



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**“ DISEÑO ÓPTIMO DEL RIEGO CON INCREMENTO DE
GASTO EN SURCOS CERRADOS EMPLEANDO UN
MODELO MATEMÁTICO “**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

FERNANDO AVILA GALINDO



DIRECTOR DE TESIS: Ing. Carlos M. Chávarri Maldonado

MÉXICO, D. F.

2007



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/123/06

Señor
FERNANDO AVILA GALINDO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. CARLOS MANUEL CHÁVARRI MALDONADO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"DISEÑO ÓPTIMO DEL RIEGO CON INCREMENTO DE GASTO EN SURCOS CERRADOS
EMPLEANDO UN MODELO MATEMÁTICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. EL PROBLEMA DEL AGUA EN EL RIEGO
 - II. RIEGO CONTINUO O TRADICIONAL
 - III. MÉTODOS DE RIEGO EFICIENTES
 - IV. MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAR EL RIEGO
 - V. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS RC y RIG
 - VI. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 7 de febrero del 2007.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

DEDICATORIA.

A mis padres:

Fernando Avila P.

Trinidad Galindo C.

Les agradezco infinitamente, el apoyo incesante que me brindaron en los momentos en que más lo necesite.

A mis hermanos:

Norma Nely y Miguel Angel, por las palabras en el momento justo.

A Sandra, por su amistad incondicional y ser alguien muy especial para mí.

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería, por haberme dado el privilegio de estar en sus aulas y consumir uno de mis más grandes sueños.

Al Ing. Carlos M. Chávarri Maldonado, por el apoyo y la confianza.

Al M. en I. Víctor Franco por haber sido mi profesor y la ayuda que me brindó en el proceso de mi titulación.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | IV |
| 1. EL PROBLEMA DEL AGUA EN EL RIEGO | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 1 |
| 1.2. Sistemas de riego por gravedad | 2 |
| 1.2.1. Métodos tradicionales | 2 |
| 1.2.2. Riego por surcos | 3 |
| 1.2.3. Conceptos utilizados en el riego..... | 5 |
| 1.2.4. Tiempos y fases del riego | 6 |
| 1.3. Flujo de agua en el suelo..... | 11 |
| 1.3.1. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada | 11 |
| 1.3.2. Capacidad de retención de humedad | 12 |
| 2. RIEGO CONTINUO O TRADICIONAL | 14 |
| 2.1. Descripción del Riego Continuo | 14 |
| 2.2. El desperdicio del agua en el RC | 15 |
| 2.2.1. Pérdidas debido a la conducción | 15 |
| 2.2.2. Pérdidas debido a percolación profunda, escorrentía superficial y evaporación del agua..... | 15 |
| 2.2.3. Condiciones que hacen ineficiente el RC | 17 |
| 2.2.4. Recomendaciones para hacer el RC más eficiente | 17 |
| 2.3. Eficiencia en el riego por surcos.. .. | 18 |
| 2.3.1. Eficiencia de aplicación | 18 |
| 2.3.2. Eficiencia de conducción | 18 |
| 2.3.3. Conceptos utilizados en la evaluación del riego | 19 |
| 2.3.4. Longitudes de los surcos recomendadas | 21 |
| 3. MÉTODOS DE RIEGO EFICIENTES | 22 |
| 3.1. Métodos eficientes alternativos al RC. | 22 |
| 3.1.1. Riego con recorte o cutback | 22 |
| 3.1.2. Riego intermitente | 24 |
| 3.1.3. Riego con incremento de gasto | 24 |
| 3.1.4. Diseño óptimo con el modelo matemático | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 4. MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAR EL RIEGO | 30 |
| 4.1. Ecuaciones de Saint-Venant | 30 |
| 4.1.1. Modelo hidrodinámico completo | 33 |
| 5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS RC y RIG | 38 |
| 5.1. Utilización del programa..... | 38 |
| 5.2. Características de los surcos..... | 40 |
| 5.3. Simulaciones numéricas | 43 |
| 5.3.1. Simulaciones con el RC | 43 |
| 5.3.2. Simulaciones con el RIG..... | 46 |
| 5.4. Resultados y discusión..... | 49 |
| 6. CONCLUSIONES | 55 |
| A. ASPECTOS GENERALES | 57 |
| B. PROGRAMA PARA SIMULAR EL RIEGO | 70 |
| BIBLIOGRAFÍA | 80 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Forma de los surcos | 5 |
| 1.2. Tiempos y fases en el riego por surcos | 8 |
| 1.3. Fases del riego | 10 |
| 1.4. Fase de avance en el riego por surcos cerrados | 10 |
| 1.5. Fase de llenado en el riego por surcos cerrados. | 11 |
| 1.6. Fase de vaciado en el riego por surcos cerrados | 11 |
| 1.7. Fase de recesión en el riego por surcos cerrados | 11 |
| 1.8. Infiltración y tiempo de contacto en el riego por surcos cerrados | 13 |
| 1.9. Evolución de la velocidad de infiltración e infiltración acumulada en el tiempo | 14 |
| 1.10. Evolución del perfil mojado una vez finalizada la fase de avance | 16 |
| | |
| 2.1. Distribución del agua con gasto pequeño | 19 |
| 2.2. Riego con gasto adecuado | 19 |
| 2.3. Riego con gasto excesivo | 20 |
| | |
| 3.1. Hidrograma de ingreso con corte posterior discontinuo | 28 |
| 3.2. Hidrograma de ingreso con corte posterior defasado | 29 |
| 3.3. Hidrograma para el RI en un surco de la segunda batería | 30 |
| 3.4. Riego con incremento de gasto | 32 |
| 3.5. Tubería multicompuerta utilizado en el RIG | 33 |
| 3.6. Hidrograma de ingreso en la primera mitad de la parcela | 34 |
| 3.7. Hidrograma de ingreso en la segunda mitad de la parcela | 34 |
| | |
| 4.1. Esquema en diferencias finitas..... | 41 |
| | |
| 5.1. Curva de avance en el RC | 51 |
| 5.2. Curva de avance en el RIG | 54 |
| 5.3. Comparación de las curvas de avance entre el RC y el RIG | 61 |
| 5.4. Comparación de las eficiencias de aplicación entre el RC y el RIG .. | 62 |
| | |
| A.1. Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases | 72 |

INTRODUCCIÓN

La presencia de agua está irregularmente distribuida en el planeta, tanto en el espacio como en el tiempo, en calidad y en cantidad por lo cual su administración deberá realizarse de la mejor manera para garantizar el progreso de la humanidad y mantener el equilibrio de todos los ecosistemas; esta aseveración debe tomarse en cuenta en el caso de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, debido a que de éstos se extrae el agua para consumo humano y actividades productivas, y son los directamente afectados en el caso de que los aprovechamientos sean excesivos. El costo, el valor y el precio del agua son conceptos diferentes y su aplicación son imprescindibles para el buen manejo de tan vital líquido, el uso eficiente debido a su escasez indica que su cantidad es limitada y tiene usos alternativos. Costo, valor y precio del agua varían según su uso, así se tienen los usos urbano o doméstico, agrícola e industrial; dentro de este último se destaca el uso del agua en la generación de la electricidad.

Hay una gran cantidad de agua presente en la tierra y la atmósfera circundante, cerca del 7% de la masa de la tierra es agua. Sin embargo el (97.39%) está almacenada en los océanos y (2.01%) en forma congelada en los casquetes polares o glaciales. El resto (0.54%) está contenida en las formaciones geológicas. Sólo el (0.06%) se encuentra como agua superficial, de la cual más de la mitad es salada, debido a los minerales existentes en el suelo, que la hace no potable. En realidad el agua dulce disponible constituye menos del 0.02% de la hidrosfera. De estas aguas superficiales, el 95% están almacenadas en lagos, dejando tan solo el 0.001% para todos los ríos y arroyos.

Según el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 en México, se estima que en el año 2000 se extrajeron de los ríos, lagos y acuíferos del país 72 km³ para los principales usos consuntivos; éste volumen representa el 15% de la disponibilidad natural nacional de agua.

El mayor usuario es el sector agropecuario, que emplea 78% del volumen total; en el uso doméstico se utiliza el 13% y en la industria 9%. A menudo el bajo precio del agua de irrigación no refleja los costos reales. En algunas zonas irrigadas, el agua se obtiene de sistemas cuyo costo no ha sido incorporado en el precio. Los precios artificialmente bajos del agua permiten el desarrollo o persistencia de las plantaciones de riego en áreas donde, de otra forma, ello no sería rentable ni posible.

El riego durante muchos años se ha venido haciendo de una forma empírica, es decir, a través de la propia experiencia de los agricultores y no de una forma tecnificada en la cual se emplee un análisis hidráulico. La mayoría de los agricultores tienen la creencia de que si se emplea una mayor cantidad de agua en el suelo, obtendrá mejores rendimientos en sus cosechas, pero esto no necesariamente es así.

En los sistemas de riego, se debe tener en cuenta que actualmente el rubro más importante es el ahorro del agua, ya que utiliza grandes cantidades por la demanda natural de los cultivos, es decir, la evapotranspiración. Ésta es la razón por la cual se le debe dar un uso racional y eficiente.

En México los métodos aplicados son tradicionales en más del 80% de la superficie del país, y las eficiencias de aplicación en las parcelas (agua aprovechada por las plantas entre agua aplicada) son bajas del orden del 59%, que ocasionan una disminución de la productividad media del agua (relación entre el rendimiento y el agua empleada). Con empleo de tecnologías e infraestructura se podría alcanzar un 80% de eficiencia.

Incluso en aquellos cultivos de riego que consumen menos agua, el gasto por hectárea promedio, es equivalente al de 40 hogares urbanos.

Por este motivo, la agricultura de irrigación es competitiva sólo si se plantan cultivos de alto valor comercial o en lugares donde el precio del agua es muy bajo.

Por lo anterior, es inobjetable la necesidad de mejorar el uso del agua agrícola, sin duda, una de las mayores preocupaciones de los especialistas de riego es el alto crecimiento aparente del consumo de agua en la agricultura, lo que la hace inutilizable para otros usos.

México no dispone aún de la tecnología para desarrollar de manera eficiente el riego parcelario, una de estas alternativas sería el riego presurizado pero por razones de costo no está al alcance, ni tampoco se dispone del capital suficiente para brindar apoyo a los agricultores.

El campo mexicano ha estado en el olvido durante mucho tiempo. Se ha visto que el desarrollo de un país, tanto económico como social depende de las posibilidades de abastecerse de alimentos, ya sea por medio de una producción agropecuaria adecuada, como por el intercambio comercial con otros países que le permitan disponer de ciertos alimentos producidos a más bajo costo.

El creciente aumento de la población demanda una necesidad por alimentos, esto ha motivado a lograr niveles de producción agrícola acordes con los requerimientos de la economía de nuestro país. Es necesario incorporar y mejorar los sistemas de riego existentes, con el fin de propiciar un uso eficiente del agua.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 1996) ha estimado que un manejo más adecuado del recurso del agua (incluyendo desde luego las prácticas de riego) representará un aumento importante en los rendimientos de los diferentes cultivos agrícolas.

Mientras no se tenga los medios adecuados debemos hacer más eficiente el riego por gravedad; una de las alternativas viables en sustitución del riego tradicional (RC) es el riego con incremento de gasto (RIG).

Una manera de lograr este fin es mediante la aplicación de los conocimientos teóricos, acerca del manejo de los suelos, el agua y los cultivos. La ingeniería agrícola ha obtenido un desarrollo importante basado en los espectaculares avances de la ciencia y la tecnología en las últimas décadas. Estos conocimientos han transformado la práctica del riego (un arte antiguo) en una técnica moderna de producción. Es por eso que el Instituto de Ingeniería se ha preocupado por subsanar este déficit en la práctica del riego por surcos, desarrollando tecnologías de bajo costo acordes con las necesidades del país.

Se tiene como antecedente la comparación en campo de uniformidades de distribución (UD) entre el RIG y el RC en surcos cerrados. La evaluación consistió en hacer mediciones durante un cultivo de zanahoria para comparar las UD de las láminas de agua infiltradas, así como la comparación de los volúmenes y la duración de la etapa de avance del agua en los surcos, después de aplicar tres riegos con incremento de gasto y tres con riego continuo, para evaluar el primer método.

Los surcos con los que se trabajó se encuentran en los campos experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo, los cuales tienen longitud de 290 m, pendiente de 0.6 %, suelo franco-arcilloso y una separación entre surcos de 0.75 m.

Dicho trabajo fue motivo de tesis, en el que se realizaron simulaciones numéricas con el programa de cómputo, donde el objetivo fue la comparación de las UD entre los dos métodos ya mencionados. En los resultados obtenidos en el Instituto de Ingeniería para dicho trabajo se determinó que la distancia óptima para hacer el incremento de gasto se encontraba entre un tercio y un cuarto de la longitud total del surco; es por este motivo, que el actual trabajo es una extensión del anterior para hallar la fracción óptima en la longitud del surco.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer el criterio de diseño óptimo del RIG en surcos cerrados empleando un modelo matemático con datos de la bibliografía.

El criterio consiste en hacer simulaciones numéricas con el programa de cómputo en distintos surcos con distintas longitudes y diferentes parámetros de infiltración y rugosidad para alcanzar el objetivo planteado.

El procedimiento seguido en las simulaciones numéricas es el siguiente:

1. Calibración de los parámetros de infiltración y rugosidad con los datos de campo del RC
2. Buscar la fracción óptima (aquella que produzca la máxima eficiencia de aplicación) con el mismo gasto para el RIG.
3. Buscar el gasto óptimo con la fracción óptima.
4. Infiltrar diferentes láminas de agua.

Este trabajo consta de cinco capítulos. En el capítulo uno se plantea la problemática que vive actualmente el campo con el recurso agua, se propone el mejoramiento de los sistemas de riego por gravedad, utilizando alternativas viables para el riego parcelario, se describen los tipos de riego, así como sus eficiencias de aplicación. En el capítulo dos, se hace una descripción del RC. En el capítulo tres, se describen los métodos de riego alternativos al RC, en este caso el RIG, el de corte posterior o cut back e intermitente; en los dos últimos solo se hace una descripción breve ya que no es objeto de este trabajo. En el capítulo cuatro se presenta el modelo matemático que se utiliza para simular el riego. En el capítulo cinco se hace la comparación entre los riegos RC y RIG; se describe la utilización del programa de cómputo así como las simulaciones numéricas realizadas en cada surco. El capítulo seis se destina para las conclusiones.

Al final en el apéndice A se mencionan conceptos fundamentales del riego para un mejor entendimiento; en el apéndice B se presenta el programa de cómputo para simular el riego por surcos cerrados. Finaliza con la bibliografía utilizada para la elaboración del trabajo.

Capítulo 1

EL PROBLEMA DEL AGUA EN EL RIEGO

1.1 Planteamiento del problema

México es un país en desarrollo y no ha encontrado la manera de solucionar el problema del agua, ya que como sabemos el sector agropecuario ocupa el 78% del consumo del vital líquido destinada para el riego, es una cifra alarmante y hay que poner especial énfasis en atender este problema que aqueja no sólo a nuestro país.

En países como el nuestro se siguen utilizando técnicas de riego tradicionales que tienen alta rentabilidad, pero a cambio de esto el desperdicio de agua es considerable, por este motivo es indispensable cambiar a métodos alternativos al RC o tradicional; en los cuales se tengan resultados superiores en la eficiencia de aplicación, entre estos métodos se encuentran, el riego intermitente (RI), el RIG y el de corte posterior o cut back (CB), que permiten aumentar la producción de los cultivos con un consumo de agua menor, sobre todo en regiones donde es insuficiente el abastecimiento del agua, esta es la razón principal de la introducción de tecnologías de riego modernas que son capaces de reducir el impacto de la escasez de agua estacional.

Por otro lado, si la población como el agua estuvieran distribuidas uniformemente sobre la superficie de la tierra, no habría escasez de agua, sin embargo la hay.

En la agricultura se necesita que se eficiente el agua en un mayor porcentaje; una manera de hacerlo es buscar alternativas diferentes al RC, que es utilizado en la gran mayoría de los países en desarrollo. Las diferentes cosechas requieren diferentes tipos de irrigación, como el riego por goteo, del cual se sabe que produce ahorros de agua del 50% en relación con el riego por gravedad, también existe el riego por aspersión, estos métodos de riego son los llamados presurizados, debido que la conducción de agua hacia la parcela se hace por medio de tuberías a presión.

El riego superficial es y seguirá siendo la forma principal de aplicar el agua artificialmente a los suelos, para suplir en éstos el agua evapo-transpirada por los cultivos desde el evento del riego anterior [Gurovich L A (1997)]. En un sentido más amplio el riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos, con los siguientes objetivos.

1. Proporcionar la humedad necesaria para que los cultivos puedan desarrollarse.
2. Asegurar las cosechas contra sequías de corta duración.
3. Disolver sales contenidas en el suelo.
4. Reducir la probabilidad de formación de drenes naturales.
5. Dar buenas condiciones que la tierra adquiere con el agua.

1.2 Sistemas de riego por gravedad

1.2.1 Métodos tradicionales

La actividad agrícola es la que requiere más agua y, sin embargo, es la que más ineficientemente la utiliza. En los sistemas de riego por gravedad el agua se desplaza sobre la superficie del área a regar, cubriéndola total o parcialmente, conducida solamente por la diferencia de cota entre un punto y otro por la acción de la fuerza de la gravedad (de ahí el nombre de métodos gravitacionales).

Pero la tendencia actual es a ser sustituido por otras técnicas, ya que su mayor inconveniente es el desperdicio excesivo de agua. Dichas pérdidas son significativas debido a largos recorridos y a cielo abierto; las cuales se estiman en un 25%. [Rojas B (1992)]

Por otra parte no requieren inversiones en equipos de bombeo, tuberías, válvulas, etc., pero en cambio si que precisan de un alto grado de sistematización previa de los cuadros a regar, esto es, nivelaciones y sistematización para poder conducir el agua adecuadamente, que consiste en hacer un estudio topográfico del terreno, en una escala adecuada para una mejor interpretación del mismo. Los datos son:

Forma del predio, con sus respectivos límites y colindancias.

Curvas de nivel, es decir las distintas líneas que unen puntos de igual nivel.

Evaluación de las longitudes, gradientes del lote y de las facilidades de acceso a las fuentes de abastecimiento de agua.

Los métodos de riego son determinadas técnicas para infiltrar el agua a través de la superficie del suelo, con la finalidad de satisfacer las características del cultivo y sus respectivas necesidades de riego tanto en cantidad como en tiempo de aplicación.

Los métodos están condicionados por:

1. Los suelos, a través de la permeabilidad, nivel de saturación, capacidad de campo (CC), densidad aparente (ver apéndice).
2. Relieve y pendiente.
3. Cultivos, a través de la evapotranspiración, punto de marchitamiento, profundidad radicular, descenso tolerable de humedad. Algunos de ellos necesitan estar sumergidos en el agua como el arroz. Otras plantas necesitan que el tronco no se moje, lo que lleva a adoptar el método de riego por surcos.
4. Recursos hídricos: algunos métodos son muy exigentes en cuanto a la cantidad de agua necesaria.
5. Mano de obra.

6. Eficiencia: también juega un papel muy importante, estando íntimamente ligada a la disponibilidad del recurso hídrico.

7. Economía: es una gran condicionante de todo proyecto de riego.

En el riego por superficie, los niveles de disponibilidad del agua son superiores al riego presurizado, debido al mal manejo que se tiene en la conducción del agua hacia las parcelas donde se va a aplicar el riego; para distribuir el agua escurre a través de pequeños cauces (surcos) o en delgadas láminas (melgas) que favorecen el escurrimiento y cubren íntegramente el terreno, a lo que también contribuye la pendiente que suelen tener las parcelas en dirección del escurrimiento, aún cuando existan parcelas a nivel en donde la pendiente es cero.

Este tipo de riego es recomendable en terrenos que tengan pendientes suaves, además se puede aplicar a la mayoría de los cultivos, sembrados en línea (maíz, algodón, etc.), en marco amplio (árboles) u ocupando la totalidad del terreno (alfalfa por ejemplo). Sólo es aconsejable inundar el terreno en cultivos muy específicos, como el arroz.

Hidráulicamente, los surcos y las melgas funcionan de la misma manera que los canales, la diferencia fundamental radica en que mientras en éstos se intenta conducir el máximo caudal posible a distancias considerables con la mínima pérdida por infiltración, en los surcos o melgas, precisamente lo que se intenta es hacer que en cortos recorridos se infiltre el agua que se conduce.

En los canales, despreciando las pérdidas por infiltración, el caudal se mantiene constante en toda su longitud, mientras que en los surcos o melgas el caudal es variable, decreciente, a medida que aumenta la distancia.

Dado el gran número de variables que intervienen en la hidráulica del riego por superficie, se presenta una lista de las mismas:

1. Caudal aplicado.
2. Velocidad de avance del agua sobre el terreno.
3. Longitud de la parcela.
4. Tirante de agua.
5. Velocidad de infiltración.
6. Pendiente del terreno.
7. Aspereza del terreno.
8. Peligro de erosión.
9. Forma del surco o de la melga.
10. Lámina de agua aplicada.

1.2.2 Riego por surcos

El agua es conducida a las tierras de labor por medio de surcos, que se inician en un "principal" que parte de la fuente de suministro (una presa, un manantial, etc.) y a lo largo del cual se van disponiendo surcos laterales y después sublaterales, hasta formar una red abierta que conduce el agua hacia las tierras de labor. En este método la profundidad radical del suelo se humedece mediante la infiltración del agua a través del perímetro mojado de pequeños cauces que reciben el nombre de surcos. En general en el riego por surcos cerrados, las pérdidas de agua se deben a la aplicación excedente en la cabecera (percolación) por ser la zona que se humedece más tiempo. El agua cubre parcialmente el terreno entre surco y surco, y se humedecen por efecto del avance del agua, en profundidad y lateralmente hacia los bordos del surco.

La forma de penetración del agua y las dimensiones de la sección humedecida, dependen de la textura del suelo (ver apéndice), de su variación en el perfil y del tiempo de aplicación del agua.

El riego por surcos se adapta especialmente a los cultivos en línea dado que dicha disposición permite humedecer el volumen de suelo explorado por las raíces, y acercar o retirar la humedad conforme al comportamiento y las exigencias del cultivo.

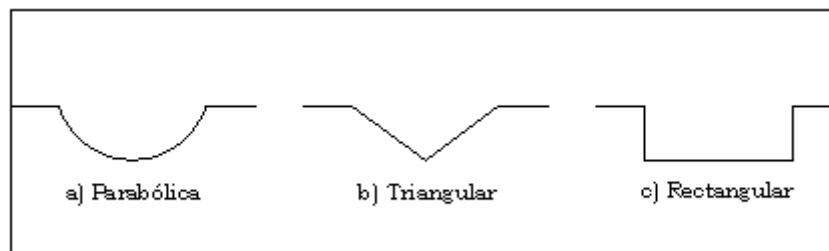
El riego por surcos se presta a todos los tipos de suelos, con buena velocidad de infiltración y baja erosión. Los suelos que mejor se adaptan son los francos y francos-arcillosos (ver apéndice), los terrenos excesivamente ligeros no, por las pérdidas en la cabecera y tampoco los excesivamente arcillosos por las pérdidas por escorrentía.

Los costos de instalación y de operación del riego por surco no son elevados, ya que puede emplearse con escasos trabajos de preparación para la plantación de cultivos.

Algunos inconvenientes que se presentan en el riego por surcos, son:

Salinidad: No es conveniente regar por surcos en terrenos salinos o con agua con sales. La razón de esto es que al subir el agua por capilaridad, ascienden también las sales, produciéndose una mayor concentración de sal en los bordos.

Formas y dimensiones de los surcos: La forma de los surcos depende del implemento empleado para su construcción; puede ser de forma parabólica, triangular o rectangular. El tamaño del surco depende comúnmente del cultivo y de las labores culturales. Oscilan entre 10 y 40 cm de ancho y entre 5 y 20 cm de profundidad. En general, los surcos son de menor tamaño cuando el cultivo es joven y va aumentando a medida que avanza el ciclo vegetativo del mismo.



[Figura 1.1: Forma de los surcos]

Espaciamiento: El espaciamiento de los surcos, o sea la distancia entre surco y surco, depende de la naturaleza física del suelo y de la profundidad del suelo que se intenta mojar. Se presenta en la Tabla 1.1.

El objetivo al determinar la separación de los surcos es asegurar que el movimiento lateral del agua entre dos surcos consecutivos, es que moje la totalidad de la zona radicular de la planta antes de que alcance profundidades superiores a las provistas en el riego. El movimiento horizontal y vertical del agua en el suelo depende de su textura. (ver Tabla A.1 en el apéndice)

Tabla 1.1: Espaciamiento entre surcos

| Suelos | Separación [m] |
|--|----------------|
| Arenoso grueso (perfil uniforme) | 0.30 |
| Arenoso grueso s/subsuelo compacto | 0.46 |
| Arenoso fino o Franco arenoso (uniforme) | 0.60 |
| Arenoso fino o Franco arenoso s/subsuelo compacto | 0.76 |
| Franco arenoso o Franco limoso (uniforme) | 0.90 |
| Franco arenoso o Franco limoso s/subsuelo compacto | 1.00 |
| Franco arcilloso limoso (uniforme) | 1.20 |
| Suelos arcillosos | 1.50 |

Pendiente y dirección de los surcos

Al igual que en los canales, el caudal que puede conducir un surco depende de la sección de escurrimiento y de sus condiciones hidráulicas. El caudal que resulta al aplicar está limitado por:

a) En los suelos sin pendiente, por la sección de escurrimiento que ofrece el surco.

