



El uso de técnicas de la información y percepción remota para mejorar el manejo del agua en sistemas de riego

Dr. Enrique Palacios Vélez - Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, epalacios@colpos.mx

A partir de las últimas dos décadas del siglo veinte, y durante lo que va del siglo actual, ha habido un acelerado avance en el desarrollo de software, abaratamiento de las computadoras, así como el aumento en su capacidad y velocidad operativa. Ésto ha permitido el desarrollo de sistemas de información que están facilitando la creación y manejo de bases de datos, las cuales se combinan con el uso de información geográfica y la percepción remota mediante sensores remotos; herramientas fundamentales para facilitar el manejo del agua, los suelos y los cultivos en el sector agrícola, y propiciar el incremento de su productividad.

La Comisión Internacional en Irrigación y Drenaje (CIID) ha creado un grupo de trabajo en sistemas de soporte para la toma de decisiones en el manejo del agua y el suelo, que se apoya en la percepción remota mediante sensores remotos y en los Sistemas de Información Geográfica (Vidal *et al.*, 2000).

La metodología propuesta para que sea utilizada con objeto de facilitar la toma de decisiones por los gerentes responsables de la operación y mantenimiento de distritos y sistemas de riego y drenaje en general, se basa en la aplicación del análisis de sistemas de información; estos sistemas han sido adaptados a las peculiares condiciones de la información geográfica, con base en la experiencia de científicos y consultores que han estudiado los problemas relacionados con la toma de decisiones en grandes sistemas de riego. Adicionalmente, la información que pueden proporcionar los sensores remotos en tiempo real es de un gran valor para evaluar la condición de los cultivos y de la infraestructura de riego y drenaje, lo cual permitirá mejorar significativamente la toma de decisiones de los operadores de los sistemas y de los productores agrícolas.

Con base en la experiencia internacional y la facilidad actual para obtener imágenes satelitales de alta resolución, desde hace algunos años se ha iniciado en México el uso de los Sistemas de Información Geográfica y la percepción remota, para asesorar al personal operativo de los distritos de riego y evaluar los sistemas de distribución del agua, con el fin de mejorar su manejo y el de la infraestructura; asimismo, informar a los productores agrícolas sobre la condición de los cultivos regados, con el objetivo básico de mejorar la productividad de los recursos edáficos e hídricos.

En este trabajo se muestran algunos de los usos de estas técnicas en la evaluación del uso y manejo del agua en algunos distritos de riego del país, así como el potencial que tienen estas técnicas, para ampliar su utilización a otros campos, en beneficio de los productores agrícolas.

Palabras clave: GIS, TI, percepción remota, sensores remotos, GPS.

INTRODUCCIÓN

El uso de los Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota para mejorar el uso del agua y el manejo de la infraestructura en los Distritos y Sistemas de Riego se inició desde las últimas dos décadas del pasado siglo y, dados los avances en las técnicas de la información, en años recientes se han alcanzado resultados muy significativos, logrando ahorros substanciales en costos de operación y mejoras en el uso de los recursos agua y suelo.

Así, en el libro de la Comisión Internacional en Irrigación y Drenaje editado por Vidal A. en 2000, se presenta una serie de proyectos realizados en varios países para mejorar el manejo del agua, evaluar el estado de la infraestructura de riego y drenaje, así como la afectación de suelos ensalitrados en Marruecos, México y Sudamérica, destacando las conclusiones del grupo de trabajo en salinidad y drenaje de Cemagref-FAO. En ellas, personal de IPTRID (Italia), IMTA (México), CODEVASF (Brasil), e INCYTH (Argentina), exponen las ventajas del uso de sensores remotos para facilitar la elaboración de mapas de suelos salinos, detectar áreas de inundación y conocer el estado de la infraestructura del drenaje.

La utilización de imágenes adquiridas de los satélites Landsat, Spot, Modis y AVHRR, ha permitido realizar trabajos en grandes áreas a costos

muy bajos, con apoyos mínimos de campo, que en otras circunstancias hubieran requerido mucho tiempo y erogaciones muy significativas para lograr resultados similares utilizando fotogrametría con fotos aéreas y mucho personal de campo. Es de interés el trabajo de Sakthivadivel (1999), sobre el estado del arte en el uso de la percepción remota para el manejo de los recursos hidráulicos, donde se presentan muchos de los trabajos realizados en países de Sudamérica, así como India, Sudáfrica e Indonesia, utilizando diferentes índices de vegetación, calculados mediante el uso de las imágenes satelitales.

