

Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038

• José Luis Espinosa-Espinosa* • Enrique Palacios-Vélez •
• Leonardo Tijerina-Chávez • Héctor Flores-Magdaleno •
• Abel Quevedo-Nolasco •

Colegio de Postgraduados, México

**Autor para correspondencia*

Resumen

Espinosa-Espinosa, J. L., Palacios-Vélez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H., & Abel Quevedo-Nolasco (enero-febrero, 2017). Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 95-104.

La tarea de los sistemas de asesoramiento de riego suele ser costosa en cuanto a recursos humanos y materiales por la necesidad de hacer un seguimiento intensivo en campo en áreas extensas, además de enfrentar el reto de transferir la información al usuario, agricultor o técnico por la vía adecuada y en el momento oportuno. Asimismo, las nuevas tecnologías de observación de la tierra han contribuido a que millones de hectáreas sean monitoreadas mediante sensores satelitales, haciendo más eficaz el seguimiento en campo. De igual forma, las tecnologías de la información, el Internet y la telefonía móvil permiten que la información generada por las imágenes satelitales pueda llegar al agricultor como usuario final de forma más rápida, fluida y personalizada, garantizando un seguimiento detallado y preciso de los cultivos haciendo más eficaz el trabajo de campo. La Unión Europea ha apoyado un proyecto para asesoramiento en riego a productores agrícolas denominado DEMETER (Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services), el cual ha sido exitosamente utilizado en España para el programa denominado Servicio de Asistencia en Riego Asistido por Satélite (e-SARAS), que maneja el Grupo de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha; también México participó en un proyecto que es extensión del DEMETER, denominado Pleiades (Participatory Low-Cost Earth-Observation-Assisted Irrigation Advisory: An Element Of Sustainable Water Management), con personal de la Universidad de Sonora, el Instituto Tecnológico de Sonora y el Colegio de Postgraduados en el periodo 2006-2009. El propósito de este trabajo es que los productores del Distrito de Riego 038 Río Mayo tengan disponible desde Internet un sistema de monitoreo satelital que contiene el seguimiento y desarrollo de los cultivos por medio del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas) por parcela; esto permitirá al productor comparar los rendimientos de ciclos pasados y permitirá que puedan tener una evaluación del desarrollo de sus cultivos para tomar decisiones necesarias y oportunas para obtener un mejor rendimiento en el actual ciclo.

Palabras clave: sensores remotos, imágenes de satélite, índice de vegetación, NDVI, visor web.

Abstract

Espinosa-Espinosa, J. L., Palacios-Vélez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H., & Abel Quevedo-Nolasco (January-February, 2017). Satellite system for monitoring crop development in the Irrigation District 038. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(1), 95-104.

The task of irrigation advisory systems is usually costly in terms of human and material resources due to the need of an intensive field monitoring in large areas. It also faces the challenge of transferring the information to the users, farmers or technicians in the right time and in the right way. Moreover, the new Earth Observation Technologies have helped millions of hectares to be monitored by satellite sensors, making the field monitoring be more effective. Similarly, the information technologies, the internet, and the mobile telephony allow the information gathered by satellite images to be available to farmers and users in a faster, smoother and more personalized way. This ensures a detailed and accurate crop monitoring and makes more efficient field work. The European Union has supported an irrigation advisory project for farmers called DEMETER (Demonstration of Earth Observation Technologies In Routine Irrigation Advisory Services), which has been successfully used in Spain for the program called Satellite Aided Irrigation Assistance Service (e- SARAS) used by the Remote Sensing and GIS Group from the University of Castilla-La Mancha. The purpose of this work is that producers from the Irrigation District 038, Rio Mayo have a monitoring web system to track their fields through the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), this will allow the producer to compare the harvest from previous cycles and to have a better evaluation of the development of their crops in order to make appropriate decisions for a better income in the current cycle.

Keywords: Remote sensing, satellite images, vegetation index, NDVI, web visor.