Los surcos se construyen sin pendiente alguna (nivelados a cero).

Se adapta muy bien para regar todos aquellos cultivos que se siembran en hilera o en cama como el maíz, el melón, la sandía y las hortalizas.

Los surcos rectos se adaptan a terrenos planos; mientras que los surcos en contorno a terrenos ondulados y con pendiente uniforme. La pendiente del surco debe ser menor de 0.05%. [Enciso J, et al (2002)]

El gasto debe ser lo suficientemente grande como para cubrir la longitud del surco. En este caso no se produce escurrimiento de agua al pie.

Es aconsejable en terrenos que permitan surcos de igual longitud.

b) En los suelos con pendiente, por la fuerza erosiva del agua.

Surcos con pendiente.

La pendiente también juega un papel muy importante. Imaginemos una bandeja donde aplicamos un poco de agua. La velocidad de escurrimiento será directamente proporcional a la inclinación que le demos. Pareciera que podemos resolver el problema de suelos arenosos, con mayor pendiente, pero nuestra limitante será la erosión.

Es recomendable para cultivos que se siembran en hilera. Se adapta a terrenos planos con pendiente, ondulados y uniformes. La pendiente a lo largo del surco no debe ser mayor de 0.5%, [Enciso J, Herrera J C, Peña E (2002)]. Puede usarse en terrenos con pendientes mayores, usando el gasto adecuado para evitar la erosión del suelo. Se adapta a cualquier forma de terreno.

1.2.3 Conceptos utilizados en el riego

La lluvia, la evaporación del agua, el consumo de agua, y la cantidad de agua que se aplica a los cultivos, se expresa en lámina de agua. Es común escuchar que la precipitación pluvial fue del orden de 25 mm, o que la lámina de riego del maíz es de 12 cm.

Lámina de agua

Es la altura que alcanzaría un volumen de agua que se encuentra en un recipiente, si se vaciara en una superficie que estuviera a nivel o completamente horizontal y que estuviera cerrado en los extremos para evitar que escurriera.

De acuerdo con su textura, los suelos tienen diferentes contenidos de humedad aprovechable, dicha lámina de agua aprovechable se expresa en centímetros por metro de espesor del suelo. Entre más arcillosos son los suelos, más humedad aprovechable almacenan por metro de profundidad del suelo y entre mas arenosos menos humedad aprovechable almacenan.

Productividad del agua

Productividad del agua o uso eficiente del agua (en inglés WUE) se puede calcular como sigue.

$$UEA=(Y/(\text{lamina aplicada})) \quad (1.1)$$

Donde:

Y: Rendimiento [ton/ha]

Dosis o lámina neta

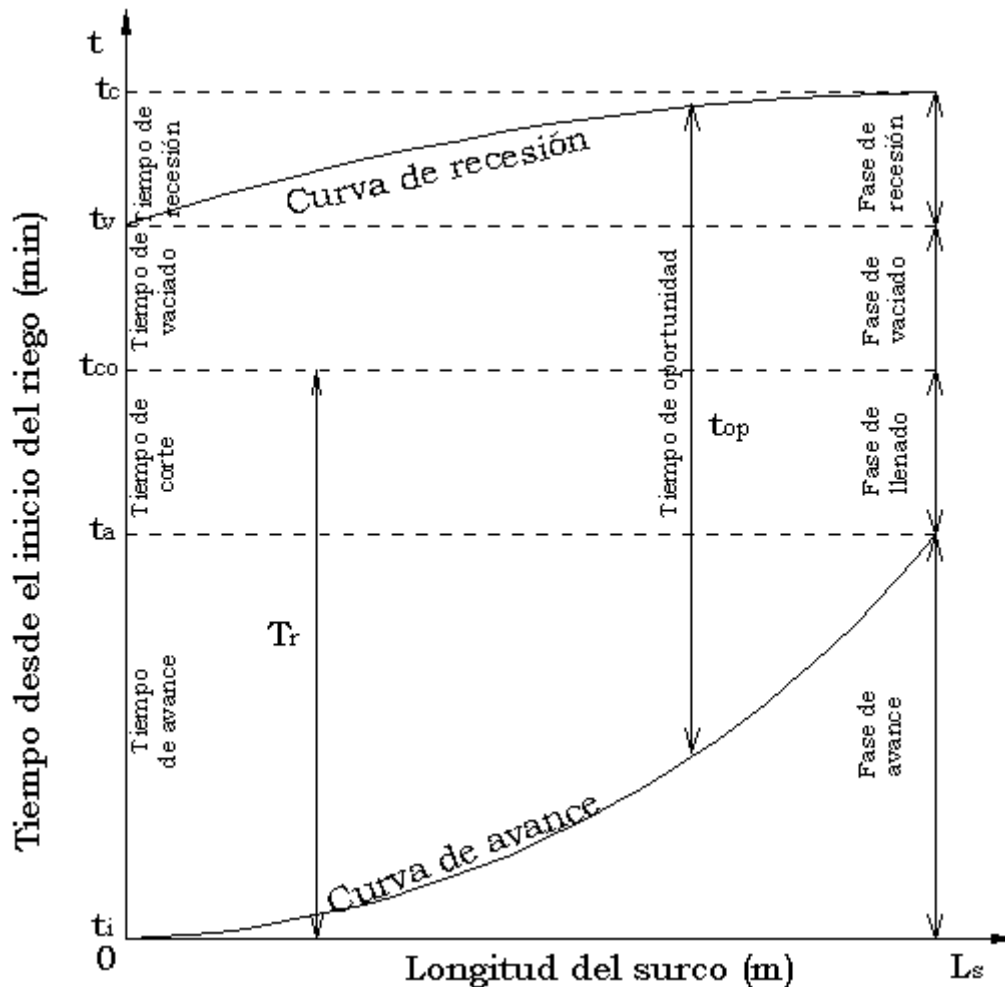
Lámina de agua requerida por la planta desde un cierto porcentaje de humedad hasta la capacidad de campo. (Z_m)

1.2.4 Tiempos y fases del riego

El riego se divide en fases que separan procesos hidráulicos distintos y que ayudan a comprender el análisis del movimiento del agua sobre la superficie del surco. Las fases del riego están separadas por los tiempos característicos, que a continuación se describen.

La curva de avance es la representación gráfica del tiempo transcurrido contra la distancia recorrida por el frente de agua una vez que ésta se ha introducido al campo.

La curva de recesión es la representación gráfica del tiempo en que desaparece el agua en cada punto del surco.



[Figura 1.2: Tiempos y fases en el riego por surcos]

Tiempo de riego

Es el período de tiempo en que se aplica una determinada lámina de agua a lo largo de la parcela con el fin de humedecer la zona radicular de la planta y dar un buen riego. (T_r)

Tiempo de aplicación del agua: El responder a la pregunta: ¿A qué tiempo se debe cortar el agua en la cabecera?, implica el conocimiento del Tiempo de Riego (T_r) y el manejo del concepto de caudal máximo no erosivo.

Tiempo de inicio del riego

Es el tiempo en el que comienza a entrar agua al surco. (t_i)

Tiempo de avance

Es el tiempo en el que el agua avanza desde la entrada hasta llegar al final del surco. (t_a)

Tiempo de corte

Es el tiempo en el que deja de entrar agua al surco. (t_{co})

Tiempo de vaciado

Es el tiempo en el que una parte del surco queda al descubierto después de infiltrarse toda el agua o desplazarse hacia otras zonas. (t_v)

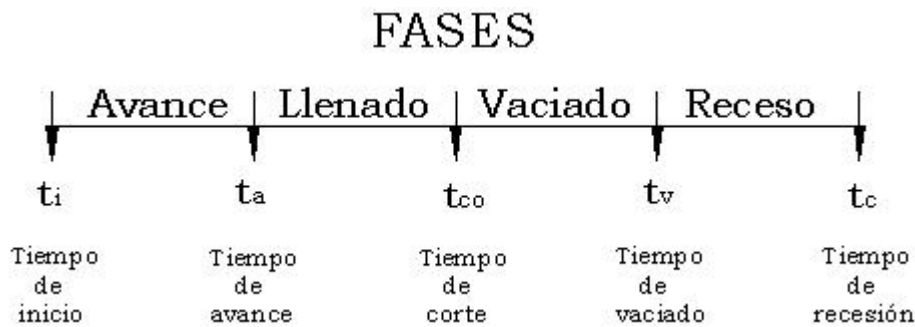
Tiempo de recesión

Es el tiempo en que desaparece el agua de toda la superficie del terreno o del surco. (t_c)

La duración entre estos tiempos característicos define las fases típicas del riego. Las distintas fases de este tipo de riego están representadas en la Figura 1.3.

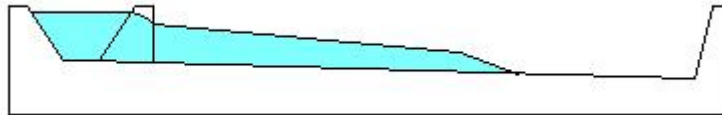
Fase de avance

Esta fase se estudia generalmente como una función de las siguientes variables: tiempo transcurrido, gasto de entrada, características de infiltración del suelo, rugosidad y pendiente del terreno.



[Figura 1.3: Fases del riego]

Comienza cuando el agua ingresa al surco y después de un cierto tiempo (llamado tiempo de avance t_a) el frente de avance llega al extremo final del surco, en ese momento termina esta etapa. Es la diferencia entre t_a y t_i . Ver Figura 1.2.



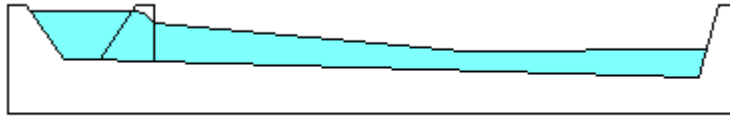
[Figura 1.4: Fase de avance en el riego por surcos cerrados]

Fase de llenado o de almacenamiento

Empieza cuando el agua comienza a salir al final de la parcela, es decir cuando hay desbordamiento en los surcos por escurrimiento superficial originada por la pendiente, se continúa suministrando agua durante cierto tiempo hasta aplicar la lámina de riego requerida, terminando cuando se interrumpe el caudal de entrada de agua a la parcela (a los surcos).

Justamente en ese momento empieza la fase de recesión, que finaliza cuando la lámina de agua sobre la superficie al comienzo del surco desaparece por efecto de la infiltración y del flujo superficial que ocurre simultáneamente en el suelo, generalmente es una fase de muy corta duración.

El tiempo que dura esta fase es el tiempo de almacenamiento (t_{alm}). Es la diferencia entre t_{co} y t_a . Ver Figura 1.2



[Figura 1.5: Fase de llenado en el riego por surcos cerrados]

Fase de vaciado o de agotamiento

Empieza en el momento del corte del suministro de agua al surco, después de lo cual el tirante de agua disminuye. Esta fase termina cuando una porción cualquiera de la superficie del terreno queda sin agua. Es la diferencia entre t_v y t_{co} . Ver Figura 1.2



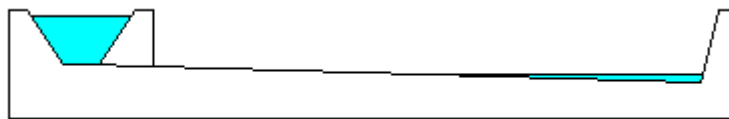
[Figura 1.6: Fase de vaciado en el riego por surcos cerrados]

Fase de recesión

Empieza cuando se suspende el agua a la parcela, entonces comienza a desaparecer gradualmente el agua desde la cabecera hasta el pie del surco. El tiempo que dura esta fase es el tiempo de recesión (t_c). Es la diferencia entre t_c y t_v .

Termina cuando el surco no presenta agua libre en ningún punto de su superficie.

En los terrenos con pendiente la recesión de la lámina de agua sobre el terreno, al cortar el agua en la cabecera, debe ser tenida en cuenta, en el tiempo de riego. Ver Figura 1.2.



[Figura 1.7: Fase de recesión en el riego por surcos cerrados]

Tiempo de contacto o tiempo de oportunidad

El tiempo de contacto (t_{op}) corresponde al tiempo en que el agua permanece sobre la superficie del surco en un punto a lo largo de éste; comprendido entre las fases de avance y recesión (ver Figura 1.2), durante este tiempo el agua se infiltra en el suelo. [Fuentes J L (2003)]

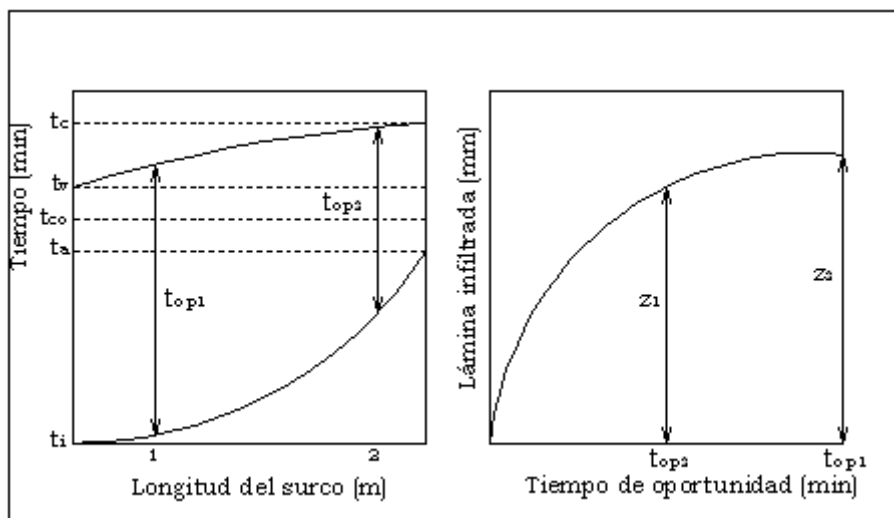
La diferencia entre el tiempo de avance y el tiempo de recesión es llamado tiempo de oportunidad (t_{op}), para que ocurra la infiltración.

$$t_{op} = t_a - t_c \quad (1.2)$$

El avance es mucho más rápido al principio que al final del surco, debido a que conforme avanza el riego hay más superficie de suelo infiltrando aguas arriba, lo que se refleja en la forma de la curva de avance. [Fuentes J L (2003)]

En la Figura 1.8 (izquierda) se observa que al principio del surco el tiempo de oportunidad (t_{op1}) es mayor y va disminuyendo a medida que el frente de avance del agua se aproxima al final del surco (t_{op2}), por consecuencia la lámina infiltrada es mayor al principio del surco. La Figura 1.8 (derecha) presenta una curva típica de tiempo de contacto e infiltración acumulada. En esta curva se observa como al inicio del riego la lámina infiltrada crece muy rápido, mientras que al final el crecimiento es muy lento.

Como consecuencia, la diferencia relativa entre las láminas infiltradas, Z_1 y Z_2 es mucho menor que la que existe entre los tiempos de contacto t_{op1} y t_{op2} .



[Figura 1.8: Infiltración y tiempo de contacto en el riego por surcos cerrados]

1.3 Flujo de agua en el suelo

Entre los principales procesos del flujo de agua en el suelo debe destacarse: La infiltración o entrada de agua al perfil del suelo, el drenaje o paso del agua en la zona radicular, la evaporación o pérdida de agua en forma de vapor hacia afuera del perfil del suelo y por último el movimiento de agua desde el suelo hacia las raíces de las plantas. Todos estos procesos de flujo, que actúan en forma simultánea o secuencial, determinan el contenido de agua en un punto del suelo en un instante dado.

1.3.1 Velocidad de infiltración e infiltración acumulada

Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la infiltrabilidad, el agua infiltra tan rápidamente como es aportada, por lo tanto, en ese caso, el control de la velocidad de infiltración está determinada por el proceso de aporte.

Sin embargo, una vez que la velocidad de aporte excede la infiltrabilidad del suelo, es esta última la que determina la velocidad real de infiltración y entonces el proceso de infiltración es controlado por las características del perfil del suelo.

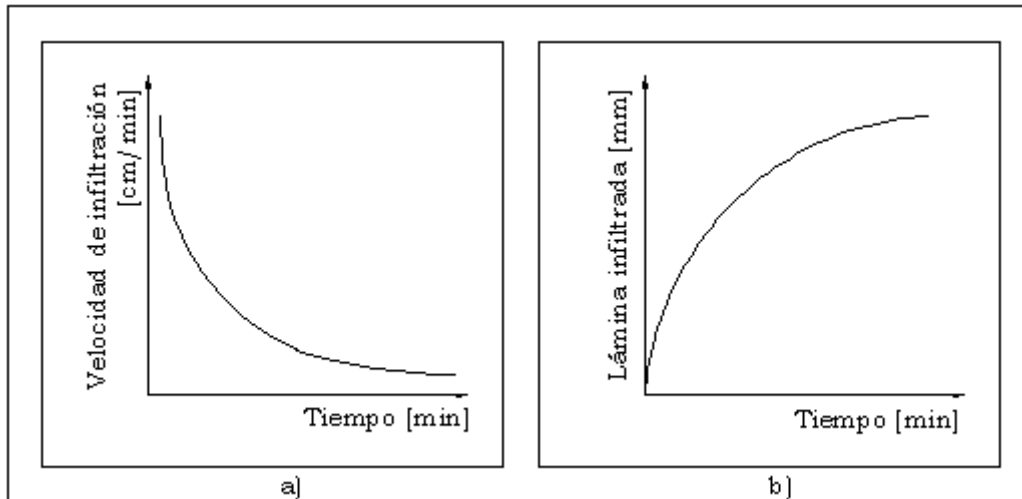
La curva de velocidad de infiltración es una gráfica de los valores instantáneos de velocidad con que el agua se infiltra en la superficie del suelo, contra el lapso de tiempo después del mojado inicial.

La curva de infiltración acumulada es una gráfica de la lámina de agua infiltrada acumulada contra el lapso de tiempo después del mojado inicial.

La infiltrabilidad del suelo varía en el tiempo, siendo alta en los estados iniciales y decreciendo en el tiempo hasta alcanzar una velocidad constante, como puede observarse en la Figura 1.9a). La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión por agua. Además determina el tiempo óptimo de riego y el diseño, en relación con el largo de los surcos y los caudales que deben utilizarse.

En los suelos arcillosos es común observar velocidades de avance muy superiores a aquellas observadas en suelos de textura arenosa; esto se debe principalmente a una mayor infiltrabilidad a lo largo del surco en un suelo arenoso, lo que hace que se retrase la velocidad del flujo superficial.

La infiltración acumulada, que es la integración en el tiempo de la velocidad de infiltración, tiene una dependencia no lineal con el tiempo y una pendiente decreciente, como se observa en la Figura 1.9b). Las técnicas de riego por surco tecnificado tienen como objetivo aumentar la uniformidad de las láminas infiltradas en cada punto a lo largo del terreno. La función de infiltración acumulada tampoco es constante a lo largo del surco, lo que significa que en cada punto del terreno infiltrará una lámina de agua diferente para un mismo tiempo de oportunidad.



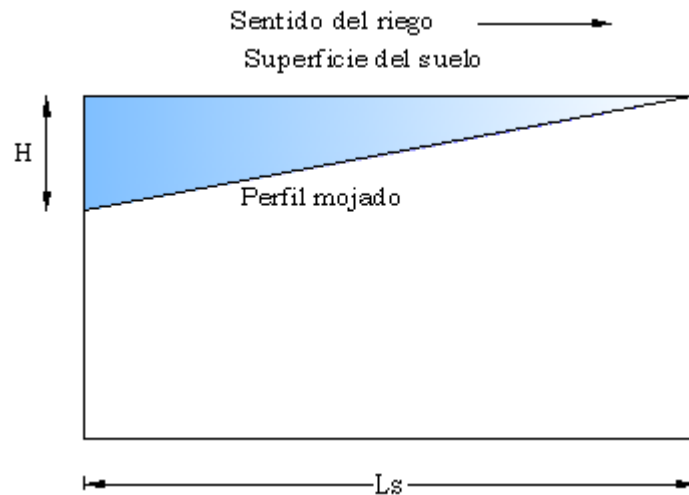
[Figura 1.9: Evolución de la velocidad de infiltración e infiltración acumulada en el tiempo]

1.3.2 Capacidad de retención de humedad

En el suelo hay variabilidad en las características que definen su capacidad de retención de humedad, lo que implica que la lámina neta requerida en cada punto puede ser diferente. Esta situación se presenta en una relación inversa de acuerdo al tipo de suelo, ya que aquellos suelos con una infiltrabilidad alta, es decir, en los que se logra infiltrar una lámina determinada en un tiempo menor, poseen una menor capacidad de retención de humedad, como ocurre en los suelos arenosos. Aquellos suelos cuya infiltrabilidad es baja requieren más tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo para infiltrar una misma lámina de agua. A su vez, poseen una alta capacidad de retención de humedad, que es una característica de los suelos arcillosos. Debido a la variabilidad de suelos que presenta un terreno, a pesar de que se logre un tiempo de oportunidad uniforme a lo largo del surco, las láminas infiltradas en cada punto pueden ser significativamente diferentes, quedando algunas zonas con una aplicación de agua inferior a la lámina neta requerida y otras zonas con una infiltración que supera la capacidad de retención de humedad del suelo, ocasionando una mayor pérdida de agua por percolación profunda y trastornos en la zona radicular por saturación.

Otra fuente de variación en la magnitud de las láminas infiltradas a lo largo del campo regado, es la diferencia existente entre los tiempos de contacto en cada punto, se debe al tiempo que tarda el flujo de agua desde que entra en contacto con el extremo inicial del surco hasta que llega al extremo final. Esto origina un gradiente de infiltración, que se puede observar en la Figura 1.10. En la misma figura se muestra una simplificación de la situación en el perfil del surco en el instante en que el agua alcanza el final de éste. En ese momento al inicio del surco ya ha infiltrado una lámina que ha mojado el perfil hasta una profundidad H , mientras que al final recién se inicia la infiltración. La zona oscurecida indica las láminas infiltradas en cada punto del suelo a lo largo del surco en el instante en que la fase de avance se ha completado. A esta zona se le denomina perfil mojado.

La pendiente del perfil mojado en suelos homogéneos es función directa de la velocidad del frente de avance, lo que tiende a disminuir durante el transcurso del riego, debido a que en los puntos sucesivos a la entrada de agua al perfil, el caudal es inferior al que ingresa al surco, producto de la infiltración de parte del caudal de entrada en el tramo anterior.



[Figura 1.10: Evolución del perfil mojado una vez finalizada la fase de avance]

El flujo de agua en el suelo permite completar la infiltración de una lámina determinada en el final del surco sin necesidad de que el tiempo de contacto en ese punto se alcance manteniendo el ingreso de agua al surco, puesto que cuando se suspende el caudal de entrada, transcurre un período de tiempo durante el cual escurre agua sobre el punto de menor cota; ese tiempo termina cuando toda el agua que quedó sobre la superficie a lo largo del surco se evacua, ya sea escurriendo por la superficie o por infiltración al interior del perfil.

Durante el período adicional de infiltración, la pendiente del perfil mojado se reducirá tanto como se demore la fase de recesión. Sin embargo, en surcos con pendientes superiores al 0.04%, no es necesario considerar el tiempo de recesión, debido a que al ser tan breve, no influye significativamente en la infiltración que ocurre en el último tercio del surco. Si no se cumple esta condición, es necesario incluir el tiempo de recesión, ya que de no hacerlo ocasionará pérdidas por percolación profunda a lo largo de todo el surco regado. Por el contrario, al considerar el tiempo de recesión, las pérdidas por percolación profunda pueden llegar a ser completamente anuladas.

Capítulo 2

RIEGO CONTINUO O TRADICIONAL

2.1 Descripción del Riego Continuo

Entiéndase como RC, aquel en el cual el gasto no se interrumpe y permanece constante durante el tiempo de riego.

El método de RC, se usa tanto en surcos abiertos como en surcos cerrados; siendo más empleado en los segundos, por aprovechar el agua de una manera más eficiente, debido a que los surcos están bloqueados en el pie (al final), esto impide que el agua escape hacia otras parcelas.

Este tipo de riego tiene un grave problema de manejo: Si el agua se corta demasiado tarde habrá un importante encharcamiento al final del surco que pone en peligro en muchas ocasiones la producción y supervivencia del cultivo; por el contrario, si el agua se corta demasiado pronto, pueden producirse riegos incompletos.

La ventaja del RC es que puede aprovechar el efecto positivo de la pendiente del terreno para acelerar el proceso de avance. Debido a que los problemas que presenta este tipo de riego están fuertemente ligados a la pendiente, se recomienda utilizar aquellas que sean moderadas, por debajo del 1%. [Rojas B (1992)]

Este tipo de riego, es un sistema muy atractivo para los agricultores porque requiere baja inversión, pero en cambio exige cierta habilidad por parte del regante para lograr una operación eficiente.

