

SISTEMA COMPUTARIZADO PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR GRAVEDAD EN MÉXICO

Martín D. Mundo Molina¹ y Polioptro Martínez Austria²

Resumen:

En México los distritos de riego enfrentan diversos problemas, tanto técnicos como de gestión administrativa. En la parte administrativa es preciso automatizar grandes volúmenes de información, de tal manera que ésta sea expedida. En la parte técnica es necesario, entre otros importantes y diversos problemas, mejorar la eficiencia de los distritos, maximizando la producción por unidad de agua utilizada. Una alternativa para apoyarlos en la solución de esta problemática es la incorporación y uso de diversas herramientas tecnológicas, software y hardware, que integradas permitan facilitar la gestión técnica y administrativa de dichos sistemas de riego. Con estos objetivos se creó el SICODE. El SICODE es un sistema de cómputo que integra de manera modular los siguientes programas: base de datos, sistema de información geográfica, simulación de balance de agua en el suelo (pronóstico del riego, apoyado en estaciones meteorológicas automatizadas), simulador biológico y sistema experto. El objetivo de este trabajo es presentar las principales características del SICODE, que actualmente está implementado en el distrito de riego: 010 Culiacán en el estado de Sinaloa, México.

Palabras clave: demandas de riego, pronóstico de riego, evapotranspiración del cultivo de referencia, rendimiento de riego, distritos de riego, sicode.

INTRODUCCIÓN

En México, actualmente prevalece el riego por gravedad y la cultura del riego tradicional, donde la decisión del momento del riego y la cantidad del mismo la toma el usuario con base en su criterio que, en pocos casos no es del todo inadecuado, sin embargo y en general, cuando es incorrecto el dispendio es grande (Mundo et al, 1995). Los bajos rendimientos en el uso del agua de riego, tanto a nivel parcelario como en los canales de distribución, provocan a su vez bajos rendimientos globales en la mayoría de los distritos de riego del país.

Existen muchas alternativas técnicas para mejorar el uso del agua en los sistemas de riego, una de ellas es la implementación de metodologías para determinar las fechas y cantidades de riego (cuándo y cuánto regar), ligadas a sistemas computarizados que facilitan el tratamiento ingente de datos meteorológicos, de suelo, cultivos, parcelas y usuarios.

Actualmente los sistemas computarizados (software y hardware) constituidos por bases de datos, sistemas de información geográfica, medición de variables meteorológicas en tiempo real con estaciones automatizadas, facilitan la puesta en práctica de estas técnicas en campo.

Los métodos de balance de agua permiten estimar los cambios de humedad del suelo de manera indirecta, considerando lo que se evapotranspira, llueve y se aporta con el agua de riego, que aplicado en el momento oportuno y en la cantidad necesaria permite no sólo ahorrar agua, sino además evita el decremento en el rendimiento de los cultivos.

Considerando estos aspectos se desarrolló el SICODE, como una herramienta de apoyo a los agricultores, para mejorar estos dos insumos en el quehacer diario de los distritos de riego, por un lado la gestión administrativa, que a través de módu-

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos, México

1. Email: mmundo@iru.etsia.upm.es. Tel.: 91 3365675 FAX: 91 3365845

2. Tel. (73) 19 36 63. Email: polioptro@tlaloc.imta.mx

Artículo recibido el 30 de agosto de 2000, recibido en forma revisada el 4 de octubre de 2001 y el 28 de diciembre de 2001 y aceptado para su publicación el 15 de enero de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

los integrados proporcionan al agricultor recomendaciones sobre aspectos administrativos, por ejemplo: pagos, cobros, padrón de usuarios, permisos de siembra, contratos, tarifas de riego, asignación de volúmenes de agua, riegos solicitados, riegos en proceso, riegos aplicados; y por otro, la parte técnica, que pronostica el momento y la cantidad adecuada de riego.

Desde su concepción hasta su puesta en práctica en campo, el SICODE ha pasado por varias etapas. La etapa de investigación se inició en 1994 y concluyó con el desarrollo del modelo de balance de agua, el sistema experto y las bases de datos relacionales, acoplados a un sistema de información geográfica. Durante 1995 se validó en gabinete y en campo, iniciando las primeras pruebas en el distrito de riego 05, Delicias, en el estado de Chihuahua, en el norte del país. Así, SICODE se convirtió en pionero en la instalación y uso de estaciones meteorológicas automatizadas para fines de riego en México. En 1996 inició su divulgación y promoción mediante videos y cursos de capacitación; en ese mismo año se capacitaron a jefes de operación y gerentes de los principales distritos de riego del país. En 1997 inició su transferencia, primero a pequeñas superficies de riego, para luego pasar a áreas cada vez más grandes. Promocionado por los propios usuarios, durante 1997 se transfirió a los distritos de riego 038 en Navojoa, Sonora y 010 en Culiacán en el estado de Sinaloa (Mundo et al, 1997 a, 1998).