Recibido: 28/04/2015

Aceptado: 12/07/2016

Introducción

La agricultura de precisión, tal como se desarrolla en la actualidad, se empezó a fomentar desde hace unas tres décadas. La evolución de tecnologías como los sensores remotos satelitales y los sistemas de posicionamiento global (GPS) han contribuido a que millones de hectáreas sean monitoreadas por esos sistemas (Hatfield, 2008), permitiendo que tales tecnologías puedan integrarse al funcionamiento rutinario de los servicios de asesoramiento de riego, mejorando así la gestión operativa diaria.

Las tecnologías de observación de la tierra mediante sensores a bordo de satélites son las más adecuadas para hacer más eficaz el seguimiento en campo, al proporcionar imágenes de la superficie terrestre a intervalos regulares (Ueno, Kawamitsu, Sun, & Maeda, 2005; Soria, 2004; Rudorff & Batista, 1990).

Los servicios de asesoramiento de riego, ligados de manera estrecha con los agricultores, se van consolidando lentamente en este nuevo papel (Martín de Santa Olalla, Brasa-Ramos, Fabeiro-Cortés, Fernández-González, & López-Córcoles, 1999) y son uno de los más importantes instrumentos de gestión para conseguir una mejor eficiencia en el uso del agua para riego.

La Unión Europea ha apoyado un proyecto para asesoramiento en riego a productores agrícolas denominado DEMETER (Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services) (DEMETER, 2002), que ha sido exitosamente utilizado en España en el programa denominado Servicio de Asistencia en Riego Asistido por Satélite (e-SARAS), que maneja el Grupo de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha; asimismo, México participó en un proyecto que es extensión del DEMETER, denominado Pleiades (Participatory Low-Cost Earth-Observation-Assisted Irrigation Advisory: An Element of Sustainable Water Management), con personal de la Universidad de Sonora, el Instituto Tecnológico de Sonora y el Colegio de Postgraduados, en el periodo 2006-2009.

El proyecto consiste en obtener imágenes del satélite Landsat 5 a través del consorcio EURIMAGE, entregadas en pocas horas después de la captura a la universidad. A estas imágenes se les realiza un proceso consistente en la corrección geométrica y estimación de las reflectividades aparentes, con lo que se obtiene el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizadas (NDVI), el mapa de coeficientes de cultivo K_c derivado del índice anterior y la producción de una imagen en falso color con las bandas 5, 4 y 3 de la zona en estudio. Además, están tratando de agregar una corrección por variables atmosféricas.

Finalmente se les remite a los productores en un visor llamado *SPIDER* vía Internet, la información sobre las necesidades de agua de los cultivos y recomendaciones sobre su manejo. Esta información se envía en dos modos: un servicio general para todos los productores y un servicio personalizado por parcela a grandes productores que cooperan económicamente para conseguir la mencionada información (Palacios & García, 2012).

Se pueden utilizar varios procedimientos para obtener el coeficiente de cultivo desde las imágenes satelitales, directamente mediante los denominados Índices de Vegetación (Calera & Martín de Santa Olalla, 2005) (Moran, Inoue, & Barnes, 1997), o bien utilizando modelos de balance de energía (Tasumi & Allen, 2007). Puesto que la información ha de estar disponible para los productores en el plazo más breve posible, la mejor solución es obtener el coeficiente de cultivo a partir de los índices de vegetación (Cuesta, Montoro, Jochum, López, & Calera, 2005).

La imagen adquirida por el satélite se puede mostrar de forma semejante a una "fotografía en color" del cultivo en el instante de su adquisición, aportando información de las características de la distribución espacial del vigor de dicho cultivo.

Contar con un Sistema de Monitoreo Satelital permite que los productores del Distrito de Riego 038 Río Mayo puedan visualizar el seguimiento y desarrollo de sus cultivos por medio del Índice de Vegetación por Diferencias

Normalizadas (NDVI); también puede compararse con el mayor rendimiento de los ciclos pasados, a fin de tomar decisiones necesarias de manejo oportuno para obtener un mejor rendimiento en el ciclo actual.