Un sistema de riego por surcos está compuesto básicamente por, un tubo de conducción (polietileno, PVC o de aluminio) que se ubica en la cabecera de los surcos, con pequeñas válvulas para verter el agua (tuberías multicompuertas).

El agua de riego tiene por objeto humedecer la zona radicular del suelo para el crecimiento de la planta. Se aplica cuando el porcentaje de humedad disminuye o es igual a un valor previamente determinado, generalmente por arriba del punto de marchitamiento (ver apéndice), pero sin exceder la capacidad de campo (ver apéndice) del suelo porque entonces el agua se infiltraría por debajo de la zona radicular y no sería utilizada por la planta. Después, por efecto de la evapotranspiración el porcentaje de humedad vuelve a descender hasta que se aplica el siguiente riego.

2.2 El desperdicio del agua en el RC

El campo mexicano se ha tecnificado al instalar tuberías para evitar el desperdicio del agua en la conducción a las parcelas. En el RC las pérdidas se deben a fugas existentes en la conducción, percolación profunda, evaporación del agua y escorrentía superficial que produce encharcamientos al final en el caso de surcos cerrados.

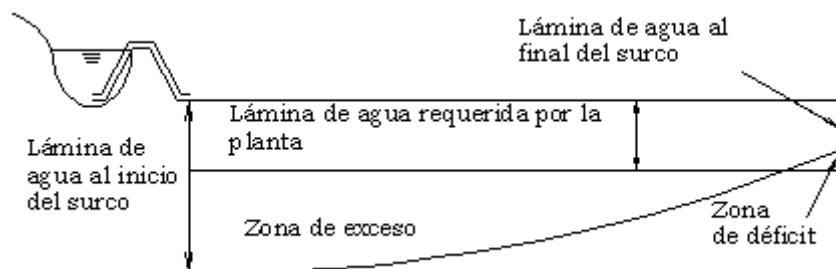
2.2.1 Prdidas debido a la conducción

Éstas se deben principalmente a filtraciones (en el caso de canales excavados en tierra), derrames y fugas (en el caso de tuberías). Sin embargo es necesario utilizar métodos alternativos al RC en surcos cerrados o diseñar de manera óptima éste, haciendo los surcos más cortos.

2.2.2 Pérdidas debido a percolación profunda, escorrentía superficial y evaporación del agua

En el riego por surcos se presentan tres esquemas de distribución del agua bajo diferentes condiciones de gasto.

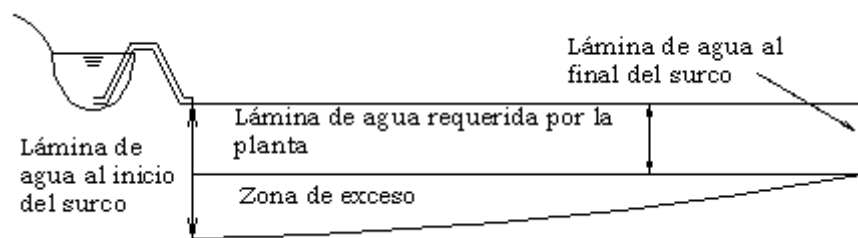
Gasto pequeño: El avance del agua tiende a escurrir muy lentamente y se produce percolación profunda.



[Figura 2.1: Distribución del agua con gasto pequeño]

De acuerdo con la figura anterior, al manejar un gasto pequeño se presentan pérdidas por percolación profunda al inicio donde el agua ha permanecido el mayor tiempo y su infiltración es en demasía, por el contrario en el extremo nos encontramos con la mínima infiltración, ya que el agua solo pudo permanecer un menor tiempo en contacto y el caudal residual ha disminuido sensiblemente, por tanto, puede observarse que hay déficit de riego en la parte final, y se aprecia que no hay escurrimientos superficiales ni encharcamientos al final, existe baja eficiencia de aplicación y mala uniformidad en el riego.

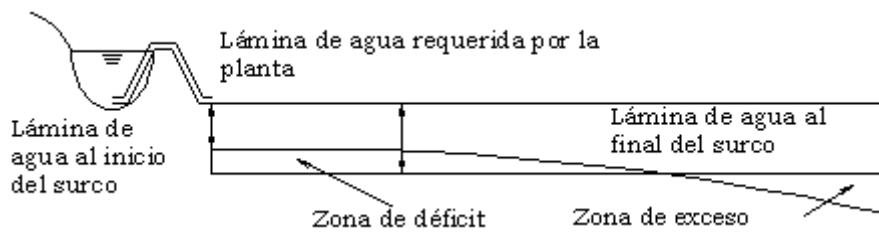
Gasto adecuado: El avance del agua es adecuado al tiempo necesario para que se infiltre la lámina de riego requerida en todo lo largo del surco.



[Figura 2.2: Riego con gasto adecuado]

En la figura anterior se observa que se satisfacen las necesidades de humedecimiento de la planta con alta uniformidad, aplicando la lámina de agua proyectada al final del riego y con un pequeño exceso por percolación profunda al inicio del surco. Aún así, el RC no llega a alcanzar una buena eficiencia de aplicación en comparación con otros métodos de riego.

Gasto grande: El frente de agua avanza muy rápido y la tendencia es a acumularse al final del surco y con posibilidad de erosionar el suelo.



[Figura 2.3: Riego con gasto excesivo]

De acuerdo con la figura anterior el riego no humedece lo suficiente al principio del surco, al final existe un exceso de agua por escurrimiento superficial ocasionando percolación profunda y cuando los surcos son cerrados como es el caso, existe encharcamiento e inevitablemente evaporación. Existe buena uniformidad pero baja eficiencia en el riego.

2.2.3 Condiciones que hacen ineficiente el RC

Se debe a pérdidas significativas por el tipo de pendiente, ocasionando encharcamiento al final del surco, percolación profunda, etc.

Escurrecimiento superficial: Se debe a las condiciones del terreno, además de que provoca erosión en el suelo.

Una pérdida importante por escurrecimiento superficial puede deberse a:

1. Una pendiente demasiado grande, consiste en hacer escurrir el agua en el punto mas alto, fluyendo hacia los sectores mas bajos durante un tiempo suficiente para que se infiltre el volumen que deseamos aplicar. Las pérdidas además de producirse por infiltración diferencial en cada punto, se producen por escurrecimiento superficial y encharcamiento al pie (final del surco) de la parcela en el caso de surcos cerrados.

En los terrenos con pendiente la recesión de la lámina de agua sobre el terreno al cortar el suministro (en la cabecera) debe ser considerada en el tiempo de riego, debe nivelarse el terreno o cambiar el método de riego por un riego mecánico.

2. Uso de caudales muy grandes y sin regulación, cuyo control y reducción aumentaría la eficiencia.

3. Suelos con velocidad de infiltración relativamente baja, lo que indica en este caso que los surcos deben alargarse, así como incrementar el tiempo de riego y disminuir significativamente los gastos empleados; esto permitirá un contacto más prolongado del agua con el suelo que se está regando, reduciendo simultáneamente las pérdidas por escurrecimiento superficial.

Percolación profunda: Es cuando un alto porcentaje de agua se infiltra hacia zonas no aprovechables por el sistema radicular de la planta.

Una pérdida importante por percolación profunda puede deberse a que se riega sin pendiente, consiste en llenar el surco con el volumen deseado de agua, éste permanecerá así hasta que el volumen se infiltre, también puede deberse a un tiempo de riego demasiado prolongado en un suelo con una velocidad de infiltración relativamente alta. Esto requiere que se modifique a tiempos de riego más cortos y por tanto reducir la longitud de los surcos. Lo anterior implica riegos más frecuentes, pero de menor duración.

2.2.4 Recomendaciones para hacer el RC más eficiente

Para asegurar el éxito en el riego, deben obtenerse eficiencias de aplicación del 80%, de esta forma se evitan pérdidas por percolación profunda y escurrecimientos superficiales y encharcamientos al final del surco. [Peña E, Montiel M A (2002)]

En México la mayoría de los surcos son cerrados, estimándose bajas eficiencias de aplicación en el riego, del orden del 59%, [Alexander-Frezieres (2001)]; sin embargo mediciones recientes en surcos abiertos y cerrados presentan eficiencias de aplicación del 39%, [Montiel-Gutierrez (2003)], debido a que se siguen utilizando métodos de riego tradicionales, dominando el riego continuo.

La eficiencia de aplicación puede incrementarse si existen las condiciones adecuadas, es decir:

1. Que los surcos sean cerrados en la parte final y que la pendiente del terreno sea suave, esto lleva a que no haya encharcamiento en el surco.

2. La longitud sea la adecuada y que el gasto sea el óptimo, de esta manera se evitan pérdidas excesivas por percolación profunda.

Estas condiciones son necesarias si se desea obtener una buena eficiencia de aplicación en el riego.

2.3 Eficiencia en el riego por surcos

Los ingenieros usan el concepto de eficiencia del riego para medir el buen uso del agua.

Una eficiencia alta del agua es un indicador de una buena uniformidad de distribución en el mojado del suelo.

2.3.1 Eficiencia de aplicación

Entiéndase como eficiencia de aplicación (E_a) a la relación que existe entre el volumen de agua que efectivamente queda retenida en la zona radicular del cultivo y el volumen total de agua que ingresa a la entrada del surco, esto es.

$$E_a = V_d / V_a \quad (2.1)$$

Donde:

V_d : Volumen de agua que queda disponible para el cultivo en la zona de las raíces [m^3]

V_a : Volumen total aplicado al surco [m^3]

El volumen aplicado en el RC se calcula con la ecuación.

$$V_a = Q_o T_r \quad (2.2)$$

Donde:

Q_o Gasto de riego aplicado al surco [m^3/s]

T_r : Tiempo total de alimentación o tiempo de riego [s]

Si los surcos de una parcela tienen una separación D , una longitud L_s y la lámina neta que aprovechan las raíces de las plantas es Z_m , entonces, V_d también puede calcularse como:

$$V_d = L_s D Z_m \quad (2.3)$$

2.3.2 Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción es un concepto que involucra el volumen que se entrega a la zona de riego (V_e) y el volumen total aplicado a la parcela (V_p), entonces podemos calcular la eficiencia de conducción de la siguiente manera:

$$E_c = \frac{V_p}{V_e} \quad (2.4)$$

2.3.3 Conceptos utilizados en la evaluación del riego

Las características que son indispensables para la evaluación del riego, se describen a continuación.

Lámina media aplicada al terreno

Para esta evaluación se requiere conocer el caudal que entra en el surco y el tiempo de alimentación del mismo, para calcular el volumen total de agua aplicada. Además, con el dato de área regada, se puede calcular la lámina de riego media, con la siguiente expresión.

$$\bar{Z} = \frac{Q_0 T_r}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

Z: Lámina media aplicada al terreno [m]

Q₀: Caudal por surco [m³/s]

T_r: Tiempo de riego [s]

A: Área en planta del surco [m²]

Cabe aclarar que con este parámetro sólo se conoce la lámina media aplicada sin establecer cómo es la distribución de la misma en el perfil longitudinal del surco; por tanto, es una evaluación rápida para determinar si al menos se aplicó la lámina requerida.

Uniformidad de distribución

La UD puede ser calculada como el valor mínimo de la lámina en el cuarto de la longitud del surco que recibe la menor lámina de agua, dividido por el promedio de la lámina en todo el terreno. [Burt, et al (1997)]

$$UD = \frac{Z_{min}}{\bar{Z}} \quad (2.6)$$

Para que el riego tenga buena uniformidad de distribución es necesario que el tiempo de contacto sea similar a lo largo del surco.

La UD es un indicador muy útil para identificar la magnitud problemas de distribución de las láminas infiltradas a lo largo de un campo regado. Un valor bajo indica que las pérdidas debidas a la percolación profunda son excesivas.

Aunque el concepto de UD bajo es relativo, valores menores a 67% son considerados como inaceptables. Por ejemplo, si se desea una profundidad de infiltración de 10 cm y la UD es 67%, el promedio de la lámina infiltrada debe ser 15 y no 10 cm y las pérdidas por percolación profunda serán de 5 cm.

En surcos cerrados, cuando la lámina mínima Z_{min} coincide con la dosis de riego (o lámina neta) Z_m , es decir, cuando se riega sin déficit de humedad el suelo al satisfacer el requerimiento de agua de la planta en toda la longitud del surco, la uniformidad de distribución es igual a la eficiencia de aplicación, esto es, $UD=E_a$.

La buena uniformidad de distribución es deseable para evitar un riego escaso en algunas zonas y excesivo en otras.

La eficiencia del riego representa el porcentaje de agua que potencialmente es utilizada para la evapotranspiración, además está íntimamente ligada con la uniformidad de distribución UD y con las pérdidas, si la uniformidad de distribución disminuye o si las pérdidas aumentan, la eficiencia total del riego disminuye. La forma en que todas estas funciones interactúan con respecto a la uniformidad y las pérdidas determinan la eficiencia del riego.

La evaluación del riego permite, además de la clasificación de la aplicación en buena, regular o mala, estimar los volúmenes de agua que se pierden al no quedar disponibles en las raíces de los cultivos, pero que se considera dentro de una lámina total aplicada (lámina bruta). Los altos valores de ésta no sólo reflejan la problemática en el uso del agua para riego y los futuros problemas de escasez, sino que también influyen en el valor de índices para medir la productividad de un distrito de riego con base en el uso eficiente del agua.

Cálculo de la lámina de riego neta

Es la lámina que debe aplicarse a un suelo para humedecerlo desde su contenido de humedad actual o inicial hasta su capacidad de campo.

Empleando la metodología del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se diseña el método de riego tradicional, empezando por el cálculo de la lámina de riego neta con la ecuación.

$$L_{rp} = (\theta_{CC} - \theta_0) P_r \quad (2.7)$$

Donde:

L_{rp} : Lámina de riego neta [cm]

P_r : Profundidad radicular de la planta [cm]

θ_{CC} : Contenido de humedad a capacidad de campo [cm^3/cm^3]

θ_0 : Contenido de humedad inicial [cm^3/cm^3]

Cálculo de la lámina de riego bruta

Es lámina que se aplica a un terreno o cultivo para reponer la lámina neta (Z).

Garantizando una eficiencia de requerimiento de riego de 100% y una eficiencia de aplicación deseada, se calcula la lámina de riego bruta, con la ecuación.

$$L_{br} = \frac{L_{rp}}{E_a} \quad (2.8)$$

Donde:

L_{br} : Lámina de riego bruta [cm]

L_{rp} : Lámina de riego [cm]

E_a : Eficiencia de aplicación [%]

Gasto máximo no erosivo

Es un concepto muy común en el riego por surcos. Se define como el gasto máximo que se puede aplicar al surco sin que origine problemas por arrastre de partículas de suelo. [Martínez E R (1980)]

Este gasto puede ser determinado por observación directa en el campo, mediante la aplicación de riegos con diferentes gastos y considerar a criterio del investigador el gasto máximo que puede soportar el surco. Sin embargo, se han desarrollado fórmulas empíricas para determinarlo. Inicialmente Criddle, et al. (1956), propusieron la siguiente ecuación para determinar el gasto máximo no erosivo, en función de la pendiente:

$$Q = \frac{0.63}{S_0} \quad (2.9)$$

Donde:

Q: Gasto máximo no erosivo [l/s]

S₀: Pendiente del surco [%]

En este trabajo se tomará el gasto máximo no erosivo para el RC con el siguiente criterio. Cuenca R H (1989)]

$$Q = \frac{0.60}{S_0} \quad (2.10)$$

2.3.4 Longitudes de los surcos recomendadas

Cuando se pretende diseñar la longitud del surco se puede partir de las longitudes que recomiendan los agricultores de los Estados Unidos [Cuenca R H (1989)], representadas en la siguiente tabla y usa el gasto máximo de acuerdo con la pendiente, que se calcula con la expresión 2.10.

Tabla 2.1: Longitudes recomendadas

| Longitudes del surco, L_s , en [m] | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|-----|------|-----|-------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|------|
| Dosis útil por infiltrar, Z_m , en [cm] | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | 15 | 22.5 | 30 | 5 | 10 | 15 | 20 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 |
| S_0 [%] | Arcillas | | | | Limos | | | | Arenas | | | |
| 0.05 | 300 | 400 | 400 | 400 | 120 | 270 | 400 | 400 | 60 | 90 | 150 | 190 |
| 0.1 | 340 | 440 | 470 | 500 | 180 | 340 | 440 | 470 | 90 | 120 | 190 | 220 |
| 0.2 | 370 | 370 | 530 | 620 | 220 | 370 | 470 | 530 | 120 | 190 | 250 | 300 |
| 0.3 | 400 | 400 | 620 | 800 | 280 | 400 | 500 | 600 | 150 | 220 | 280 | 400 |
| 0.5 | 400 | 400 | 560 | 750 | 280 | 370 | 470 | 530 | 120 | 190 | 250 | 320 |
| 1.0 | 280 | 280 | 500 | 600 | 250 | 300 | 370 | 470 | 90 | 150 | 220 | 250 |
| 1.5 | 250 | 250 | 430 | 500 | 220 | 280 | 340 | 400 | 80 | 120 | 190 | 220 |
| 2.0 | 220 | 220 | 340 | 400 | 180 | 250 | 300 | 340 | 60 | 90 | 150 | 190 |

Capítulo 3

MÉTODOS DE RIEGO EFICIENTES

3.1 Métodos eficientes alternativos al RC

Existen otros métodos de riego que igualmente siguen distribuyendo el agua a los cultivos por gravedad, con la diferencia que buscan una mejor distribución de la lámina de agua a lo largo del surco y por consiguiente una mejor eficiencia en el uso del agua. Riego con recorte o Cutback (CB), Riego Intermitente o Surge Flow (RI), Riego con Incremento de Gasto (RIG)

3.1.1 Riego con recorte o cut back

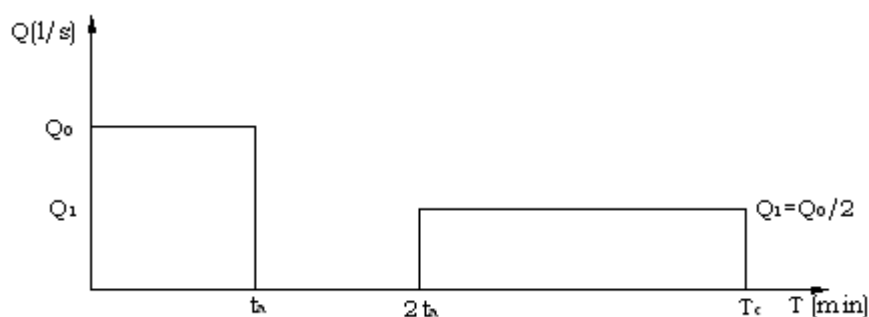
Éste método fue creado para surcos abiertos, obteniendo buenos resultados aunque también puede utilizarse en surcos cerrados.

En el CB (que es lo contrario RIG) consiste en regar con un gasto Q_0 durante un tiempo igual al tiempo de avance, y después reducir el gasto a un valor Q_1 (generalmente la mitad de Q_0) hasta un tiempo de riego suficiente para infiltrar la dosis requerida por la planta. Se ha observado en la práctica que este método incrementa la eficiencia de aplicación, porque disminuye las pérdidas por coleos en el caso de surcos abiertos.

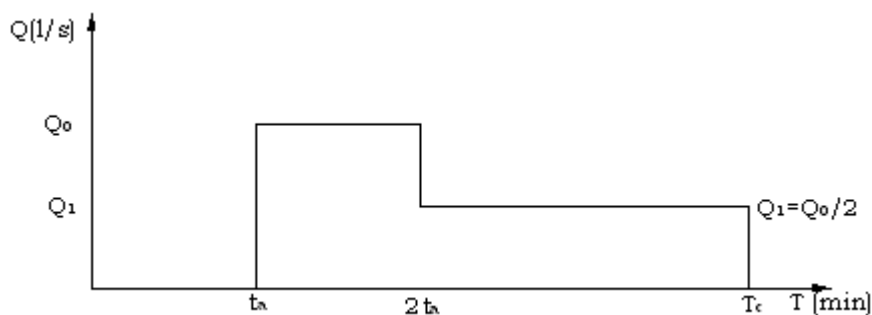
El gasto inicial del método con recorte es el máximo que permite la pendiente, el cual aumenta 1.43 (1/0.7) veces el gasto de diseño óptimo en riego continuo, ya que la eficiencia de aplicación se incrementa. El método CB presenta la dificultad práctica de conservar constante el gasto de ingreso a la parcela (módulo de riego parcelario) por la reducción del gasto inicial.

Humpherys (Jensen, 1980) propone un plan de riego sencillo en el manejo del agua para alimentar con un gasto fijo la parcela; este plan consiste en dividir la parcela en dos partes con igual número de surcos, la primera mitad se riega con el gasto inicial hasta que el agua llega al final del surco (tiempo de avance del agua), en seguida se abastece con el mismo gasto e igual tiempo de avance la otra mitad de la parcela, después se riega toda la parcela con este gasto inicial, esto es, a cada parte le corresponde la mitad del gasto, de manera que en la primera mitad el riego se puede llamar con recorte discontinuo con tiempo de riego T_c (Figura 3.1) y en la segunda mitad el riego es con corte posterior defasado con un tiempo igual al tiempo de avance t_a (Figura 3.2).

Establecido el manejo del agua en la parcela con la reducción del gasto inicial a la mitad, se formula el criterio para determinar el gasto de diseño en surcos donde se pretenda infiltrar una cierta dosis, se deben disponer de datos geométricos, tales como; longitud, pendiente, sección transversal, además de tener estimaciones confiables del coeficiente de rugosidad, conductividad hidráulica, humedad inicial, diferencias de tensiones de capilaridad en el frente húmedo y diferencias de humedades del suelo.



[Figura 3.1: Hidrograma de ingreso con corte posterior discontinuo]



[Figura 3.2: Hidrograma de ingreso con corte posterior defasado]

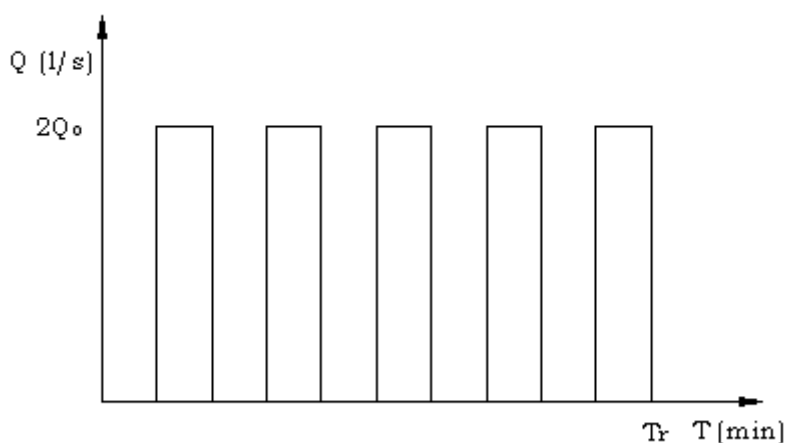
3.1.2 Riego intermitente

Este tipo de riego es recomendable tanto para surcos cerrados, como para surcos abiertos. El método ha sido probado en otros países, en especial en E.U.A, ya que desde finales de la década de los 70', se han realizado pruebas (zonas semiáridas, Utah, Texas, California) en parcelas experimentales como en campo y se ha puesto de manifiesto la ventaja que presenta sobre los métodos convencionales.

Stringhan y Keller, en 1979, introducen el concepto de riego Intermitente o Surge Flow en la Irrigation and Drainage Especiality Conference de la American Society of Civil Engineers.

La oficina de patentes de los E.U.A, en 1986 registra esta modalidad de riego como un método de riego por surcos.

El RI es el más eficiente, se estima entre el 80 y el 85% [Rodríguez M G (2003)], pero también es el más costoso, porque necesita aditamentos especiales, como válvulas y controladores electrónicos que hacen posible la intermitencia en el riego, el dispositivo es una válvula automatizada operada y controlada que se adapta al hidrante de un sistema de tuberías con compuertas. Su fuente de alimentación es un sistema de bombeo de baja presión. El RI, es un método que emplea el doble del gasto óptimo (Q_0) del RC para un surco, pero que en promedio es idéntico a éste (Figura 3.3), pero con la ventaja de que mientras no se aporta caudal en la cabecera el agua avanza y llega más rápido al pie del surco; así se reducen la etapa de avance del agua y el tiempo de riego.



[Figura 3.3: Hidrograma para el RI en un surco de la segunda batería]

3.1.3 Riego con incremento de gasto

El RIG es un método reciente en comparación con los mencionados anteriormente.

De manera semejante al RI y al CB, el RIG, requiere que la parcela se divida por la mitad en sentido transversal en dos baterías con igual número de surcos.

