

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO “

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



PROGRAMA PARA CALCULAR DEMANDAS DE AGUA Y CALENDARIZAR
EL RIEGO DE LOS CULTIVOS

POR:

MIGUEL SERVIN PALESTINA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO

DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México.

Diciembre 2007.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO “

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

PROGRAMA PARA CALCULAR DEMANDAS DE AGUA Y CALENDARIZAR
EL RIEGO DE LOS CULTIVOS

POR:

MIGUEL SERVIN PALESTINA

T E S I S

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR, COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

ASESOR PRINCIPAL:

M.C. ABEL ROMÁN LÒPEZ

ASESOR:

PH. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

ASESOR:

PH. D. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA

ASESOR:

M.C. ERNESTO LUNA DÁVILA

M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE 2007.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO “

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS DEL C. MIGUEL SERVIN PALESTINA QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

PRESIDENTE:

M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

VOCAL:

PH. D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

VOCAL:

PH. D. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA

VOCAL SUPLENTE:

M.C. ERNESTO LUNA DÁVILA

M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE 2007.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Pomposa y Genaro por su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos mas grandes de la vida, por lo cual les viviré eternamente agradecido.

A MI HIJO:

Tristan Miguel por ser mi más grande motivación para salir adelante y cumplir todas mis metas.

A JESSICA:

Por ser una gran mujer, la cual siempre esta conmigo en los momentos mas difíciles de mi vida, por todo su amor y cariño

A MIS HERMANOS:

Alfredo y Genaro por tener la confianza en mí y brindarme su apoyo incondicional.

A MIS TIOS:

Gerardo e Isidra por darme su apoyo económico y moral para dar un paso más en mi vida.

A MIS SUEGROS:

Amelia y Horacio por haberme dado su apoyo económico y moral para lograr esta meta tan importante en mi vida.

A MIS COMPADRES:

Vane y Julio por su apoyo económico y moral para salir adelante.

A MIS AMIGOS:

Neri y Mario por haberme dado su apoyo a lo largo de la carrera y darme su lealtad y confianza.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS:

Por haberme dado salud, paciencia y brindado muchas oportunidades en esta vida.

A MI ALMA TERRA MATER:

Por brindarme los conocimientos necesarios para formarme como profesionalista. Ser alumno egresado de la **UAAAN-UL** es un privilegio y una gran satisfacción por eso y más.

Mis más sinceros agradecimientos.

Al Ph. D. Ernesto Alonso Catalán Valencia por su disposición de haberme asesorado en este trabajo de tesis tan importante para lograr esta meta.

Al M. C. Abel Román López por haber compartido sus conocimientos y apoyarme a lo largo de mi carrera y por depositar la confianza en mí

Al M. C. Jorge Luis Villalobos Romero por ver sido mi tutor, amigo y transmitir sus conocimientos y estoy muy agradecido por haber confiado en mí.

A mis maestros: Por la colaboración que contribuyó a mi formación como profesionalista y como persona.

A mis compañeros: Por todos los momentos que pasamos juntos, por la unidad que siempre nos caracterizó y por los buenos recuerdos que llevo de todos ustedes.

Agradezco a todas aquellas personas contribuyentes y a quienes participaron para que este trabajo de investigación llegara a término y sea pauta de próximas investigaciones.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

El presente trabajo se realizó en su totalidad en las instalaciones del Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua – Suelo – Planta – Atmósfera (CENID – RASPA), del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP), de Gómez Palacio, Durango, bajo la dirección y asesoría del Ph. D. Ernesto Alonso Catalán Valencia. Forma parte del proyecto “Sistema experto en red para el uso eficiente del agua en los distritos de riego” financiado por el INIFAP.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México.....	3
Figura 2. Curva de retención hídrica (A: arenoso; B: franco; C: arcilla)	10
Figura 3. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.....	15
Figura 4. Curva generalizada del coeficiente de cultivo Kc.....	20
Figura 5. Localización del CENID RASPA INIFAP.....	23
Figura 6. Pantalla de presentación.....	25
Figura 7. Pantalla de información general.....	26
Figura 8. Primera opción para los datos del suelo.....	28
Figura 9. Segunda opción para los datos del suelo.....	29
Figura 10. Tercera opción para los datos del suelo.....	30
Figura 11. Pantalla de captura de datos número tres.....	31
Figura 12. Menú de resultados.....	32
Figura 13. Calendario de riegos del algodónero.....	33
Figura 14. Componentes del balance del agua en el suelo.....	33
Figura 15. Consumo de agua por el cultivo a través de su ciclo vegetativo.	35
Figura 16. Datos acumulados del consumo de agua y la precipitación.....	35
Figura 17. Evolución de la humedad aprovechable entre los riegos.	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de la textura del suelo según USDA.....	7
Cuadro 2. Valores aproximados de la porosidad en diferentes tipos de suelo....	8
Cuadro 3. Constantes de humedad por tipo de suelo.	14
Cuadro 4. Funciones Kc para diversos cultivos.....	21
Cuadro 5. Distritos de riego considerados por el programa.	27
Cuadro 6. Cultivos incluidos en el programa.....	28
Cuadro 7. Clasificación de los suelos por textura (USDA, 1952).	29

RESUMEN

La programación del riego, es decir, la técnica consistente en determinar la cantidad de agua y el momento en que han de regarse los cultivos es un instrumento fundamental para lograr un uso eficiente del agua. Regularmente se realiza sin soporte técnico con base únicamente en la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un programa de cómputo para que los usuarios de los distritos de riego estimen las demandas de agua de sus cultivos y programen sus riegos. El programa resuelve el balance de agua en el suelo mediante la estimación previa de cada uno de sus componentes. Fue codificado en el lenguaje computacional DELPHI 6.0 y permite estimar el consumo de agua a través del tiempo, así como el calendario de riegos de un cultivo a escoger de un total de 62 cultivos distintos de acuerdo al clima de cada localidad o distrito de riego, al tipo de cultivo, de suelo, y al manejo del riego propuesto por el usuario. Es una versión independiente para instalarse en cualquier computadora personal que se derivó de la versión original instalada en la página WEB del INIFAP (<http://www.inifap.gob.mx>) para ejecutarse en línea a través del Internet. Los calendarios de riego proporcionados por el programa deben considerarse como una primera aproximación debido a que reflejan los efectos del clima promedio de 30 años, por lo cual deben ajustarse de acuerdo a las condiciones actuales del clima.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
AGRADECIMIENTO ESPECIAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
RESUMEN	IX
CONTENIDO.....	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS.....	2
IV. HIPÓTESIS.....	2
V. REVISIÓN DE LITERATURA	3
5.1. EL RIEGO EN MÉXICO	3
5.2. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	4
5.2.1. Programación del riego con parámetros climáticos.....	4
5.2.2. Programación en función de la humedad del suelo	5
5.2.3. Programación en función de indicadores de estrés hídrico de los cultivos	5
5.3. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO.....	5
5.4. EL AGUA EN EL SUELO	6
5.4.1. Propiedades del suelo que afectan la retención de agua.....	6
5.4.1.1. Textura.....	6
5.4.1.2. Estructura.....	7
5.4.1.3. Porosidad.....	8
5.4.2. Contenido de agua en el suelo	9
5.4.3. Estado energético del agua en el suelo	9
5.4.4. Retención de agua en el suelo.....	10
5.4.5. Medición del contenido y el potencial de agua en el suelo	10
5.4.6. Constantes de humedad del suelo.....	12
5.4.7. Humedad aprovechable	14
5.4.8. Abatimiento de humedad aprovechable como criterio de riego ...	15
5.5 EL FLUJO DE AGUA HACIA LA ATMÓSFERA	16
5.5.1. Evaporación	16
5.5.2. Transpiración	16
5.5.3 Evapotranspiración	17
5.6. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	18
5.7. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.....	20
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	23
6.1 UBICACIÓN DEL ESTUDIO	23
6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.....	23
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
VIII. CONCLUSIONES.....	38
IX. LITERATURA CITADA.....	39

I. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola consume más del 80 por ciento del agua disponible a nivel mundial. En América este valor es de 60 por ciento, donde los sectores doméstico e industrial consumen el 25 y 15 por ciento respectivamente (Fourth World Water Forum, 2006). En México los porcentajes correspondientes son 77, 17 y seis, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego en las que la eficiencia global es menor al 50 por ciento (Sánchez y Catalán, 2006).

La menor disponibilidad de agua observada en las presas del país, producto de la incertidumbre climática en los últimos años, ha traído como consecuencia una sobreexplotación de los acuíferos subterráneos. Así, de los 653 acuíferos del país, 102 se encuentran sobre explotados con tasas de abatimiento anual de hasta 3.5 metros por año (CNA, 2004; Sánchez, 2005). Esta situación clama por el establecimiento de estrategias para ejercer un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias destaca la tecnificación del riego, la cual implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos para ejercer mayor control en la ejecución de esta importante práctica agrícola.

La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: cuánto cuándo y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua. La presente publicación se centra en las dos primeras interrogantes, es decir, en la cuantificación de las demandas hídricas de los cultivos y la determinación del momento oportuno para la aplicación de los riegos. Las respuestas a estas preguntas constituyen lo que se conoce como el programa o calendario de riegos.

La tecnificación del riego parcelario implica tanto el refinamiento de técnicas como la transferencia y adopción de estas técnicas por el usuario. La generación y refinamiento de técnicas es el aspecto en el que se han tenido los avances más importantes. Sin embargo, la transferencia y adopción de estas técnicas es la etapa donde han ocurrido los mayores rezagos.

La programación de los riegos de los cultivos normalmente se ejecuta sin soporte técnico alguno con base únicamente a la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada.

II. JUSTIFICACIÓN

El aumento de la conciencia colectiva de la importancia del agua como vehículo del desarrollo de todas las actividades económicas y sociales, junto con la creciente demanda de este recurso para el resto de las actividades de la sociedad y unas exigencias mayores de la calidad medio ambiental por parte de los ciudadanos, hace que el riego sea señalado como una de las principales causas de desperdicio de este recurso.

Dentro de este entorno, muchas veces se olvida cuales son las funciones del riego en zonas con recursos hídricos escasos y una irregular distribución de las lluvias a través del tiempo. En México, se ha de tener presente que normalmente en la mayor parte de las zonas agrícolas, la aportación del agua a través de las precipitaciones es muy inferior al consumo potencial de este elemento que tienen los cultivos. La magnitud de estas deficiencias justifica que el agua sea el factor determinante de la producción agrícola y de toda la industria agroalimentaria que de ella depende, representando un factor básico en el reequilibrio del territorio.

Esta importancia tanto económica como social, no excluye que la agricultura de regadío haya de hacer todos los esfuerzos necesarios en mejorar la eficiencia en el uso del agua y, de esta manera, dar respuesta a planteamientos más globales de los recursos hídricos y a la creciente demanda de agua para finalidades no agrícolas.