Figura.1 Menú principal del SICODE

COMPONENTES DEL SICODE

El SICODE es una herramienta de cómputo diseñado para distritos de riego, enfocado principalmente a dos aspectos: 1. Gestión administrativa y 2. Pronóstico de riego.

El SICODE integra de manera modular los siguientes subsistemas (fig. 1):

- Base de datos
- Sistema de información geográfica
- Programación y pronóstico de riego
- Simulador biológico (IBSNAT, 1998)³, y
- Sistema experto

Tabla 1. Gestión administrativa

SUBMENU	SERVICIO QUE PRESTA
Padrón de usuarios	Ubicación de usuarios dentro del distrito de riego. Proporciona además, para cada usuario: número de cuenta, subcuenta, superficie física y con derecho a riego, puntos entrega del agua de cada parcela, tipo de sistema de riego explotado.
Asignaciones	Estima la posible distribución del volumen de agua neto disponible para un ciclo agrícola determinado, para cada sección de riego dentro del distrito. Informa al usuario sobre el volumen de agua utilizado y el disponible para cada sección de riego. Realiza la estimación del volumen de agua disponible por hectárea para todo el distrito de riego.
Contratos	Permite imprimir el contrato de riego del usuario, en el cual se registra el volumen de agua que éste usará para un cultivo en determinado ciclo agrícola, riegos disponibles, caudal a usar, duración y pagos por concepto de riego.
Permisos de siembra	Elabora el permiso de siembra de cada usuario. Aquí se registra: el nombre del agricultor, superficie de cultivo, superficie de siembra, tipo de cultivo, variedad, ciclo agrícola, número de cuenta y nombre de quien autoriza dicha siembra.
Tarifas	Lleva un control de pagos y tarifas de riego, en dos modalidades: por riego o por volumen.
Pagos	Informa sobre el balance entre pagos y débitos por concepto de riego, para cada usuario del distrito.
Reportes	Proporciona reportes de deudores por concepto de riego.

³ El simulador biológico por su extensión sólo se enunciará en este artículo

A continuación se presenta una descripción sucinta de la base de datos del SICODE, los servicios que brinda a los agricultores y personal técnico de las asociaciones de usuarios de los distritos de riego.

EL SICODE COMO GESTOR ADMINISTRATIVO

Lleva un control del padrón de usuarios, asignación de volúmenes de agua para un ciclo agrícola,

la, contratos, permisos de siembra, tarifas, pagos y reportes de deudores (tabla 1).

El menú Gestión administrativa se muestra el submenú padrón de usuarios (fig. 2).

Riegos y recomendaciones técnicas de riego

Lleva un control del número de riegos solicitados, en proceso y aplicados; además proporciona al usuario recomendaciones técnicas de riego (tabla 2).

Figura. 2 Padrón de usuarios

Tabla 2. Riegos y recomendaciones técnicas

SUBMENU	SERVICIO QUE PRESTA
Riegos solicitados	Informa el nombre y número de cuenta de la persona que solicita el riego, fecha y ciclo agrícola de la solicitud, caudal a distribuir, caudal promedio por día y por riego, duración estimada del riego.
Riegos en proceso	Proporciona el nombre del usuario, número de cuenta y la parcela correspondiente bajo riego, cultivo que se riega y caudal usado.
Riegos aplicados	Informa el nombre y código del usuario que aplicó el riego, fecha y ciclo agrícola de la aplicación, superficie sembrada, superficie bajo riego, caudal servido, duración del riego, fecha y hora de inicio, fecha y hora de conclusión y volumen usado.
Recomendaciones técnicas de riego	En función de las características físicas de la parcela y del cultivo explotado, sugiere al usuario: ancho de surcos, longitud máxima de surcos, caudal recomendado, volumen y duración del riego. Informa también sobre el número e intervalos de riego recomendables para dicho cultivo.

SICODE

Adiós Gestión Riegos Cultivos Suelos GIS Simulación Experto Herramientas

Especificaciones Técnicas de Riego

Serie de Suelos: ARROYO

Capacidad de retención: 4,65 cm/30cm

Cultivo establecido: ALGODON

Profundidad de raíz: 1,20 m

Lámina usada: 13,10 cm

Intervalo crítico: 23 días

Número de riegos: 6

Metodo de riego: SURCOS

Infiltración básica: 1,56 cm/hr

Gasto: 2,14 l/s/m

Ancho: 0,90 m

Longitud máxima: 200 m

Eficiencia: 77 %

Lámina neta: 14,39 cm

Duración de riego: 4,0 hr

Pendiente mínima: 0,00100 m/m

Pendiente máxima: 0,00150 m/m

Caida Mínima: 0,0 cm/20m

Caida Máxima: 0,0 cm/20m

Fuente:

Observaciones:

Principio

Anterior

Próximo

Ultimo

Agrega

Borra

Busca

Explora

Adiós

Imprime

Rec_rie Reg: 1/76 Exclusivo INS NÚM 12:12:53

Figura. 3 Recomendaciones técnicas de riego

Tabla 3. Información sobre cultivos

SUBMENU	SERVICIO QUE PRESTA
Perennes	Proporciona al usuario información sobre cultivos perennes, los que se cultivan en cada región particular y las diversas variedades de los mismos. Muestra información sobre coeficientes de cultivos de cada ciclo vegetativo, descenso tolerable de humedad y umbral recomendable para tolerancia a la salinidad.
Anuales	La información es idéntica a la que se describe en cultivos perennes.
Cultivos autorizados	Informa al usuario sobre los cultivos autorizados para la siembra en cada ciclo agrícola, así como la variedad de los mismos.
Información agronómica	Este submenú proporciona información de cada cultivo contenido en la base de datos, por ejemplo: variedades de cultivos que se siembran a nivel regional, épocas de siembra, densidad de siembra, calendario de riego, recomendaciones sobre fertilización, tipos de plagas y su adecuado manejo, control de enfermedades, control de malezas, días de cosecha, tipos de herbicidas y dosis recomendables.

En la figura 3 se muestra un ejemplo del submenú recomendaciones técnicas de riego.

Información agronómica

Este submenú del SICODE tiene los principales cultivos perennes y anuales del distrito de riego y proporciona información agronómica de cada uno de los cultivos de la región (tabla 3).

En la figura 4 se muestra el submenú información agronómica.

Información sobre suelos

Proporciona información sobre algunas propiedades morfológicas, físicas y químicas de los diferentes tipos de suelo del distrito de riego (tabla 4).

EL SICODE COMO SIMULADOR

Simulación de balance de agua en el suelo

El simulador de balance de agua del SICODE

SISTEMA COMPUTARIZADO PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR GRAVEDAD EN MÉXICO

SICODE

Adiós Gestión Riegos Cultivos Suelos GIS Simulación Experto Herramientas

INFORMACION AGRONOMICA

Cultivo
CEBOLLA

Fertilizacion
180-80-00
Dividirlo en 4 partes:
1. Al camelloneo aplicar todo el fósforo y un cuarto del nitrógeno.

Variedades
White Grano
Early White Grano
Híbrido Early Supreme
Híbrido White Tampico

Plagas, insecticidas y dosis
TRIPS, Paratión Metílico CE 631 lt/ha o Gusatón M 20 2 lt/ha.

Enfermedades y control
RAIZ ROSA, Rotación de cultivos, TIZON DEL FOLLAJE, Mancozeb 3 lt/ha, Captan PH 50 3 kg/ha, Clorotalonil PH 75 2 kg/ha.

Maleza, herbicidas y dosis
Mantener limpio el cultivo por lo menos 40 días.
Los herbicidas para cebolla de trasplante son: Dactal W-75 de 10 a 12 kg/ha. y

Dias a cosecha
INVIERNO: Cuando el 90 % de las plantas doblen el follaje por su base en invierno (210 a 335 días).
PRIMAVERA: Casi no doblan el follaje

Epoca de siembra
INVIERNO
Almácigo: 10-30 sep
Trasplante: 6-26 nov
Directa: 10-31 oct

Densidad
Dist. entre surcos: 70-80 cm
Dist. entre hileras de plantas: 14-18 cm
Dist. entre plantas: 8 cm
Cantidad de semilla: 2.5-4 kg/ha

Calendario de riego
Riego de siembra o trasplante.
Sobreriego de 15 a 20 días después del primero.
Después, regar cada 20 a 25 días hasta

Principio
Anterior
Próximo
Ultimo
Agrega
Borra
Busca
Explora
Adiós
Imprime

Info_agr Reg: 1/20 Exclusivo INS NÚM 8:03:02 pm

Figura. 4 Información agronomica

Tabla 4. Suelos

SUBMENU	SERVICIO QUE PRESTA
Morfología del suelo	Informa al usuario sobre las características morfológicas de cada serie de suelo del distrito, como: clasificación y profundidad de cada horizonte, color de cada capa de suelo, textura, estructura, consistencia.
Características físicas	Informa al usuario sobre las características físicas de cada serie de suelo del distrito como: profundidad de cada horizonte, pendiente, densidad aparente, porosidad, textura (porcentaje de arena, limo y arcilla), capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente.
Características químicas	Informa al usuario sobre las características químicas de cada serie de suelo como: Ph, cantidad de materia orgánica, carbón orgánico, nitrógeno, carbonatos, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio y conductividad eléctrica.

toma datos meteorológicos diariamente de una estación automatizada. La estación mide cada cierto período de tiempo las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar y precipitación; éstas son transmitidas vía radio o teléfono al SICODE. El intervalo de tiempo de las mediciones se define según el mejor criterio para almacenar la mayor cantidad de datos posible en la memoria del CR10 de la estación meteorológica automatizada. Los datos obtenidos se promedian cada 24 horas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar) o se suman en dicho período (precipitación). Con esta información se realiza

un balance diario del contenido de humedad en el suelo, para cada cultivo establecido en el distrito (Mundo et al, 1997 b).