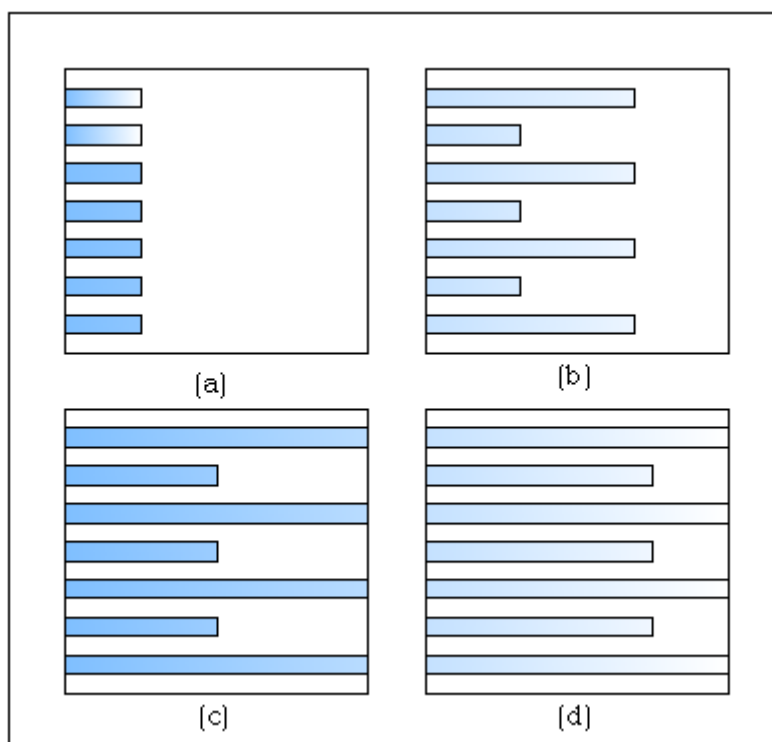
Las primeras evaluaciones en campo del RIG en surcos con pendiente de 0.6%, longitudes de 160 y 290 m, y suelo de textura franco-arcillosa han permitido modificarlo para que sea más eficiente. En su origen, se proponía llevar a cabo el incremento al finalizar la etapa de avance del agua.

El procedimiento al inicio de la fase de avance del agua es semejante al RC, es decir, se riega la parcela completa con el gasto de diseño hasta que el frente de avance del agua llega a un cuarto de la longitud total de los surcos y se cierran manualmente las compuertas de la primera mitad de la batería (Figura 3.4a), lo que ocasiona que el gasto se duplique en la segunda mitad, por lo que en ese momento sólo se tendrá regada una parte de la parcela (Figura 3.4b); el gasto duplicado se deja durante un cierto tiempo necesario para que el agua llegue al pie de los surcos e infiltre la dosis requerida por el cultivo, hay que observar que aunque en la otra batería ya no ingresa agua en la zona humedecida ésta avanza unos metros más (Figura 3.4c). Una vez que el agua llega al extremo final de la primera batería que se encuentra regando, se procede a cerrar las compuertas de ésta y se abren las compuertas de la segunda batería (Figura 3.4d) y se deja el caudal duplicado durante un tiempo igual al empleado en la primera mitad para infiltrar la dosis requerida por el cultivo.

Es discutible que en éste método se incremente el gasto en vez de reducirlo, dado que la velocidad de infiltración aumente una vez humedecido todo el surco; sin embargo, la razón de que se incremente la eficiencia aún más que con el RC, es que debido al gasto duplicado el perímetro mojado aumenta y la velocidad de infiltración también, y el agua llega más rápido al final del surco, esto es, se reduce notablemente la etapa de avance del agua y se evita la percolación profunda en la parte inicial del surco, que es lo que reduce la eficiencia en el RC.

Además en surcos cerrados no hay pérdidas por coleos y no es importante que el tiempo de receso sea grande. El aspecto que debe cuidarse es que en la primera mitad de la parcela no desborden los surcos.

Se ha observado en los riegos practicados en diferentes campos que las láminas de riego aplicadas son pequeñas, ya que la reducción en la duración de la etapa de avance, propicia tiempos de riego pequeños, lográndose ahorros en los tiempos de riego y volúmenes de agua, además de una mejor distribución de las láminas de agua infiltradas.

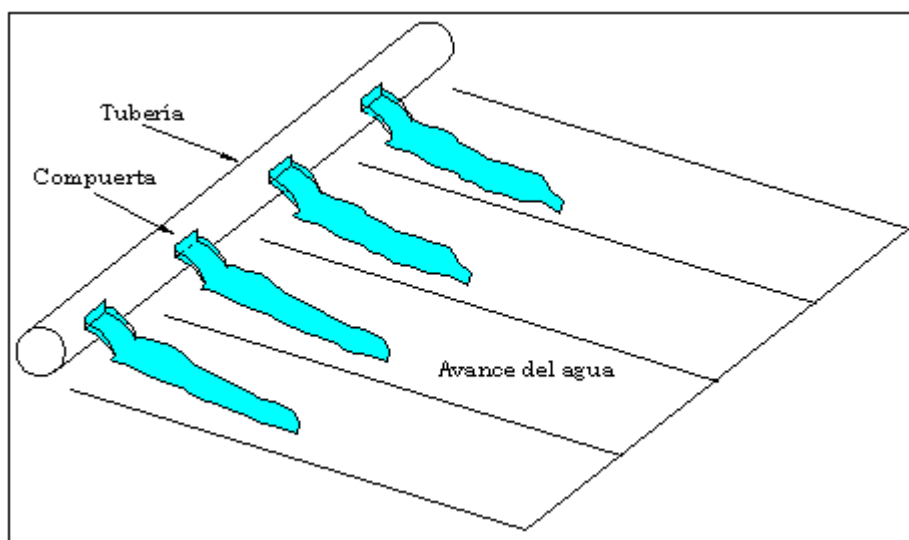


[Figura 3.4: Riego con incremento de gasto]

En el RIG, al aumentar la UD los tiempos de riego en las parcelas son menores que con RC, el aumento de este indicador se explica porque durante el proceso de infiltración, en la fase de avance, las láminas son mayores en la cabecera del surco; después en la fase de almacenamiento o llenado (ver Figura 1.2) por ser mayor el gasto de alimentación, los tirantes y perímetros mojados en el pie del surco aumentan, así como el gasto de infiltración vertical; finalmente, en la fase de receso, el gasto de infiltración vertical es mayor en el pie del surco compensando la distribución de las láminas.

En simulaciones numéricas se debe comprobar que el tirante máximo al final del surco será menor que la profundidad del mismo, lo cual hace suponer que en el campo no habrá desbordamiento.

En este tipo de riego cabe señalar que no necesita ningún accesorio, como en el caso del RI, este sistema es operado mediante un sistema basado en una tubería con compuertas, también llamada tubería multicompuertas (como se observa en la siguiente figura) que se manejan manualmente por el operador de riego, de modo que es una alternativa bastante atractiva para los agricultores, debido a que resulta económico.



[Figura 3.5: Tubería multicompuerta utilizado en el RIG]

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran los hidrogramas de ingreso a las dos mitades de la parcela.

Donde:

Q_0 : Gasto inicial

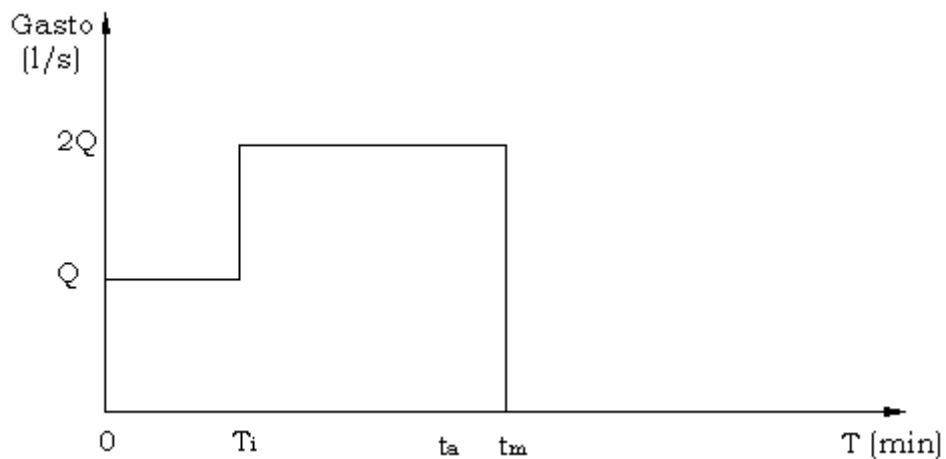
t_a : Duración de la etapa de avance del agua

t_m : Tiempo de inicio del riego complementario en la segunda mitad de la batería de surcos y tiempo de riego de la primera mitad

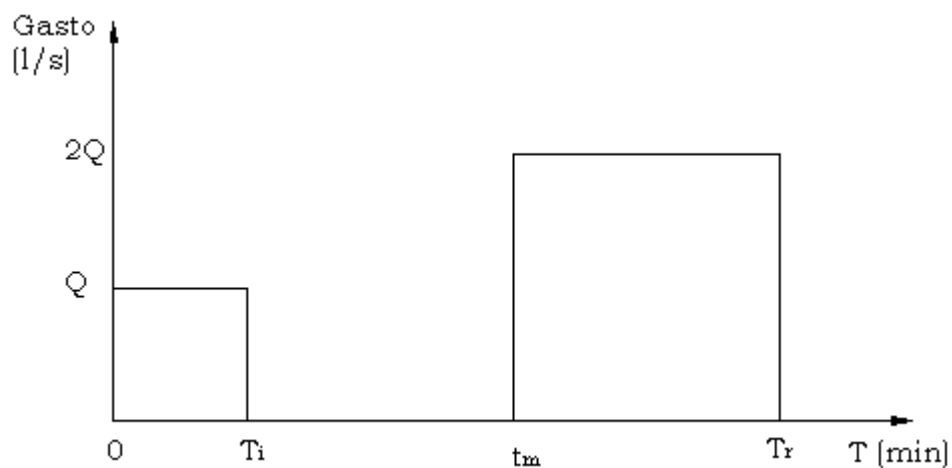
T_i : Tiempo de incremento del gasto (a 1/4 de la longitud del surco)

T_r : Tiempo total de riego de la parcela

$$T_r = T_i + 2(t_m - T_i) = 2t_m - T_i$$



[Figura 3.6: Hidrograma de ingreso en la primera mitad de la parcela]



[Figura 3.7: Hidrograma de ingreso en la segunda mitad de la parcela]

Al riego de la primera mitad de la parcela se denomina riego con incremento de gasto normal o sin interrupción y el de la segunda, riego con incremento de gasto discontinuo o con interrupción.

3.1.4 Diseño óptimo con el modelo matemático

El procedimiento, es el siguiente.

1. Definir los parámetros de la geometría de los surcos con base en las ecuaciones.

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \quad (3.1)$$

$$R = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (3.2)$$

Donde:

A: Área del surco [m²]

y: Tirante del flujo [m]

R: Radio hidráulico [m]

$\sigma_1, \sigma_2, \rho_3, \rho_4$: Parámetros que se determinan con un ajuste de regresión lineal simple

2. Realizar una prueba de avance del agua para calibrar los parámetros K, λ de la fórmula de Green y Ampt y n de la fórmula de rugosidad de Manning. K se introduce al programa en [cm/min] y λ en [cm].

3. Conocer el porcentaje de humedad del suelo (en volumen) antes del riego, para determinar la diferencia de humedades DH con respecto al porcentaje a capacidad de campo, la cual previamente debe calcularse.

4. Determinar la humedad inicial del suelo en lámina de agua como.

$$SW = \frac{W_i}{100} h_r \quad (3.3)$$

Donde:

SW: Humedad inicial del suelo [cm]

W_i: Humedad inicial del suelo en volumen antes del riego [%]

h_r: Profundidad radicular de la planta [cm]

5. Establecer la dosis que se requiere aplicar al cultivo.

$$Z_m = \delta_r \frac{(W_{CC} - W_i)}{100} h_r \quad (3.4)$$

Donde:

Z_m: Dosis o lámina de agua requerida por la planta [cm]

δ_r : Densidad relativa aparente del suelo [adimensional]

W_{CC}: Humedad a capacidad de campo, porcentaje en peso

W_i: Humedad inicial, porcentaje en peso

h_r: Profundidad radicular [cm]

6. Conocer la longitud del surco, L_s, y la pendiente longitudinal del mismo, S_o en porcentaje.

7. Introducir los datos anteriores en el programa y proponer un tiempo de riego con un gasto, correr el programa y verificar que se satisfaga la dosis por infiltrar; si no es el caso, ajustar el tiempo de riego hasta lograrlo y anotar la eficiencia de aplicación, (ecuación 2.1).

Enseguida se propone otro gasto de diseño, con el cual también debe satisfacer la dosis al ajustar el tiempo de riego, hasta que se obtenga el gasto óptimo cuando se alcance la máxima eficiencia.

8. Determinar, con base en el gasto de alimentación a la parcela, el número de surcos que se regará.

$$N_s = \frac{Q_p}{Q_0} \quad (3.5)$$

Donde:

N_s : Número total de surcos en la parcela

Q_p : Gasto de alimentación en la parcela [l/s]

Q_0 : Gasto óptimo por surco [l/s]

Cabe aclarar que no necesariamente el gasto de diseño del RC debe ser igual al del RIG; por ejemplo, para el RIG, el gasto inicial puede ser del orden de 0.85 del correspondiente al RC.

La fuente de alimentación a las parcelas puede hacerse mediante tuberías que cuenten con hidrante para el acoplamiento de la tubería con compuertas, o con zanjas excavados en la tierra, con las irremediables pérdidas por infiltración.

Vázquez E (2004) demuestra que el RIG conviene aplicarlo en surcos largos con longitudes de 150 m o más. Cuando se pretende diseñar la longitud del surco se puede partir de las longitudes que recomiendan los agricultores de los Estados Unidos (Tabla 2.1) y usar el gasto máximo no erosivo (ec. 2.10) de acuerdo con la pendiente.

Los parámetros de evaluación en el RIG, son:

La eficiencia de aplicación (ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3)

Uniformidad de Distribución (ecuación 2.6)

Ahorro del agua (ecuación 5.3)

Capítulo 4

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAR EL RIEGO

4.1 Ecuaciones de Saint-Venant

El diseño de riego por surcos está regido por las ecuaciones presentadas en 1871 por Barré de Saint-Venant.

La descripción del flujo del agua de riego por surcos, es un caso de flujo transitorio y se fundamenta en las ecuaciones de continuidad (o conservación de masa) y la ecuación dinámica (o conservación de cantidad de movimiento), las cuales presentan el modelo hidrodinámico completo.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (4.1)$$

Donde:

Q: Gasto en una sección hidráulica [m³/s]

x: Distancia a lo largo del surco [m]

B: Ancho de la superficie libre del agua [m]

y: Altura del flujo o tirante [m]

t: Es el tiempo [s]

q: Gasto de infiltración por unidad de longitud [m³/s/m]

Ecuación dinámica:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + S_f - S_0 \quad (4.2)$$

Donde:

- y: Altura del flujo o tirante [m]
- x: Distancia a lo largo del surco [m]
- V: Velocidad media del flujo [m/s]
- g: Aceleración de la gravedad [m/s²]
- t: Tiempo [s]
- S_f: Pendiente hidráulica calculada con la fórmula de Manning
- S₀: Pendiente del canal o surco [%]

Ecuación de Green y Ampt:

$$q = PK \left(1 + \frac{\lambda}{Z} \right) \quad (4.3)$$

Donde:

- q: Gasto de infiltración a través del perímetro mojado por unidad de longitud [m³/s/m]
- P: Perímetro mojado de la sección transversal [m]
- K: Conductividad hidráulica [cm/min]
- λ: Diferencia en tensión capilar antes y después del humedecimiento del suelo [m]

La fórmula empírica de Kostiakov en su versión original o modificada es la más popular, pues es usada por todos los investigadores; sin embargo, existen otras fórmulas para calcular la velocidad de infiltración. Singh y Yu (1990) derivan una ecuación general donde quedan incluidas las fórmulas de Horton, Kostiakov, Overton, Green-Ampt y Philip. Demuestran la equivalencia de las fórmulas de Green-Ampt y Philip por ser las que tienen un fundamento teórico. Chu (1978) aplica la fórmula de de Green-Ampt para medir la infiltración durante una lluvia no uniforme, y la escribe en la forma:

$$\frac{dz}{dt} = K \left(1 + \frac{SM}{Z} \right) \quad (4.4)$$

Donde:

- $\frac{dz}{dt}$: Velocidad de infiltración [cm/min]
- K: Conductividad hidráulica [cm/min]
- S: Diferencia en tensión capilar antes y después del humedecimiento del suelo [m]
- M: Diferencia de humedad del suelo antes y después de humedecerse [%]
- Z: Lámina acumulada de infiltración [m]

En adelante se expresa $SM=\lambda$, en [cm] y se interpreta en este trabajo como una deficiencia de humedad (sin ser la dosis, aunque puede tener el mismo valor numérico), ya que si $SM=0$, $dz/dt=K$ es la conductividad hidráulica del suelo saturado. Por tanto, K y λ son los parámetros por medir en la fórmula de Green y Ampt para poder calcular la velocidad de infiltración. [Vázquez E (1996)]

La función de infiltración que utiliza el modelo, es la ecuación de Green y Ampt escrita en la siguiente forma:

$$I = K_s t + \lambda \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

I: Velocidad de infiltración [m/s]

K: Conductividad hidráulica a saturación

* $\lambda=(h-h_f)(\theta_s-\theta_0)$

* producto de la diferencia de humedades por la diferencia de tensiones del suelo

θ_s : Contenido de humedad final

θ_0 : Contenido de humedad inicial

h: Tensión capilar antes del humedecimiento del suelo

h_f: Tensión capilar después del humedecimiento del suelo

Estas ecuaciones, para un flujo de escurrimiento poco profundo en un cauce, expresadas en unidades de caudal por unidad de ancho o espaciamiento entre surcos, pueden ser representadas por las ecuaciones 4.1 y 4.2.

Existen muchos modelos matemáticos para riego por surcos calibrados con la reproducción de la etapa de avance (o curva de avance). Entre ellos, Elliot, Walker y Skogerboe (1982); Yu y Singh (1990); Wallender (1992); y Juana y Losada (1994).

Además de los de Sánchez y Fuentes (1992), Vázquez y Sánchez (1993), aún no calibrados; y el de Vázquez (1994), calibrado con datos bibliográficos.

Los últimos tres dan origen al modelo que se presenta en este trabajo. Los modelos deben ser simples, sistemáticos, suficientemente seguros y fáciles de aplicar.

Vázquez y Sánchez (1993) dan a conocer un modelo explícito con solución de gastos y tirantes hacia aguas abajo, con resultados similares al de Sánchez y Fuentes (1992) pero con la desventaja de emplear mayor tiempo de cálculo por necesitar de intervalos de tiempo más pequeños. Posteriormente se extiende el modelo matemático a uno de versión implícita con tiempos de cálculo menores.

En este trabajo se propone que el diseño con el RIG debe partir del diseño óptimo del RC para obtener la mayor eficiencia de aplicación.

4.1.1 Modelo hidrodinámico completo

El modelo hidrodinámico RICIG, Instituto de Ingeniería, UNAM, es completo propuesto por Vázquez E (2001), emplea la ecuación 4.5 de Green y Ampt (1911) que considera la humedad inicial del suelo, emplea el perímetro mojado para calcular el gasto de infiltración en la dirección vertical, este modelo reproduce el RC, RI, CB y el RIG.

El movimiento del agua a superficie libre sobre un surco es un flujo transitorio y espacialmente variado debido a que el caudal va disminuyendo a lo largo del surco y el agua se infiltra en el suelo conforme avanza hacia el final del mismo. Las ecuaciones que reproducen este tipo de flujo son las ecuaciones de continuidad y la ecuación dinámica, ambas conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant (Wylie y Streeter, 1978).

Para el diseño del riego superficial, los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt (1911) pueden estimarse a partir de la información de textura del suelo.

Estas ecuaciones tienen como incógnitas el gasto y el tirante en distintas secciones. Se supone que el canal o surco es prismático, esto es, que no cambia su sección transversal a lo largo del mismo, la pendiente es pequeña, menor al 10%; y el suelo es homogéneo, es decir, la conductividad hidráulica es constante en toda la longitud del surco.

La ecuación dinámica que considera el gasto sobre el surco es:

$$\left(1 - F^2\right) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{g A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (4.6)$$

Donde:

$F = Q/(B/gA^3)^{1/2}$: Es el número de Froude

y: Altura del flujo o tirante [m]

x: Distancia a lo largo del surco [m]

V: Velocidad media del flujo [m/s]

g: Aceleración de la gravedad [m/s²]

t: Es el tiempo [s]

S_f : Pendiente hidráulica calculada con la fórmula de Manning

Q: Gasto [m³/s]

S_0 : Pendiente del canal o surco [%]

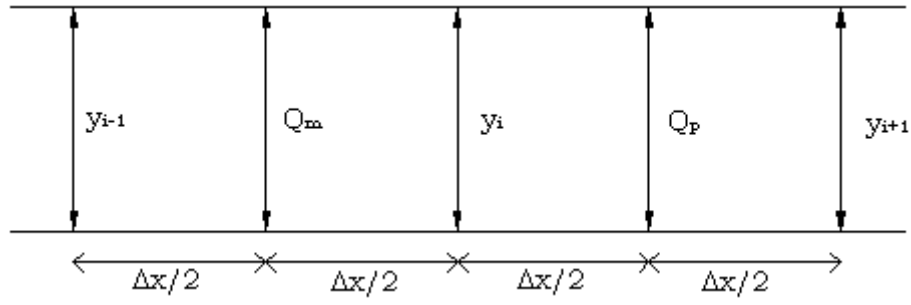
A: Sección del área del flujo [m²]

A su vez la ecuación de continuidad puede considerarse como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (4.7)$$

Para calcular el gasto de infiltración se utiliza la ecuación 4.4 de Green-Ampt. [Chu (1978)]

Para resolver las ecuaciones de Saint-Venant se emplea un esquema centrado en diferencias finitas como el de la figura.



[Figura 4.1 Esquema en diferencias finitas]

Si la ecuación 4.6 se expresa en diferencias finitas, conduce a las siguientes expresiones.

$$\left[1 - (F_m^j)^2\right] \frac{\tilde{y}_i^{j+1} - \tilde{y}_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_m^{j+1}}{g(A_m^j)^2} \frac{Q_i^j - Q_{i-1}^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_m^j} \frac{Q_m^{j+1} - Q_m^j}{\Delta t} + \frac{n^{2|Q_m^j|Q_m^{j+1}}}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^{\frac{4}{3}}} = S_0 \quad (4.8)$$

$$\left[1 - (F_p^j)^2\right] \frac{\tilde{y}_i^{j+1} - \tilde{y}_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_p^{j+1}}{g(A_p^j)^2} \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_p^j} \frac{Q_p^{j+1} - Q_p^j}{\Delta t} + \frac{n^{2|Q_p^j|Q_p^{j+1}}}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^{\frac{4}{3}}} = S_0 \quad (4.9)$$

Se ha empleado como fórmula de fricción la de Manning.

Donde:

n: Coeficiente de rugosidad $\left[\frac{s}{m^{1/3}}\right]$

A_m, A_p : Áreas transversales en las secciones m y p [m^2]

R_m, R_p : Radios hidráulicos en las secciones m y p [m]

$\tilde{y}_i^{j+1} = \theta y_i^{j+1} + (1 - \theta) y_i^{j+1}$

θ : Factor de peso que promedia la magnitud local del tirante en el tiempo

i: Subíndice que identifica la posición

j: Superíndice que identifica el instante de tiempo

La discretización en diferencias finitas de la ecuación de continuidad 4.1 en el tramo i queda.

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta x} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + q = 0 \quad (4.10)$$

Si se supone que el gasto de infiltración es a través del perímetro mojado por unidad de longitud y se emplea la ecuación 4.4 de Green y Ampt, se tiene.

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta x} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + P_i^j K \left(1 + \frac{\lambda}{Z_i^j} \right) = 0 \quad (4.11)$$

Al despejar los gastos Q_m^{j+1} y Q_p^{j+1} de las ecuaciones 4.8 y 4.9 se obtiene.

$$Q_m^{j+1} = \frac{1}{C_m^j} \left[S_0 \Delta x + \frac{\Delta x Q_m^j}{g A_m^j \Delta t} + \left(1 - (F_m^j)^2 \right) (\bar{y}_{i-1}^{j+1} - \bar{y}_i^{j+1}) \right] \quad (4.12)$$

$$Q_p^{j+1} = \frac{1}{C_p^j} \left[S_0 \Delta x + \frac{\Delta x Q_p^j}{g A_p^j \Delta t} + \left(1 - (F_p^j)^2 \right) (\bar{y}_i^{j+1} - \bar{y}_{i+1}^{j+1}) \right] \quad (4.13)$$

Donde:

$$C_m^j = \frac{\Delta x}{g A_m^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_m^j|}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^{4/3}} + \frac{2}{g (A_m^j)^2} (Q_i^j - Q_{i-1}^j) \quad (4.14)$$

$$C_p^j = \frac{\Delta x}{g A_p^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_p^j|}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^{4/3}} + \frac{2}{g (A_p^j)^2} (Q_i^j - Q_{i-1}^j) \quad (4.15)$$

Así como se emplea un factor de peso (θ) para promediar los tirantes en el tiempo, se puede usar un otro factor de peso para promediar los gastos en el espacio; por tanto, se puede escribir.

$$Q_m^{j+1} = \phi Q_i^{j+1} + (1 - \phi) Q_{i-1}^{j+1} \quad (4.16)$$

$$Q_p^{j+1} = \phi Q_{i+1}^{j+1} + (1 - \phi) Q_i^{j+1} \quad (4.17)$$

Los factores de peso θ y ϕ se calibraron de manera que fuera satisfecha la ecuación de continuidad, obteniéndose valores de $\theta=0.7$ y $\phi=0.75$ para aproximaciones menores al 3% en la ecuación de continuidad.