El Colegio de Postgraduados (COLPOS), inició trabajos con el uso de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica a partir del año 1995, con trabajos para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la participación del Instituto Internacional para el Manejo de la Irrigación (IIMI). Entre los primeros trabajos destaca la evaluación de áreas regadas y volúmenes utilizados para riego en la región del río Pesquería en Nuevo León, en los acuíferos de Janos y la Costa de Hermosillo, así como una estimación de las áreas regadas en las unidades de riego en todo el país, utilizando principalmente imágenes del satélite Landsat 7. Posteriormente se han hecho planos catastrales de varios distritos de riego en diferentes estados de México; se realizó una evaluación de áreas regadas y volúmenes de agua extraída de acuíferos en la región del río Lerma, y en la actualidad se está llevando al cabo un proyecto para el apoyo a la operación del Distrito de Riego 017, Región Lagunera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Las herramientas utilizadas para el estudio de los distritos y sistemas de riego son el software para el manejo de los Sistemas de Información Geográfica y las imágenes de diferentes satélites utilizados para la evaluación de los recursos naturales, así como el software para el análisis de estas imágenes. Hay muchos tipos de software comercial, con costos muy variables, incluyendo software gratuito que puede obtenerse en el Internet. Específicamente para los trabajos desarrollados por el COLPOS, se han utilizado los programas ArcView 3.2® y ArcMap 9®, para manejo de los Sistemas de Información Geográfica, y para el análisis de las imágenes, los programas IDRISI® y ERDAS®. Un software gratuito que también se ha utilizado con fines de enseñanza es el SAGA, desarrollado en la Universidad de Goettingen Alemania y que puede obtenerse en la red en <http://geosun1.uni-geog.gwdg.de/saga/html/index.php> o bien en <http://www.saga-gis.org>.

Mediante los Sistemas de Información Geográfica es posible crear bases de datos con toda la información necesaria para la toma de decisiones sobre el manejo hidráulico de los sistemas de riego, así como para las decisiones de los productores agrícolas, y esta información puede

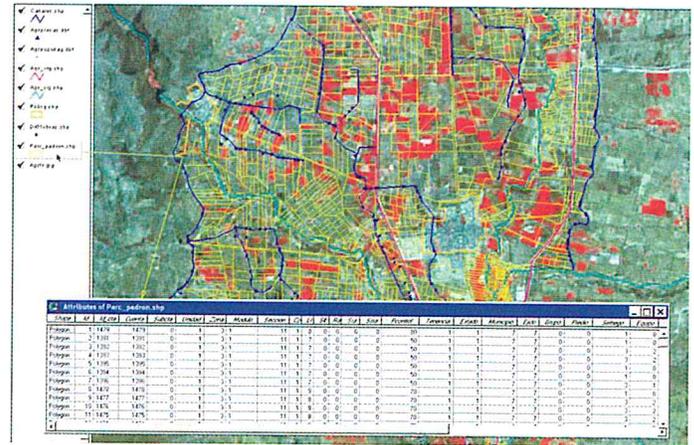


Figura 1. SIG del DRO1, Aguascalientes

combinarse con la posición geográfica de los elementos que forman los sistemas hidráulicos y de producción agrícola para mejorar la comprensión de su funcionamiento.

Por otra parte, la información que pueden proporcionar los sensores remotos en tiempo real es de gran utilidad para evaluar la condición de los cultivos y de la infraestructura de riego y drenaje, lo cual permitirá mejorar significativamente la toma de decisiones de los operadores de los sistemas y de los productores agrícolas.

Un sistema de información geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés), es una herramienta para la adquisición, almacenamiento, manejo y despliegue gráfico de información espacialmente dispuesta. También se puede definir como un sistema automatizado para la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y visualización de información espacialmente referenciada mediante sus coordenadas geográficas (Clarke, 2001).

Como ejemplo de un SIG, se muestra en la figura 1 un sistema del Distrito de Riego 01, Aguascalientes, donde se incluye la base de datos de las parcelas, que incluye su ubicación con coordenadas UTM, así como la localización relativa en la red de distribución de agua, la superficie de los predios, los nombres de los usuarios según el padrón de usuarios del distrito y alguna información adicional como el tipo de tenencia de la tierra, el número del estado y del municipio donde se localiza el predio.