III. OBJETIVOS

-Colaborar en el desarrollo de un programa computacional para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos.

-Proveer de información básica a usuarios del riego, técnicos e investigadores sobre las demandas de agua y programación del riego de los cultivos en los distritos de riego en el país.

IV. HIPÓTESIS

Mediante la aplicación de los principios físicos que determinan el balance de agua en el suelo es posible construir un algoritmo y un programa computacional para estimar el consumo de agua y programar el riego de los cultivos.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. El riego en México

En México la agricultura de riego se practica en los distritos y unidades de riego que cuentan con la infraestructura necesaria para el aprovechamiento de los recursos hídricos. Existen 80 distritos que difieren por sus niveles de tecnificación y aportación al producto interno bruto. Las zonas del país donde se ubican los distritos de riego presentan características contrastantes; por ejemplo, en la zona norte que cubre más de la mitad del territorio, el escurrimiento es de sólo 20 por ciento. Sin embargo, en esta porción del territorio nacional vive el 76 por ciento de la población total, están establecidos el 70 por ciento de las industrias y se localiza el 40 por ciento de las tierras arables. En contraste, en el sureste, que ocupa el 24 por ciento del territorio, siendo poca la industria, se tiene el 67 por ciento del escurrimiento.

Los problemas asociados con la disponibilidad y aprovechamiento del agua afectan tanto a la agricultura de riego como a la de temporal. De los 6.3 millones de hectáreas bajo riego, sólo 450 mil cuentan con alta tecnificación y el resto opera bajo métodos tradicionales de irrigación con eficiencias no mayores al 50 por ciento (Sánchez *et al.*, 2002). Por su parte, el 68 por ciento de los 14 millones de hectáreas de temporal operan bajo condiciones de riesgo debido a la incertidumbre climática. Otro problema añadido a la disponibilidad del agua es la salinidad de los suelos, habiendo en el país 400 mil hectáreas bajo esta condición (Sánchez, 2005). La Figura 1 señala la distribución del déficit evapotranspirativo en el territorio nacional.

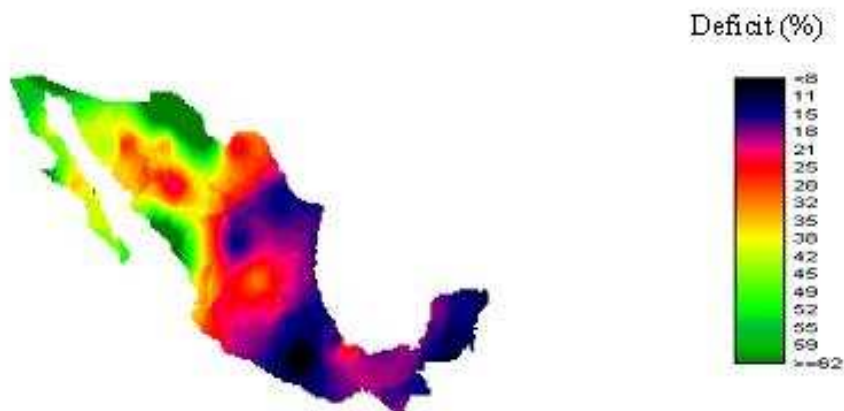


Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México. Fuente: Sánchez *et al.* (2006).

5.2. Programación del riego

Es una técnica que permite determinar el nivel óptimo de riego de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, cultivo, clima y manejo agronómico (Ortega y Acevedo, 1999). La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso.

Toda programación de riego responde a dos preguntas fundamentales: ¿Cuánto y cuándo regar?, es decir, debe permitir conocer las dosis y frecuencias de riego. Salvo en algunas instalaciones en las que estas decisiones se toman en forma automática, lo normal es que se haga una programación anticipada, según la experiencia y conocimiento del agricultor, suponiendo que el año se comportará como el año medio. Después a lo largo de la campaña, los parámetros de riego se van corrigiendo en función de información actual: factores climáticos, desarrollo del cultivo, disponibilidad de agua (Maldonado, 2000).

En la programación de riego la tendencia es que cada vez intervengan menos factores subjetivos y se logre mayor eficiencia en el manejo del agua. Siguiendo esta tendencia se han desarrollado distintos métodos para programar los riegos, los cuales pueden agruparse en tres categorías: parámetros climáticos, medidas de humedad del suelo y medidas de estrés hídrico de las plantas (FAO, 1989). En el orden en que se han citado, los métodos van de menos a más rigurosos. Desgraciadamente, la facilidad de aplicación de los métodos va en orden inverso.

5.2.1. Programación del riego con parámetros climáticos

Este método consiste en realizar un balance hídrico en el perfil del suelo, tomando en cuenta, por una parte, las aportaciones de agua del riego y la lluvia, y por otra, la demanda evapotranspirativa del cultivo. La parte

fundamental del cálculo es la determinación de la evapotranspiración con datos climáticos.

5.2.2. Programación en función de la humedad del suelo

Este método tiene la ventaja, con respecto al método de parámetros climáticos, que incluye los posibles aportes del agua almacenada en el suelo, además que elimina los errores en el cálculo de ET (Evapotranspiración), en la elección del Kc (Coeficiente de cultivo). En efecto, si el suelo está seco es que se está regando poco y si está demasiado húmedo, se está regando en exceso.

5.2.3. Programación en función de indicadores de estrés hídrico de los cultivos

Este método se basa en mediciones micro meteorológicas y de temperatura del follaje. Se fundamenta también en el uso de indicadores del estrés hídrico en las plantas como el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y los grados día estrés (SDD). Sin duda es un procedimiento con un gran potencial, ya que la planta realiza una integración de todos los factores que determinan sus necesidades de agua. Sin embargo, requiere de equipo de medición especializado.

5.3. Balance de agua en el suelo

Para un volumen dado de suelo durante un cierto periodo de tiempo, la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua perdida, es igual a la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) en dicho volumen de suelo y puede expresarse como:

$$V_{ent} - V_{sal} = \Delta\theta \quad (1)$$

Donde V_{ent} es el volumen de agua que entra al suelo y V_{sal} el que sale. Cuando las entradas exceden las salidas, la variación de contenido de humedad es positiva y en caso contrario, negativa.

Las ganancias o entradas de agua más importantes son la precipitación (P) (incluidas condensaciones por rocío o encharcamiento) y el riego (R).

$$V_{ent} = P + R \quad (2)$$

Las pérdidas de agua se deben a los procesos de escorrentía (E), drenaje (D) y a la evapotranspiración (ET) o consumo de agua por parte de las plantas.

$$V_{sal} = E + D + ET_r \quad (3)$$

La escorrentía supone una pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia otros lugares y en ocasiones, puede suponer una ganancia de agua si ésta fluye hacia nuestro volumen de suelo desde zonas adyacentes. El valor del drenaje por percolación profunda hacia el exterior de nuestro volumen de suelo, aunque normalmente es positivo, puede tomar signo negativo en el caso que hubiera ascenso capilar de agua desde un nivel freático somero. Por su parte, la evapotranspiración representa la suma de la evaporación directa desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación.

Cuando se realiza el balance de agua del suelo, suele ignorarse el agua de lluvia o riego interceptada por la vegetación, así como el agua depositada en charcos sobre el terreno, por ser fenómenos muy efímeros y además porque esa agua acaba normalmente infiltrándose en el terreno o evaporándose. Así pues, el balance de agua para un volumen dado de suelo, en cualquier escala, pasando desde plantas individuales hasta cuencas hidrológicas, puede representarse como:

$$\Delta\theta = P + R - E - D - ET \quad (4)$$

5.4. El agua en el suelo

5.4.1. Propiedades del suelo que afectan la retención de agua

El suelo desde un punto de vista físico, puede considerarse como una mezcla porosa de partículas minerales, orgánicas, aire y agua con sustancias en disolución. En él las partículas minerales y orgánicas forman la matriz sólida del conjunto, mientras que la solución y el aire ocupan los huecos que deja la porción sólida. Muchas son las propiedades del suelo que afectan su capacidad para retener el agua, destacando entre todas, la textura, estructura y porosidad.

5.4.1.1. Textura

La textura del suelo hace referencia a las porciones relativas de los diversos tamaños en que se presentan sus partículas minerales, como son arena, limo y arcilla, con independencia de su composición química. Existen

diversos sistemas para clasificar la textura del suelo a partir del diámetro de sus partículas. En el Cuadro 1 se describe la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1952).

Cuadro 1. Clasificación de la textura del suelo según USDA.

Nombre de la partícula	Límites de diámetro en mm
Arena	0.05-2.0
Arena muy Gruesa	1.00-2.0
Arena Gruesa	0.5-1.0
Arena mediana	0.25-0.5
Arena Fina	0.10-0.25
Arena Muy fina	0.05-0.10
Limo	0.002-0.05
Arcilla	Menor que 0.002

5.4.1.2. Estructura

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados. La circulación del agua en el suelo varía notablemente con la estructura.

El proceso de agregación del suelo puede asumir diferentes modalidades, lo que da por resultado diferentes tipos de estructura del suelo. El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales y generalmente se reconocen cuatro tipos:

1. Estructura granular y migajosa
2. Estructura en bloques o bloques subangulares
3. Estructura prismática y columnar
4. Estructura laminar

5.4.1.3. Porosidad

Como consecuencia de la textura y estructura del suelo tenemos su porosidad, es decir su sistema de espacios vacíos o poros. Los poros del suelo se distinguen en macroscópicos y microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, por lo cual el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los terrenos arenosos son ricos en macroporos, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua. La porosidad (P) puede expresarse con la siguiente ecuación (Costantinidis, 1970).

$$P = \frac{V_e}{V} \quad (5)$$

Donde V_e es el volumen de espacios vacíos, comprendiendo los que están ocupados por gases o líquidos, y V es el volumen total de la muestra, comprendiendo sólidos, líquidos y gases. También puede estimarse a partir de la densidad aparente (D_a) y la densidad real del suelo (D_r):

$$P = \frac{D_r - D_a}{D_r} \quad (6)$$

La porosidad varía de acuerdo a tipo de suelo como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores aproximados de la porosidad en diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Porosidad (%)
Suelos ligeros	30-45
Suelos pesados	50-65
Suelos medios	45-55
Suelos turbosos	75-90

5.4.2. Contenido de agua en el suelo

El espacio poroso del suelo está, en condiciones normales, ocupado en parte por agua con sustancias disueltas (sales) y en otra parte por una mezcla de diversos gases (entre ellos vapor de agua) que se conoce como aire del suelo. El agua, como tal compuesto químico, se encuentra también formando parte de la estructura cristalina de algunos minerales de la fase sólida del suelo, pero tan fuertemente retenida que se requieren temperaturas muy altas para liberarla. A efectos prácticos se considera agua del suelo la que puede liberarse por desecación en una estufa a 105-110 °C hasta peso constante y se expresa generalmente en forma de porcentaje.