La sustitución de las ecuaciones 4.12 y 4.13 en la 4.11 conduce a la ecuación fundamental para cada tramo i donde se ha efectuado el artificio de multiplicar el perímetro mojado P_i^j por \tilde{y}_i^{j+1}/y_i^j con el fin de expresar \tilde{y}_i^{j+1} como factor en el segundo término.

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\left(1-(F_m^j)^2\right)}{C_m^j} \tilde{y}_{i-1}^{j+1} \left[\frac{\left(1-(F_m^j)^2\right)}{C_m^j} + \frac{\left(1-(F_p^j)^2\right)}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x}{y_i^j} \left(1 + \frac{\lambda}{Z_i^j}\right) \right] \\
 & \tilde{y}_1^{j+1} \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_1^{j+1} - \frac{\left(1-(F_p^j)\right)^2 n^2 \Delta x |Q_p^j|}{C_p^j} \tilde{y}_1^{j+1} = \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} \\
 & -\frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} + \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_p^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \tag{4.18}
 \end{aligned}$$

La condición de frontera aguas arriba, donde existe un gasto de alimentación Q_0 por la cabecera del surco, permite sustituir $Q_m^{j+1} = Q_0$ en la ecuación 4.11, obteniéndose.

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{\left(1-(F_p^j)^2\right)}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{y_i^j} \left(1 + \frac{\lambda}{Z_i^j}\right) \right] \tilde{y}_i^{j+1} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^{j+1} - \frac{\left(1-(F_p^j)\right)}{C_p^j} \tilde{y}_i^{j+1} \\
 & = Q_0 - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} + \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \tag{4.19}
 \end{aligned}$$

Con el fin de facilitar el cálculo en la etapa de avance del frente de onda de la superficie y evitar problemas de inestabilidad en el último tramo, conviene adoptar las hipótesis de Sánchez y Fuentes (1992).

a) Se considera un gasto base pequeño que permite calcular las condiciones iniciales de los tirantes y gastos (se usa $Q_b=0.01$ l/s).

b) Se supone un tramo ficticio aguas abajo.

En un surco cerrado no hay pérdida real por coleo; sin embargo, por la hipótesis b) se supone que el gasto en el tramo final ficticio es el gasto base, por lo que si $Q_p^{j+1} = Q_b$ y se sustituye en la ecuación 4.11, se obtiene la ecuación para la condición de frontera aguas abajo.

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\left(1-(F_m^j)^2\right)}{C_m^j} \tilde{y}_{i-1}^{j+1} + \left(1-(F_m^j)^2\right) \tilde{y}_i^{j+1} \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta x} y_i^{j+1} = -Q_b \\
 & \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \tag{4.20}
 \end{aligned}$$

Al utilizar la ecuación 4.18 en los tramos intermedios del surco, junto con las ecuaciones 4.19 y 4.20, establece un sistema de ecuaciones tridiagonal con incógnitas $\tilde{y}_1^{j+1} + \tilde{y}_2^{j+1}, \dots, \tilde{y}_{n-1}^{j+1}$ que se resuelve muy rápido por eliminación gaussiana. Posteriormente se usan las ecuaciones 4.12 y 4.13 para determinar, en el mismo intervalo de tiempo, los gastos Q_m^{j+1} y Q_p^{j+1} .

El cálculo se continúa hasta que logre infiltrarse la dosis requerida por la planta en algún tramo del surco cerrado, generalmente entre 1/2 y 3/4 de la longitud del mismo.

Si se atiende a las fases del proceso de riego por surcos descrita en la Figura 1.2, durante la fase de avance del agua (t_a) el gasto de infiltración se calcula sólo en aquellos tramos donde el gasto Q_m^{j+1} sea mayor que Q_p^{j+1} . Durante las fases de llenado ($T_r - t_a$) y receso (t_c), el gasto de infiltración se calcula en todos los tramos excepto el último, según la hipótesis b).

Una relación conveniente para la convergencia y estabilidad en la solución, obtenida en forma empírica con simulaciones numéricas, es $\Delta t = 1.2 \Delta x$, donde Δx está en [m] y Δt en [s].

Capítulo 5

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS RC y RIG

5.1 Utilización del programa

El programa de computadora que se utilizó para la realización del presente trabajo, corre bajo el lenguaje de programación Fortran, [Vázquez-Fernández E, López-Téllez P y Chagoya-Amador B (2005)]. Dicho programa es capaz de simular los riegos RC, RI, CB y el RIG.

Con el programa se hicieron simulaciones con numerosos surcos de distinta longitud, que van de los 110 a 625 m y pendientes de 0.12 a 0.60%; sin perder de vista que estos son cerrados, porque esta es una de las condiciones que se recomiendan para aplicar el RIG, la otra es que los surcos sean largos. Vázquez (2004) demuestra que el RIG conviene aplicarlo en surcos largos con longitudes de 150 m o más.

Para tener validez en la comparación de los métodos, se conservaron, además de los gastos, los mismos parámetros de infiltración y rugosidad obtenidos con el RC para realizar la simulación del RIG, de tal manera que la lámina de agua infiltrada en el RIG sea muy aproximada a la del RC.

Los parámetros de infiltración que se calibran al simular los riegos a través del modelo numérico se incluyen en la fórmula de infiltración de Green y Ampt. A los parámetros anteriores debe agregarse el coeficiente de rugosidad (n), que interviene para calcular la pérdida de energía debida a la fricción en la ecuación dinámica de Saint-Venant.

Los datos que necesita el programa son los siguientes.

Los parámetros σ_1 , σ_2 , ρ_1 , ρ_2 se determinan con un ajuste de regresión lineal simple.

Tabla 5.1: Datos de la forma del surco

| | |
|-----------------------------|---|
| $A = \sigma_1 y^{\sigma_2}$ | A: Área del surco [m ²] |
| $R = \rho_1 A^{\rho_2}$ | y: Tirante del flujo [m] |
| | R: Radio hidráulico [m] |
| SM1 | σ_1 : Coeficiente |
| SM2 | σ_2 : Exponente |
| RO1 | ρ_1 : Coeficiente |
| RO2 | ρ_2 : Exponente |
| PS | Profundidad del surco [cm] |
| | Datos principales |
| KF | K: Conductividad hidráulica [cm/min] |
| RR | n: C. de rugosidad de Manning [s/m ^{1/3}] |
| SW | w: Humedad inicial [cm] |
| HS | λ : Segundo parámetro de Green-Ampt [cm] |
| SO | So: Pendiente longitudinal [%] |
| LS | Longitud del surco [m] |
| DT | Intervalo de tiempo (1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16) |
| CP | Tipo de riego (1 RC, 2 RIG, 10 ó mayor RI, 0.5 CB) |
| TD | T _r : Tiempo de riego |
| QF | Q: Gasto de diseño [l/s] |
| RIG1 | Fracción de la longitud del surco donde se hace el incremento |

Los resultados que arroja el programa son como los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.2: Resultados del programa

| |
|---|
| Nomenclatura de resultados |
| Ef: Eficiencia de aplicación |
| y_m : Tirante máximo aguas abajo [cm] |
| Z_m : Dosis de riego [cm] |
| V_z : Volumen infiltrado [cm] |
| V_e : Volumen de ingreso [m^3] |
| V_a : Volumen aprovechable [m^3] |
| t_a : Tiempo de avance [min] |
| T_r : Tiempo de riego [min] |
| T_f : Tiempo final [min] |
| R1: Número de tramo para el incremento de gasto |
| R2: Número de tramo para reducción de gasto |
| IR: Indicador de tipo de riego |

5.2 Características de los surcos

Las características geométricas de los surcos, como profundidad, pendiente y longitud se presentan en la Tabla 5.3 y los parámetros de infiltración (conductividad hidráulica, segundo parámetro de Green-Ampt, humedad inicial del suelo) y rugosidad (coeficiente de rugosidad de Manning) se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.3: Características geométricas de los surcos

| Parámetros de diseño | Bardenas | Benson | Calera |
|-----------------------------|----------|----------|--------|
| σ_1 | 1.1250 | 1.6889 | 0.9170 |
| σ_2 | 1.6174 | 1.6785 | 1.5396 |
| ρ_1 | 0.3497 | 0.3050 | 0.3696 |
| ρ_2 | 0.5133 | 0.5126 | 0.5297 |
| Profundidad [m] | 0.1200 | 0.1500 | 0.1430 |
| Pendiente So [%] | 0.1220 | 0.4400 | 0.2500 |
| Longitud [m] | 200 | 625 | 198 |
| Parámetros de diseño | Celaya | Chapingo | Narrow |
| σ_1 | 0.9130 | 1.6889 | 0.3950 |
| σ_2 | 1.5000 | 1.6785 | 2.1000 |
| ρ_1 | 0.4300 | 0.3050 | 0.7353 |
| ρ_2 | 0.5550 | 0.5126 | 0.4762 |
| Profundidad [m] | 0.1700 | 0.1500 | 0.5160 |
| Pendiente So [%] | 0.1800 | 0.6000 | 0.5420 |
| Longitud [m] | 150 | 290 | 110 |
| Parámetros de diseño | Calera2 | Tarboton | Wide 2 |
| σ_1 | 0.9170 | 1.5000 | 0.9670 |
| σ_2 | 1.5396 | 1.7150 | 2.1700 |
| ρ_1 | 0.3696 | 0.31445 | 0.3460 |
| ρ_2 | 0.5297 | 0.53352 | 0.4420 |
| Profundidad [m] | 0.1430 | 0.3000 | 0.3400 |
| Pendiente So [%] | 0.2500 | 0.2000 | 0.5400 |
| Longitud [m] | 198 | 270 | 110 |
| Parámetros de diseño | Schwankl | | |
| σ_1 | 1 | | |
| σ_2 | 1.6960 | | |
| ρ_1 | 0.3330 | | |
| ρ_2 | 0.5080 | | |
| Profundidad [cm] | 0.3000 | | |
| Pendiente So [%] | 0.2320 | | |
| Longitud [m] | 250 | | |

Tabla 5.4: Parámetros de infiltración y rugosidad

| | Bardenas | Benson | Calera |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Conductividad hidráulica K [cm/min] | 0.0300 | 0.0070 | 0.020 |
| Segundo parámetro de Green - Ampt λ [cm] | 12.5 | 10 | 15 |
| Humedad inicial del suelo w [cm] | 0.25 | 0.85 | 0.500 |
| C. de rugosidad de Manning n [s/m ^{1/3}] | 0.0500 | 0.0380 | 0.095 |
| | Celaya | Chapingo | Narrow |
| Conductividad hidráulica K [cm/min] | 0.0220 | 0.0085 | 0.0200 |
| Segundo parámetro de Green - Ampt λ [cm] | 20 | 42 | 235 |
| Humedad inicial del suelo w [cm] | 0.1800 | 0.2200 | 3 |
| C. de rugosidad de Manning n [s/m ^{1/3}] | 0.0590 | 0.0625 | 0.0950 |
| | Calera2 | Tarboton | Wide 2 |
| Conductividad hidráulica K [cm/min] | 0.020 | 0.009 | 0.0200 |
| Segundo parámetro de Green - Ampt λ [cm] | 7 | 13.50 | 118 |
| Humedad inicial del suelo w [cm] | 0.100 | 0.3600 | 0.550 |
| C. de rugosidad de Manning n [s/m ^{1/3}] | 0.095 | 0.070 | 0.0930 |
| | Schwankl | | |
| Conductividad hidráulica K [cm/min] | 0.0130 | | |
| Segundo parámetro de Green - Ampt λ [cm] | 18.60 | | |
| Humedad inicial del suelo w [cm] | 0.3500 | | |
| C. de rugosidad de Manning n [s/m ^{1/3}] | 0.0650 | | |

5.3 Simulaciones numéricas

En este capítulo, se presentarán las simulaciones numéricas de los surcos, realizadas con la ayuda del programa de cómputo, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

El trabajo consiste en simular tanto el RC como el RIG con diferentes gastos a diferente fracción (en el RIG) de la longitud del surco donde hacer el incremento del gasto.

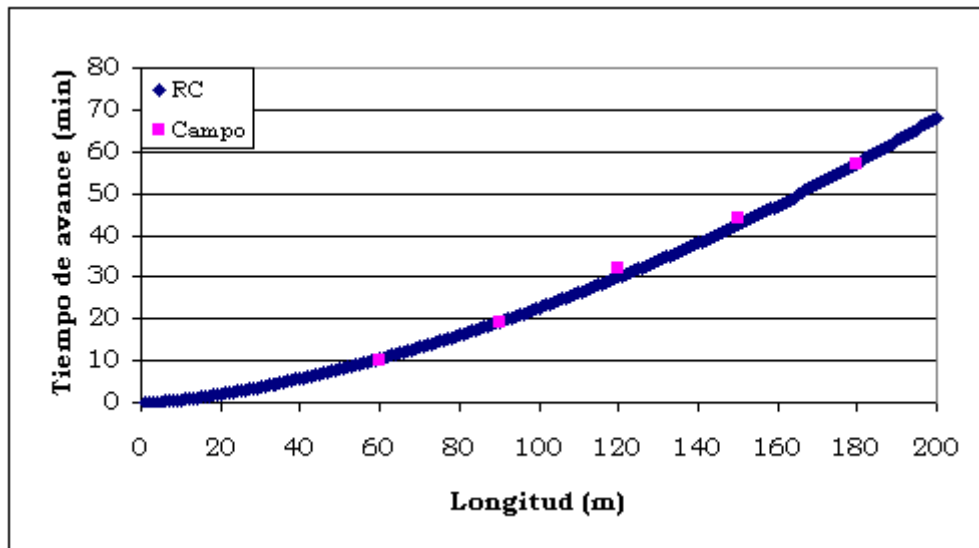
Tabla 5.5: Surcos tomados de la bibliografía

| Nombre de los surcos | Longitud [m] |
|----------------------|--------------|
| Bardenas (Ev-49) | 200 |
| Benson | 625 |
| Calera | 198 |
| Celaya | 150 |
| Chapingo | 290 |
| Narrow | 110 |
| Schwankl | 250 |
| Calera2 | 198 |
| Tarboton | 270 |
| Wide 2 | 110 |

5.3.1 Simulaciones con el RC

Los gastos del RC empleados en el modelo numérico son los medidos en el campo, y con ellos se ajustaron las curvas de avance del agua. Mediante métodos indirectos y de laboratorio se determinaron las características hidráulicas del suelo; estos son los parámetros de infiltración (K, w, h) y rugosidad (n), y con el apoyo del programa RICIG son calibrados.

Dicha calibración se realiza por prueba y error tratando siempre de ajustar (a ojo) la mejor curva de avance posible simulada a la real, esto se puede hacer con diversos juegos de parámetros de infiltración y rugosidad, la mejor aproximación es aquella que logra el menor error en la ecuación de continuidad, Figura 5.1. También en la misma figura se observa la típica curva de avance que se presenta en el RC, la forma tradicional de esta curva es exponencial ascendente, tanto en el riego simulado, como el que se presenta en el campo.



[Figura 5.1: Curva de avance en el RC]

Una vez calibrados los parámetros, se busca el gasto óptimo para el RC, el cual satisfaga la lámina de infiltración que requiere el cultivo.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.6: Resultados para RC arrojados por el programa

| | Bardenas | Benson | Calera |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Tiempo de riego Tr | 70.50 | 235 | 66 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 10.07 | 10.03 | 8.05 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 10.25 | 3.68 | 8.22 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 11.02 | 27.80 | 8.99 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.91 | 0.64 | 0.89 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.94 | 0.98 | 0.90 |
| Gasto óptimo RC Qo [l/s] | 2.75 | 2 | 2.5 |
| | Celaya | Chapingo | Narrow |
| Tiempo de riego Tr | 52 | 255 | 54 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 5.32 | 11.29 | 3.15 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 6.29 | 4.97 | 7.15 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 5.84 | 18.89 | 4.30 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.91 | 0.9 | 0.73 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.93 | 0.98 | 0.97 |
| Gasto óptimo RC Qo [l/s] | 2.0 | 1.25 | 1.37 |
| | Calera2 | Tarboton | Wide2 |
| Tiempo de riego Tr | 55 | 130 | 48 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 5.10 | 11.01 | 4.00 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 5.21 | 3.74 | 6.13 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 5.90 | 13.07 | 5.52 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.87 | 0.84 | 0.72 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.85 | 0.95 | 0.9 |
| Gasto óptimo RC Qo [l/s] | 2 | 1.75 | 52.0 |
| | Schwankl | | |
| Tiempo de riego Tr | 62.5 | | |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 7.30 | | |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 3.98 | | |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 8.70 | | |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.8464 | | |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.8932 | | |
| Gasto óptimo RC Qo [l/s] | 2.6 | | |

5.3.2 Simulaciones con el RIG

La diferencia con el RC, es que el gasto no permanece constante a lo largo del surco, sino que este es duplicado, entonces surge la pregunta ¿a que fracción hay que hacer el incremento de gasto?, esta es la razón por la cual se realizan simulaciones numéricas a diferente fracción de la longitud del surco (0.25, 0.50, 0.75) hasta encontrar la óptima, en donde la eficiencia de aplicación sea la máxima posible.

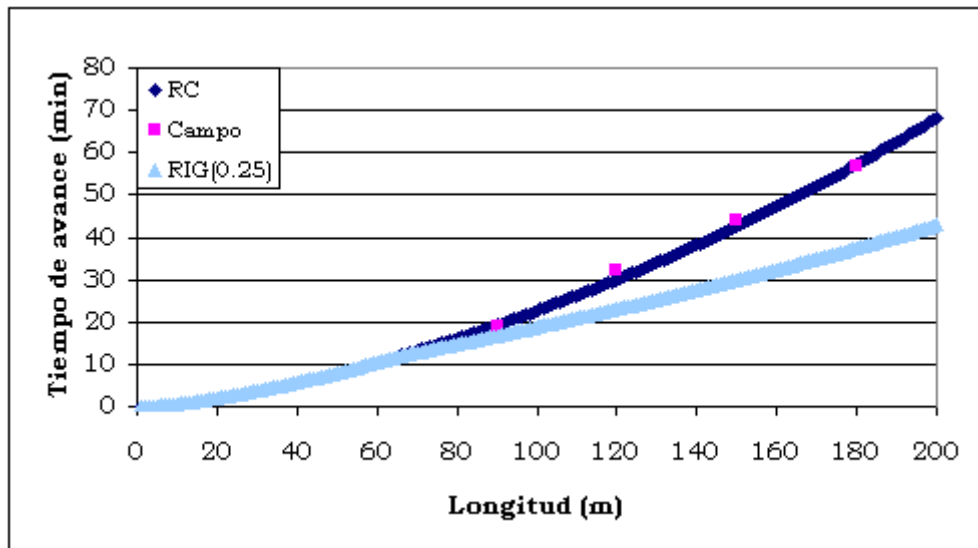
Los resultados para el RIG, se muestran en la siguiente tabla .

Tabla 5.7: Resultados para RIG arrojados por el programa

| Fracción a la que hay que hacer el incremento | 0.25 | 0.50 | 0.75 |
|---|----------|---------|----------|
| Surco | Ea(0.25) | Ea(0.5) | Ea(0.75) |
| Bardenas | 0.95 | 0.94 | 0.93 |
| Benson | 0.71 | 0.69 | 0.68 |
| Calera | 0.95 | 0.93 | 0.92 |
| Celaya | 0.95 | 0.94 | 0.93 |
| Chapingo | 0.74 | 0.72 | 0.69 |
| Narrow | 0.86 | 0.85 | 0.80 |
| Calera2 | 0.94 | 0.92 | 0.91 |
| Tarboton | 0.92 | 0.91 | 0.91 |
| Wide2 | 0.81 | 0.80 | 0.73 |
| Schwankl | 0.90 | 0.89 | 0.88 |

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que la fracción donde existe la eficiencia de aplicación más alta es a (0.25), es decir a un cuarto de la longitud total del surco.

Si el incremento del gasto se hace en esa fracción la duración de la fase de avance se reduce y se logra una mejor distribución de la humedad del suelo a través del surco. Al hacer la comparación gráfica del tiempo de avance del RC con las correspondientes al RIG, los puntos de este se ajustan aproximadamente a una recta, lo que explica la reducción en la duración de la fase de avance del agua. En la Figura 5.2 se puede observar.



[Figura 5.2: Curva de avance en el RIG]

Tabla 5.8: Resultados para el RIG con la fracción óptima (0.25)

| | Bardenas | Benson | Calera |
|--|-----------------|-----------------|---------------|
| Tiempo de riego Tr | 48 | 135 | 0.51 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 10.22 | 17.95 | 7.95 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 10.40 | 3.67 | 8.12 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 10.78 | 25.13 | 9.36 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.95 | 0.71 | 0.95 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.89 | 0.96 | 0.83 |
| Gasto óptimo RIG Qo [l/s] | 2.25 | 1.7 | 2.0 |
| | Celaya | Chapingo | Narrow |
| Tiempo de riego Tr | 34 | 115 | 27 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 5.35 | 11.46 | 3.22 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 6.31 | 5.05 | 7.32 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 5.61 | 15.59 | 3.74 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.95 | 0.74 | 0.86 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.84 | 0.97 | 0.90 |
| Gasto óptimo RIG Qo [l/s] | 1.75 | 1.25 | 1.37 |
| | Calera2 | Tarboton | Wide2 |
| Tiempo de riego Tr | 55 | 80 | 28.5 |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 5.12 | 10.72 | 4.05 |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 5.24 | 3.65 | 6.20 |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 6.10 | 11.73 | 5.01 |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.94 | 0.92 | 0.81 |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.86 | 0.88 | 0.89 |
| Gasto óptimo RIG Qo [l/s] | 1.2 | 1.5 | 1.75 |
| | Schwankl | | |
| Tiempo de riego Tr | 41 | | |
| Volumen aplicado Va [m ³] | 7.59 | | |
| Lámina infiltrada Zm [cm] | 4.14 | | |
| Volumen infiltrado Vz [m ³] | 8.47 | | |
| Eficiencia de aplicación Ea | 0.90 | | |
| Error en la ecuación de continuidad Er [%] | 0.73 | | |
| Gasto óptimo RIG Qo [l/s] | 2.6 | | |

5.4 Resultados y discusión

En este trabajo, por tratarse de surcos cerrados, el volumen infiltrado es muy cercano al volumen aplicado al surco. Esta condición hace que las eficiencias de aplicación se calculen como la relación entre la lámina mínima del agua infiltrada entre la lámina media infiltrada a través del surco, y es equivalente a la relación entre el volumen de agua que el cultivo requiere (si se considera que la lámina de agua mínima infiltrada iguala la dosis) y el volumen aplicado al surco.

Por otra parte, al emplear cualquier método de riego más eficiente (RE) que el RC, se produce un ahorro del agua.

El ahorro de agua (A_g) con volúmenes se calcula con la ecuación:

$$A_g = \frac{[(V_a)_1 - (V_a)_2]}{(V_a)_1} = 1 - \frac{(V_a)_2}{(V_a)_1} \quad (5.1)$$

Donde:

$(V_a)_1$: Volumen empleado con el (RC)

$(V_a)_2$: Volumen empleado con el (RE)

Al multiplicar y dividir el segundo término de la ecuación 5.1 V_d que es el volumen que aprovechan las plantas de la ecuación 2.1 se obtiene el ahorro de agua en términos de las eficiencias, con la siguiente expresión. [Vázquez E (1996)]

$$A_g = 1 - \frac{(V_a)_2 V_a}{(V_a)_1 V_a} = 1 - \frac{(E_a)_{RC}}{(E_a)_{RIG}} \quad (5.2)$$

El ahorro de agua en por ciento se calcula como.

$$A_g = 100 \left(1 - \frac{(E_a)_{RC}}{(E_a)_{RIG}} \right) \quad (5.3)$$

Donde:

$(E_a)_{RC}$: Eficiencia de aplicación con el RC

$(E_a)_{RIG}$: Eficiencia de aplicación con el RIG

El error en la ecuación de continuidad se calcula de la siguiente manera.

$$Er = [(V_a - V_z) / V_a] 100 \quad (5.4)$$

Donde:

Er: Error en la ecuación de continuidad [%]

Va: Volumen aplicado al surco [m³]

Vz: Volumen infiltrado [m³]

En la Tabla 5.9 se presenta la comparación entre las eficiencias de aplicación del RC y el RIG en surcos cerrados, así como el ahorro de agua para cada caso. Los tirantes al final del surco en el caso del RIG en ningún momento rebasan la profundidad del surco, esto asegura que al final del mismo no habrá desbordamiento. Por lo anterior podemos decir que el RIG es un método alternativo al RC y que el incremento del gasto es recomendable hacerlo a un cuarto de la longitud total del surco.