También se ha incluido en este sistema una imagen del satélite Landsat7, en falso color, que resalta los predios con cultivos, que se representan en color rojo en lugar de verde.

Además, este sistema también incluye una base de datos de todas las estructuras que hay en el distrito y otra base con la ubicación y nombre de los canales, de manera que puede utilizarse el SIG para llevar el control del mantenimiento de la infraestructura.

Una herramienta muy valiosa que tienen los SIG es la búsqueda de información con despliegue gráfico. Así, en la figura 2, se muestra cómo se solicita información sobre

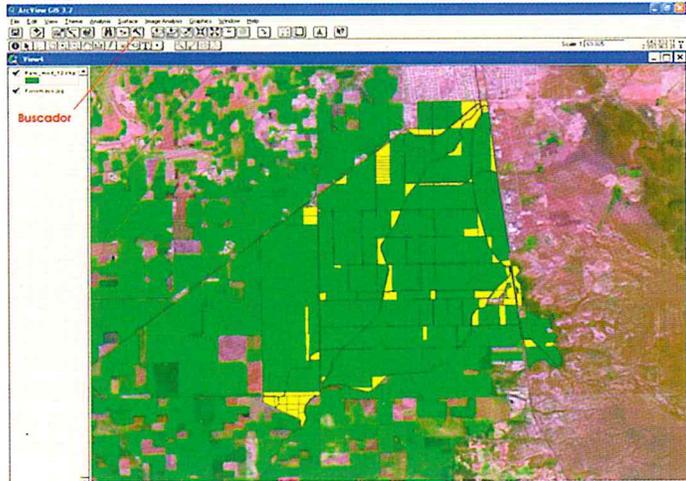


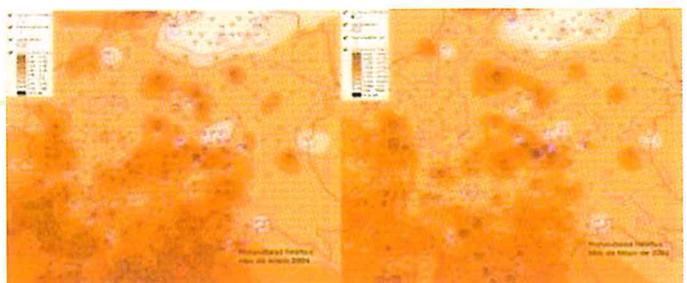
Figura 2. Buscador del SIG.

las parcelas menores de 20 hectáreas en un módulo del DR 38 Río Mayo, que se muestran en color amarillo.

Por otra parte, los modelos de elevación digital (MED o DEM, por sus siglas en inglés) pueden combinarse en los SIG, para destacar el relieve o para generar capas con curvas de nivel y utilizarlas con fines de diseño de obras. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), tiene accesible mediante su página de Internet (www.inegi.gob.mx) el Continuo de Elevaciones Mexicano, con DEM de todo el país con resolución de 30.9 m (un segundo de arco) con lo que pueden lograrse mapas de relieve sombreado o curvas de nivel, como se muestra en la figura 3, del centro del estado de Zacatecas.

Estos modelos pueden utilizarse con un software específico para realizar estudios en cuencas hidrológicas, como es el ArcView y el ArcMap o con el "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) http://www.bcr.tamus.edu/swat/soft_model.html, que tiene una interfase con el ArcView y otros semejantes, desarrollados por diferentes universidades de EU y Europa.

Otro ejemplo interesante es la generación de una base de datos con información de los niveles freáticos, utilizando la información obtenida de las mediciones mensuales de la profundidad de los mantos freáticos. Así,