Materiales y métodos

El presente trabajo se desarrolló en el Distrito de Riego 038 Río Mayo. La superficie actual del distrito está situada en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, y comprende un área de 114 000 ha, de las cuales 97 891 ha están en un padrón y se riegan 88124 ha; en algunos ciclos agrícolas se incrementan hasta 92 000 ha; también se consideran terrenos agrícolas localizados fuera de su perímetro. Este distrito se localiza al sur del estado de Sonora, en la zona denominada Valle del Mayo, entre las latitudes 27° 15' y 26° 45' al norte del ecuador, así como los meridianos 109° 20' y 109° 50' con respecto al meridiano de Greenwich.

Materiales

Se adquirieron 40 imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI para cuatro ciclos agrícolas, las cuales fueron obtenidas de la página web: Global Visualization de USGS Visor (<http://glovis.usgs.gov/>) (USGS, 2011-2015). Dichas imágenes constan de ocho bandas, con una resolución espacial de 30 m para las seis bandas reflectivas (de 1 a 5 y 7), 15 m para la banda pancromática (8) y 60 m para la banda térmica (6).

En el cuadro 1 se muestra el número de imágenes utilizadas con las fechas y nombre de cada imagen por ciclo agrícola.

El *software* utilizado para el análisis y procesamiento digital de las imágenes de satélite fue IDRISI®, ArcView® y Quantum GIS Wien 2.8.2, por su ventaja que es *Open Source*, así como el desarrollado por Palacios (2007) para la corrección atmosférica y *EstadParcelas*, a fin de estimar valores promedio de índices de vegetación

Cuadro 1. Lista de imágenes de satélite utilizadas en el sistema de monitoreo de cuatro ciclos agrícolas.

ID	Fecha	Clave ciclo	Nombre-FCV	Nombre-NDVI
1	25/12/2011	1112	fcv_1112_111225	ndv_1112_111225
2	10/01/2012	1112	fcv_1112_120110	ndv_1112_120110
3	26/01/2012	1112	fcv_1112_120126	ndv_1112_120126
4	11/02/2012	1112	fcv_1112_120211	ndv_1112_120211
5	24/03/2012	1112	fcv_1112_120324	ndv_1112_120324
6	09/04/2012	1112	fcv_1112_120409	ndv_1112_120409
7	18/04/2012	1112	fcv_1112_120418	ndv_1112_120418
8	28/04/2012	1112	fcv_1112_120428	ndv_1112_120428
9	11/05/2012	1112	fcv_1112_120511	ndv_1112_120511
10	27/05/2012	1112	fcv_1112_120527	ndv_1112_120527
11	11/12/2012	1213	fcv_1213_121211	ndv_1213_121211
12	27/12/2012	1213	fcv_1213_121227	ndv_1213_121227
13	12/01/2013	1213	fcv_1213_130112	ndv_1213_130112
14	28/01/2013	1213	fcv_1213_130128	ndv_1213_130128
15	13/02/2013	1213	fcv_1213_130213	ndv_1213_130213
16	01/03/2013	1213	fcv_1213_130301	ndv_1213_130301
17	17/03/2013	1213	fcv_1213_130317	ndv_1213_130317
18	18/04/2013	1213	fcv_1213_130418	ndv_1213_130418
19	04/05/2013	1213	fcv_1213_130504	ndv_1213_130504
20	14/12/2013	1314	fcv_1314_131214	ndv_1314_131214

Cuadro 1 (continuación). Lista de imágenes de satélite utilizadas en el sistema de monitoreo de cuatro ciclos agrícolas.