En la Tabla 5.6 se puede ver que las opciones del RC con poco error son las de valores más altos de la conductividad hidráulica; por tanto, éste parámetro es el más significativo para satisfacer la ecuación de continuidad, puesto que influye directamente en el cálculo de la velocidad de infiltración en la ecuación 4.4. Con respecto al segundo parámetro de Green y Ampt y el coeficiente de rugosidad de Manning, juntos permiten el ajuste de la curva de avance en el extremo final del surco.

Si se cambian los juegos de parámetros de infiltración (K, w, h) y rugosidad (n), por ejemplo si disminuyo n tengo que aumentar h , si se disminuye K se aumenta h . Si w la hago mayor, la infiltración es menor debido a que el suelo está mas húmedo y por lo tanto el frente de agua llega más rápido y el tiempo de avance es menor. Por el contrario si w es más pequeña (un suelo con poca humedad inicial suelo seco) el avance del agua en la proximidad de la cabecera del surco es lento porque aumenta la infiltración y reduce el gasto hacia adelante por tanto el frente de agua llega menos rápido y el tiempo de avance es mayor. Este efecto lo reproduce bien el modelo numérico.

Tabla 5.9: Comparación de los resultados del RC y el RI

| | Bardenas | | Benson | |
|--|-----------------|-------|---------------|-------|
| | RC | RIG | RC | RIG |
| Tiempo de riego T_r [min] | 70.50 | 48 | 235 | 135 |
| Tiempo de avance t_a [min] | 46.03 | 36.60 | 80.36 | 70.25 |
| Volumen aplicado V_a [m ³] | 10.07 | 10.22 | 10.03 | 17.95 |
| Lámina infiltrada Z_m [cm] | 10.25 | 10.40 | 3.68 | 3.67 |
| Volumen infiltrado V_z [m ³] | 11.02 | 10.78 | 27.80 | 25.13 |
| Tirante máximo y_m | 8.78 | 11.32 | 8.52 | 12.18 |
| Ahorro de agua A_g [%] | 3.20 | | 9.86 | |
| Eficiencia de aplicación E_a | 0.91 | 0.94 | 0.64 | 0.71 |
| Incremento en la E_a con Respecto al RC | 0.03 | | 0.07 | |
| Error en la ecuación de continuidad E_r [%] | 0.94 | 0.89 | 0.98 | 0.96 |
| Gasto óptimo RC Q_0 [l/s] | 2.75 | 2.25 | 2.0 | 1.7 |
| | Calera | | Celaya | |
| Tiempo de riego T_r [min] | 66 | 51 | 52 | 34 |
| Tiempo de avance t_a [min] | 55.02 | 46.56 | 41.57 | 29.90 |
| Volumen aplicado V_a [m ³] | 8.05 | 7.95 | 5.32 | 5.35 |
| Lámina infiltrada Z_m [cm] | 8.22 | 8.12 | 6.29 | 6.31 |
| Volumen infiltrado V_z [m ³] | 8.99 | 9.36 | 5.84 | 5.61 |
| Tirante máximo y_m | 10.61 | 14.40 | 7.97 | 10.89 |
| Ahorro de agua A_g [%] | 4.21 | | 4.21 | |
| Eficiencia de aplicación E_a | 0.91 | 0.95 | 0.91 | 0.95 |
| Incremento en la E_a con Respecto al RC | 0.04 | | 0.04 | |
| Error en la ecuación de continuidad E_r [%] | 0.90 | 0.83 | 0.93 | 0.84 |
| Gasto óptimo RC Q_0 [l/s] | 2.5 | 2.0 | 2.0 | 1.75 |
| | Chapingo | | Narrow | |
| Tiempo de riego T_r [min] | 255 | 115 | 54 | 27 |
| Tiempo de avance t_a [min] | 188.68 | 88.52 | 47.42 | 23.48 |
| Volumen aplicado V_a [m ³] | 11.29 | 11.46 | 3.15 | 3.22 |
| Lámina infiltrada Z_m [cm] | 4.97 | 5.05 | 7.15 | 7.32 |
| Volumen infiltrado V_z [m ³] | 18.89 | 15.59 | 4.30 | 3.74 |
| Tirante máximo y_m | 7.27 | 10.32 | 18.55 | 25.78 |
| Ahorro de agua A_g [%] | 19.17 | | 15.12 | |
| Eficiencia de aplicación E_a | 0.59 | 0.73 | 0.73 | 0.86 |
| Incremento en la E_a con Respecto al RC | 0.14 | | 0.13 | |
| Error en la ecuación de continuidad E_r [%] | 0.98 | 0.97 | 0.97 | 0.90 |
| Gasto óptimo RC Q_0 [l/s] | 0.25 | 1.25 | 1.37 | 1.37 |

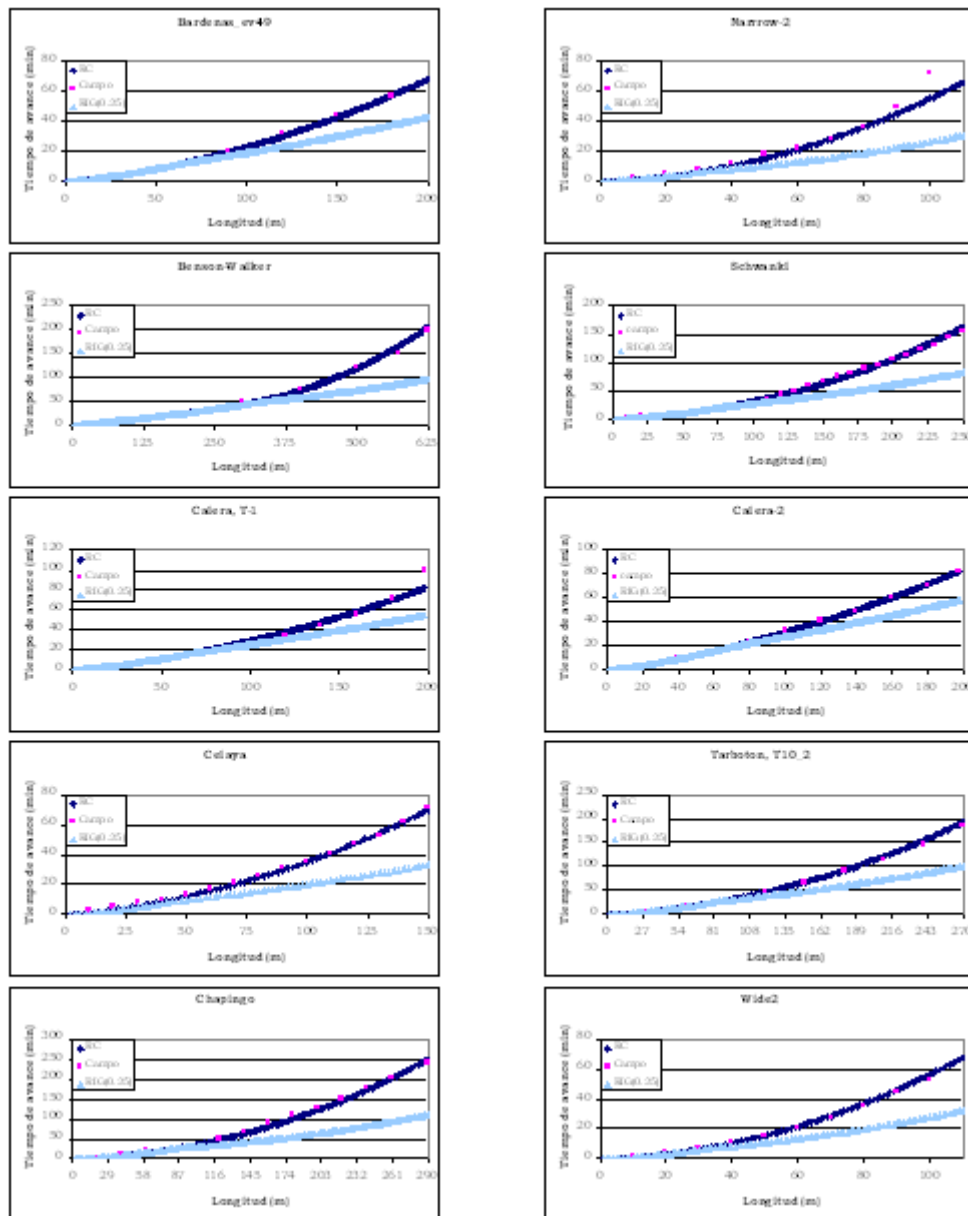
Tabla 5.9: Continuación

| | Calera2 | | Tarboton | |
|--|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | RC | RIG | RC | RIG |
| Tiempo de riego T_r [min] | 55 | 41 | 130 | 80 |
| Tiempo de avance t_a [min] | 57.53 | 44.60 | 98.22 | 72.15 |
| Volumen aplicado V_a [m ³] | 5.10 | 5.02 | 11.01 | 10.72 |
| Lámina infiltrada Z_m [cm] | 5.21 | 5.13 | 3.74 | 3.65 |
| Volumen infiltrado V_z [m ³] | 5.90 | 6.56 | 13.07 | 11.73 |
| Tirante máximo y_m | 8.98 | 13.81 | 9.29 | 12.59 |
| Ahorro de agua A_g [%] | 4.40 | | 7.70 | |
| Eficiencia de aplicación E_a | 0.87 | 0.91 | 0.84 | 0.91 |
| Incremento en la E_a con Respecto al RC | 0.04 | | 0.07 | |
| Error en la ecuación de continuidad E_r [%] | 0.85 | 0.74 | 0.95 | 0.88 |
| Gasto óptimo RC Q_0 [l/s] | 2.0 | 2.0 | 1.75 | 1.5 |
| | Schwankl | | Wide2 | |
| Tiempo de riego T_r [min] | 62.50 | 41 | 48 | 28.5 |
| Tiempo de avance t_a [min] | 60.38 | 43.89 | 43.04 | 26.21 |
| Volumen aplicado V_a [m ³] | 7.30 | 7.59 | 4.00 | 4.05 |
| Lámina infiltrada Z_m [cm] | 3.98 | 4.14 | 6.13 | 6.20 |
| Volumen infiltrado V_z [m ³] | 8.70 | 8.47 | 5.52 | 5.01 |
| Tirante máximo y_m | 12.22 | 17.54 | 15.84 | 20.52 |
| Ahorro de agua A_g [%] | 6.70 | | 10.00 | |
| Eficiencia de aplicación E_a | 0.84 | 0.90 | 0.72 | 0.80 |
| Incremento en la E_a con Respecto al RC | 0.06 | | 0.08 | |
| Error en la ecuación de continuidad E_r [%] | 0.89 | 0.73 | 0.95 | 0.89 |
| Gasto óptimo RC Q_0 [l/s] | 2.6 | 2.6 | 2.0 | 1.75 |

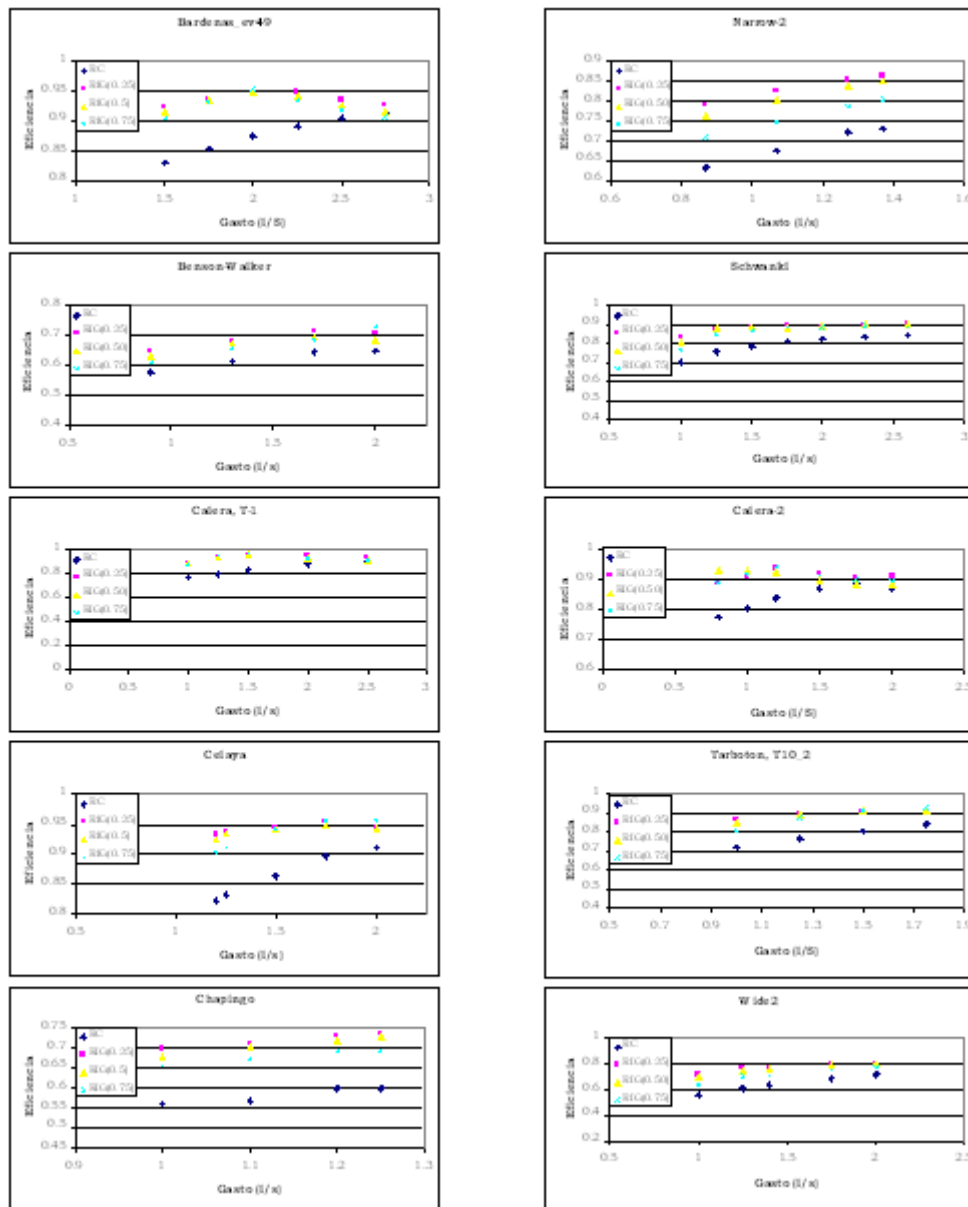
En la Figura 5.3 se muestran las curvas de avance para el RC y el RIG de cada uno de los surcos. Sabemos que en el RC el tiempo de riego T_r es mayor y por lo tanto la infiltración, esto significa que el consumo de agua es mayor, por el contrario el RIG requiere un menor tiempo de riego T_r debido a que la curva de avance se logra ajustar mejor a una recta, además de que presenta eficiencias superiores.

En el caso del RIG el tiempo de avance se reduce notablemente, casi a la mitad del RC, esto se traduce en un ahorro de agua y una mejor distribución de humedad a lo largo del surco en comparación con los tiempos de avance del RC.

En la Figura 5.4 se observa que para el RC, las eficiencias de aplicación en cada uno de los surcos está por debajo de las alcanzadas con el RIG, esto se debe a que en este tipo de riego al cortar el agua a un cuarto de la longitud total del surco se alcanza la eficiencia máxima para un gasto óptimo.



[Figura 5.3: Comparación de las curvas de avance entre el RC y el RIG]



[Figura 5.4: Comparación de las eficiencias de aplicación entre el RC y el RIG]

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El objetivo que se persigue en cada riego es empapar la zona de las raíces del suelo sin permitir que el agua se infiltre a gran profundidad. Las grandes pérdidas por escurrimiento superficial hacia la parte inferior del campo implican un despilfarro que pueden ser fácilmente localizadas y evitadas. Este objetivo es difícil de lograr con el método de riego tradicional.

Se ha estudiado el RIG de manera teórica, mostrándose que resulta ser una buena elección si se emplea en surcos largos, mayores a 150m, sabemos también que el RC se vuelve más eficiente si los surcos son cortos y cerrados, en vez de largos y abiertos al final. Razón por la cual se escogieron surcos con longitudes variables, que van de los 110 m a 625 m con el objeto de demostrar que también resulta ser más eficiente el RIG en surcos cortos comparado con el RC o tradicional.

En el RIG el tirante al final nunca debe ser mayor que la profundidad del surco, la cual se cumple para cada uno de los surcos, ya que si esto ocurriera indica que hay desbordamiento, lo cual debe evitarse, ya que representa la mayor desventaja del método.

Para regar eficientemente es preciso distribuir el agua de manera uniforme a lo largo de los surcos para evitar las pérdidas excesivas de agua por percolación profunda al inicio del surco, provocadas por un gasto pequeño que hace que el tiempo de riego sea mayor y por lo tanto la infiltración, y si esto ocurre no importa donde se haga el incremento. Si el gasto es el adecuado conviene hacer el incremento a un cuarto de la longitud total del surco por que sólo así se infiltra la lámina que requiere el cultivo. En cambio si se maneja un gasto grande aunque se infiltre poco da lo mismo hacer el incremento a cualquier fracción.

La uniformidad de distribución, es un parámetro que permite evaluar de manera rápida la buena o mala distribución de la lámina de riego, pero en surcos cerrados, que es el caso, cuando Z_{min} coincide con la dosis de riego Z_m , es decir, cuando se riega sin déficit de humedad, el suelo al satisfacer el requerimiento de agua de la planta en toda la longitud del surco, la uniformidad de distribución UD es igual a la eficiencia de aplicación E_a , por lo anterior se deduce que en los resultados obtenidos en la Tabla 5.9 el RIG tiene eficiencias de aplicación superiores a las del RC. Al comparar las curvas de avance de los dos métodos existe una mejor distribución de las láminas de agua infiltrada y una reducción en la duración de la etapa de avance para el RIG. Los beneficios que produce aplicar el RIG en surcos cerrados comparado con el RC en el cultivo son ; ahorro de tiempo de riego en un 37.5%, y ahorro de agua del 8.4%.

Ningún sistema de riego puede aplicar más agua de la necesaria para establecer el status de humedad del suelo hasta llevarlo a la capacidad de campo. Cualquier exceso será eliminado a través del drenaje del suelo. Por tanto como resultado de la evaluación, el RIG resulta ser un método viable en vez del RC. Por lo que se recomienda un cambio en la manera de regar en nuestro país.

El RIG resulta ser un método alternativo al RC. Los resultados que se obtuvieron, muestran una mejor eficiencia de aplicación, un ahorro importante de agua, que es uno de los objetivos que se buscaron en este trabajo. Además una de las ventajas que ofrece es que es un método económico en comparación con otros métodos de riego, como por ejemplo el RI.

Apéndice A

ASPECTOS GENERALES

La necesidad de la planta por el agua

Un acre (4047 m²) de vegetación en plena luz solar pierde en promedio diez toneladas de agua al día durante el verano, una yarda cuadrada de cosecha (0.84 m²) utiliza más de dos litros de agua al día. [Orson W I y Vaughn H (1975)]

Las plantas transpiran estas grandes cantidades de agua en la atmósfera durante el día y existe poca o ninguna transpiración durante la noche. El agua es extraída del suelo por las raíces de la planta, y el sol proporciona la mayor parte de energía para convertir el agua líquida en vapor a través de las hojas. Las plantas normalmente obtienen sus nutrientes minerales de aquellos que están disueltos en el agua del suelo, que son tomados y transportados por las raíces a través de esta corriente de transpiración a las partes de la planta donde deben ser utilizados. Una proporción muy pequeña de agua es tomada; se combina químicamente para formar el nuevo material vegetal, así como la mayor parte se transforma en vapor al pasar a la atmósfera a través de los poros (estomas) de las hojas. Cada estoma se mantiene abierto, en tanto que las células en la zona en que se encuentran permanecen túrgidas, cuando estas llegan a un estado de flaccidez debido al déficit de agua en la planta los estomas tienden a cerrar el poro y así en alguna extensión reducen la pérdida de agua. Tal reducción en la transpiración por cierre de los estomas conduce a un decrecimiento en el desarrollo de la planta.

Otra función esencial de la toma de agua por la planta, es la de proporcionar fuerza mecánica a los tejidos no leñosos.

Evapotranspiración

El consumo de agua de los cultivos, llamado evapotranspiración (ET) o uso consumo (UC), se define como la cantidad de agua usada por cada cultivo o vegetación natural en la formación de tejidos. En un sentido más explícito ET es la suma de de la transpiración que se realiza a través de las hojas, mas la evaporación del agua contenida en la superficie, del suelo y de la planta.

El método directo para determinar la ET del cultivo o ET real es:

ESTANQUES

Este método consiste en cultivar plantas dentro de un estanque enterrado que contiene suelo, de tal modo que su superficie coincida con la del terreno. Este estanque debe ser colocado en el interior de un área extensa cultivada con la misma especie, para evitar el efecto "borde". La ET del cultivo se estima aplicando un balance hidrológico al sistema, esto es, midiendo los aportes de agua (lluvia y/o riego) así como la variación del contenido de humedad en el suelo, de acuerdo con la siguiente expresión.

$$ET=LL+R\pm\Delta H \quad (A.1)$$

Donde:

LL: Lámina proporcionada por la lluvia [mm]

R: Lámina proporcionada por el riego [mm]

ΔH : Cambio de humedad del suelo en el período considerado [mm]

Esta ecuación supone que no existe escurrimiento superficial ni percolación profunda, siendo esta su principal desventaja. Los estanques pueden tener una profundidad variable, entre 1 a 3 m. La superficie puede ser de forma circular o rectangular, el llenado con el suelo debe ser cuidadoso, de modo de no alterar las características morfológicas y físicas del perfil. Con especial cuidado de poner con la reproducción exacta de la estratificación y grado de compactación del suelo, tal como se presenta en las condiciones del campo.

El método es sencillo, pero tiene un costo alto de construcción y operación; es por eso que existen pocas estaciones de experimentación agrícola en el mundo que tengan estas instalaciones.

El agua en el suelo

El suelo consta de partículas de materia mineral (arcilla, limo y arena) y materia orgánica. A causa de las formas irregulares de estas partículas, no se ajustan estrechamente unas a otras y entre las mismas aparecen poros (pequeños espacios de aire).

Cuando la lluvia o el riego llenan completamente estos espacios con agua, hasta la exclusión de todo el aire del suelo, se dice que está saturado. Esta es una condición no estable que se mantiene únicamente en tanto que el drenaje de los costados de la zona inundada es más lento que el promedio de agua que continúa cayendo sobre la superficie. Cuando el agua cesa de caer en la superficie, el drenaje tiende a eliminar el agua a través de los poros y sustituirla con aire. Eventualmente después de un período que puede ir de un día a varias semanas, de acuerdo con el tipo de suelo, el impulso de la gravedad (que es constante) se equilibra con la tensión de la superficie de la pérdida de agua que hay alrededor de cada partícula individual de suelo.

Entonces cesa el drenaje y el suelo nos indica que está a su capacidad de campo, esto es que contiene la cantidad máxima posible de agua frente a un drenaje libre.

Capacidad de campo

Es cuando un suelo ha eliminado toda el agua en exceso, por gravedad. Como su nombre lo indica, este valor debe determinarse en condiciones de campo. El mejor tiempo para determinar la capacidad de campo es a principio de primavera, después de que el suelo está muy húmedo, durante la mayor parte de los meses invernales [Gurovich L A (1997)]. La mejor manera de medirla es mediante determinación gravimétrica del contenido de humedad de las muestras tomadas de los suelos inalterados. Se agrega una carga apreciable (10 a 20 cm de agua) mediante lluvia o artificialmente de modo que el suelo quede completamente saturado permitiéndole drenar naturalmente, luego se cubre el suelo con un material impermeable (un film de polietileno, por ejemplo) y se toma después de 48 a 72 horas, una muestra de suelo de 30 cm de profundidad. El contenido de agua de esta muestra corresponde a la capacidad de campo. De acuerdo con lo expuesto y desde un punto de vista práctico, dos o tres días después de un riego un suelo se ha mojado hasta su capacidad de campo en una profundidad que dependerá del total de agua que se haya incorporado al perfil del suelo durante el proceso de riego.

Drenaje

El drenaje es la remoción del agua desde el suelo, cuando su contenido está saturando el espacio poroso, ya sea en el estrato superficial, o en el volumen total o parcial de suelo ocupado por las raíces. Se requiere drenar los suelos por tres motivos: evitar condiciones de anaerobiosis en el sistema radicular de los cultivos, evitar la acumulación de sales en el volumen de suelo ocupado por las raíces de los cultivos y evitar la lixiviación de los nutrientes.

La irrigación no debe realizarse en suelos con drenaje pobre; cada suelo llegará a saturarse de manera normal mientras se aplique agua, pero cuando cese el riego no existirá el movimiento de descenso de agua y consecuentemente entrada de aire desde la superficie. El suelo permanecerá encharcado e incapaz de sostener un buen desarrollo de las plantas.

Pérdida de agua del suelo

Una vez que el campo ha alcanzado su capacidad, un terreno bien drenado puede perder agua únicamente por transpiración durante el desarrollo de las plantas o por evaporación de la superficie del suelo expuesta al sol. En tanto la superficie del terreno está húmeda, el promedio de evaporación del suelo es casi el mismo que el de una superficie de agua abierta.