5.4.3. Estado energético del agua en el suelo

Desde el punto de vista de la producción agrícola, además del contenido de agua del suelo, es imprescindible conocer también la energía con la que esa agua está retenida, ya que el movimiento de la misma, hacia la atmósfera y hacia otras zonas del suelo son procesos regulados por diferencia de estados energéticos.

Sobre el agua del suelo actúan fuerzas muy variables y de muy diversa intensidad y dirección, creando diferencias de energía potencial entre unos puntos y otros y por consiguiente el movimiento de agua entre ellos se da de mayor a menor potencial.

El potencial del agua en el suelo resulta de la suma algebraica de cuatro componentes: el potencial osmótico (ψ_s), el de presión, el mátrico (ψ_m) y el gravitacional (ψ_g) (Jury, *et al.*, 1991).

El potencial osmótico (ψ_s) está determinado por las sustancias presentes en la solución del suelo que disminuyen el potencial químico del agua.

El potencial mátrico (ψ_m) se relaciona con la matriz sólida del suelo. Las interfases sólido-líquido constituyen fuerzas de atracción que restan potencial químico al agua.

Por último, la componente gravitacional hace referencia a la energía potencial gravitacional que afecta al potencial del agua.

Tanto el potencial osmótico, como el mátrico son siempre negativos. El agua de una solución, por diluida que sea, tendrá siempre un potencial químico

inferior al del agua pura a igual temperatura y presión. Lo mismo vale para el agua retenida en interfases con respecto al agua libre. Por su parte, el potencial de presión es positivo.

5.4.4. Retención de agua en el suelo

La cantidad de agua presente en el suelo a una tensión mátrica determinada varía considerablemente con el tipo de suelo. El contenido de agua es mayor cuando el suelo es de textura más fina y contiene mayor cantidad de materia orgánica que cuando es arenoso y su contenido de materia orgánica es menor (Figura 2).

5.4.5. Medición del contenido y el potencial de agua en el suelo

Existen diversos métodos e instrumentos para medir directa o indirectamente el contenido y el potencial de agua en el suelo. En el caso de estos últimos, lo que miden realmente es algún componente del potencial o la suma de varios de ellos. Enseguida se describen brevemente los más importantes.

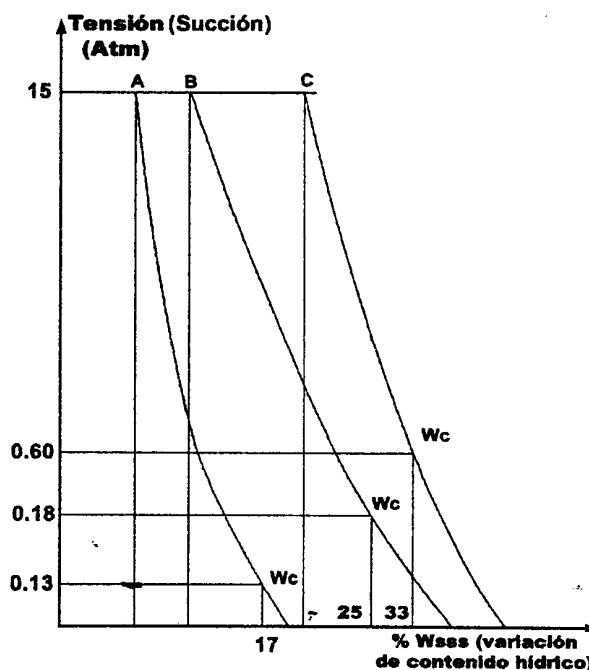


Figura 2. Curva de retención hídrica (A: arenoso; B: franco; C: arcilla)

Método Gravimétrico

Es el método más preciso para medir directamente el contenido de agua en el suelo, el cual se usa como referencia para calibrar otros métodos. Se basa en la colección de muestras y su secado en la estufa a 105 °C para

determinar, mediante diferencias de peso, el contenido de agua del suelo. Se utiliza poco por ser un método laborioso, destructivo y lento, ya que se necesitan 24 horas para secar completamente las muestras del suelo.

Sonda de neutrones

La sonda de neutrones es un instrumento para medir indirectamente el contenido de agua en el suelo. Se introduce en el suelo a la profundidad deseada y emite neutrones. Los neutrones se reflejan más o menos dependiendo del contenido de agua del suelo. Un receptor cuenta los neutrones reflejados y transforma la señal en contenido de agua. Su uso es limitado por el riesgo de contaminación y el exceso de regulaciones que implica el empleo de materiales radioactivos.

Reflectometría

La reflectometría se basa en la relación que existe entre el contenido de humedad del suelo y su constante dieléctrica. El agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la del suelo, por lo que la constante dieléctrica del suelo húmedo dependerá principalmente de su contenido de humedad. La constante dieléctrica del suelo se mide aplicando una onda electromagnética de alta frecuencia y midiendo la velocidad de propagación. A mayor humedad, menor será la velocidad de la onda.

Psicrómetros

El potencial del agua en un suelo se relaciona con la presión relativa de vapor de la atmósfera en equilibrio con él a través de la siguiente ecuación.

$$\psi = RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (7)$$

Donde Ψ es el potencial de agua en el suelo, R la constante universal de los gases, T la temperatura absoluta, P la presión de vapor de agua en el suelo y P_0 la presión de vapor de agua en el estado de referencia (agua libre). El valor P/P_0 (presión relativa de vapor) se mide con psicrómetros.

Tensiómetros

Son aparatos que miden la succión, tensión o fuerza que ejerce el suelo sobre el agua. A medida que el suelo pierde agua la succión aumenta, es decir, el suelo ejerce más fuerza sobre el agua retenida. Normalmente se instalan dos tensiómetros a distintas profundidades para medir gradientes hidráulicos y por tanto, conocer la dirección de los flujos de agua en el suelo.

Como la cápsula cerámica es permeable al agua y a las sales disueltas, el agua del interior de la sonda acaba adquiriendo la misma concentración salina de la solución del suelo. Por esta razón no sirve para medir el potencial osmótico, a menos que vaya equipada con algún tipo de sensor salino auxiliar.

Las medidas de tensión están limitadas a potenciales matriciales no menores a -1 bar. A mayores tensiones, el aire penetra en el interior de la sonda a través de la cápsula porosa y se rompe la continuidad de la columna líquida.

5.4.6. Constantes de humedad del suelo

Capacidad de campo

La capacidad de campo (θ_{cc}) de un suelo es usualmente descrita como el contenido de agua después que el drenaje de agua por flujo gravitacional es tan pequeño que llega a ser relativamente estable. Esta situación generalmente ocurre algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por lluvia o riego.

La capacidad de campo se determina simplemente vertiendo agua en la superficie del suelo y dejándola drenar por unos cuatro a 10 días (dependiendo del tipo de suelo), previniendo la evaporación de la superficie. Las muestras de suelo son luego recolectadas con barrena para su medición gravimétrica y el contenido de agua es expresado en bases volumétricas. Determinado de esta manera, el valor de capacidad de campo es reproducible si se tiene en cuenta no muestrear en zonas de transición. Debido a que la capacidad de campo es afectada por la estructura del suelo, las determinaciones de laboratorio no son siempre indicadores confiables del valor de campo.

Punto de marchitamiento permanente

El punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) es el contenido de agua del suelo que ocurre cuando la planta se marchita y no recupera su turgencia por más que se riegue.

Briggs y Shantz (1912) enfatizaron primero la importancia de esta constante de agua en el suelo, denominándola como coeficiente de marchitez. Ellos efectuaron mediciones en varios tipos de plantas y encontraron que todas se marchitaron en alrededor del mismo contenido de agua del suelo.

Richards y Wadleigh (1952) encontraron que la mayoría de las plantas cultivadas tienen potenciales osmóticos en el rango de -14 a -18 bares, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua en -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente.

Estimación indirecta de la función de retención y las constantes de humedad del suelo

La determinación de la función de retención es una tarea lenta y costosa, razón por la cual rara vez se dispone de dicha información. Es por esto que se han desarrollado algunos modelos para predecir la función de retención a partir de propiedades del suelo más fácilmente medibles y disponibles. El análisis de amplias bases de datos medidos en laboratorio y campo han permitido, en las últimas décadas, el establecimiento de relaciones funcionales denominadas "Pedotransfer functions" (PTF) para predecir la función de retención en función de datos básicos del suelo como la distribución de sus partículas por tamaño o textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente (Bouma, 1989).

Algunas funciones PTF, como las de Rawls y Brakensiek (1982) utilizadas en este estudio, estiman el contenido de humedad para ciertos potenciales mátricos predefinidos utilizando regresión múltiple, así como redes neuronales artificiales (Pachepsky *et al.*, 1996); otras estiman directamente los parámetros de la función de retención con regresión múltiple (Vereecken *et al.*, 1989; Minasny *et al.*, 1999) y redes neuronales artificiales (Pachepsky *et al.*, 1996; Schaap y Leij, 1998); un tercer grupo de funciones utilizan modelos conceptuales de la física del fenómeno de retención de agua (Ayra y Paris, 1981; Haverkamp y Parlange, 1986).

5.4.7. Humedad aprovechable

A la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) (entre -0.1 y -0.3 bars) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) (-15 bars) se le conoce como humedad aprovechable (HA). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})Pr \quad (8)$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en m^3 de agua por m^3 de suelo, HA y Pr en metros. El Cuadro 3 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} y HA para cada tipo de textura y a un metro de profundidad del suelo, los cuales fueron derivados de Saxton *et al.* (1986). Como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa.

Cuadro 3. Constantes de humedad por tipo de suelo.

TEXTURA	θ_s	θ_{CC}	θ_{PMP}	HA
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	0.0714
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	0.0834
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	0.0782
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	0.1360
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	0.0952
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	0.1377
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	0.1707
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	0.1794
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	0.0914
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	0.1617
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	0.1232
Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	0.2192

5.4.8. Abatimiento de humedad aprovechable como criterio de riego

La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico (θ_c) que determina el grado de estrés hídrico máximo al que se somete el cultivo. Por lo regular, este valor se estima en la escala de la humedad aprovechable, donde θ_{PMP} y θ_{CC} representan el cero y 100 por ciento de HA respectivamente (Fig. 3). Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (9)$$

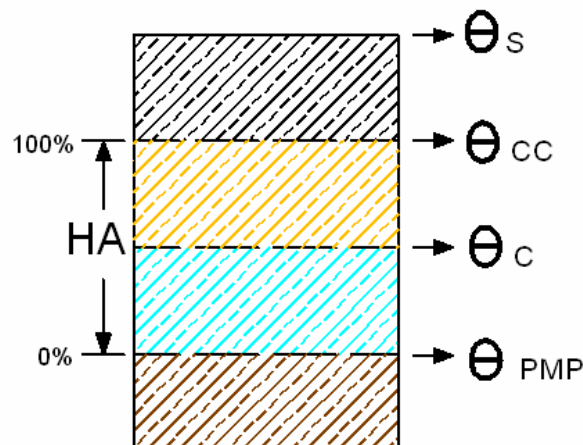


Figura 3. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.