El modelo

Se han desarrollado una considerable cantidad de modelos que simulan el balance de humedad en el suelo y más recientemente el pronóstico del riego. Un problema común de todos son los datos del modelo, ya que es necesario introducir las variables más representativas para simular la dinámica del sistema agua-planta-suelo-atmósfera. Tal información comprende algunas características físicas

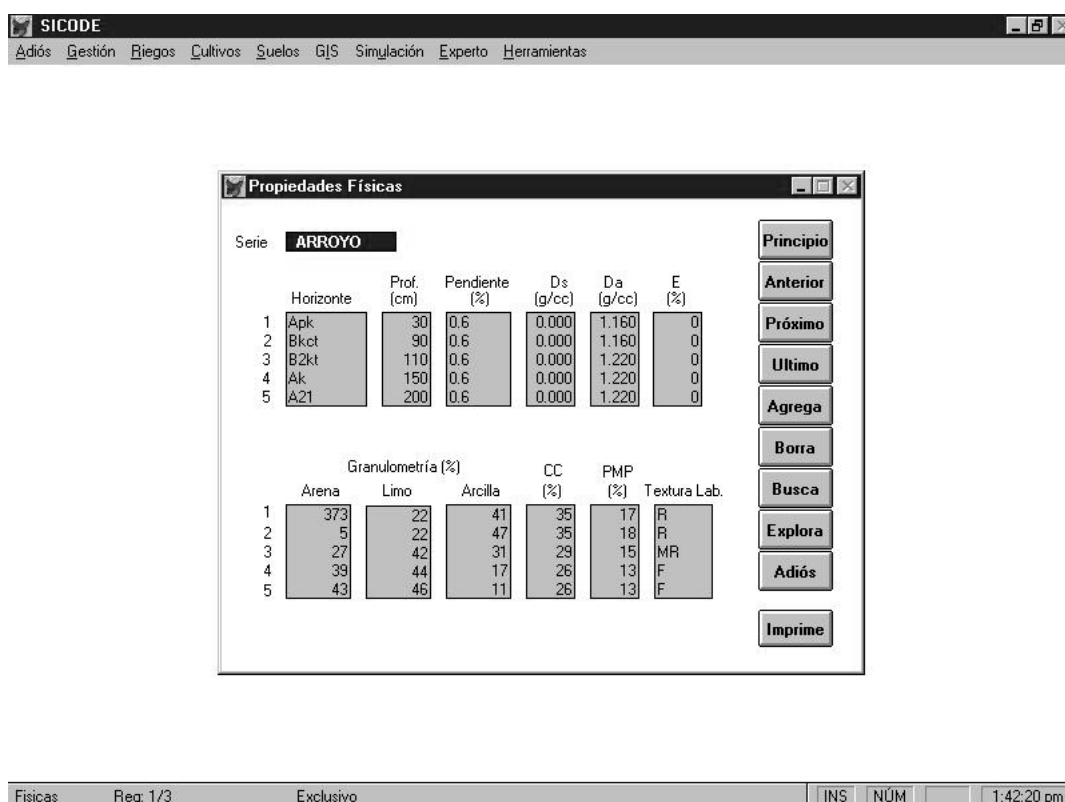


Figura. 5 Propiedades físicas del suelo

sicas del suelo, datos del cultivo e información actualizada del estado del tiempo meteorológico.

Una vez definidos los datos correspondientes al suelo y cultivos, el pronóstico de riego, depende fundamentalmente de los datos meteorológicos. De la adecuada medición, precisión y exactitud de las variables meteorológicas depende a su vez la mejor aplicación de los modelos de simulación; para esta tarea el SICODE se apoya en estaciones meteorológicas automatizadas, las cuales envían datos al modelo, a intervalos de tiempo regulares.

Una forma de expresar el balance de agua en el suelo es:

$$Bh = Ss (\uparrow) - Es (\downarrow) \quad (1)$$

De manera simplificada, se considera únicamente como salidas del sistema la evapotranspiración de los cultivos:

$$Ss (\uparrow) = Eto \quad (2)$$

Las entradas al sistema son la precipitación efectiva, la contribución de agua subterráneas y el agua almacenada antes del riego:

$$Es (\downarrow) = (Pe + As + Aa) \quad (3)$$

Pero dado que para zonas áridas y balances diarios de agua en el suelo la ecuación (3) se puede sustituir por la precipitación total (Dastane, 1974), el balance de agua en el suelo se puede escribir de forma simplificada como:

$$Bh = Eto (\uparrow) - Pt (\downarrow) \quad (4)$$

La evapotranspiración del cultivo de referencia, Eto , de la ecuación (4), se estima con la ecuación combinada de Penman-Monteith (Allen et al, 1998), con datos obtenidos diariamente de la estación meteorológica automatizada:

$$Eto = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (5)$$

Para realizar el balance diario de humedad en el suelo (ec. 4), es necesario calcular la evolución en el tiempo de la humedad disponible para el cultivo, la humedad mínima tolerable por el mismo y la humedad residual del suelo. La humedad residual en el suelo en porcentaje de masa (θ_i) en un instante de tiempo determinado, se puede estimar restando a dicha humedad residual la humedad del suelo en un tiempo posterior (θ_{i+1}), con la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \theta_i - \theta_{i+1} \quad (6)$$