Para fines prácticos puede asumirse que no se pierde más allá de unos 1.83 cm de evaporación de la superficie del suelo antes de que ésta cese prácticamente. La mayor pérdida se produce en los centímetros superiores; el movimiento capilar del agua hacia arriba se produce únicamente en forma muy lenta.

Disponibilidad de agua en el terreno

Las plantas pueden tomar agua del suelo en cualquier grado de humedad que esté entre la capacidad de campo y el punto permanente de marchitamiento, la cantidad de agua que el suelo pueda suministrar entre estos dos puntos se conoce como disponibilidad de agua en el terreno.

La capacidad de agua disponible es una propiedad característica del suelo y puede cambiarse hasta un pequeño pero útil límite, mediante un buen manejo del terreno tal como unas labores apropiadas y un uso juicioso de materia orgánica.

Tensión de humedad del suelo

Las raíces de la planta toman el agua de la película que está alrededor de cada partícula de terreno mediante la fuerza de tensión de su superficie y ellas deben vencer esta fuerza a fin de absorber el agua. Mientras esta película permanece alrededor de las partículas y llega a ser más pequeña, esta fuerza aumenta y las raíces deben por tanto ejercer una capacidad de succión superior. Esta succión puede medirse por ejemplo mediante un tensiómetro, su magnitud es una indicación de la sequedad del suelo.

Relaciones fundamentales entre el agua y el suelo

Entre las relaciones del suelo y el agua que tienen una especial importancia con las zonas de regadío, se incluyen las capacidades de los suelos bien drenados, que retienen el agua para su posterior utilización por las plantas, y el flujo o movimiento del agua en los suelos. Las condiciones de alcalinidad y salinidad junto con la translocación y concentración de las sales solubles debidas al movimiento y evaporación del agua del suelo, se encuentran igualmente entre las relaciones más importantes del agua con el suelo.

Las proporciones en que se encuentra la humedad en el terreno influyen decisivamente en el desarrollo de las plantas. Cuando el volumen de agua contenido en el terreno es excesivo, el crecimiento vegetal se ve dificultado o detenido, por lo que el drenaje se presenta como imprescindible. Por el contrario en las regiones áridas las deficiencias de humedad provocan su esterilidad.

Textura del suelo

La textura la determina las dimensiones de una partícula que constituyen un suelo, las partículas pueden ser desde arena fina o arcilla; las que tienen un diámetro superior a 1 mm se denominan gravas, de 0.05 a 1.00 mm arenas, entre 0.002 y 0.05 mm limos y menores de 0.002 mm arcillas. La mayoría de los suelos contienen una mezcla de arena, limo y arcilla. Si predomina la arena, se dice que es un suelo arenoso, si la arcilla es el elemento predominante, el suelo es arcilloso, los limos están comprendidos entre las arcillas y las arenas. Los suelos francos tienen una textura media con cantidades análogas de partículas de arcilla, limo y arena.

Los granos de arena raspan al contacto con los dedos y pueden ser distinguidos a simple vista.

Tabla A.1: Textura del suelo

| Tipo de suelo | Denominación textural |
|-----------------------------------|---|
| • Arena | • Material del suelo que contiene del 0 al 10% de limo y arcilla. |
| • Arenoso franco | • Material del suelo que contiene del 10 al 20% de limo y arcilla. |
| • Franco arenoso | • Material del suelo que contiene del 0 al 27% de arcilla y del 55 al 80 de arena; y también suelos que tienen del 0 al 10% de arcilla, menos del 50% de limo y menos del 55% de arena. |
| • Franco | • Material del suelo que contiene del 10 al 27% de arcilla, menos del 50% de limo y menos del 55% de arena. |
| • Franco limoso | • Material del suelo que contiene del 0 al 27% de arcilla y 50% o más de limo. |
| • Franco arcilloso arenoso | • Material del suelo que contiene del 27 al 40% de arcilla y más del 45% de arena. |
| • Franco arcilloso | • Material del suelo que contiene del 27 al 40% de arcilla y del 20 al 45% de arena. |
| • Franco arcilloso limoso | • Material del suelo que contiene del 27 al 40% de arcilla y 20% o menos de arena. |
| • Arcilla arenosa | • Material del suelo del 40 al 60% de arcilla y del 40 al 60% de arena. |
| • Arcilloso | • Material del suelo con 40% o más de arcilla, 40% o menos de arena, y 40% o menos de limo. |
| • Acillo-limoso | • Material del suelo que contiene 40% o más de arcilla y 40% o más de limo. |

El limo, cuya visibilidad es difícil, tiene una apariencia y tacto harinosa. Las partículas arcillosas, muchas de las cuales son coloides inorgánicos, no se distinguen a simple vista y una gran parte de ellos son demasiado pequeños para ser vistos a través del microscopio, esta es la parte que hace que el suelo se hinche y lo vuelve pastoso cuando está húmedo y quebradizo cuando está seco.

El tamaño de las partículas se designa por la palabra textura. Los suelos arenosos son los que tienen una textura gruesa, los francos una textura media y los arcillosos una textura fina. La textura del suelo tiene una influencia muy grande en el movimiento del agua en el suelo, la circulación de aire y la velocidad de transformaciones químicas, que son de gran importancia en la vida vegetal. En la Tabla A.1 se puede observar los tipos de suelo.

Infiltración del agua durante el riego

Una propiedad de gran importancia en los suelos, es la velocidad a la que el agua percola o se infiltra, dicha infiltración es normalmente mucho mayor al principio de un riego, que varias horas después y está influida por las propiedades del suelo y por el gradiente de humedad. [Hervé-Plusquel L (1990)]

La tensión de humedad, explicada antes, puede ser cero en el primer centímetro del suelo, poco después del humedecimiento y puede ser muy alta algunos centímetros más abajo, produciendo de esta manera una fuerza descendente (que se suma a la gravedad) que atrae al agua hacia la parte del suelo no saturada. Estas diferencias de tensión, algunas horas después del humedecimiento, pueden ser muy pequeñas y entonces la gravedad se convierte en la fuerza principal causante de la filtración. La disminución de la filtración a medida que transcurre el tiempo después del humedecimiento de un suelo, es de gran importancia para los estudios de las pérdidas de agua de lluvia o de riego. El agua que se aplica a los suelos arenosos de estructura gravosa o gruesa, percola tan rápidamente hacia el interior, que la superficie del agua puede descender varios centímetros en una hora. En suelos con arcilla de textura fina, se acumulará y permanecerá en el suelo con muy poca filtración aparente durante muchos días.

Una forma conveniente de expresar la filtración es el descenso de la superficie del agua en centímetros por hora.

Por ejemplo si una hectárea de tierra nivelada está cubierta por una capa de agua de dos centímetros a las nueve de la mañana y a las diez el agua tiene tan sólo un centímetro de profundidad, la velocidad de infiltración es de un centímetro por hora, despreciando las pérdidas por evaporación.

Permeabilidad

La permeabilidad no está influida por la pendiente hidráulica, lo que implica una diferencia importante entre esta propiedad y la infiltración. Tampoco la modifican demasiado los cambios de temperatura del agua, pero en cambio la afectan grandemente las restantes propiedades físicas del suelo. El término permeabilidad también se utiliza para designar el movimiento del agua, ya sea a través de los suelos, por su interior, en cualquier dirección.

La permeabilidad de los suelos saturados varía entre límites muy amplios; en los suelos arcillosos compactos desde menos de 30 cm por año, en formaciones de grava hasta varios miles de metros por año. [Gurovich L A (1997)]

Para los suelos no saturados, el contenido de humedad es uno de los factores determinantes de la permeabilidad.

Las dimensiones de la permeabilidad, corresponden a las de una velocidad, ya que su dimensión es la longitud dividida por el tiempo.

Estructura del suelo

Según los edafólogos (del griego "edapos" suelo, "logos" tratado, estudio. Estudio de los suelos) la buena estructura de los suelos es la clave de su fertilidad, ya que, aunque las cantidades adecuadas de principios químicos nutritivos son fundamentales para la producción de cosechas estos no aseguran por sí solos el crecimiento satisfactorio de las plantas. La permeabilidad de los suelos el agua y el aire, proporcionada por una estructura favorable del suelo, son tan importantes para el crecimiento de las plantas como pueda serlo la cantidad necesaria de nutrientes.

En los suelos en que las partículas son relativamente del mismo tamaño, existen espacios grandes entre las partículas, es decir el acomodo entre ellas no es tan bueno como lo podría ser en un suelo en donde las partículas que lo constituyen exista una gran variedad de tamaño, esto se ve reflejado en un menor volumen de espacios intersticiales.

En los suelos de textura fina, si se cultivan adecuadamente, actúan como pequeños granos en los que cada uno de ellos está formado por muchas partículas, mientras que en los suelos de textura más gruesa, cada partícula tiene una propia individualidad. La existencia de gránulos es garantía de una estructura adecuada del suelo. El exceso de riego, arados y también el laboreo de suelos de textura fina, cuando están húmedos, tiende a dividir estos gránulos.

Peso específico real

El peso específico real del suelo, es una cantidad sin dimensión y se define como el cociente entre el peso de una partícula de suelo y el de un volumen de agua igual al de la partícula. Algunos suelos de regadío, que contienen gran cantidad de materia orgánica, tienen un peso específico entre 1.5 y 2.0 según la materia mineral que contengan.

Peso específico aparente

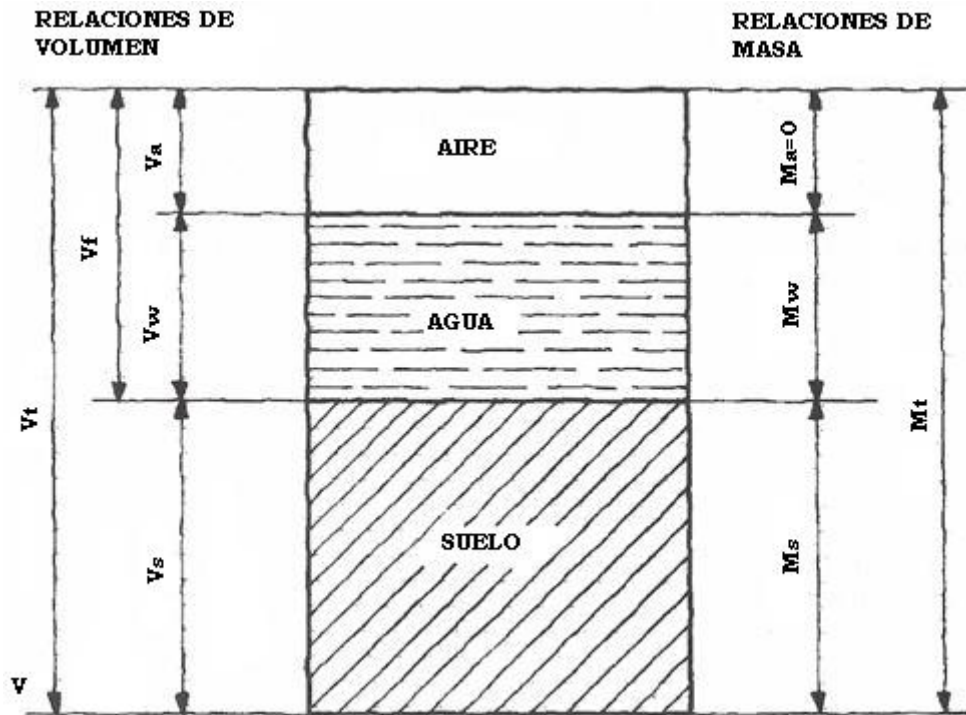
El peso específico aparente de un suelo se define como el cociente entre el peso de un volumen dado de suelo seco, incluido el espacio de poros, y el peso de un volumen igual de agua. Este cociente se denomina también "peso volumétrico" del suelo. El peso específico aparente está influido por la estructura, es decir, por la posición de las partículas del suelo, por la textura y la compacidad.

El peso específico aparente es una propiedad del suelo de gran importancia para los cultivadores de tierras de regadío, ya que cuando se hace más compacto un suelo de peso específico fijo, aumenta el peso específico aparente porque se reduce el espacio entre las partículas del suelo y por ello se hace disminuir el volumen del espacio poroso.

Es necesario conocer esta propiedad, para calcular el agua de riego, puesto que es imposible medir por medios directos el volumen de agua que exista en forma de humedad del suelo, en un volumen dado del mismo.

Relaciones de volumen y masa del suelo

Con base en la Figura A.1 se pueden definir términos que se usan para expresar las relaciones cuantitativas de los tres constituyentes básicos del suelo.



[Figura A.1: Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases]

Densidad de sólidos

$$D_s = M_s / V_s \quad (A.2)$$

Donde:

Ms: Masa del suelo seco

Vs: Volumen ocupado por el material sólido,
de acuerdo con la figura anterior

Las unidades de la densidad de sólidos se expresa, en (g/(cm³)).

Densidad aparente

Es la relación entre la masa de partículas del suelo después que han sido secadas y el volumen total del suelo, que incluye las partículas y los poros en conjunto. Obviamente éste es menor que el valor de D_s . Para el suelo en el cual los poros constituyen la mitad del volumen total, D_b es 1/2 de D_s , o sea aproximadamente 1.3-1.35 g/cm³. En un suelo arenoso D_b puede ser del orden de 1.5 g/cm³; en un suelo arcilloso puede llegar a 1.1 g/cm³.

$$D_b = M_s / V_t \quad (A.3)$$

Donde:

Ms: Masa de sólidos [g]

Vt: Volumen total [cm³]

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

Densidad aparente total

$$D_t = M_t / V_t \quad (A.4)$$

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

Volumen específico seco

$$V_b = V_t / M_s = 1 / D_b \quad (A.5)$$

El volumen de una masa de suelo seco (g/cm^3); sirve como índice del grado de compactación del suelo.

Porosidad

$$f = V_f / V_t = (V_A + V_W) / (V_s + V_A + V_W) \quad (A.6)$$

El término porosidad (equivale a decir espacio poroso) es un índice del volumen relativo de poros en el suelo. Este valor se encuentra en general en el rango 0.3-0.6 (30-60%). Los suelos de textura gruesa tienden a ser menos porosos que los de textura fina, aunque el tamaño promedio de los poros individuales es mayor en el primero que en el segundo tipo de suelo. En los suelos con alto contenido de arcilla, la porosidad es muy variable, a medida que el suelo se expande o se contrae, se agrega o dispersa, se compacta y se parte. La porosidad total no revela nada acerca de la distribución de poros por tamaño, pero es una propiedad importante del suelo, en relación al riego. [Hervé-Plusquel L (1990)]

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

a. Contenido de agua gravimétrico o humedad de masa:

$$\omega = M_w / M_s \quad (A.7)$$

Donde:

M_w : Masa de agua

M_s : Masa de la partícula de suelo seco

El contenido de humedad total del suelo (no contenido de humedad disponible) puede determinarse gravimétricamente pesando una muestra antes y después, secándolo a peso constante a 105°C ; las arcillas pueden contener cantidades apreciables de agua, incluso a temperaturas mayores.

El suelo secado al aire contiene generalmente una apreciable cantidad de agua, en comparación con un suelo secado en una estufa a 105°C, fenómeno que se debe a la adsorción de vapor de agua; éste fenómeno se conoce como "higroscopía". El contenido de humedad puede también deducirse por la lectura de varios instrumentos enterrados en el suelo. El tensiómetro consta esencialmente de un depósito poroso lleno de agua, enterrado en el suelo; el agua se mueve hacia adentro y hacia fuera del depósito hasta que la succión establecida se iguale con la tensión de humedad del suelo circundante. La succión en el interior del depósito puede medirse con un manómetro o un medidor Bourdon. Los tensiómetros dan una medida directa de la tensión que las raíces deben vencer a fin de extraer el agua del suelo; se usan ampliamente en investigación, especialmente en cultivos perennes incluyendo árboles frutales. En un suelo mineral saturado ω varía entre 25% y 60%, [Hervé-Plusquel L (1990)] según la densidad aparente. El contenido de agua en condiciones de saturación es generalmente mayor en suelos más arcillosos. En suelos orgánicos el contenido de agua de saturación en base a masa puede exceder del 100%.

b. Humedad volumétrica:

$$\Theta = V_w/V_t = V_w/(V_s + V_f) \quad (\text{A.8})$$

Donde:

V_w : Volumen de agua

V_t : Volumen total del suelo

En suelos arenosos el valor de Θ en saturación es del orden de 48-50%, aumentando a medida que la textura del suelo se hace más arcillosa.

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

c. Grado de saturación:

$$\Theta_s = V_w/V_f = V_w/(V_a + V_w) \quad (\text{A.9})$$

Este índice -conocido algunas veces solamente como saturación- [Gurovich L A (1997)] expresa el volumen de agua presente en el suelo con relación al volumen de poros. El índice varía entre 0 en suelo seco, hasta 100% en un suelo totalmente saturado.

Sin embargo, es casi imposible obtener 100% de saturación, ya que siempre hay algo de aire atrapado en forma de burbujas, este índice no es adecuado para suelos arcillosos que se expanden, en los cuales la porosidad cambia con el contenido de agua; en suelos arenosos el valor de Θ en saturación es del orden de 48-50%, aumentando, a medida que la textura del suelo se hace más arcillosa.

Medición del agua en el suelo

La medición del contenido de agua del suelo tiene fundamental importancia con el fin de poder establecer la frecuencia del riego. En condiciones de campo, se requiere una medida directa del contenido de agua, o alternativamente la medición de un índice del contenido de agua.

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

$$\omega = M_w/M_s = (M_{sh} - M_s)/M_s \quad (A.10)$$

Donde:

M_{sh} : Masa de suelo húmedo

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

$$\theta = V_w/V_s \quad (A.11)$$

Ya sea que el contenido del agua del suelo se exprese en forma gravimétrica ω , o en forma volumétrica θ , como una relación de volúmenes.

En el caso del riego, la expresión de contenido de agua del suelo que más interesa es θ . Cuando θ es multiplicado por 100, se obtiene el porcentaje de agua de la muestra de suelo; sin embargo, la determinación de θ generalmente se realiza a partir de la determinación de ω , pues resulta bastante complicado establecer el volumen exacto de una muestra de suelo; por ello se utiliza la relación entre θ y ω , expresada con la siguiente ecuación.

$$\theta = D_b * \omega \quad (A.12)$$

Punto permanente de marchitamiento

Otro valor del contenido de agua que tiene importancia en la práctica del riego es el punto permanente de marchitamiento, que debido a la evapotranspiración reducen el contenido de agua que tiene un suelo, bajo el cual las raíces de la planta no pueden absorber más agua en forma más rápida que ellas la pierden de las hojas. Las hojas se marchitan, la transpiración se reduce y eventualmente cesa. Cuando las plantas permanecen en un estado de marchites aún cuando el medio del suelo sea húmedo se dice que la planta está en un estado "permanente de marchites". En cualquier suelo determinado, todas las plantas que tengan el mismo contenido en humedad permanecerán permanentemente en el mismo estado de marchites.

El punto que se encuentra entre la capacidad de campo y el punto permanente de marchitamiento es el rango de contenido de agua en el cual la planta puede desarrollarse y se denomina "humedad aprovechable del suelo" y se expresa como porcentaje de agua o como lámina [cm] de acuerdo con las siguientes expresiones

$$H.A. = (W_{cc} - W_{pmp}) * 100\% \quad (A.13)$$

$$H.A. = (W_{cc} - W_{pmp}) * D_b * H \quad (A.14)$$

Donde:

H.A.: Humedad aprovechable

H: Grosor del perfil del suelo o el estrato de suelo considerado

Wcc: Contenido gravimétrico de agua a capacidad de campo

Wpmp: Contenido gravimétrico de agua en el punto
permanente de marchitamiento

Db: Densidad aparente del suelo

Una forma de marchitamiento completamente distinto puede producirse con gran calor aún cuando el suelo este comparativamente húmedo. Esta es la marchites temporal que puede verse en cosechas tales como la remolacha, y cuando esto ocurre el riego no producirá que las plantas obtengan o regeneren su estado de turgidez mientras la evapotranspiración interna continúe.

Este valor puede medirse cultivando plántulas de girasol en muestras de suelo, hasta que las plántulas hayan cubierto completamente el suelo con sus raicillas. La superficie del suelo se cubre para evitar la evaporación y no se aplica más agua.

Cuando ciertas hojas de las plantas se marchitan y no se recubren, si el cultivo se sitúa en atmósfera saturada el suelo tiene un punto de marchitamiento permanente y se determina el contenido de humedad, los valores van de 1.8% (para arena gruesa) a 13% (suelo franco muy limoso). El punto de marchitamiento puede determinarse también mediante métodos de laboratorio.

La causa del movimiento del agua en el suelo

La velocidad de flujo del agua en el suelo está determinada por dos factores principales: a) la fuerza que actúa sobre cada porción del volumen del agua y b) la resistencia al flujo, ofrecida por el espacio poroso del suelo. La fuerza que actúa sobre el volumen del agua del suelo, está representada a su vez por dos términos: la fuerza gravitacional, que hace que el agua caiga a un nivel menor y la fuerza debida a las diferencias de presión hidrostática en diferentes puntos del sistema, existiendo la tendencia a moverse de una zona alta a una de baja presión. La fuerza gravitacional y la fuerza debida a las diferencias de presión hidrostática, que contribuyen a la fuerza total que actúa sobre el agua del suelo, actuarán sólo en contados casos en la misma dirección, de tal modo que la resultante debe ser calculada por la construcción geométrica del paralelogramo de fuerzas.

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

Conductividad hidráulica

Está relacionada íntimamente con la permeabilidad y se define como el volumen de agua que fluirá durante la unidad de tiempo a través de una columna de tierra de sección unitaria, debido a la fuerza que, por unidad de masa, corresponde al gradiente de potencia unitario.

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

La conductividad hidráulica es la razón entre el flujo y el gradiente hidráulico. Siendo las dimensiones del flujo $[L \cdot T^{-1}]$, las dimensiones de la conductividad hidráulica dependen de las dimensiones de la fuerza que causa el movimiento (el gradiente de potencial). Se ha mostrado que la forma más simple de expresar el gradiente de potencial es usando unidades de carga, es decir, longitudes. Por ser una relación entre dos longitudes, el gradiente de carga hidráulica (gradiente hidráulico) $\Delta H/L$ es adimensional; por lo tanto, las dimensiones de la conductividad son las mismas que las del flujo, o sea $[L \cdot T^{-1}]$.

Donde:

ΔH : Carga hidráulica

L : Longitud

La pérdida de carga por unidad de distancia, en la dirección del flujo es el gradiente hidráulico; en realidad, es la fuerza que produce el flujo. La velocidad de descarga específica Q/A o sea, el volumen de agua que fluye a través de una sección de área A en el tiempo t , se llama densidad de flujo o simplemente flujo y se indica por q .

$$q = Q/A \quad \alpha \quad V/At = K \cdot \Delta H/L \quad (A.15)$$

El factor de proporcionalidad K se conoce como conductividad hidráulica.

$$q = K \cdot \Delta H/L \quad (A.16)$$

Si el flujo no es constante (o sea, si q cambia en el tiempo) o el suelo no es uniforme, la carga hidráulica puede disminuir en forma no lineal en la dirección del flujo.

Cuando el gradiente de carga hidráulica o la conductividad hidráulica son variables, se debe considerar los valores de flujo, gradiente y conductividad locales.