Según la ecuación del balance de agua en el suelo (Ec. 4), el contenido de agua del suelo en un día particular, θ_i , se estima con base en el contenido de agua del día previo, θ_{i-1} , y el resto de los términos de la Ec. (4) estimados para el día actual, a excepción de la escorrentía, no considerada aquí:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_i - ET_i - D_i \quad (10)$$

Luego se compara θ_i con θ_c para decidir si se aplica un riego o no. Si θ_i es menor que θ_c , entonces el cultivo debe regarse el día siguiente, si no, se actualizan cada uno de los términos de la Ec. (4) para el día siguiente y se compara nuevamente θ_i con θ_c . La cantidad de agua por aplicar R , comúnmente denominada como lámina de riego (L_r), puede calcularse como el producto de H_a y FAM , o bien como:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_c) Pr \quad (11)$$

5.5 El flujo de agua hacia la atmósfera

5.5.1. Evaporación

La evaporación es el paso de moléculas de agua de la fase líquida a la fase gaseosa (vapor) y depende sobre todo de la temperatura del agua. También influye la salinidad y la curvatura de la superficie, es decir, la presión del agua. La condensación es el proceso contrario (paso de moléculas de agua en fase gaseosa a líquida) y depende de la presión parcial del vapor de agua. Cuando la presión de vapor en el aire es muy baja, la vaporización supera a la condensación y se produce una evaporación neta. Esto hace que aumente dicha presión de vapor, aumentando la condensación. Si no hay algún mecanismo que elimine vapor, su presión parcial seguirá aumentando hasta que la condensación iguale a la vaporización. En ese momento, el aire está saturado y a la presión de vapor correspondiente se le llama de saturación.

La evaporación consume una cantidad muy importante de energía. El calor latente de vaporización (λ : MJ kg⁻¹) es la energía requerida para pasar 1kg de agua de fase líquida a vapor y se calcula en función de la temperatura del agua (T: °C) como:

$$\lambda = 2501 - 0.002361 T \quad (12)$$

5.5.2. Transpiración

La mayor parte del agua evaporada por las plantas es agua que ha pasado a través de las mismas, absorbida por las raíces, pasando por los tejidos vasculares y saliendo por las hojas, a través de los estomas, aunque a veces también ocurre a través de la cutícula. Esta evaporación de agua a través de las plantas es denominada transpiración. El agua absorbida por las raíces cumple las siguientes funciones: incorporación a su estructura (1%), transporte de alimentos, eliminación de sales y refrigeración.

La transpiración es controlada por muchas variables ya que depende de algunos aspectos dinámicos de la actividad de la planta:

a) Las diferentes especies vegetales pueden transpirar cantidades muy diferentes de agua en función de la naturaleza de las aberturas de evaporación que tienen las hojas denominadas estomas, sobretodo por su tamaño, densidad, localización o exposición.

- b) La estación del año, que determina si las plantas tienen hojas y por cuánto tiempo.
- c) La hora del día, que altera el balance de la radiación, los ritmos de fotosíntesis y crecimiento de la planta, y la actividad de las estomas. Por la noche la transpiración es del orden del 5-10% de la tasa de transpiración diurna.
- d) El estado de crecimiento de la planta, dado que las plantas consumen mucha más agua en estado de crecimiento activo o periodos de construcción de biomasa, o cuando el sistema radicular ha alcanzado el máximo de expansión y eficiencia. Para ciertas especies vegetales el máximo de evapotranspiración tiene lugar cuando ha conseguido cubrir toda la superficie del suelo.
- e) Los factores meteorológicos también influyen en la apertura de las estomas, dándose la circunstancia de que con fuertes vientos, sobretodo si son cálidos, las estomas se cierran, como mecanismo para no perder grandes cantidades de agua. Por el contrario, en casos de gran humedad ambiental, las plantas pueden seguir eliminando agua incluso en forma líquida para permitir el movimiento de la savia.
- f) Las propiedades del suelo, por supuesto, también condicionan la cantidad de agua disponible para la planta, siendo un factor limitante a tener en consideración, de manera que, en función de la litología, las plantas van a ser capaces de extraer más o menos cantidad del agua retenida por el suelo

5.5.3 Evapotranspiración

El agua de riego se consume tanto por la evaporación que ocurre desde la superficie del suelo como la que ocurre por transpiración desde la superficie de las hojas y que ha sido previamente absorbida por las raíces de la planta. Ante la dificultad de medir por separado la evaporación y la transpiración, se utiliza el término evapotranspiración (ET) para referirse de manera conjunta a ambos tipos de flujo de agua (FAO, 1989).

La cantidad de agua consumida por un cultivo durante todo su ciclo se relaciona directamente con su rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1996). El valor de ET en un momento dado depende de factores climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento.

Enseguida se describe brevemente cómo afectan estos factores climatológicos a la evapotranspiración.

Radiación solar. Este término comprende la luz visible y otras formas de energía radiante (radiación infrarroja y ultravioleta). El principal efecto de la radiación solar sobre la evapotranspiración proviene de la influencia de la luz sobre la apertura y cierre de las estomas, ya que en la mayoría de las especies vegetales, las estomas por lo común, permanecen cerrados cuando desaparece la luz.

Humedad relativa. En general si otros factores permanecen constantes, cuando la presión de vapor es mayor, será más lenta la evapotranspiración. Si las estomas están abiertas, la difusión del vapor de agua de las hojas dependerá de la diferencia entre la presión de vapor de agua en los espacios intercelulares y la presión de vapor de la atmósfera exterior.

Temperatura. Influye en la velocidad con que se difunde el vapor de agua de las hojas a través de las estomas, en general cuanto más alta es la temperatura para un gradiente dado, más alta es la velocidad de difusión.

Viento. El efecto del viento sobre la evapotranspiración dependerá de las condiciones ambientales. Un aumento en la velocidad del viento, dentro de ciertos límites significa una mayor evapotranspiración, sin embargo, puede decirse que la evapotranspiración aumenta relativamente más, por los efectos de una brisa suave (0 a 3 km/hora), que por vientos de gran velocidad. Se ha observado que estos últimos retardan la evapotranspiración, probablemente debido al cierre de las estomas en tales condiciones. El efecto del viento puede ser indirecto sobre la evapotranspiración a través de la influencia que ejerce sobre la temperatura de las hojas.

5.6. Determinación de la evapotranspiración

Los métodos para calcular la evapotranspiración pueden clasificarse en métodos directos e indirectos. Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos como lisímetros, evapotranspirómetros y atmómetros. El del lisímetro es uno de los métodos de mayor precisión y resolución, aunque se trata de equipo costoso y poco disponible que se utiliza con fines de investigación para validar otros métodos.

Los métodos indirectos se basan en el uso de ecuaciones físico empíricas para calcular ET. El equipo requerido para medir directamente ET regularmente no se encuentra disponible y debe estimarse a partir de datos climáticos y del cultivo. Tales métodos varían en su precisión dependiendo del enfoque de aproximación y del tipo y número de variables involucradas.

Evapotranspiración de referencia, máxima y actual. Ante la dificultad que implica la caracterización aerodinámica de la cubierta vegetal de cada cultivo, un procedimiento común para estimar ET consiste en estimar primero la evapotranspiración de referencia (ET_r) y luego aplicar coeficientes adimensionales de cultivo y de suelo para estimar ET (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1989). La ET_r es la ET de un cultivo de referencia como el pasto o la alfalfa bien irrigado, sin restricción de humedad en el suelo:

$$ET = K_c * K_s * ET_r \quad (13)$$

$$K_c = \frac{ET}{ET_r} \quad (14)$$

Donde K_c es un coeficiente adimensional específico de cada cultivo que depende de su estado de desarrollo, por lo cual varía en el tiempo y expresa el grado de similitud entre la superficie vegetal del cultivo y la del cultivo de referencia. Sus valores se obtienen empíricamente a partir de datos experimentales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Annandale y Stockle, 1994).

Al producto ET_r*K_c se le conoce como evapotranspiración máxima (ET_{max}), es decir, la que tendría el cultivo bajo condiciones irrestrictas de humedad en el suelo. De manera similar, al producto ET_{max}*K_s se le conoce como evapotranspiración actual o real, donde el coeficiente K_s es un factor adimensional que restringe el consumo de agua máximo del cultivo debido al abatimiento de la humedad del suelo y a la resistencia al flujo de agua que éste provoca.

El coeficiente de cultivo K_c describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que van desarrollándose, desde la siembra hasta su madurez. Debido a las variaciones en las características del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c

cambia a través del ciclo vegetativo. La siguiente figura representa de manera simplificada dichos cambios.

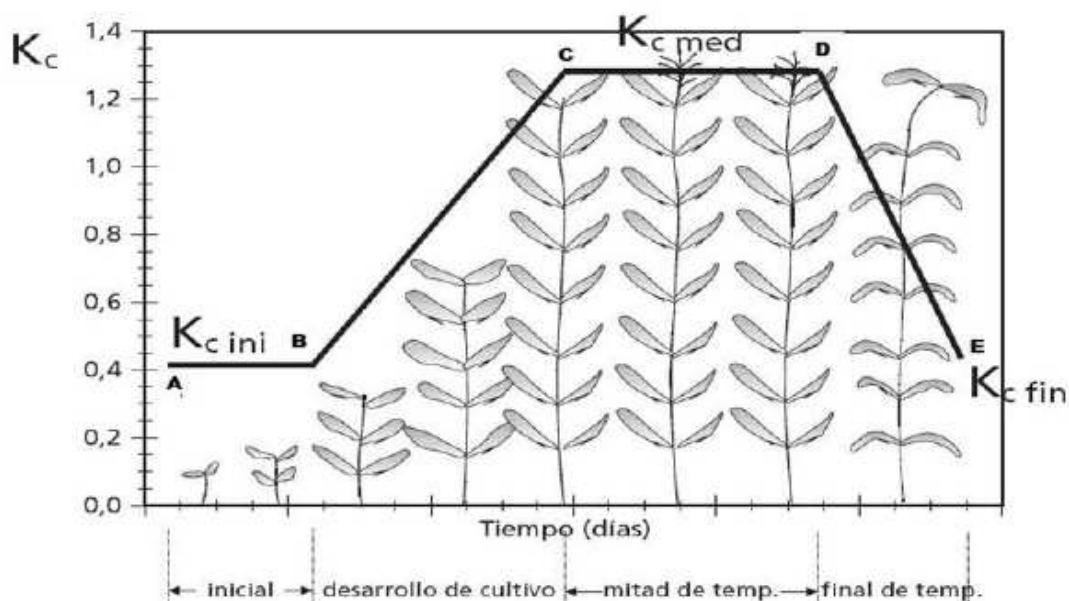


Figura 4. Curva generalizada del coeficiente de cultivo K_c . Fuente: FAO (1977).