Después de un riego y cuando el suelo alcanza su capacidad de campo ($i=1$), se cumple (ver fig. 6):

$$\theta_i = cc \quad (7)$$

Así, cuando el suelo pierde humedad por efecto de la radiación solar, el perfil húmedo empieza a descender. Para no afectar al cultivo, la humedad residual (θ_i) no debe descender por debajo de la humedad mínima tolerable por éste (θ_t), por lo tanto se debe verificar que:

$$\theta_t \geq \theta_i \quad (8)$$

donde se estima de la siguiente manera:

$$\theta_t = cc - [\theta_s (Dth)] \quad (9)$$

y la humedad disponible para el cultivo en porcentaje de masa (θ_s) es⁴ (ver fig.6):

$$\theta_s = \frac{\theta_{cc} - \theta_{pmp}}{100} \quad (10)$$



Figura 6. Perfil esquemático de la humedad del suelo

A continuación se presenta un ejemplo de balance de agua en el suelo. El SICODE ejecuta este procedimiento desde el menú simulación (ver fig.1). La simulación presentada en la tabla 5 fue realizada con datos de campo del módulo IV-1 del distrito de riego 010 Culiacán Sinaloa, para un suelo arcilloso, cuyas propiedades físicas son las siguientes: $cc=42\%$, $pmp=27\%$, $da=1.02 \text{ gr/cm}^3$. El cultivo considerado fue maíz, que alcanza una profundidad radical (Pr) de 1m; el descenso tolerable de humedad (Dth) para este cultivo se consideró de 70%. La fecha de riego se calculó usando las ecuaciones (4), (5), (6), (9) y (10).

Posteriormente el programa calcula el volumen de agua que demanda el cultivo para cada par-

cela simulada; si el usuario lo requiere, el SICODE puede pronosticar la fecha del siguiente riego.

Pronóstico de riego

El manejo de información meteorológica actual, en periodos cortos de tiempo, minimizando los factores aleatorios, se define como manejo de información meteorológica en tiempo real. Con esta información se realizan pronósticos de riego, cuyo objetivo es la estimación de la fecha futura de riego y los volúmenes de agua a aplicar.

Pronóstico de riego. El SICODE realiza el pronóstico de dos formas: 1. A través de un promedio móvil en la serie de Eto de la base de datos meteorológica, 2. Si las condiciones del clima en los últimos siete a diez días se mantienen sin cambios, se utilizan los últimos datos proyectándolos a futuro, para el mismo lapso de tiempo. Conocido Eto se pronostica a su vez la fecha de riego, de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 7.

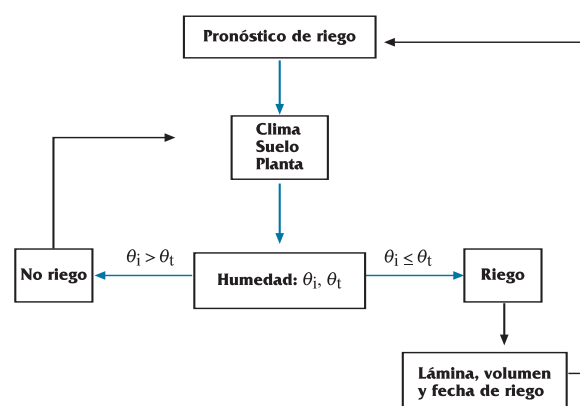


Figura 7. Diagrama de flujo para el pronóstico de la fecha de riego

EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), son herramientas de cómputo que permiten al usuario manejar de manera rápida y expedita, gran cantidad de datos numéricos e información general de manera textual o gráfica. El GIS del SICODE está acoplado al simulador de balance de agua en el suelo, que una vez ejecutado presenta los resultados de manera gráfica, relacionando la información del GIS (mapa del distrito de riego digitalizado) con la base de datos numérica del simulador de balance de agua, presentando como resultado el mapa del distrito de riego. Así, el

⁴ Para estimar θ_s , el sicode toma información de la base de datos de suelo (ver fig. 5).