NO.	SOL	POZO	MED	COORDENADAS	LONGITUD	X	Y	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2	1	1	26.00111	-109.72670	625617	2075006	1.4	1.2	1.1	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	1.6	1.7	1.5	1.4	
3	2	1	26.00000	-109.74467	624730	2073775	1.8	1.7	1.5	1.9	2.1	2.3	2.5	2.5	2.1	2.1	2.0	1.9	
4	3	1	26.00744	-109.72811	623779	2073946	1.5	1.3	1.1	1.6	1.8	1.9	2.3	2.4	2.1	1.7	1.4	1.4	
5	4	1	26.01444	-109.72000	623604	2073710	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	
6	5	1	26.01309	-109.75333	623607	2071609	1.6	1.5	1.3	1.9	2.2	2.4	2.6	2.7	2.4	2.1	1.8	1.6	
7	6	1	26.00309	-109.74233	624530	2071468	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	
8	7	1	26.00556	-109.72309	627015	2072194	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.0	3.0	3.0	
9	8	1	26.00556	-109.71467	627742	2072204	2.6	2.5	2.3	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	3.0	2.9	2.7	2.6	
10	9	1	26.02222	-109.77309	621817	2070650	2.5	2.3	2.0	2.7	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	2.9	2.7	2.5	
11	10	1	26.00111	-109.74444	624735	2071136	2.5	2.4	2.2	2.6	2.7	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	
12	11	1	26.00000	-109.72000	623555	2071009	1.4	1.1	1.0	1.4	1.7	1.9	1.9	2.0	1.8	1.5	1.3	1.4	
13	12	1	26.02270	-109.71467	627736	2071054	2.7	2.5	2.3	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	
14	13	1	26.04667	-109.77222	621975	2070036	2.1	2.2	1.6	2.3	2.5	2.6	2.7	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	
15	14	1	26.04200	-109.75056	624146	2069508	1.6	1.4	1.2	1.7	1.9	2.0	2.1	2.2	2.0	1.8	1.6	1.6	
16	15	1	26.04309	-109.74200	624501	2071654	1.2	1.2	1.0	1.3	1.4	1.7	1.8	1.9	1.7	1.5	1.2	1.2	
17	16	1	26.04044	-109.73070	625501	2070124	1.4	1.2	1.1	1.4	1.5	1.7	2.0	2.1	1.8	1.7	1.4	1.3	
18	17	1	26.04611	-109.72444	626725	2070020	1.3	1.1	0.9	1.3	1.5	1.7	1.9	1.9	1.6	1.3	1.2	1.2	
19	18	1	26.04309	-109.71444	627733	2070070	2.0	2.5	2.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.0	
20	19	1	26.05000	-109.77309	621502	2069745	1.3	1.2	1.0	1.4	1.6	1.8	2.2	2.4	2.1	1.7	1.5	1.4	
21	20	1	26.03111	-109.75467	622791	2068875	1.1	0.9	0.8	1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	1.7	1.2	1.0	1.1	
22	21	1	26.04722	-109.74570	624670	2068750	1.0	0.8	0.6	1.2	1.4	1.7	2.0	2.1	1.7	1.3	1.1	1.0	
23	22	1	26.03722	-109.75200	625914	2068029	2.1	1.5	1.5	2.2	2.3	2.5	2.7	2.8	2.4	2.5	2.2	2.1	
24	23	1	26.03722	-109.72422	627119	2069045	2.4	2.3	2.1	2.4	2.5	2.7	2.9	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	
25	24	1	26.03666	-109.71472	627710	2069005	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	
26	25	1	26.03811	-109.75700	623466	2069044	1.8	1.6	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.2	1.8	1.6	1.6	
27	26	1	26.03000	-109.75222	623660	2068873	2.4	2.3	2.1	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	
28	27	1	26.02000	-109.71444	627757	2069092	2.9	2.8	2.6	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	3.0	2.9	2.9	
29	28	1	26.02000	-109.74200	624574	2069122	1.4	1.3	1.1	1.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.1	1.8	1.5	1.4	
30	29	1	26.03722	-109.77309	621944	2069036	1.6	1.4	1.1	1.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.1	1.7	1.4	1.5	

Figura 4. Niveles freáticos en grafica y BD.

en el distrito de riego del Río Mayo, se generan cada mes los planos con las áreas que muestran la profundidad de los mantos freáticos; en la figura 4 se muestran las profundidades de los mantos freáticos en enero y en mayo de 2004.

Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)

Como equipo adicional que permite ubicar y georeferenciar la posición de un determinado usuario mediante coordenadas geográficas, o las denominadas UTM (Universal Transverse Mercator), se utilizan los denominados Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), que utilizan la información generada por 24 satélites para lograr, mediante la posición de al menos 4 en una determinada zona, localizar la posición del usuario. Actualmente, con equipos relativamente baratos (\$1,500) es posible lograr una ubicación con un error menor a 5 metros. En la figura 5 se muestran algunos de estos equipos.