La Figura 4 muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva K_c de un cultivo. Tres valores de K_c : $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$, así como la duración en días o como fracción del ciclo vegetativo total en los puntos B, C, y D. En el Cuadro 4 se presentan tales valores para varios cultivos, donde la duración del ciclo en los puntos B, C y D se expresan como fracciones acumuladas del ciclo vegetativo (FAO, 1977).

5.7. Determinación de la evapotranspiración de referencia

Existen algunos modelos para estimar la evapotranspiración de referencia (E_{Tr}) a partir de datos del cultivo como el índice de área foliar y datos climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento. Todos tratan de representar, con diferente grado de aproximación, los principios físicos que gobiernan el flujo evapotranspirativo (Jensen *et al.*, 1990).

La ecuación de Penman-Monteith. Uno de los métodos más completos y precisos para estimar E_{Tr} es la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1981), la cual resuelve el balance de energía y utiliza todas las variables del clima antes mencionadas:

$$\lambda ETr = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_a - e_d) r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (15)$$

Donde λETr es la tasa evapotranspirativa expresada como flujo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), Δ la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n la radiación neta incidente sobre la cubierta vegetal ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), G el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), ρ la densidad del aire (kg m^{-3}), c_p el calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_a la presión de vapor a saturación del aire correspondiente a la temperatura del aire actual (kPa), e_d la presión de vapor a saturación correspondiente a la temperatura del punto de rocío (kPa), λ la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), r_a la resistencia aerodinámica a la difusión de calor y vapor de agua (t m^{-1}), y r_c la resistencia estomática al flujo de vapor de agua (t m^{-1}).

Cuadro 4. Funciones Kc para diversos cultivos.

Cultivo	B	C	D	Kcini	Kcmed	Kcfin
Ajo	0.11	0.28	0.78	0.70	1.00	0.75
Algodonero	0.17	0.44	0.75	0.35	1.15	0.60
Arroz	0.20	0.40	0.80	0.50	1.15	0.50
Avena	0.19	0.44	0.81	0.40	1.05	0.40
Cacahuete	0.19	0.46	0.81	0.40	1.00	0.55
Calabaza	0.25	0.60	0.85	0.50	0.95	0.75
Cártamo	0.15	0.70	0.87	0.20	1.42	0.60
Cebada	0.19	0.44	0.81	0.40	1.10	0.25
Cebolla	0.11	0.28	0.78	0.70	1.00	0.75
Chile	0.19	0.44	0.81	0.60	1.05	0.60
Fresa	0.12	0.41	0.76	0.40	0.85	0.75
Frijol	0.18	0.45	0.82	0.40	1.10	0.55
Garbanzo	0.18	0.45	0.82	0.40	1.10	0.35
Girasol	0.19	0.46	0.81	0.40	1.00	0.35
Lechuga	0.29	0.67	0.90	0.70	1.00	0.95
Maíz	0.20	0.47	0.80	0.60	1.05	0.45
Melón	0.21	0.50	0.83	0.50	1.00	0.60
Papa	0.21	0.45	0.79	0.50	1.10	0.90
Pepino	0.19	0.46	0.85	0.50	1.00	0.80
Sandía	0.18	0.45	0.73	0.40	1.00	0.75
Sorgo	0.15	0.42	0.77	0.40	1.10	0.55
Soya	0.15	0.37	0.81	0.40	1.00	0.50
Tomate	0.19	0.44	0.81	0.60	1.15	0.60
Trigo	0.19	0.44	0.81	0.60	1.15	0.40

Jensen, *et al.* (1990) presentó una comparación de 20 métodos distintos para estimar ETr contra mediciones realizadas con lisímetros en 11 diferentes sitios. En este estudio, como en muchos otros, la ecuación de Penman Monteith fue más precisa tanto en sitios de clima húmedo como seco. La principal limitante de este método es la colección de los datos climáticos que requiere.

La ecuación de Hargreaves. La ecuación de Hargreaves (Hargreaves, 1974), modificada posteriormente por Hargreaves y Samani (1982), requiere únicamente de las temperaturas del aire máxima y mínima diarias:

$$E_{Tr} = 0.0023 R_a T D^{1/2} (T + 17.8) \quad (16)$$

Donde R_a es la radiación solar extraterrestre, estimada al tope de la atmósfera para cualquier sitio y expresada en unidades equivalentes de evaporación de agua (mm), $T D$ la diferencia entre las temperaturas del aire máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$) y T el promedio de dichas temperaturas.

En la evaluación de los 20 métodos para estimar ETr reportados por Jensen, *et al.* (1990), el método de Hargreaves se mantuvo por encima del rango medio de precisión, tanto en sitios con clima húmedo como seco. Por lo tanto, se le considera un método con precisión aceptable y con un requerimiento de información bajo, lo cual es importante en sitios donde no se dispone de todas las variables climáticas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del estudio

El presente estudio se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP, localizado en el margen derecho del canal principal Sacramento km 6.5 en Gómez Palacio, Durango (Figura 5).

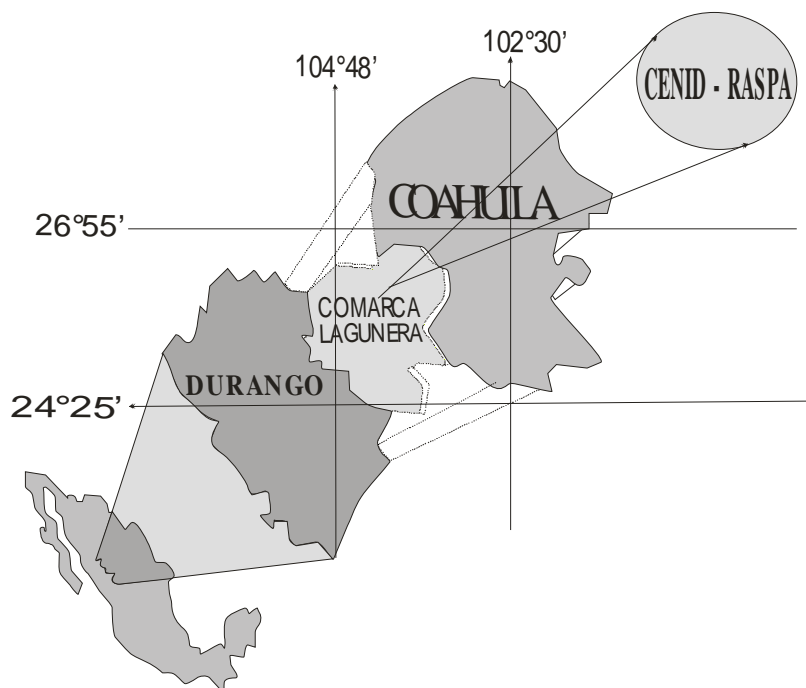


Figura 5. Localización del CENID RASPA INIFAP.

6.2 Descripción del programa

El programa desarrollado se llama Driego 1.0. Se basa en la solución del balance de agua en el perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo a nivel diario (Ec. 4). Incluye una serie de rutinas y funciones para calcular cada uno de los componentes de dicho balance: evapotranspiración, lluvia efectiva, drenaje o percolación, así como la capacidad del suelo para almacenar agua. Los métodos utilizados para calcular tales componentes fueron descritos en la sección precedente.

El programa incluye también un archivo con los datos climáticos (temperatura del aire y precipitación) promedio de los últimos 30 años para cada uno de los 80 distritos de riego. También cuenta con un archivo con los

parámetros que describen las funciones de los coeficientes de cultivo K_c para cada uno de los 62 cultivos considerados.

El programa se codificó utilizando el lenguaje de programación visual DELPHI 6.0. Cuenta con disco instalador y solo requiere del sistema operativo WINDOWS 95 o posterior.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultados de este trabajo se obtuvo un programa de cómputo para calcular las demandas de agua y programar el riego de los cultivos en los distritos de riego. Programas similares a éste han sido desarrollados por otras instituciones nacionales y extranjeras como la Universidad de Chapingo y la Universidad de Arizona. La ventajas de este programa son su sencillez, ya que incluye una serie de ayudas que facilitan su uso, además de que cuenta con una versión en línea que se encuentra instalada en la página WEB del INIFAP (<http://www.inifap.gob.mx>) para ejecutarse a través de la red de Internet (Catalán *et al.*, 2005).

Enseguida se describen los pasos para ejecutar el programa, es decir, el orden con que deben ingresarse los datos de entrada, así como las salidas proporcionadas por el mismo. La primera pantalla corresponde a la presentación, la cual muestra el objetivo de la aplicación, instrucciones para visualizar algunas ayudas sobre algunos conceptos y las variables de entrada (Figura 6).

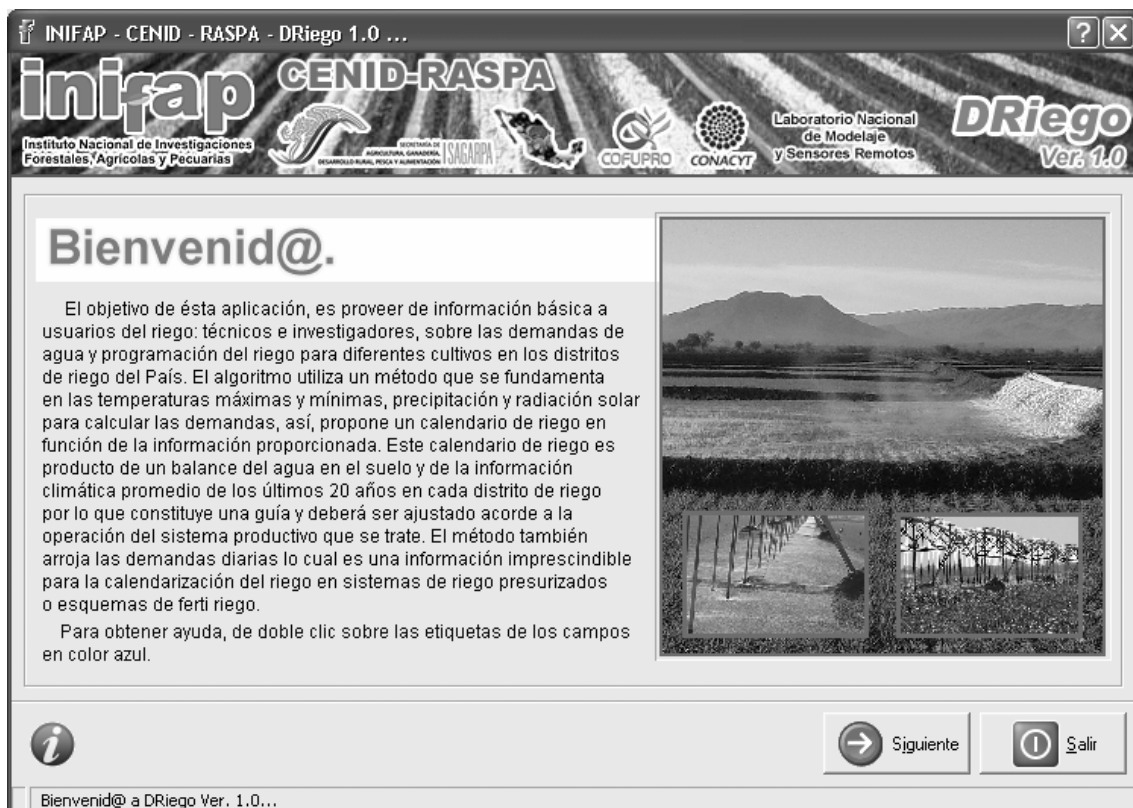


Figura 6. Pantalla de presentación.