Tabla 5. Balance de agua en el suelo y cálculo de la fecha de riego

Eto (mm)	Pt (mm)	Bh= Eto-Pt (mm)	θ_{i+1} (%)	θ_i (%)	RIEGO	DIA JULIANO
				42 (qcc)		1
4.8	0	4.8	0.4706	41.5294	NO	2
5.6	0	5.6	0.5490	40.9803	NO	3
7.29	0	7.29	0.7147	40.2656	NO	4
8	0	8	0.7843	39.4812	NO	5
8.8	0	8.8	0.8627	38.6185	NO	6
10.4	0	10.4	1.04	37.7585	NO	7
11.2	0	11.2	1.12	36.6385	NO	8
11.2	0	11.2	1.12	35.5185	NO	9
11.2	0	11.2	1.12	34.3985	NO	10
11.2	0	11.2	1.12	33.27	NO	11
11.2	0	11.2	1.12	32.15	NO	12
11.2	0	11.2	1.12	31.035	SÍ	13
				42	NO	14
4.8	0	4.8	.4706	41.5294	NO	15
5.6	0	5.6	.5490	40.9803	NO	16
7.2	0	7.2	.7058	40.2744	NO	17
4.704	0	4.704	.4612	39.81	NO	18
9.6	0	9.6	.9411	38.86	NO	19
12	0	12	1.2	37.66	NO	20
8	0	8	.7843	36.8756	NO	21
8.8	50	-32.4	-3.1764	40.05	NO	22
4.8	120	-110.4	-10.82	50.8	NO	23
				42	NO	24
7.92	0	7.92	0.7764	41.2235	NO	25
9.6	0	9.6	0.9412	40.2823	NO	26
8.2	0	8.2	0.8040	39.4783	NO	27
8	0	8	0.7843	38.6940	NO	28
7.3	0	7.3	0.7157	37.9783	NO	29
8.5	0	8.5	0.8333	37.1450	NO	30
9	0	9	0.8823	36.2627	NO	31
9.5	0	9.5	0.9313	35.3314	NO	32
8.9	0	8.9	0.8725	34.4589	NO	33
8.5	0	8.5	0.8333	33.6256	NO	34
9	0	9	0.8823	32.7433	NO	35
9.8	0	9.8	0.9608	31.7825	NO	36
9.9	0	9.9	0.9706	30.8119	SI	37

GIS muestra todas las parcelas del distrito de riego (fig. 8), en donde el usuario puede observar (con base en un código de colores) los resultados del pronóstico de riego (Mundo et al., 1997 b), por ejemplo: cultivos que requieren riego inmediatamente (rojo), los que pueden esperar (azul) y los que no necesitan riego (verde). Además el GIS puede mostrar prácticamente la información deseada por el usuario (basta incorporarlo a la base de datos). El GIS usado por SICODE es el AU2WIN V. 3.0 (Dicartu, 1995).

EL SISTEMA EXPERTO

En períodos punta o de máxima demanda, los canales de distribución en los distritos de riego, no son capaces de conducir el caudal demandado por los cultivos, debido a la expansión de la superficie que éstos han tenido a lo largo del tiempo. Este problema también se presenta cuando ocurre una lluvia más o menos uniforme en dichos distritos. Días después de la lluvia, muchos cultivos demandan agua casi al mismo tiempo y los canales no tienen capacidad para conducir el caudal total requerido.