ID	Fecha	Clave ciclo	Nombre-FCV	Nombre-NDVI
21	22/12/2013	1314	fcv_1314_131222	ndv_1314_131222
22	07/01/2014	1314	fcv_1314_1401107	ndv_1314_1401107
23	15/01/2014	1314	fcv_1314_140115	ndv_1314_140115
24	23/01/2014	1314	fcv_1314_140123	ndv_1314_140123
25	08/02/2014	1314	fcv_1314_140208	ndv_1314_140208
26	24/02/2014	1314	fcv_1314_140224	ndv_1314_140224
27	28/03/2014	1314	fcv_1314_140328	ndv_1314_140328
28	06/04/2014	1314	fcv_1314_140406	ndv_1314_140406
29	21/04/2014	1314	fcv_1314_140421	ndv_1314_140421
30	23/11/2014	1415	fcv_1415_141123	ndv_1415_141123
31	01/12/2014	1415	fcv_1415_141201	ndv_1415_141201
32	17/12/2014	1415	fcv_1415_141217	ndv_1415_141217
33	02/01/2015	1415	fcv_1415_150102	ndv_1415_150102
34	10/01/2015	1415	fcv_1415_150110	ndv_1415_150110
35	18/01/2015	1415	fcv_1415_150118	ndv_1415_150118
36	03/02/2015	1415	fcv_1415_150203	ndv_1415_150203
37	11/02/2015	1415	fcv_1415_150211	ndv_1415_150211
38	27/02/2015	1415	fcv_1415_150227	ndv_1415_150227
39	23/03/2015	1415	fcv_1415_150323	ndv_1415_150323
40	16/04/2015	1415	fcv_1415_150416	ndv_1415_150416

dentro de los límites de las parcelas de estudio.

Para el desarrollo e instalación de la aplicación del Sistema de Monitoreo Satelital se utilizaron los siguientes programas: *Eclipse IDE for Java EE Developers*, *HeidiSQL*, *XAMPP*. Las herramientas y lenguajes de programación web usadas fueron *Java*, *JavaScript*, *jQuery*, *Css*, *Html*, *OpenLayers* y *MySQL*. La instalación se realizó en el Sistema Operativo *Ubuntu server 12.04.3 LTS Linux*, con *Glassfish 04*, contenedor de aplicaciones web, como *Geoserver 2.3* es contenedor de almacén de datos geospaciales, y la misma aplicación web Sistema de Monitoreo Satelital. En la figura 1 se muestra la forma en que se integra el *software*.

Metodología

La notable diferencia de la reflectividad entre las bandas visibles y los infrarrojos, especialmente el rojo (utilizado en la fotosíntesis) y la del infrarrojo cercano (reflejado) permite calcular varios

índices de vegetación, que pueden ser un buen indicador del desarrollo de los cultivos y aún estimar su rendimiento futuro. Entre estos índices suele utilizarse para medir el desarrollo de la vegetación el denominado “Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas” (NDVI, por sus siglas en inglés) (Rouse et al., 1974), citado por Jensen (2000), cuyo valor se calcula con las reflectividades en las bandas roja (ρ_r) (0.60 a 0.70 μm) e infrarrojo cercano (ρ_i) (0.70 a 1.3 μm). La fórmula para su cálculo es:

$$NDVI = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad (1)$$

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se llevaron a cabo las siguientes actividades.

Tratamiento de las imágenes

Se realizaron las siguientes actividades para el tratamiento de las imágenes satelitales: recorte



Figura 1. Integración del software.

de la imagen para la zona de estudio (DR 038), corrección atmosférica y transformación de los valores de radiancia a reflectancia aparente. Estos cálculos permitieron transformar los valores originales de cada imagen Landsat en parámetros físicos. Después se obtuvieron los Índices de Vegetación de Diferencias Normalizada (NDVI) para las diferentes imágenes satelitales y por último los valores obtenidos del NDVI para cada imagen se agregaron a cada parcela con el programa *EstadParcelas* para generar una base de datos con los valores acumulados del NDVI; esto, para cada ciclo agrícola.

La imagen adquirida por el satélite ya procesada y con los valores calculados del NDVI aporta información de gran importancia sobre las características del vigor de dicho cultivo, la cual es entregada al productor por medio del sistema de monitoreo satelital.

Arquitectura de desarrollo para la aplicación web

Se siguió el patrón de arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), que define la organización independiente del Modelo (objetos de negocio), la Vista (interfaz con el usuario u otro sistema) y el Controlador (controlador de secuencias de tareas de la aplicación). De esta forma, el sistema se dividió en tres capas.