La pantalla de captura número uno solicita información general como la entidad federativa, el distrito de riego y el cultivo (Figura 7). Cuando se selecciona un estado, el sistema despliega los distritos de riego existentes en el estado; posteriormente, cuando se selecciona un distrito de riego, la base de datos del clima de ese distrito es consultada y retenida para realizar los cálculos posteriores. El Cuadro 5 lista los distritos de riego considerados por el programa. El Cuadro 6 muestra la lista de cultivos considerados; una vez que se selecciona el cultivo, la aplicación propone una fecha de siembra y una duración de su ciclo vegetativo desde la siembra o establecimiento hasta la madurez fisiológica, datos que el usuario puede cambiar.



Figura 7. Pantalla de información general.

La pantalla de captura número dos solicita la información que determina la capacidad de retención de agua por el suelo (Figura 8). El programa da al usuario tres posibles opciones para determinar los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} , dependiendo de la información disponible. Se pueden proporcionar datos representativos de todo el perfil del suelo para lo cual se llena solo una línea o

bien, de un máximo de cuatro estratos o profundidades distintas con diferentes valores de θ_{CC} y θ_{PMP} . El programa proporciona una profundidad promedio de raíces para cada cultivo, misma que el usuario puede modificar. Para facilitar el uso de la aplicación, el usuario puede acceder a textos de ayuda sobre las variables de entrada dando doble clic a las etiquetas marcadas en azul.

Cuadro 5. Distritos de riego considerados por el programa.

Estado	No.	Nombre	Estado	No.	Nombre
Ags	1	Pabellón	Mich		45 Tuxpan
Bc	14	Rio colorado	Mich		61 Zamora
Bcs	66	Santo domingo	Mich	87	Rosario
Cam	81	Campeche	Mich	97	Cárdenas
Coah	6	Palestina	Mich	98	Morelos
Coah/Dgo	17	La laguna	Mich	99	La magdalena
Col	53	Colima	Mor	16	Edo morelos
Chi	5	Delicias	Nay	43	Nayarit
Chi	9	Juárez	NI	4	Don martín
Chi	42	Buenaventura	NI	31	Las lajas
Chi	83	Papigochic	Oax	19	Tehuantepec
Chi	89	El carmen	Pue	30	Valsequillo
Chi	90	Bajo conchos	Qr	102	Rio hondo
Chi	103	Rio florido	Qro	23	San juan del rio
Chs	46	Suchiate	Sin	10	Culiacán
Chs	59	Rio blanco	Sin	63	Guasave
Chs	101	Custepeques	Sin	74	Mocorito
Chs	107	San gregorio	Sin	75	Rio fuerte
Dgo	52	Durango	Sin	76	El carrizo
Gro	57	Cutzamala	Slp	49	Rio verde
Gro	68	Tepecuacuico	Son	18	Colonias yaquis
Gro	95	Atoyac	Son	37	Altar
Gro	104	Cuajinicuila	Son	38	Rio mayo
Gro	105	Nexpa	Son	41	Rio yaqui
Gto	11	Rio Ierma	Son	51	Hermosillo
Gto	85	La begoña	Son	84	Guaymas
Hgo	3	Tula	Tam	25	Bajo rio bravo
Hgo	8	Meztlán	Tam	26	Rio san juan
Hgo	28	Tulancingo	Tam	29	Xicotencatl
Hgo	100	Alfajayucan	Tam	39	Rio frio
Jal	13	Jalisco	Tam	50	Acuña
Jal	93	Tomatlán	Tam	86	Sotolamarina
Jal	94	Jalisco sur	Tam	92.2	Ánimas
Mex	33	Edo méxico	Tlx	56	Atoyac
Mex	44	Jilotepec	Ver	92.1	Rio pánuco
Mex	73	La concepción	Ver	35	La antigua
Mex	88	Chiconautla	Ver	60	El higo
Mex	96	Arroyozarco	Ver	82	Rio blanco
Mich	20	Morelia	Yuc	48	Ticul
Mich	24	Chapala	Zac	34	Zacatecas

Cuadro 6. Cultivos incluidos en el programa.

Cultivos anuales					
Ajo	Berenjena	Cebada	Fresa	Lenteja	Repollo
Ajonjolí	Betabel	Cebolla	Frijol	Maíz	Sandía
Algodón	Brócoli	Centeno	Garbanzo	Melón	Sorgo
Alpiste	Cacahuete	Chícharo	Girasol	Nabo	Soya
Apio	Calabaza	Chile	Haba	Papa	Tomate
Arroz	Camote	Coliflor	Jícama	Pepino	Trigo
Avena	Cártamo	Espinaca	Lechuga	Rábano	Zanahoria
Cultivos perennes					
Aguacate	Limonero	Naranja	Palma coco	Pera	Toronja
Alfalfa	Mandarina	Nogal	Papaya	Pistacho	Vid
Caña	Mango	Olivo	Pasto	Plátano	
Durazno	Manzano	Palma datilera			

Opción 1: Si se conocen, proporcionar los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} (Figura 8).

INIFAP - CENID - RASPA - DRiego 1.0 ...

2 Proporcione información sobre su tipo de suelo.

2.1. ¿Qué información tiene del suelo?

- Constantes de Humedad (CC y PMP).
- Contenido de Arena, Arcilla y Materia Orgánica.
- Textura del Suelo.

2.2. Teclée la información sobre su tipo de suelo:

Estratos	Profundidad (cm)	CC (%)	PMP (%)
1	120		
2			
3			
4			

2.3. Tipo de Siembra:

Haga doble clic sobre los campos de color AZUL para obtener ayuda...

Figura 8. Primera opción para los datos del suelo.

Opción 2: Si no conocen θ_{CC} y θ_{PMP} , proporcionar los contenidos de arena, arcilla y materia orgánica del suelo. El programa luego ejecuta una subrutina para estimar indirectamente θ_{CC} y θ_{PMP} a partir de dichos datos y las funciones desarrolladas por Rawls y Brakensiek, (1982) (Figura9).



Figura 9. Segunda opción para los datos del suelo.

Opción 3: Si no se conoce la información solicitada en las dos opciones anteriores, proporcionar la categoría o clasificación del suelo por textura (Cuadro 7). El programa luego asume valores típicos de θ_{CC} y θ_{PMP} de acuerdo a la textura del suelo (Catalán *et al.*, 2006) (Figura 10).

Cuadro 7. Clasificación de los suelos por textura (USDA, 1952).

ARENOSO	FRANCO	FRANCO	ARCILLO LIMOSO
		ARCILLOSO	
ARCILLOSO	ARENO	FRANCO	FRANCO ARCILLO
	FRANCOSO	LIMOSO	ARENOSO
LIMOSO	FRANCO	ARCILLO	FRANCO ARCILLO
	ARENOSO	ARENOSO	LIMOSO



Figura 10. Tercera opción para los datos del suelo.

El campo “tipo de siembra” tiene dos opciones, “en seco” para el caso en que el primer riego se aplica después de la siembra o trasplante y “en húmedo” para cuando se aplica primero un riego de presembrado y luego se siembra en húmedo algunos días después.

La pantalla de captura número tres (Figura 11) solicita la fracción de abatimiento máximo de la humedad aprovechable del suelo (FAM). El programa propone un valor promedio recomendado para todo el ciclo vegetativo del cultivo seleccionado. El usuario puede modificar este valor y fraccionar el ciclo vegetativo en un máximo de cuatro etapas de diferente duración y valor de FAM en cada una de ellas. Esto permite considerar períodos de mayor sensibilidad al estrés hídrico por parte del cultivo a través de su ciclo vegetativo. En general, no se recomienda dejar abatir la humedad aprovechable del suelo más del 80 por ciento, es decir, se tiene que reponer humedad mediante el riego antes de que este valor ocurra. Valores de FAM menores a los propuestos producen riegos más frecuentes (mayor número de riegos), láminas de riego menores y menor estrés hídrico. Lo contrario ocurrirá con valores de FAM mayores.



Figura 11. Pantalla de captura de datos número tres.

El campo “humedad aprovechable inicial” (HAI) se refiere al contenido de humedad del suelo previo al establecimiento del cultivo (θ_0), expresado como un porcentaje de la humedad aprovechable máxima (HA). El programa propone un valor de cero para indicar que el suelo se encuentra sin reservas de agua aprovechable por el cultivo, es decir, a un contenido de humedad igual al punto de marchitamiento permanente (PMP). En regiones del sureste del país, donde se aprovechan las lluvias de verano, el suelo suele estar a un contenido de humedad entre PMP (θ_{PMP}) y capacidad de campo (θ_{CC}), es decir a un valor de HAI entre cero y 100 por ciento, lo cual permite atrasar la aplicación de los riegos y ahorrar agua:

$$HAI = \frac{(\theta_0 - \theta_{PMP})}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} \times 100 \quad (23)$$

El botón “atrás” permite regresar y modificar los datos de las pantallas previas. El botón “terminar” ejecuta o corre el programa para los datos de entrada capturados, y el botón “salir” detiene el programa y da la salida al

sistema. Después de aplicar el botón “terminar”, el programa despliega una pantalla con un menú de resultados (Figura 12).



Figura 12. Menú de resultados.

El primer botón del menú de resultados despliega el calendario de riego que incluye el número de riegos, fechas de aplicación, intervalos entre riegos y láminas de riego. La Figura 13 muestra la pantalla que despliega el calendario de riegos resultante para el algodónero de acuerdo a los datos proporcionados en las pantallas de captura descritas. La pantalla muestra algunas herramientas para visualizar, imprimir o guardar en un archivo el calendario de riegos, así como un botón para regresar al menú de resultados.