La percepción remota y los sensores remotos.

La percepción remota, o teledetección, se ha definido de muchas formas, entre las cuales se pueden presentar las siguientes: la capacidad de medir y adquirir información de algunas propiedades de un objeto o fenómeno,

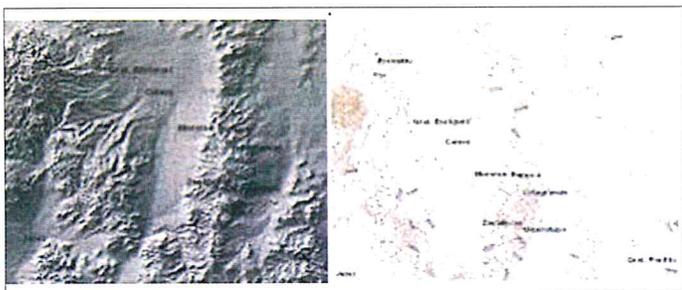


Figura 3. Relieve sombreado y curvas de nivel.

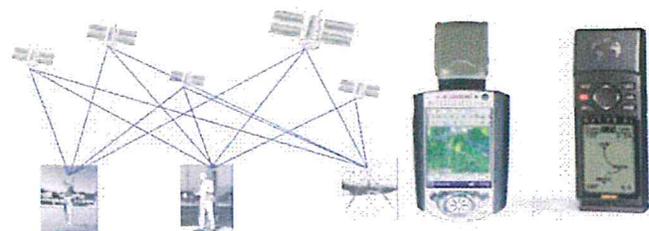


Figura 5. Diferentes tipos de GPS.

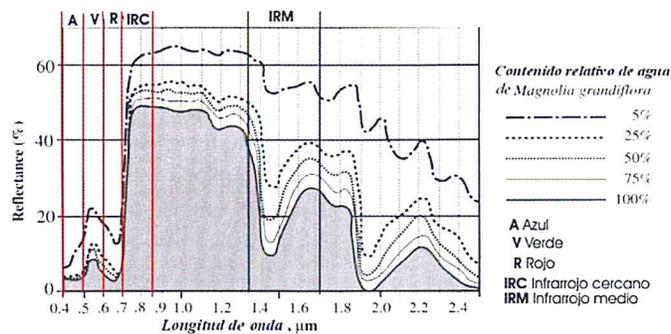


Figura 6. Variación de la reflectancia de hojas, según el contenido de humedad.

mediante un dispositivo que no tiene contacto físico con el objeto o fenómeno considerado. También se dice que la percepción remota es la ciencia y arte de adquirir información de algún objeto o fenómeno, sin estar en contacto con él. Una cámara fotográfica es un dispositivo de percepción remota.

En general la percepción remota utiliza la energía electromagnética emitida o reflejada por el objeto en estudio, para obtener la información requerida. Específicamente, para la obtención de información sobre la vegetación o sobre cultivos agrícolas, se mide la energía solar reflejada por el follaje, en lo que se ha llamado el espectro visible e infrarrojo.

Desde fines de la década de los sesenta del siglo pasado, se han puesto en órbita satélites que portan sensores capaces de medir la energía reflejada por objetos en la tierra, lo que ha permitido evaluar, entre otras cosas, el desarrollo de los cultivos y la humedad de los suelos mediante índices que se calculan en función de la variabilidad de la reflectancia, evaluada. Así, se observa cómo varían estas reflectancias en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, como se muestra en la figura 6 (adaptada de Jensen J. R., 2000).

Debido a estas características de la reflectancia de la energía electromagnética que presenta el follaje de la vegetación, se han construido índices mediante el contraste entre las bandas de ondas electromagnéticas que miden los sensores satelitales, como son el rojo que es absorbido por la vegetación verde y el infrarrojo cercano que reflejan las hojas, o bien por el infrarrojo medio que absorbe el agua de las hojas.

Este comportamiento ha permitido calcular Índices de Vegetación, cuya observancia permite deducir el estado de desarrollo de los cultivos, así como conocer cuándo se tienen problemas en el crecimiento de los cultivos. La relación entre el valor de la reflectancia en la banda infrarroja y la roja ha permitido generar un par de índices que pueden mostrar una variación proporcional al desarrollo de los cultivos, como son la relación simple: $RVI = \frac{NIR}{R}$

y las diferencias normalizadas: $NDVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} = \frac{NIR - R}{NIR + R}$

donde R es la reflectancia en la banda roja y NIR es la reflectancia en la banda infrarroja cercana; este último índice propuesto por Rouse *et al.* (1973).