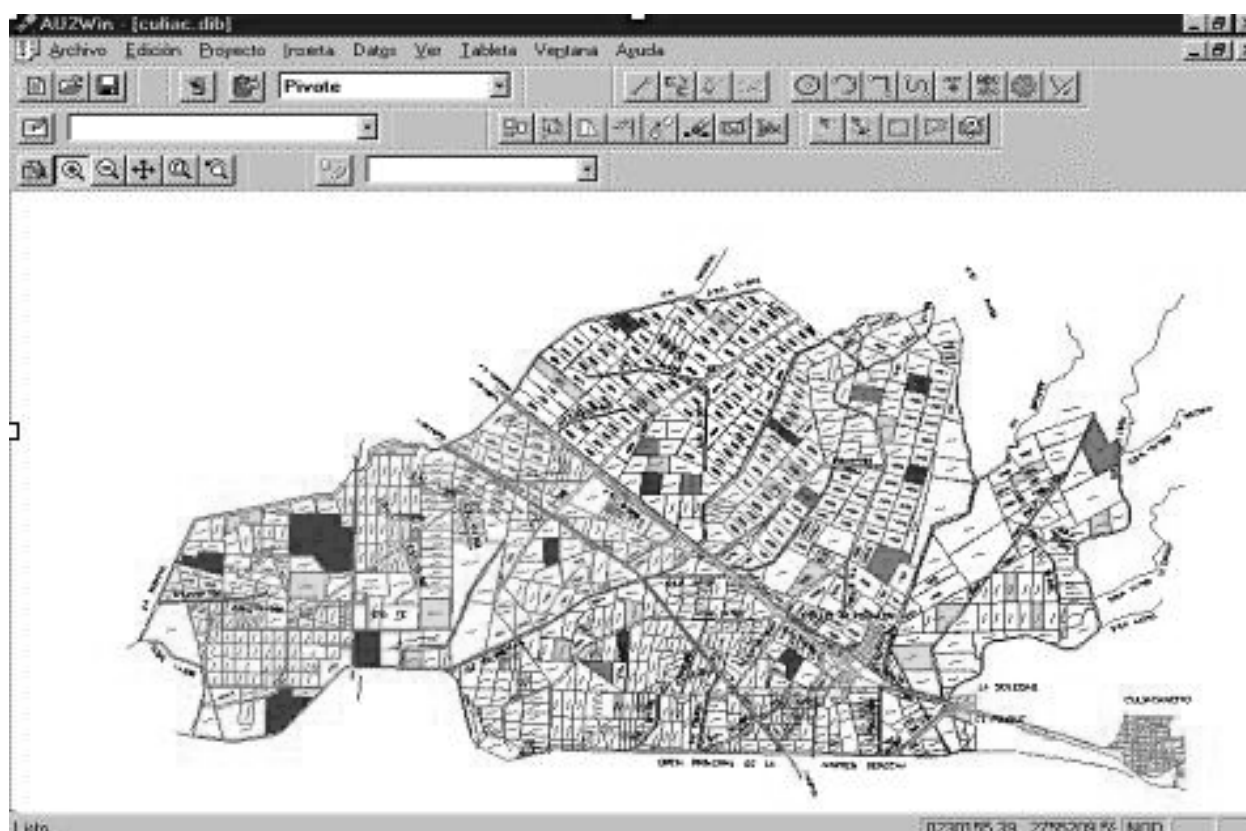


Figura 8. Resultado gráfico de la simulación (pronóstico de riego).

Ante este problema el administrador de la red de canales tiene que tomar, con base en su experiencia, ciertos criterios para repartir de la mejor forma el agua de riego a la mayoría de las parcelas demandantes, según el caudal disponible y la capacidad de conducción de los canales de distribución. Algunos criterios que el administrador de la red toma en cuenta son: la capacidad de conducción de los canales, la sensibilidad de los cultivos al estrés hídrico (se da prioridad a los cultivos más sensibles), y la cercanía de las parcelas a los canales de distribución.

Para automatizar este procedimiento empírico, se desarrolló un sistema experto (SE), con base en el concepto de ingeniería del conocimiento ("knowledge engineering"), que se resume en la figura 9.

Una vez identificada, conceptualizada, formalizada, implementada y validadas las reglas de inferencia del SE, se codificaron en un programa de cómputo o "shell" denominado Level5 (IBI, 1990) y se acopló al SICODE. El Level5 es un lenguaje para codificar reglas empíricas de inferencia en plataforma windows.

El sistema experto (fig. 10) tiene como principal objetivo establecer las prioridades de riego, en función de las necesidades de los cultivos en periodos de máxima demanda, o después de que ocurre una lluvia más o menos uniforme sobre el distrito de riego, con base en tres criterios: 1. Estrés hídrico de los cultivos, 2. Sensibilidad de los cultivos al estrés hídrico y 3. Distancia de las parcelas a la fuente de suministro más cercana (canal de riego). A continuación se explican estos criterios.

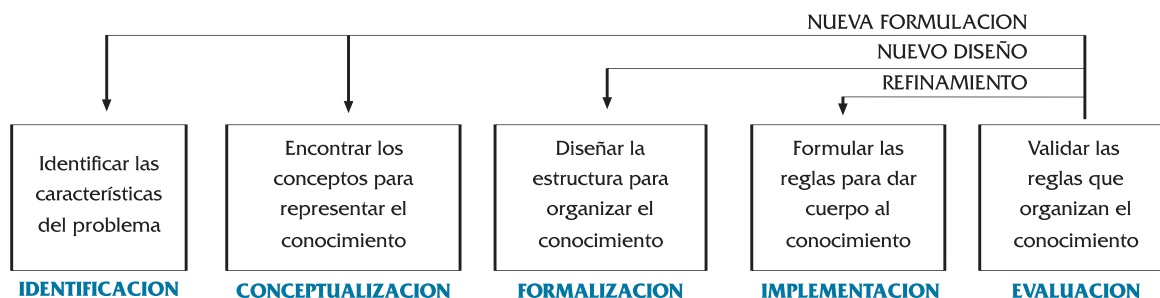


Fig. 9. Ingeniería del conocimiento

Estrés hídrico. El sistema experto usa los resultados del simulador de balance de agua del SICODE. Con estos datos el SE determina un índice de estrés, definido como la fracción de agua usada por el cultivo, en relación con la cantidad que puede ser extraída del suelo, sin que produzca estrés hídrico a la planta que reduzca su rendimiento.



Fig. 10 Menú del sistema experto

Sensibilidad del cultivo. Consiste en una asignación hecha por el usuario, de la sensibilidad relativa al estrés hídrico entre los diferentes cultivos demandantes en un momento dado, en una escala de 1 a 5. Donde 1 representa la máxima sensibilidad y 5 la mínima sensibilidad.

Distancia de las parcelas a la fuente de suministro (canal de suministro). El SE utiliza como tercer criterio para establecer las prioridades de riego, la cercanía de las parcelas al canal de riego en operación. Se dan prioridad a las parcelas más cercanas a éste o aquellas parcelas inmediatas que acaban de concluir el riego.

CONCLUSIONES

Se presentó un sistema computarizado denominado SICODE, cuyo objetivo fundamental es apoyar a los usuarios de los distritos de riego en la gestión técnica y administrativa de los mismos.