El segundo botón del menú de resultados despliega datos del clima y algunos componentes del balance del agua en el suelo a nivel diario (Figura 14). De estos últimos destacan la evapotranspiración máxima y real por día y acumulados, la lluvia efectiva y el déficit de la humedad aprovechable del suelo. La definición de cada variable y sus unidades pueden visualizarse dando doble clic en las etiquetas de ayuda marcadas en color azul, mismas que se transcriben enseguida:

Print Preview

inifap CENID - RASPA **DRiego**
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Calendario de Riego

Número de Riego	Fecha del Riego	Intervalo entre Riegos (días)	Lámina de Riego (cm)	Lámina de Riego Acumulada (cm)
Presiembra	9 Mar	0	16.9	16.9
2	26 Abr	48	11.4	28.3
3	14 May	18	11.6	39.9
4	29 May	15	11.3	51.2
5	13 Jun	15	11.4	62.6
6	29 Jun	16	11.3	73.9

0% Page 1 of 1

Figura 13. Calendario de riegos del algodónero.

Print Preview

inifap CENID - RASPA **DRiego**
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Balance Diario

Día	Fecha	Temp. Máx. (°C)	Temp. Min. (°C)	Precip. (mm)	ET Máx. (cm/día)	ET Máx. Acum.	ET Real (cm/día)	ET Real Acum.	Prec. Efe. (cm/día)	DHA (cm)
1	15 Mar	29.10	10.70	0.30	0.17	0.17	0.17	0.17	0.00	1.16
2	16 Mar	27.80	11.40	0.30	0.16	0.33	0.16	0.33	0.00	1.32
3	17 Mar	28.90	10.50	0.00	0.17	0.51	0.17	0.50	0.00	1.49
4	18 Mar	29.70	10.90	0.00	0.18	0.69	0.18	0.68	0.00	1.67
5	19 Mar	29.20	11.50	0.00	0.18	0.86	0.17	0.85	0.00	1.84
6	20 Mar	29.50	11.30	0.00	0.18	1.04	0.17	1.02	0.00	2.01
7	21 Mar	30.00	11.80	0.00	0.18	1.22	0.18	1.20	0.00	2.19
8	22 Mar	29.40	12.10	0.00	0.18	1.40	0.17	1.37	0.00	2.36
9	23 Mar	30.10	12.00	0.00	0.18	1.59	0.18	1.55	0.00	2.54
10	24 Mar	29.90	11.70	0.00	0.18	1.77	0.18	1.73	0.00	2.72
11	25 Mar	30.30	11.40	0.00	0.19	1.96	0.18	1.91	0.00	2.90
12	26 Mar	30.10	12.60	0.10	0.19	2.15	0.18	2.09	0.00	3.08
13	27 Mar	29.80	13.00	0.00	0.18	2.33	0.18	2.26	0.00	3.26
14	28 Mar	29.90	12.10	0.00	0.19	2.52	0.18	2.44	0.00	3.44
15	29 Mar	30.00	12.40	0.00	0.19	2.71	0.18	2.62	0.00	3.62
16	30 Mar	29.30	12.00	0.00	0.19	2.89	0.18	2.80	0.00	3.79
17	31 Mar	29.30	11.30	0.00	0.19	3.08	0.18	2.98	0.00	3.97
18	1 Abr	30.70	11.60	0.10	0.20	3.28	0.19	3.16	0.00	4.16
19	2 Abr	31.00	13.10	0.00	0.20	3.48	0.19	3.35	0.00	4.34
20	3 Abr	30.90	12.90	0.00	0.20	3.68	0.19	3.54	0.00	4.53
21	4 Abr	29.80	13.20	0.80	0.19	3.87	0.18	3.71	0.00	4.71
22	5 Abr	30.00	12.30	0.00	0.20	4.06	0.18	3.90	0.00	4.89
23	6 Abr	30.30	12.40	0.10	0.21	4.27	0.19	4.09	0.00	5.08
24	7 Abr	31.00	13.30	0.00	0.23	4.50	0.21	4.30	0.00	5.29
25	8 Abr	30.50	13.50	0.20	0.24	4.73	0.22	4.52	0.00	5.51

0% Page 1 of 3

Figura 14. Componentes del balance del agua en el suelo.

Evapotranspiración máxima: cantidad de agua que consume el cultivo por día cuando no sufre por estrés hídrico. Es decir, cuando está siempre provisto de una humedad adecuada en el suelo. En este caso, el factor limitante es el clima.

Evapotranspiración real o actual: cantidad de agua que consume el cultivo por día y que muestra el manejo del riego, es decir, refleja los efectos de la disminución de la humedad del suelo entre un riego y otro. El efecto principal es que el consumo de agua se reduce, en relación a ET máxima, con el abatimiento de la humedad.

Precipitación efectiva: cantidad de lluvia acumulada aprovechable por el cultivo. Su valor depende de muchos factores como la intensidad y duración de los eventos lluviosos, tipo de suelo, cubierta vegetal y pendiente del terreno, entre otros.

Déficit de la humedad aprovechable: déficit acumulado de la humedad aprovechable a través del tiempo expresado como una lámina o espesor de agua en centímetros.

El tercer botón del menú de resultados despliega una gráfica con los valores diarios del consumo de agua en sus modalidades de evapotranspiración máxima y real para todo el ciclo del cultivo (Figura 15). El cuarto botón muestra una gráfica con los valores acumulados de estas mismas variables junto con los datos de precipitación (Figura 16). Por su parte, el quinto botón presenta una gráfica que ilustra los cambios que sufre la humedad aprovechable del suelo de un riego a otro durante el ciclo del cultivo (Figura 17). El botón “modificar” permite regresar a las pantallas previas para modificar alguno de los datos de entrada.

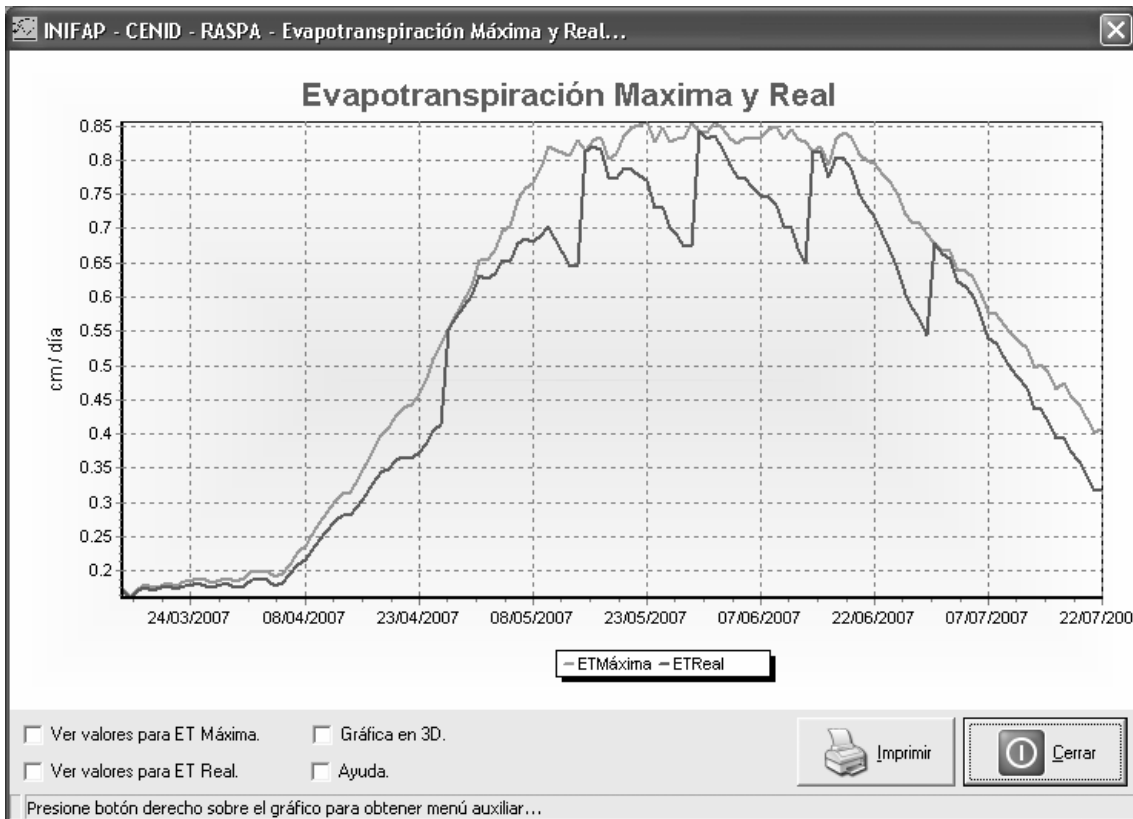


Figura 15. Consumo de agua por el cultivo a través de su ciclo vegetativo.

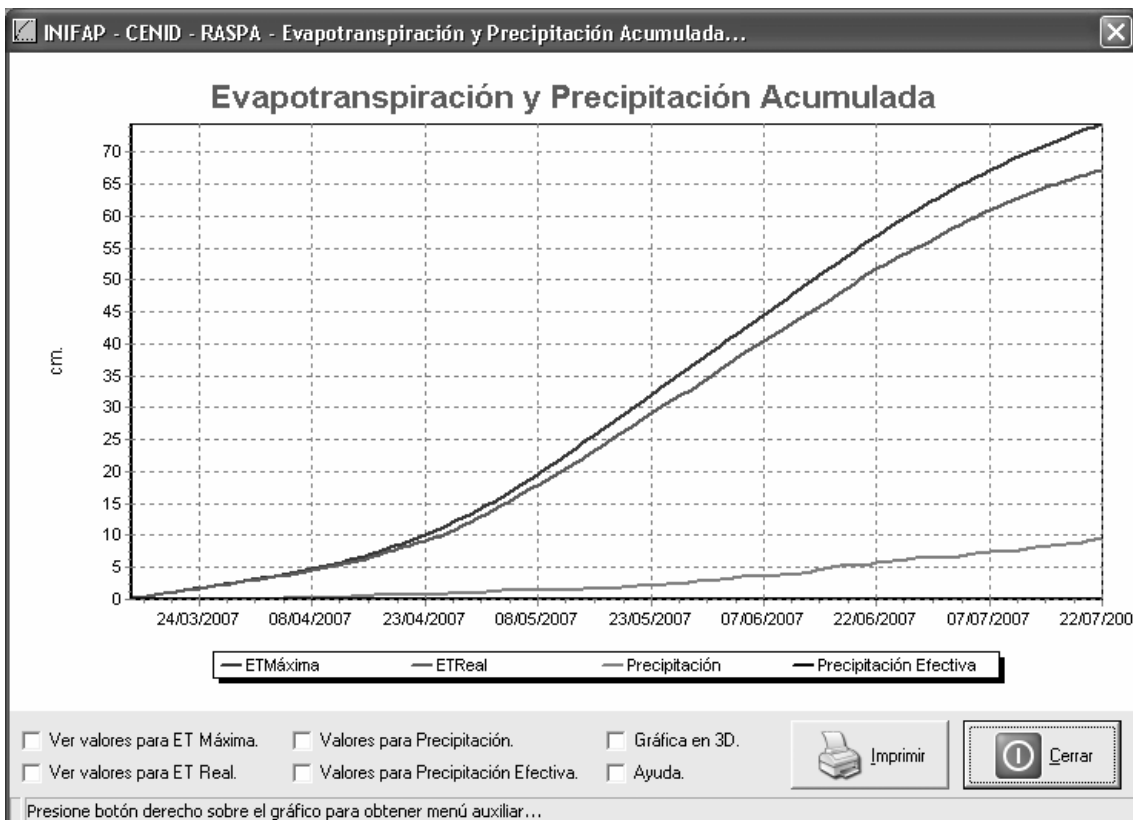


Figura 16. Datos acumulados del consumo de agua y la precipitación.

