$A_0 = \log C$$

$$X = \log T$$

$$N = 8; \sum xy = 10.34; \sum x = 12.38; \sum y = 6.43; \sum X^2 = 20.14; \sum x^2 = 153.26$$

$$b = \frac{(8 \times 10.34) - (12.38 \times 6.43)}{(8 \times 20.14) - 153.26}$$

$$b = 0.3965$$

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:

$$\frac{9.8 - 9.5}{150 - 120} = \frac{0.3}{30} = 0.01$$

$$\frac{10.2 - 9.8}{200 - 150} = \frac{0.4}{50} = 0.008 \leq 10\%$$

Para el cálculo de C se tiene:

$$A_0 = \frac{\sum y \cdot \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$A_o = \frac{(6.43 \times 20.14) - (12.38 \times 10.34)}{(8 \times 20.14) - 153.26}$$

$$A_o = 0.19 \quad C = 1.55$$

Por lo tanto la ecuación queda:

$$h = 1.55 T^{0.40}$$

Distancia (m)	T de llegada (minutos)	T de des- 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:

$$V_T = V_I + V_E$$

$$4\,860 \text{ m}^3 = 2\,810.4 \text{ m}^3 + V_E$$

$$V_E = 2\,049.6 \text{ m}^3$$

$$V_T: 4\,860 \text{ m}^3$$

$$V_I: 2\,810 \text{ m}^3$$

$$V_E: 2\,049.6 \text{ m}^3$$

$$V_T = V_I + V_E$$

$$V_I = V_{\text{infiltrado}}$$

$$V_E = V_{\text{escurrido}}$$

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.

$$E_a = 0.5782 \times 100 \quad E_a = 57.82 \%$$

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.

$\frac{h}{\text{(cm)}}$	$\bar{h} = 11.71 \text{ (cm)}$	$(h - \bar{h})$ 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
		$\Sigma = -0.18$

$$\frac{\sum(h - \bar{h})}{n \cdot \bar{h}} = -0.00219$$

$$E_d = 100 (1 - 0.00219)$$

$$E_d = 99.7 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia Agronómica} &= E_a \times E_{al} \times E_d \\ \text{Agronómica} &= 0.5782 \times 0.8312 \times 0.997 \\ \text{Agronómica} &= 0.479 = 47.9 \% \end{aligned}$$

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

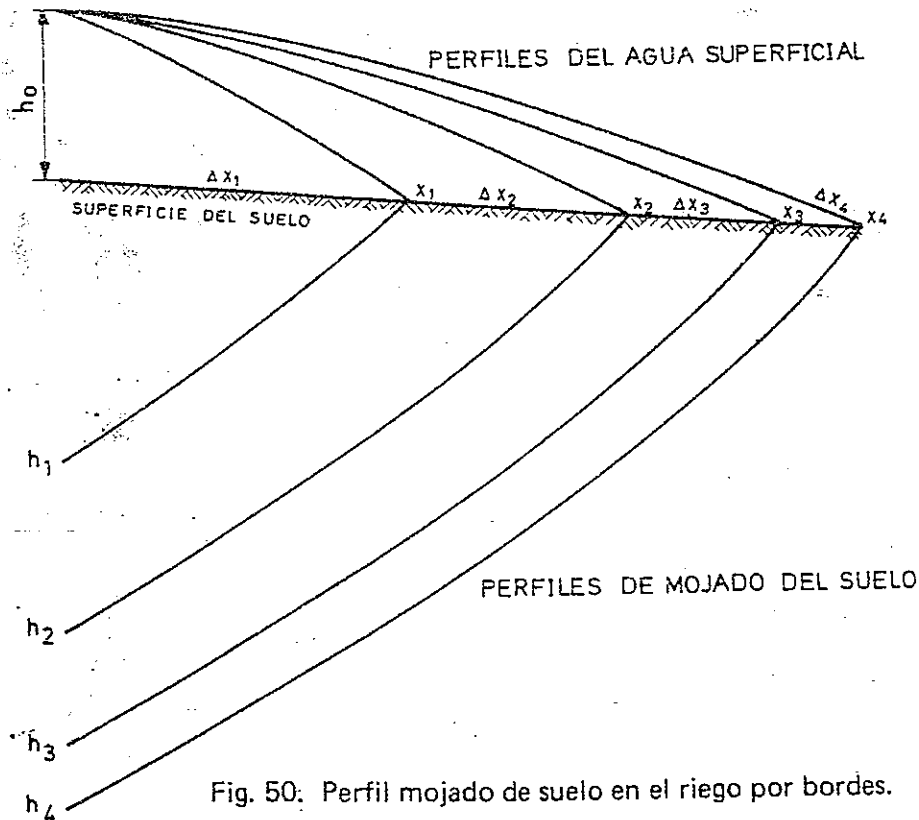


Fig. 50. Perfil mojado de suelo en el riego por bordes.