El SICODE es un sistema que integra de manera modular los siguientes programas: base de datos, sistema de información geográfica, simulación de balance de agua en el suelo, simulador biológico y sistema experto. Incluye también el pronóstico de riego apoyado en estaciones meteorológicas automatizadas. El sistema experto —a diferencia del resto de los programas que componen al SICODE— está basado en reglas empíricas obtenidas de los usuarios en la gestión de sus parcelas. El esquema

de inferencia del SE está basado en reglas simples, para lograr una adecuada distribución del agua de riego en períodos de máxima demanda. La base de conocimiento del SE tiene la posibilidad de ser incrementada, incluso con reglas probabilísticas.

Se validó el SICODE en gabinete y en campo en 1995, iniciando las primeras pruebas en el distrito de riego 05, Delicias, Chihuahua, en el norte de México; con esta implementación en Delicias, Chihuahua, se convirtió en pionero en la instalación y uso de estaciones meteorológicas automatizadas para fines de riego en el país. En 1996 inició su divulgación y promoción mediante videos y cursos de capacitación; en ese mismo año se capacitaron a jefes de operación y gerentes de los principales distritos de riego del país. En 1997 inició su transferencia, primero a pequeñas superficies de riego, para luego pasar a áreas cada vez más grandes. Promocionado por los propios usuarios, durante 1997 se transfirió a los distritos de riego 038, en Navojoa, Sonora, y 010, en Culiacán en el estado de Sinaloa.

Debido a la capacidad de gestión (técnica y administrativa), versatilidad, interactividad, características técnicas y de aplicabilidad del SICODE, así como a la solicitud de usuarios y de la Gerencia de Distritos de Riego de la Comisión Nacional del Agua (CNA), actualmente se está usando para gestionar 5000 hectáreas de riego por gravedad en el módulo IV-1 del distrito de riego 010 en Culiacán, Sinaloa.

LISTA DE SIMBOLOS

Bh	Balance de agua en el suelo (mm)
Ss (↑)	Salidas del sistema (mm)
Es (↓)	Entradas al sistema (mm)
Pe	Precipitación efectiva (mm).
As	Contribución del agua subterránea al requerimiento del cultivo (mm).
Aa	Agua almacenada antes del riego (mm).
Pt	Precipitación total diaria (mm)
Eto	Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d ⁻¹]
R_n	Radiación neta en la superficie de cultivo [MJ m ⁻² d ⁻¹]
G	Flujo de calor del suelo [MJ m ⁻² d ⁻¹]
T	Temperatura media [°C]
U₂	Velocidad del viento a 2 m de altura [ms ⁻¹]
(ea- ed)	Déficit de presión de vapor, [KPa]
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor [KPa°C ⁻¹]

γ	Constante psicrométrica [$\text{Kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$]
θ_i	Humedad residual del suelo (%)
θ_s	Humedad disponible para el cultivo (%)
θ_{i+1}	Humedad del suelo en un tiempo posterior (%)
θ_t	Humedad mínima tolerable por el cultivo (%)
θ_{cc}	Humedad del suelo en el punto de capacidad de campo (%)
θ_{pmp}	Humedad del suelo en el punto de marchitamiento permanente (%)
Dth	Descenso tolerable de humedad (%)
cc	Capacidad de campo (%)
pmp	Punto de marchitamiento permanente (%)
da	Densidad aparente del suelo (gr/cm^3)

REFERENCIAS

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., and SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy 300 p.
- DASTANE, N.G. (1974). Effective rainfall in irrigated agriculture. FAO. Irrigation and Drainage. 25. Rome.
- DICARTU. (1995). Sistema de información geográfica, AU2WIN V.3.0. Manual de usuario, Guadalajara, México.
- IBI. (1990). Information Builders, Inc. Level 5 Objects-Oriented Expert System. U.S.A.
- IBSNAT (1998). International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). University of Hawaii. U.S.A.
- MUNDO MOLINA M. D., HERNÁNDEZ LEONARDO, BOCANEGRA ANTONIO, MARTÍNEZ A. POLIOPTRO. (1995). Capacitación en el uso del sistema computacional para la distribución eficiente del agua en módulos de riego (SICODE), en: Informe interno anual del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), pp. 2.
- MUNDO MOLINA M. D., HERNÁNDEZ LEONARDO, BOCANEGRA ANTONIO, MARTÍNEZ A. POLIOPTRO. (1997 a). Transferencia del SICODE a tres módulos de tres distritos de riego del país, Delicias, Chihuahua, Culiacán, Sinaloa y Navojoa, Sonora. Informe final. IMTA. México.
- MUNDO MOLINA M. D., MIRELES V. VICTOR., MARTÍNEZ A. POLIOPTRO. (1977 b). Sistema Computacional para la Distribución Eficiente del Agua en distritos de riego, SICODE, v.2.1. Revista de Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XII, Núm. 2, II época, Mayo-agosto, IMTA, México.
- MUNDO MOLINA M. D., HERNÁNDEZ LEONARDO, BOCANEGRA A., MARTÍNEZ A. POLIOPTRO. (1998). Transferencia del SICODE a tres distritos de riego del país: 05 Delicias, Chihuahua, 038 Culiacán, Sinaloa y 010 Navojoa, Sonora. Informe final. HC-9813. IMTA. México.