En la figura 2 se describe el funcionamiento del patrón modelo-vista-controlado.

El patrón de arquitectura "modelo vista controlador" es una filosofía de diseño de aplicaciones compuesta por Modelo, Vista y Controlador.

Modelo

Aquí se programa todo lo relacionado con las bases de datos, es decir, las entradas y salidas de

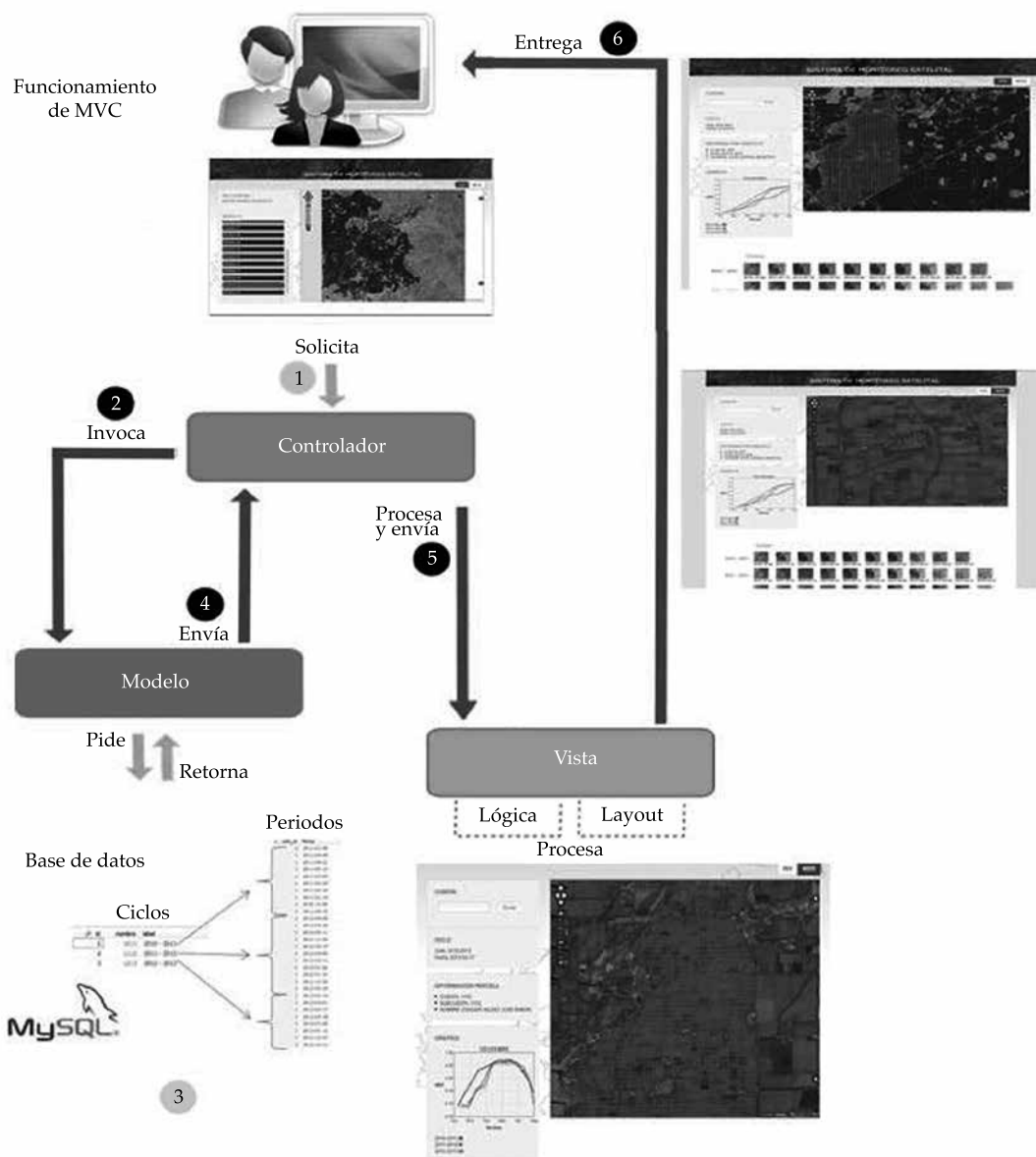


Figura 2. Funcionamiento del patrón modelo-vista-controlador.