El estrés hídrico puede también ser evaluado mediante otros índices, dado que el contenido de agua de las plantas y su condición medida por la forma de transpirar son indicadores del estrés. Así, se han propuesto índices de estrés de humedad (*Moisture Stress Index*), considerando las reflectancias de las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio (MIR):

$$MSI = \frac{MIR}{NIR} \quad \text{y} \quad MSIN = \frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$$

El primero fue propuesto por Rock *et al.* (1986) y el segundo por Hardisky *et al.* (1983). También la evaluación de la temperatura del follaje que puede ser estimada mediante las bandas térmicas de los sensores de los satélites Landsat, Modis y AVHRR, pueden estimar las condiciones de humedad, debido a que las plantas al transpirar bajan la temperatura del follaje.

RESULTADOS Y APLICACIONES

La combinación de la información obtenida con los sensores remotos, principalmente los montados en satélites, y los sistemas de información geográfica, son de gran ayuda para mejorar la operación de sistemas de riego, evaluar la eficiencia de la aplicación del agua de riego, evaluar la condición de los cultivos durante su desarrollo, estimar los posibles rendimientos de los cultivos antes de la cosecha, evaluar los suelos afectados por salinidad, estimar las áreas infestadas con plantas acuáticas en embalses y drenes, así como otras aplicaciones.

Desde fines de la década de los años noventa, en un distrito de riego en Marruecos en la región de Gharb, donde se riegan algo más de 100,000 ha, se han utilizado imágenes de los satélites Spot y Landsat, para mapear las áreas regadas, detectar problemas de empantanamiento, de estrés hídrico, control del pago del servicio de riego y mejoramiento de la gestión del agua en general. Con apoyo del gobierno de ese país y del de Francia, con la participación de CEMAGREF, a costos muy razonables (IICID, Vidal *et al.*, 2000).

En la India se ha evaluado la productividad de los suelos en un distrito de riego de más de un millón de hectáreas en la región de Bhakra, mediante sensores remotos y SIG, usando clasificación supervisada, con parcelas de control, como se muestra en la figura 7 (Sakthivadivel *et al.*, 1999).

En México se han usado los sensores remotos, desde mediados de los noventa, para evaluar áreas ensalitradas, como lo muestra el trabajo de Pulido *et al.*, en 1995. La CONAGUA ha estimado superficies regadas en las unidades de riego mediante sensores remotos desde 1999, con trabajos desarrollados por el COLPOS en todo México. El uso de estas técnicas también ha permitido estimar la infestación de plantas acuáticas en embalses del país,

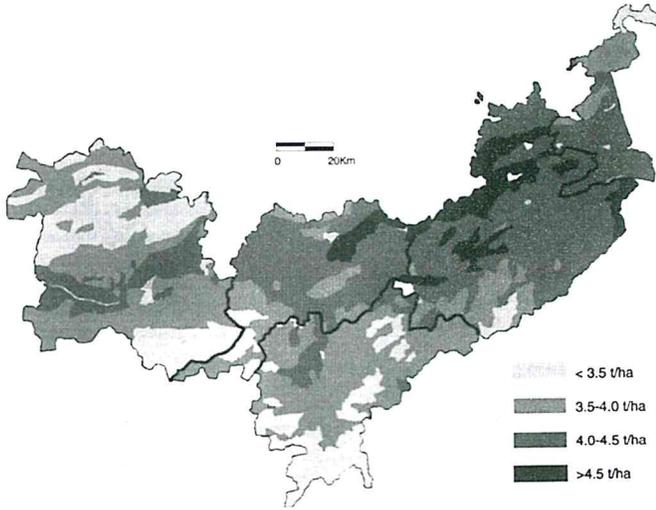


Figura 7. Clasificación de suelos por producción.

como se muestra en la figura 8, donde se muestra la presa Solís invadida por lirio acuático.

La percepción remota utilizando sensores satelitales de alta resolución permite monitorear el riego, como se muestra en la figura 9, en una parcela regada mediante un pivote central; como se observa, al ampliar el área regada, se muestran en color amarillo las zonas estresadas por un riego deficiente.