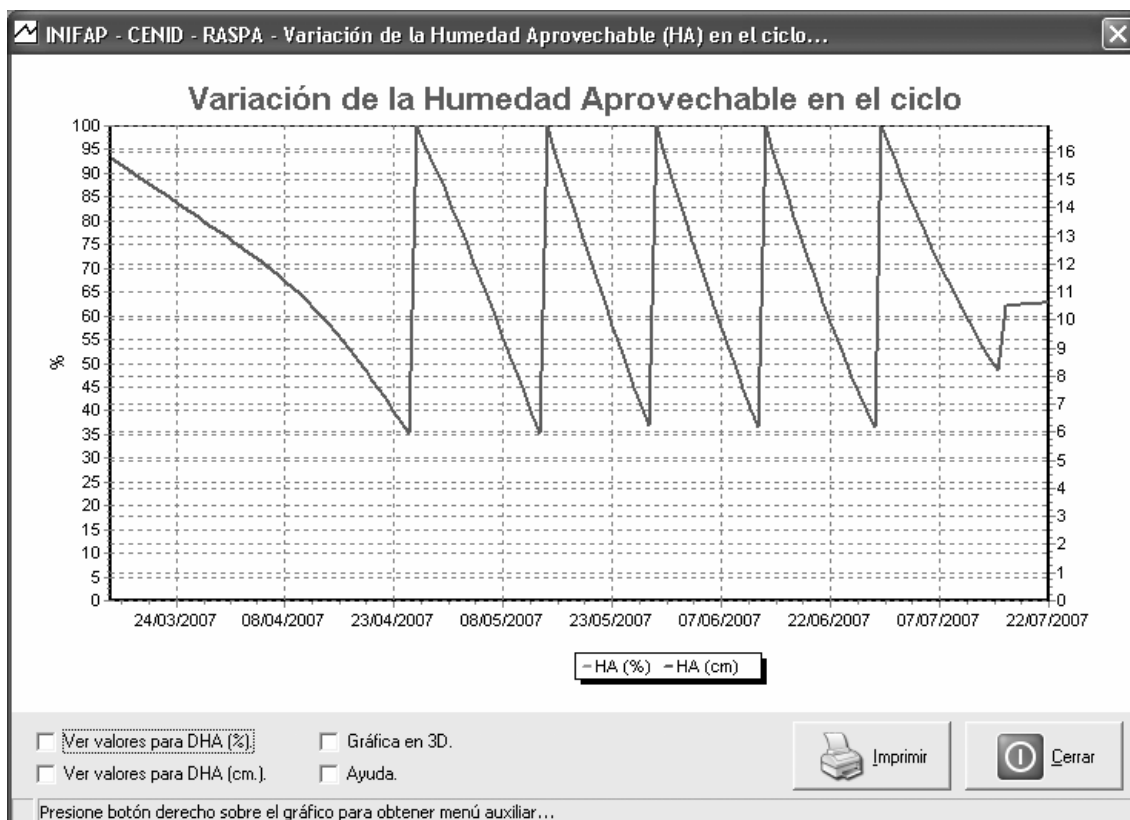


Figura 17. Evolución de la humedad aprovechable entre los riegos.

Todas las gráficas desplegadas por la aplicación poseen algunas herramientas que permiten al usuario visualizarlas de distinta manera, imprimirlas, guardarlas temporalmente en el portapapeles o almacenarlas en un archivo para uso posterior como puede ser insertarlas en un documento o presentación. Es posible visualizar los valores de las variables sobre las gráficas y abrir ventanas de acercamiento a una porción de las mismas para lograr una visualización más detallada. Para abrir una de estas ventanas se debe arrastrar el botón izquierdo del ratón sobre el área por ampliar, iniciando desde la esquina superior izquierda de la ventana hacia la esquina inferior derecha. Para deshabilitar la ventana, se debe marcar una ventana de cualquier tamaño en sentido inverso, es decir, iniciando desde la esquina inferior derecha hacia la esquina superior izquierda.

Interpretación y uso de los calendarios de riego obtenidos con el programa

Un calendario de riego es una receta en la que se indica cuánto y cuándo regar los cultivos. Esta receta muestra el número de días que deben

transcurrir entre riegos para aplicar una determinada cantidad de agua que ordinariamente se expresa como una lámina o altura de agua. En general, los agricultores riegan sus cultivos con base en su experiencia, considerando por lo tanto algunos criterios empíricos. Son pocos aquellos que realizan mediciones del estado hídrico del suelo o las plantas para decidir cuándo y cuánto regar. La herramienta aquí propuesta hace una estimación del consumo de agua por el cultivo y del balance de agua en el suelo utilizando valores promedio de los datos históricos de clima. Por lo tanto, los calendarios de riego que de ella se derivan deben considerarse como una aproximación de la situación real. El máximo potencial de la aplicación descrita recae sobre el proceso de planeación del riego, es decir, se pueden hacer iteraciones considerando diferentes escenarios (abatimientos de humedad, etapas de desarrollo, texturas, etc.) para obtener una apreciación objetiva del impacto producido por el cambio de alguna de estas variables.

VIII. CONCLUSIONES

La aplicación aquí descrita representa una herramienta importante para que los usuarios de los distritos de riego incorporen un mayor soporte técnico a la tarea de programar el riego de sus cultivos. El uso de esta aplicación significa también un paso más en el proceso de transferencia de la tecnología disponible. Además de los usuarios del riego, la aplicación aquí descrita puede utilizarse con fines didácticos por maestros y estudiantes para entender mejor los principios teóricos involucrados en su desarrollo; así como por investigadores para ayudar a definir posibles acciones de investigación orientadas al refinamiento de las técnicas utilizadas en la aplicación.

Esta aplicación también es de ayuda para la optimización de los patrones de cultivo en los distritos de riego del país en aras de estimar los volúmenes necesarios para un ciclo de riego. Su valor debe afectarse por la eficiencia en el manejo del agua del distrito (volumen neto) para que arroje el volumen bruto (Sánchez y Catalán, 2006; Rogers *et al.*, 1997; Solomon, 1988). En este proceso la eficiencia juega un papel preponderante ya que de ésta depende el volumen total necesario para irrigar los cultivos en los distritos de riego del país.

IX. LITERATURA CITADA

- Allen R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81:650-662.
- Annandale, J.G., and C.O. Stockle. 1994. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis. *Irrig. Sci.* 15:1-7.
- Arya L.M., and J.F. Paris. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Bouma J. 1989. "Using soil survey data for quantitative land evaluation". *Advances in Soil Science* 9: 177–213.
- Briggs L.J. and H.L. Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Catalán V., E.A.; Sánchez C., I.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A. y Mendoza M., S.F. 2005. Aplicación computacional en red para la estimación de las demandas de agua y la calendarización de los riegos de los cultivos en los distritos de riego del país. *AGROFAZ* 5: 51-58.
- Catalán V., E.A.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A.; Mendoza, M., S.F. y Román L., A. 2006. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas de los suelos de la Región Lagunera. *Memorias de la XVII Semana Internacional de Agronomía*. Gómez Palacio, Dgo.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2004. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. En la página web: www.cna.gob.mx/ecna/espaniol/estadisticas/central/cap3_situación_de_recursos.pdf.
- Costantinidis. C. 1970. *Bonifica ed Irrigazione*. Edagricole. Bologna. Italy.
- Doorenbos J. and Kassam A., H. 1996. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*. Rome, Italy.
- Doorenbos J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 24*. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. *Training Manual No. 4*. Rome Italy.

- Fourth World Water Forum. 2006. Official Delegate Publication. National Water Commission. 208 pp. Mexico.
- Hargreaves G., H. 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE 17:701-704.
- Hargreaves G., H. and Samani Z., A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 108:223-230.
- Haverkamp, R., and J.Y. Parlange. 1986. Predicting the water-retention curve from a particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. Soil. Sci.
- Jensen M. E., Burman R., D. and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p.
- Jury W.A., Gardner W.R., and W.H. Gardner. 1991. Soil Physics. Fifth edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Maldonado I. 2000. Revista Tierra Adentro. Septiembre-Octubre. pp 28-29.
- Minasny, B., A.B. McBratney, and K.L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. Geoderma.
- Monteith, J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quart. J.R. Meteorol. Soc. 107:1-27.
- Ortega F.S. y C. Acevedo. 1999. "Programación del riego usando sistemas meteorológicos automáticos" en Curso: Riego por Aspersión y Goteo. Universidad de Talca. Talca.
- Pachepsky, V., A.D. Timlin and G.Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. Soil Science Society of America Journal
- Rawls W., J. and Brankensiek D., L. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. Journal of the ASCE 108: 166-171.
- Richards, L.A. and C.H. Wadleigh. 1952. Soil physical conditions and plant growth. Ed. Am. Soc. Agron. Monograph.
- Rogers D.H, Lamm F.R., Mahbub A., Trooien T.P., Clark G.A., Barnes P.L. and K. Markin. 1997. Efficiencies and water losses of irrigation systems. Irrigation Management Series Publications. Kansas State University, Kansas.

- Sánchez C., I.; Estrada A., J. and González C., G. 2002. Irrigation Technology in the Irrigation Districts of México. International Water Resources Association. Water International 27: 578 - 584. U.S.A.
- Sánchez C., I. 2005. Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Un enfoque de simulación de procesos. Libro científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. 272 pp. Gómez Palacio, Dgo. México.
- Sánchez C., I y Catalán V., E.A. 2006. Sistema para la optimización de patrones de cultivo en distritos de riego del norte del país. Folleto Técnico No. 5. CENID RASPA INIFAP. 75 pp. Gómez Palcio, Dgo. México.
- Sánchez C., I.; Catalán V., E.A.; and Villa C., M.M. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. In. Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture. pp. 71 – 89. USA – Mexico. USDA ARS – INIFAP.
- Saxton K., E.; Rawls W., J.; Romberger J., S. and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1031-1036
- Schaap, M.G., and F.J. Leij, 1998. Database Related Accuracy and Uncertainty of Pedotransfer Functions, Soil Science
- Solomon K., H. 1988. Irrigation systems and water application efficiencies. Center for Irrigation Technology research notes, CAIT Pub #880104. California State University, California.
- USDA. 1952. Soil Survey Manual. USDA Handbook 18. USDA. Washington, DC.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. Soil Sci.