datos, y se devuelven como se necesitan desde el programa principal. Contiene el núcleo de la funcionalidad (dominio) de la aplicación, encapsula el estado de la aplicación, pero es independiente del Controlador y la Vista.

Vista

En esta sección se programa la parte visual del *software* que utiliza el usuario. En el caso de un

sitio web es la parte de *HTML*, *CSS* y *JavaScript* normalmente. Es la presentación del Modelo; se puede acceder a él, pero nunca cambiar su estado.

Controlador

Es la lógica del programa. Le pide al modelo los datos y los muestra en la vista o pantalla, lo que es el núcleo, y reacciona a la petición del

Cliente; ejecuta la acción adecuada y crea el modelo pertinente.

Resultados y discusión

El resultado final de este trabajo (sistema de monitoreo satelital) se instaló en un dominio en el Colegio de Postgraduados, donde se puede tener acceso desde la página <http://hidro.colpos.mx:8080/sig-mon/>. Se puede ingresar a la aplicación desde cualquier explorador web.

El tratamiento de las imágenes satelitales, como el cálculo del NDVI, se agregaron a cada parcela del Distrito de Riego 038 con el programa *EstadParcelas*. Los valores acumulados del NDVI por parcela se guardaron en una base de datos geoespacial *shapefile* para cada ciclo agrícola, que se presentan en una gráfica para un mayor entendimiento al productor dentro del visor del Sistema de Monitoreo Satelital.

El Sistema de Monitoreo Satelital se integra de cuatro *shapefiles* y de las imágenes satelitales. Un *shapefile* para el ciclo agrícola 2011-2012, otro para el ciclo 2012-2013, 2013-2014 y para

el ciclo 2014-2015. “El Shapefile es un formato de representación vectorial desarrollado por ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos” (OSM, 2015). En cada *shapefile* se cuenta con la información de los usuarios, como distrito de riego, módulo, número de cuenta, nombre, apellido paterno, apellido materno, superficie y los acumulados del NDVI de las correspondientes imágenes de satélite por cada ciclo agrícola.

Como las imágenes se visualizan en NDVI y falso color se tiene un total de 80 imágenes procesadas para los cuatro ciclos; 40 son NDVI y 40 falso color.

Estos *shapefiles* y las imágenes se cargaron en *Geoserver*. “Es un servidor Web y contenedor de los almacenes de datos geoespaciales; permite visualizar mapas y datos de diferentes formatos para aplicaciones Web” (OSGeo, 2015), como se muestra en la figura 3.

La aplicación está desarrollada en tres secciones:

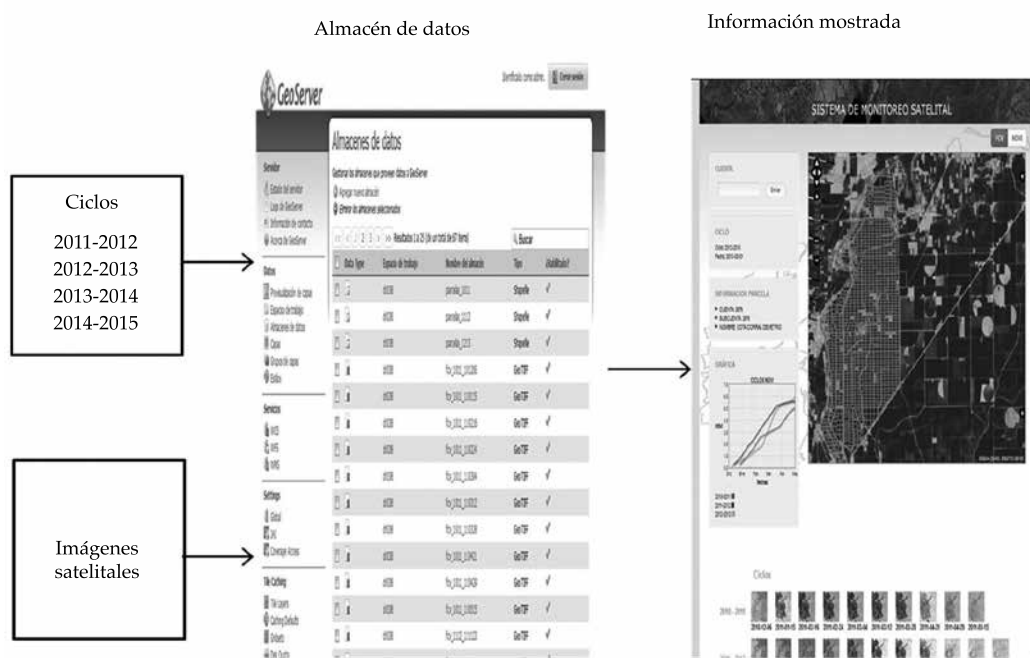


Figura 3. Integración de los *shapefile* y las imágenes satelitales para su visualización en la aplicación web.

- Sección de acceso.
- Sección en donde se encuentran los 16 módulos del Distrito de Riego.
- Sección donde está la información por parcela en sus diferentes ciclos.

El Sistema de Monitoreo Satelital da acceso simultáneamente a la imagen satelital y a la gráfica de la parcela de la que se requiere la información correspondiente al NDVI acumulado, tal y como se muestra en la figura 4, que permite observar el seguimiento de la evolución temporal del cultivo a lo largo de su ciclo de crecimiento. Cuando se selecciona una parcela se muestra el NDVI acumulado de cada ciclo agrícola. La información gráfica sobre el vigor del cultivo es una de las aportaciones más relevantes derivadas de la imagen del satélite, pues permite al usuario identificar y reconocer los rasgos del cultivo en ese momento en una parcela, al igual que las diferencias de siembra en suelo, nutrientes, riego que pueden reflejarse

en la imagen a lo largo del ciclo de crecimiento. El reconocimiento de estas diferencias y su contraste con la propia experiencia del agricultor hace que éste tenga confianza en el Sistema de Monitoreo Satelital.

Es conveniente mencionar que las gráficas en el NDVI acumulado para cada parcela pueden variar en cada ciclo, pues muchos de los dueños rentan sus terrenos a diferentes productores y cada productor no siempre siembra el mismo cultivo en los diferentes ciclos agrícolas, o bien la fecha de siembra no es la misma para los distintos ciclos.

El sistema de monitoreo ya está disponible para los productores del Distrito de Riego 038 Río Mayo ingresando a la dirección <http://hidro.colpos.mx:8080/sig-mon/>, donde se pretende que los productores ya puedan contar y visualizar la información para los ciclos agrícolas 2015-2016 y puedan ver con las imágenes satelitales actuales la evolución del cultivo, comparando esto con los ciclos pasados.



Figura 4. Imagen de la gráfica correspondiente al NDVI acumulado.

Conclusiones y recomendaciones

Las tecnologías de observación de la tierra han alcanzado el punto de madurez y desarrollo en la generación de productos que hacen posible plantear su integración en el funcionamiento diario de los servicios de asesoramiento en riego, para conseguir, entre otros aspectos, una mejor eficiencia del agua para riego.

Como se ha observado, el apoyo a la agricultura en general y a la de riego en particular mediante el uso de imágenes satelitales combinadas con Sistemas de Información Geográfica son herramientas de mucho valor, que ayudarán a los usuarios del agua a mejorar su uso y aumentar el rendimiento de sus cultivos.

Mediante estos métodos, es posible evaluar cómo se desarrollan los cultivos y, en su caso, los productores pueden tomar las medidas conducentes a corregir errores en el manejo de sus cultivos. Esto es la base de la agricultura de precisión.