CONCLUSIONES

Las tecnologías de la información y de las comunicaciones permiten conocer, en tiempo real, el estado del desarrollo de los cultivos y facilitan la toma de decisiones para los productores, respecto a las acciones que deben tomar para lograr mejores rendimientos a menores costos.

La Comisión Internacional de Irrigación y Drenaje (CIID), ha creado un grupo de trabajo para promover los Sistemas de Información Geográfica y la percepción remota como herramientas que permiten mejorar la



Figura 8. 52% del área del embalse con lirio.

operación y mantenimiento de los sistemas de riego y drenaje, así como facilitar la toma de decisiones para los regantes, promoviendo la utilización de estas técnicas tanto en los países desarrollados como aquellos en proceso de desarrollo.

También hay interés de países de la Unión Europea, en apoyar la instrumentación de estas técnicas en países de la Latinoamérica.

Finalmente, debe señalarse que estas técnicas tienen costos de instrumentación muy accesibles, por lo que su utilización está al alcance no sólo de los gobiernos, sino también de las organizaciones de usuarios del riego.

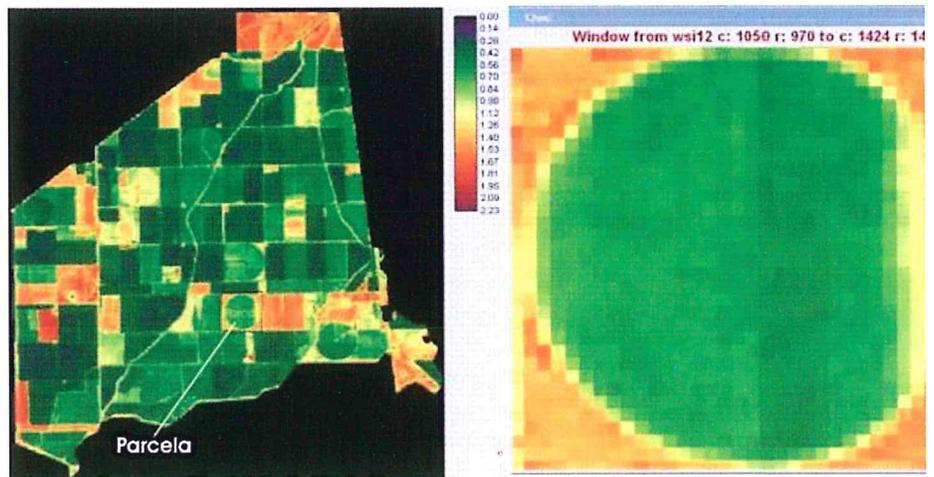


Figura 9. Riego deficiente con pivote central.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Clarke K. C. 2001. Getting Started with Geographic Information Systems. Prentice Hall Series in Geographic Information Science, New Jersey.

Clark Labs. 2004. IDRISI Kilimanjaro, GIS and Image Processing Software. Guide and Tutorial. Clark University, Worcester, MA.

ESRI. 2005. ArcView y ArcMap, GIS and Mapping Software. Guide and Tutorials. Redlads, California.

Hardisky, M. A., V. Klemas and M. Smart, 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina Alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49:77:83.

ICID-CIID. 2000. Remote Sensing and Geographic Information Systems in Irrigation and Drainage: Methodological Guide and Applications. Alain Vidal Editor, New Delhi, India.

Jensen J. R. 2000. Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall, New Jersey.

Pulido, M. L., H. S. Sanvicente, C. L. Wiegand y G. L. Anderson. 1995. Estimación de pérdidas de cosecha en suelos ensalitrados mediante imágenes de satélite. *In: Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*. Puerto Vallarta, México.

Rock B. N., J. E. Vogelmann, D. L. Williams, A. F. Voglemann y T. Hoshisaki. 1986. Remote Detection of Forest Damage. *Bio Science*. 36:439 pp.

Rouse J. W., W., R.H. Haas, J.A. Schell, y D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Vol. 1, pp. 309-317.*

Sakthivadivel, R., S., S. Thiruvengadachari, U. Amerasinghe, W. G. M. Bastiaanssen, y D. Molden. 1999. Performance evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, using remote sensing and GIS techniques. Research Report 28. International Water Management Institute. Sri Lanka.