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.

$$Q_{\text{mín}} = 0.04 s^{0.5} \text{ pies/seg}$$

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:

$$h = C T^b$$

$$\log h = \log C + b \log T$$

$$Y = A_0 + b x$$

$$A_0 = \frac{y x^2 - x xy}{N x^2 - (x)^2}; b = \frac{N xy - x y}{N x^2 - (x)^2}$$

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

$$\Sigma Y = 5.1507$$

$$\Sigma x = 13.122$$

$$\Sigma x^2 = 20.7958$$

$$(\Sigma x)^2 = 172.186$$

$$\Sigma xy = 8.4431$$

$$N = 9$$

$$A_o = \frac{5.1507 \times 20.7958 - 13.122}{9 \times 20.7958 - 172.186} \times 8.4431$$

$$b_1 = \frac{9 \times 8.4431 - 13.133 \times 5.1507 \times 5.1507}{9 \times 20.7958 - 172.186}$$

$$h = 0.568 \times T^{0.560}$$

$$A_o = -0.2455$$

$$C = 0.568$$

$$b = 0.560$$

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)

(bar) ϕ	$\log \phi$	(%) θ	$\log \theta$
1.0	0	20.52	1.312
2.0	0.303	15.12	1.179

Al interpolar estos valores se obtiene:

$$\phi = 1.412$$

$$\% \theta = 17.59 \% \quad w = 14.66 \%$$

$$h = \frac{(29.04 - 14.66)}{100} \times 1.2 \times 100$$

$$h = 17.256 \text{ cm} \quad 1725.6 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Cálculo del tiempo de contacto:

$$h = CT^b \quad h = 0.568 \quad T^{0.560}$$

$$17.256 = 0.568 T^{0.560}; T_c = 444 \text{ minutos}$$

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 pretilles y una gradiente transversal no modificada (0.6 %) se tiene:

$$\text{Ancho} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.006 \text{ m/m}} \quad \text{Ancho} = 8.3 \text{ metros}$$

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 pretilles 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:

$$t = 4 \times 106.24 \quad t = 425.0 \text{ min}$$

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 m). Esto debe encuadrar con el límite de tolerancia utilizado

$$\begin{array}{rcl} 0.6 \text{ m} & \text{---} & 100 \text{ m} \\ X & \text{---} & 9 \text{ m} \\ \hline X = 5.4 \text{ cm} \end{array}$$

(Tolerancia: 5 cm)

(Q) Caudal inicial por borde.

$Q \text{ máx: } 30.3 \text{ litros/seg.}$ 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:

$$E_a = \frac{\text{Volumen de agua en raíces (Vr)}}{\text{Volumen Aplicado}}$$

$$V_r: h \text{ (a reponer)} \times \text{Area (del borde)}$$

$$V_r: 0.17 \text{ m} \times (9 \times 400) \text{ m}^2$$

$$V_r: 612 \text{ m}^3$$

$$V_a: Q \text{ inicial} \times T_a + Q \text{ reducido} \times T_c$$

$$V_a: (42.12 \times 3.6) \text{ m}^3 / h \times \frac{(106)}{60} h + (14.14 \times 3.6) \text{ m}^3 / h \times \frac{444}{60} h$$

$$V_a: 647 \text{ m}^3$$

$$V_a + 6 \% \text{ Percolación} = 686 \text{ m}^3$$

$$E_a = \frac{621.288 \text{ m}^3}{686.01 \text{ m}^3}$$

$$E_a = 0.905639$$

$$E_a = 90.56 \%$$

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)

$$\begin{array}{rcl} 127.39 \text{ litros/seg} & \text{—————} & 17.78 \text{ cm} \\ 42.42 \text{ litros/seg} & \text{—————} & X \end{array}$$

$$X = 5.9 \text{ cm}$$

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.