Recomendaciones

Recomendación para el buen funcionamiento de la aplicación Sistema de Monitoreo Satelital y algunas mejoras.

- Actualizar el padrón de usuarios

Esto permitirá hacer una consulta de la parcela al momento de ingresar el número de cuenta en el sistema, lo que actualmente no se puede hacer porque hay muchos números de cuenta no actualizados en el padrón actual; por ejemplo, hay 390 registros que están con número de cuenta 0; otros números están repetidos.

Tener la información al día también permitirá que las parcelas estén correctamente digitalizadas.

- Enviar reportes por correo electrónico

Para evitar que el usuario, técnico o productor tenga que ir hasta el módulo del Distrito de Riego para monitorear su parcela, otra mejora es realizar una interfaz donde el usuario pueda

ingresar qué parcela o parcelas quiere monitorear, para que pueda recibir un reporte a su correo electrónico cada vez que se cuente con una nueva imagen satelital.

- Reportes por módulo y distrito

Otra mejora para el Sistema de Monitoreo Satelital sería que pudiera registrar qué cultivo se está sembrando en cada parcela y volúmenes de agua entregados por módulo, entre otras cosas. Esto permitiría generar gráficas para obtener los reportes necesarios por módulo.

- Aplicación para dispositivo móvil

Ya que en la actualidad las tecnologías están evolucionando y cada vez hay más personas empleando dispositivos móviles por su gran comodidad para tener la información al momento desde cualquier lugar, se pretende tener el Sistema de Monitoreo Satelital en dispositivos móviles, haciendo más efectiva la transmisión de información a los productores.

Referencias

- Calera, A., & Martín de Santa Olalla, F. (2005). Uso de la teledetección en el seguimiento de los cultivos de regadío. Cap. XIV. En: *Agua y Agronomía*. Santa-Olalla, M., López, F.P. & Calera, B. A. (eds.). Madrid: Mundiprensa.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A., López, P., & Calera, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA*, 101(3), 212-224.
- DEMETER (2002). *Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services*. VI Framework Program, European Commission. Recovered from www.demeter-ec.net.
- Hatfield, J. L. (2008). Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, 100, 117-131.
- Martín de Santa Olalla, F., Brasa-Ramos, A., Fabeiro-Cortés, C., Fernández-González, D., & López-Córcoles, H. (1999). Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management*, 40(2-3), 195-206.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. (1997). Opportunities and limitations for ImageBased remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61, 319-346.

- OSM, 2015. Open Street Map. Recuperado de <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Shapefiles>
- OSGeo, 2015. Open Source Geospatial Foundation. Recuperado de https://live.osgeo.org/es/overview/geoserver_overview.html
- Palacios, S. L. A. (2007). *Corrector atmosférico en imágenes Landsat*. Tesis doctoral. México, DF: Colegio de Posgraduados.
- Palacios, V. E., & García, E. A. (2012). *La operación de los sistemas de riego con apoyo de las técnicas de la información*. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados.
- Rudorff, B. F. T., & Batista, G. T. (1990). Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, 33, 183-192.
- Soria, R. J. (2004). Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 55, 61-78.
- Tasumi, M., & Allen, R. (2007) Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, 88, 54-62.
- Ueno, M., Kawamitsu, Y., Sun, L., & Maeda, K. (2005). Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. *Sugarcane International*, 23, 8-11.
- USGS (2011-2015). *Global Visualization Viewer*. Recuperado de <http://glovis.usgs.gov/>.

Dirección institucional de los autores

M.C. José Luis Espinosa-Espinosa
Dr. Enrique Palacios-Vélez
Dr. Leonardo Tijerina-Chávez
Dr. Héctor Flores-Magdaleno
Dr. Abel Quevedo-Nolasco

Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km. 36.5
Montecillo, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200, ext. 1174
espinosa.jose@colpos.mx
tijerina@colpos.mx
mhector@colpos.mx
anolasco@colpos.mx