Por lo tanto una expresión más generalizada; para el flujo de agua saturado, en un medio poroso de tres dimensiones, en forma de ecuación diferencial: $K\Delta H$ es el producto de un escalar K por un vector ΔH , por lo tanto el flujo q es un vector cuya dirección está determinada por ΔH , de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$q = -K \cdot \Delta H \quad (A.17)$$

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

En un sistema unidimensional, la ecuación (A.17) toma la forma.

$$q = -K \cdot \delta H / \delta x \quad (A.18)$$

Apéndice B

PROGRAMA PARA SIMULAR EL RIEGO

```
C PROGRAMA RICIG.FOR
INTEGER N, I, J, K, L, JT, Z, NS, FR
REAL FI, TE, QP, FPI
REAL SM1, SM2, RO1, RO2, DS, DH, DW, LS, So, KF, RR, SW, HS, DT
REAL N30, ZK, CP, DN, TD, FRT, FC, LT
REAL RA, RG, QF, QT, QR, S0, SM, SH, KG
REAL C1, C2, C3, YC, N1, N2, N3, YN, YMX, AC, VC, RC, SC
REAL TC, TS, Y1, SS, SX, XT, RX, YX, GT, QQS, QQE, QSAL
REAL TI, TM, TP, RTA, ERT, CRT, A1, A2, AM, BM, R1, R2, RM
REAL VM, GM, NM, MX, RR1, RR2, RR3, RZ, YMY, ZF, TRC
REAL ZM, VZ, SZP, ZP, CU, ZL, LZD, TA, GP, RIG1, RIG2
REAL HT, TF, NUM1, MULT1, MULT2, MULT3, BN1, PMJ
REAL Y(400), TCC(400), CZZ(400), P(400)
REAL QZZ(400), Q(400), C(400, 400), D(400), H(400) REAL CM(400, 400),
QM(400, 400), FM(400, 400), YY(400), PM(400)
REAL A(400, 400), B(400), E(400), F(400), FP(400), BB(400)
OPEN(1, FILE='RICIG.DAT')
READ(1, *) SM1, SM2, RO1, RO2, PS
READ(1, *) KF, RR, SW, HS, So, LS, DT
READ(1, *) CP, TD, QF, RIG1, RIG2, N30
C datos fijos -----
JT = 12
Z = 999999
FPI = 2
FI = 0.75
TE = 0.95
RIG1= INT(RIG1*N30)
RIG2= INT(RIG2*N30)
```

C datos que pueden modificarse -----

QP = 0.01

ccc N30 = 64

NS = 3

TRC = 1.5

DH = 18

ccc T1N = 166

cc T2N = 66

cc T3N = 48

cc T4N = 56

cc T5N = 60

ccc T7N = 52

ccc T8N = 54

ccc T9N = 56

ccc T10N = 58

ccc T11N = 60

C Nomenclatura:

c FI = factor de peso para la variación del tirante en el tiempo

c TE = factor de peso para la variación del gasto en el espacio

c QP = tiempo base, en l/s (puede tomar un valor máximo de 0.05 l/s)

c N30 = número de tramos (de preferencia número par o múltiplo de 5)

c (Observación: a mayor N30 menor DT. Si el programa

c se interrumpe debe disminuirse DT) c NS = número de secciones ficticias

c TRC = factor >1 que multiplica al tiempo de riego y sirve para

c retardar el tiempo receso

c (si TRC>1 debe cambiarse la línea 2925)

c DH = diferencia de humedades del suelo antes y después

c del riego, en % (se supone constante de 15%)

C datos de la forma del surco -----

c A = SM1*y**SM2 (área del surco)

c R = RO1*A**RO2 (radio hidráulico del surco)

c SM1 = 0.913 (coeficiente sigma 1)

c SM2 = 1.5 (exponente sigma 2)

c RO1 = 0.43 (coeficiente rho 1)

c RO2 = 0.555 (coeficiente rho 2)

c PS = 0.226 (profundidad del surco, en cm)

C datos principales -----

c KF = 0.040 cm/min (conductividad hidráulica)

c RR = 0.06 s/m^{1/3} (n de Manning)

c SW = 5.0 cm (humedad inicial)

c HS = 150.0 cm (segundo parámetro de Green y Ampt)

c So = 0.18 % (pendiente longitudinal)

c LS = 150 m (longitud del surco)

c DT = 1 s (intervalo de tiempo, de preferencia 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16)

C indicadores del ripo de riego

c WRITE(*,*) 'tipo de riego (1, continuo,'

c WRITE(*,*) ' 2, con incremento de gasto) ='

c WRITE(*,*) ' 10 ó mayor, intermitente,'

c WRITE(*,*) ' 0.5, con recorte o cutback,'

c CP = 1

```

c CP = 2
c CP = 20 (máxima eficiencia cuando CP=N30/3)
c CP = 0.5 (reducción al final de fase de avance RIG1=N30)
c1 -----
FR = CP
DN = CP
IF (CP.EQ.2) GOTO 25
c2 WRITE(*,*) 'tiempo de riego (min) =',
CC TD = 300  c -----
IF (FR.GT.3) CP = 1
IF (CP.EQ.1) GOTO 55
cc25 TD = 1440
25 TD = TD
FR = 1
c -----
IF (DN.EQ.0.5) GOTO 50
FC = 1 + FRT
GOTO 55
50 FC = 2
55 WRITE(*,*)
DS = SM1 * SM2 * (PS ** (SM2 - 1))
WRITE(*,*) 'DS ancho del surco (cm) =', DS*100
cc DW = DH / 100
DW = DH
WRITE(*,*) DS
DX = LS / N30
57 LT = LS + NS * DX
N = LT / DX + 1
ZK = 18
QD = 1.63*LS*(So**(-0.77))*(KF**1.25)*(RR**1.07)*(SW**(-0.11))
QD = QD * (HS ** 0.62) * (ZK ** (-.48)) * (DS ** (-.1))
WRITE(*,*) 'Q diseño propuesto para riego continuo (l/s) =', QD
WRITE(*,*) 'gasto maximo: Qmax = 0.6/So (l/s) =', .6 / So
WRITE(*,*) 'gasto de diseño definitivo (l/s) =', QF
c terminan los datos =====
60 RA = RR
RG = RA
QF = QF / 1000
  QP = QP / 1000
QF = QF + QP
QT = QF
IF (CP.EQ.1) GOTO 70
QR = (QF - QP) * DN + QP
GOTO 80
70 QR = QP
80 S0 = So / 100
SM = (SW / 100) * DX * DS
SH = (HS / 100) * DX * DS
KG = (KF / 100) / 60
C TIRANTES PARA LAS CONDICIONES INICIALES

```

```

C1 = (QP * QP) / 9.81
C2 = SM2 / (SM1 * SM1)
C3 = 1 / (2 * SM2 + 1)
YC = (C1 * C2) ** C3
N1 = (RG * QP) / (S0 ** 0.5)
N2 = SM1 * (RO1 ** 0.6667) * (SM1 ** (2.0 * RO1 / 3.0))
N3 = 1 / (SM2 * (1 + 2 * RO2 / 3))
YN = (N1 / N2) ** N3
YMX = YN
AC = SM1 * (YC ** SM2)
VC = QP / AC
RC = RO1 * (AC ** RO2)
SC = ((VC * RG) ** 2.0) / (RC ** (1.3333))
TC = (JT * DT) / 60
WRITE(*,*) 'tiempo de calentamiento en minutos =', TC
TS = (Z * DT) / 60
WRITE(*,*) 'tiempo maximo de infiltracion en minutos=', TS
C CONDICIONES INICIALES
Y1 = YN / YC
SS = SC / S0  SX = (3.63 * Y1) / (SS ** 0.2) - 3.52 / (SS ** 0.13)
XT = (SX * YC) / S0
DO 490 I = 1, N - 1
Q(I) = QP
QM(I, I + 1) = QP
490 CONTINUE
Q(N) = QP
DO 500 I = 1, N
RX = (LT - (I-1) * DX) / XT
YX = 1.26 * (RX ** 0.285)
Y(I) = YC + (YN - YC) * YX
IF (Y(I).GT.YN) Y(I) = YN
    500 CONTINUE
GT = 9.81 * DT
505 DO 510 I = 2, N - NS
FP(I) = FPI
QZZ(I) = SM
510 CONTINUE  C INICIA CALCULO DINAMICO
DO 2935 T = 1, Z
TI = (T - JT) * DT
TM = TI / 60
TP = INT(TM)
IF (TI.LT.0) GOTO 780
IF (TI.GE.0) GOTO 810
780 Q(1) = QP
GOTO 830
810 Q(1) = QF
IF (FR.GT.5) GOTO 820
IF (CP.EQ.1) GOTO 813
IF (TCC(RIG1).EQ.0) GOTO 830
IF (TI.GT.TCC(RIG1)) Q(1) = QP

```

```

IF (TI.GT.FR*TCC(RIG1)) Q(1) = QR
IF (TM.GT.TD) Q(1) = QP
IF (TCC(RIG2).EQ.0) GOTO 830
IF (TI.GT.TCC(RIG2)) Q(1) = QF
IF (TI.GT.FR*TCC(RIG2)) Q(1) = QF
IF (TM.GT.TD) Q(1) = QP
GOTO 830
813 IF (TCC(N-NS).EQ.0) GOTO 830
IF (TM.GT.TD) Q(1) = QP
GOTO 830
C' riego intermitente
820 IF (TCC(FR).EQ.0) GOTO 830
C' Q(1) = QR
C' IF QZZ(N - NS) >= ZL GOTO Q(1) = QP
RTA = TI / TCC(FR)
ERT = AINT(RTA) / 2
CRT = INT(ERT)
IF ((ERT-CRT).GT.0) Q(1) = QR
IF (TM.GT.TD) Q(1) = QP
830 IF (Y(N-NS).GT.YMX) YMX = Y(N - NS)
840 DO 842 I = 1, N - 1
A1 = SM1 * (Y(I) ** SM2)
A2 = SM1 * (Y(I + 1) ** SM2)
AM = (A1 + A2) / 2
BB(I) = SM1 * SM2 * (Y(I) ** (SM2 - 1))
  BB(I + 1) = SM1 * SM2 * (Y(I + 1) ** (SM2 - 1))
BM = (BB(I) + BB(I + 1)) / 2
R1 = RO1 * (A1 ** RO2)
R2 = RO1 * (A2 ** RO2)
RM = (R1 + R2) / 2
PM(I) = A1 / R1
PM(I + 1) = A2 / R2
PMJ = (PM(I) + PM(I+1))/2
VM = QM(I, I + 1) / AM
FM(I, I + 1) = (VM ** 2.0) / (9.810001 * (AM / BM))
FM(I + 1, I) = FM(I, I + 1)
GM = 2 / (9.810001 * (AM ** 2.0))
NM = (ABS(QM(I,I+1))*DX*(RG**2.0))/((AM**2.0)*(RM**1.3333))
MX = DX / (GT * AM)
CM(I, I + 1) = NM + MX + GM * (Q(I + 1) - Q(I))
CM(I + 1, I) = CM(I, I + 1)
D(I) = BB(I) * (DX / DT)
A(I, I + 1) = -TE * ((1 - FM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1))  A(I + 1, I) = A(I, I + 1)
C(I, I + 1) = (S0 * DX + MX * QM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1)
C(I + 1, I) = C(I, I + 1)
842 CONTINUE
C(N - 1, N) = (S0 * DX + MX * QM(N - 1, N)) / CM(N - 1, N)
D(1) = D(1) / 2
DO 844 I = 1, N - 1
A(I, I) = ABS(A(I, I + 1)) + D(I)

```

```

B(I) = -C(I, I + 1) + D(I) * Y(I)
844 CONTINUE
IF (QZZ(N-NS).EQ.SM) GOTO 875
A(N - 1, N - 1) = D(N - 1)
ccc IF (TL.GT.(TRC*TD)) GOTO 850
850 B(N - 1) = D(N - 1) * Y(N-1) - QP
ccc GOTO 875
ccc850 B(N - 1) = D(N - 1)*(TE*Y(N-2)+(1-TE)*Y(N-1)) - QP
875 DO 900 I = 2, N - 1
A(I, I) = A(I, I) + ABS(A(I, I - 1))
B(I) = B(I) + C(I, I - 1)
YY(I) = Y(I)
900 CONTINUE
IF (TILE.0) GOTO 1220
IF (TCC(N-NS).GT.0) GOTO 1205
C TIEMPOS DE ALCANCE DE LA ONDA DE SUPERFICIE
DO 1200 I = 1, N - (NS+1)
IF (TCC(I+1).GT.0) GOTO 1200
IF (QM(I,I+1).LE.QP) GOTO 1205
IF (QM(I,I+1).GT.(FP(I)*QP)) TCC(I + 1) = TI
TCC(I + 2) = 0
GOTO 1205
1200 CONTINUE
C GASTOS DE INFILTRACION
1205 DO 1215 K = 2, N - NS
IF (QM(K-1,K).LE.QP) GOTO 1210
IF (TCC(N-NS).GT.0) GOTO 1207
IF (QM(K-1,K).LE.QM(K,K+1)) GOTO 1210
IF (TCC(K).EQ.0) GOTO 1210
cc1207 H(K) = (PM(K) / Y(K)) * DX * KG * (1 + SH / QZZ(K))
1207 H(K)=(PM(K)/Y(K))*DX*KG*(1 + (SH + AM*DX*DW)/QZZ(K))
cc (es preferible calcular el volumen de infiltración con la última
cc expresión, ya que permite cumplir mejor con la ec. de continuidad
cc para tiempos de riego más largos y emplear coeficientes de
cc rugosidad menores)
a(K, K) = a(K, K) + TE * H(K)
GOTO 1215
1210 H(K) = 0
1215 CONTINUE
1220 B(1) = B(1) + Q(1)
NUM1 = 1 - FM(1, 2)
B(1) = B(1) + (1 - TE) * (NUM1 / CM(1, 2)) * (Y(2) - Y(1))
c surco abierto (KT = 0) o cerrado (KT = 1)
C IF (KT.EQ.0) GOTO 1230
IF (QZZ(N-NS).GT.SM) GOTO 1230
B(N - 1) = B(N - 1) + ABS(a(N - 1, N)) * Y(N)
MULT1 = (1 - FM(N - 1, N)) / CM(N - 1, N)
B(N - 1) = B(N - 1) + (1 - TE) * MULT1 * (Y(N - 1) - Y(N))
1230 DO 1232 I = 2, N - 1
1231 B(I) = B(I) - (1 - TE) * H(I) * YY(I)

```

```

cc (la expresión correcta es la anterior. Se acepta un error de 1%,
cc TE=0.99, porque beneficia al cálculo)
ccc1231 B(I) = B(I) + (1 - TE) * H(I) * YY(I)
MULT2 = (1 - FM(I, I - 1)) / CM(I, I - 1)
ccc B(I) = B(I) - (1 - TE) * MULT2 * (Y(I - 1) - Y(I))
B(I) = B(I) + (1 - TE) * MULT2 * (Y(I + 1) - Y(I))
1232 CONTINUE
DO 1234 I = 2, N - 1
MULT3 = (1 - FM(I, I + 1)) / CM(I, I + 1)
B(I) = B(I) + (1 - TE) * MULT3 * (Y(I + 1) - Y(I))
1234 CONTINUE
c surco abierto (KT = 0) o cerrado (KT = 1)
c IF (KT.EQ.0) GOTO 1240
IF (QZZ(N-NS).EQ.SM) GOTO 1240
B(N - 1) = B(N - 1) - (1 - TE) * MULT3 * (Y(N) - Y(N - 1))
C SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES
1240 E(1) = A(1, 1)
F(1) = B(1)
L = N - 1
DO 1250 I = 2, L
E(I) = A(I, I) - (A(I, I - 1) * A(I - 1, I)) / E(I - 1)
F(I) = B(I) - (a(I, I - 1) * F(I - 1)) / E(I - 1)
1250 CONTINUE Y(L) = F(L) / E(L)
DO 1260 I = L - 1, 1, -1
Y(I) = F(I) / E(I) - (A(I, I + 1) / E(I)) * Y(I + 1)
1260 CONTINUE
C GASTOS PROMEDIO
DO 1600 J = 1, N - 1
QM(J, J + 1) = C(J,J+1) + ABS(A(J,J+1)) * (Y(J) - Y(J + 1))
Q(J + 1) = (QM(J, J + 1) - (1 - FI) * Q(J)) / FI
1600 CONTINUE
C BORRA A, B, E, F
DO 1650 I = 1, N
DO 1640 J = 1, N
A(I, J) = 0
1640 CONTINUE
B(I) = 0
E(I) = 0
F(I) = 0
1650 CONTINUE
IF (QZZ(N-NS).GT.SM) GOTO 1730
C gasto de salida
QSAL = Q(N)
C condicion de frontera aguas abajo
1670 RR1 = (QSAL * QSAL) / 9.81
RR2 = SM2 / (SM1 * SM1)
RR3 = 1 / (2 * SM2 + 1)
Y(N) = (RR1 * RR2) ** RR3
C gastos y laminas de infiltracion
1730 DO 1740 I = 2, N - NS

```

```

P(I) = H(I) * (TE * Y(I) + (1 - TE) * YY(I))
QZZ(I) = QZZ(I) + P(I) * DT
1740 CONTINUE
IF (TL.LT.0) GOTO 1800
IF (TP.LT.TM) GOTO 1800  C ----- impresión cada DT -----
WRITE(*,*) 't=',TI/60,'min',' Qe=', (Q(1) - QP) * 1000, 'l/s'
WRITE(*,*) 'Z(', N-NS,')=',((QZZ(N-NS) - SM) / (DX * DS)) * 100
IF (TCC(N-NS).EQ.0) GOTO 1750
WRITE(*,*) ' Y(', N - NS,')=', Y(N - NS) * 100
GOTO 1800
1750 WRITE(*,*) 'Y(', N - NS, ')= 0.0 cm'
C -----
1800 IF (TI.LE.0) GOTO 1810
QQE = QQE + (Q(1) - QP) * DT
IF (QZZ(N-NS).LE.SM) GOTO 1810
RG = RR
cc IF (TCC(T2N).GT.0) RG = 0.25 * RR
cc IF (TCC(N-NS).GT.0) RG = RR
cc IF (TCC(T3N).GT.0) SH = 1.05 * SR
cc IF (TCC(T4N).GT.0) SH = 1.10 * SR
cc IF (TCC(T5N).GT.0) SH = 1.18 * SR
ccc IF (TCC(T6N).GT.0) SH = 1.30 * SR
cc IF (TCC(T3N).GT.0) RG = 1.50 * RR
cc IF (TCC(T4N).GT.0) RG = 1.70 * RR
cc IF (TCC(T5N).GT.0) RG = 1.75 * RR
cc IF (TCC(T6N).GT.0) RG = 1.85 * RR
1801 IF (TM.EQ.TD) VF = QQE
ccc IF (KT.EQ.0) GOTO 1810
c IF (KT.EQ.0) GOTO 1810
IF (QZZ(N-NS).GT.SM) GOTO 1810
1802 QQS = QQS + (Q(N) - QP) * DT
1810 DO 1812 I = 1, N-NS
CZZ(I) = QZZ(I)
1812 CONTINUE
IF (QZZ(N-NS).LE.ZL) GOTO 1820
DO 1814 I = 2, N-(NS+1)
IF (CZZ(I).LE.CZZ(I+1)) CZZ(I + 1) = CZZ(I)
RZ = CZZ(I + 1)
1814 CONTINUE
1820 IF (TM.LT.TD) GOTO 2930
ccc2925 IF (Y(N-NS).LE.3*YN) GOTO 2940
cc (en ocasiones el factor de YN puede ser mayor que 1.0)
2925 IF (TM.GT.TRC*TD) GOTO 2940
cc (en algunas ocasiones conviene emplear TRC,
cc pero debe asignarse un valor al principio o agregar a los datos)
2930 IF (TM.GT.1800) GOTO 4000
2935 CONTINUE
2940 VZ = 0
2941 DO 2942 I = 2, N-NS
VZ = VZ + QZZ(I) - SM

```

```

2942 CONTINUE
c -----
ZMIN = RZ - SM
ZP = VZ / (N-(NS+1))
HT = ZMIN / ZP
OPEN(2,FILE='INFIL.XLS')
DO 3330 I = 2, N-NS
WRITE (2,*) (I-1)*DX, -((QZZ(I) - SM) / (DX * DS)) * 100
3330 CONTINUE
c -----
DO 2944 I = 2, N-NS
SZP = SZP + ABS((QZZ(I) - SM) - ZP)
2944 CONTINUE
CU = 1 - SZP / ((N-NS) * ZP)  ZL = ZL / (DX * DS)
ZP = ZP / (DX * DS)
ZM = ZMIN / (DX * DS)
SM = SM / (DX * DS)
SH = SH / (DX * DS)
LZD = ZM * LS * DS
c HT = LZD / VZ
TF = TI / 60
2950 WRITE(*,*)
GP = (QT-QP)*1000
S0 = S0*100
YMY = YMX*100  ZF = ZM*100
TA=(TCC(N-NS)+TCC(1))/60
IF (FR.GT.3) CP = FR
IF (FR.GT.3) RIG2 = (TCC(RIG1)+TCC(1))/60
IF (CP.EQ.2) RIG2 = (TCC(RIG1)+TCC(1))/60
2960 OPEN(3,FILE='RICIG.RES')
cc WRITE (3,*) ' Programa RICIG'
cc WRITE (3,*) ' Datos principales:'
WRITE (3,*) 'L=',LS, ' Q=',GP, ' S=',S0, ' K=',KF
WRITE (3,*) 'n=',RG, ' w=',SW, ' h=',HS, ' Dt=',DT
WRITE (3,*) SM1,SM2,RO1,RO2,PS,DS,QP*1000,N30,' RICIGgto'
cc WRITE (3,*) ' Resultados:'
WRITE (3,*)
WRITE (3,*) 'Ef=',HT, ' Ym=',YMY, ' Zm=',ZF
WRITE (3,*) 'Vz=',VZ, ' Ve=',QQE, ' Va=',LZD, ' Er=',VZ/QQE
WRITE (3,*) 'ta=',TA, ' Tr=',TD, ' Tf=',TF
WRITE (3,*) 'R1=',RIG1/N30,' R2=',RIG2,' IR=',CP
OPEN(4,FILE='CAVAN.XLS')  DO 3350 I = 2, N-NS
WRITE (4,*) (I-1)*DX, TCC(I)/60
3350 CONTINUE
4000 END

```

- c Nomenclatura de resultados:
- c E_f = eficiencia de aplicación
- c y_m = tirante máximo aguas abajo (cm)
- c Z_m = dosis de riego (cm)
- c V_z = volumen infiltrado (m³)
- c V_e = volumen de ingreso (m³)
- c V_a = volumen aprovechable (m³)
- c t_a = tiempo de avance (min)
- c T_r = tiempo de riego (min) c T_f = tiempo final (min)
- c R_1 = número de tramo para el incremento de gasto
- c R_2 = número de tramo para reducción de gasto
- c IR = indicador de tipo de riego c Observaciones: c En riego con incremento de gasto, R_2 es el tiempo del incremento.
- c En riego intermitente, R_2 es el ciclo de activación.
- c El tiempo del incremento de gasto y los ciclos iguales
- c del riego intermitente también pueden verse en pantalla

BIBLIOGRAFÍA

Alexander-Frezieres, J (2001). "Conservación de la infraestructura hidrológica en las unidades de riego en México". XI Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, Guanajuato, México.

COMISION NACIONAL DEL AGUA. (2003). "Estadísticas del Agua en México".

C. N. A. (2001-2006). "Programa Nacional Hidráulico".

COMISION NACIONAL DEL AGUA (2002). "Tecnificación del riego parcelario en el DR-005, Delicias, Chihuahua". México.

Criddle, W D, Davis S, Piar, C H and Shockley, D G (1956). "Methods for evaluating irrigation system agricultural hanbook No. 82. Soil conservation service, united states departament of agriculture". Washington, USA.

Cuenca, R H (1989). "Irrigation System design". Prentice Hall.

Enciso, J, Herrera, J C, Peña, E (2002). "Manual para planificar la tecnificación del riego parcelario". IMTA, México.

Fereres, E, F Orgaz y F J Villalobos (1993). "Water use efficiency in sustainable Agricultural systems". p. 83-89. In D R Buxton, R Shibles, R A Fosberg, B L Blad, K H Asay, G M Pulsen and R F Wilson (ed.). International Crop Science Society of American Inc. Madison, Wisconsin, USA.

Fuentes, J L, (2003). "Técnicas de Riego". Editorial Mundi-Prensa, Madrid. España.

Gurovich, L A (1997). "Riego superficial tecnificado". Ediciones Universidad Católica de Chile.

Hervé-Plusquel, L (1990). "Mejoramiento de la operación de los sistemas de riego por gravedad". CNA. IMTA. Serie didáctica 9.

Jensen, M E (1980). "Design and operation of Farm Irrigation Systems". American Society of Agricultural Engineers.

Lambe William T. (2001). "Mecánica de suelos". Editorial Limusa. Méx.

Martínez, E R (1980). "Metodologías de riego en surcos con reducción del gasto". Tesis de maestra en ciencias. Colegio de postgraduados. Centro de hidrocencias. Chapingo. México.

Montiel-Gutierrez, M A (2003). "Estudio sobre la eficiencia de aplicación en el Distrito de Riego 038", Río Mayo, Sonora XII Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, Zacatecas, México.

Orson W, I y Vaughn, H (1975). "Principios y aplicaciones del riego". Editorial reverté, 2^a Edición.

Paz -Soldan, G (2005). "Agua y asentamientos humanos". CICM. Ingeniería Civil. Foro Latinoamericano y del Caribe.

Peña, E, Montiel, M A (2002). "Manual práctico de fertirriego". IMTA, México.

Rodríguez, M G (2003). "Evaluación de la modalidad de riego intermitente para el cultivo de la cebolla". Centro Universitario José Martí, Sancti Spiritus, Cuba.

Rojas, B (1992). "El riego por surcos". Folleto 16674, México.

Suárez, M A (1995). "Optimización de la tecnificación del riego parcelario". Tesis de maestría, DEPFI, UNAM.

Vázquez, E (2001). "Diseño de riego con incremento de gasto en surcos cerrados". Ingeniería del agua, Vol. 8 No. 3. España.

Vázquez, E (1996). "Formulación de un Criterio para Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos, Incluyendo el Método de Corte Posterior". Tesis doctoral, DEPFI, UNAM.

Vázquez, E y J Gracia (1998). "Calibración de parámetros de infiltración y rugosidad con un modelo para riego con surcos cerrados". Ingeniería del agua, Vol. 5, No. 3. España.

Vázquez-Fernández E, López-Téllez P y Chagoya-Amador B (2005). "Comparison of Water Distribution Uniformities between Increased-discharge and Continuous-flow Irrigations in blocked-end Furrows". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 131, No. 4, ASCE.