

AVANCES EN GEOMÁTICA PARA LA RESOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO

• Felipe Omar Tapia-Silva* •
Universidad Autónoma Metropolitana, México

*Autor de correspondencia

Resumen

TAPIA-SILVA, F.O. Avances en geomática para la resolución de la problemática del agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 2, marzo-abril de 2014, pp. 131-148.

Como en un trabajo precedente (Tapia-Silva 2011a, 2011b, escrito en 2008), este manuscrito tiene la intención de conjuntar una muestra ilustrativa de los trabajos que permiten apreciar las capacidades de la geomática y sus disciplinas convergentes para apoyar el estudio de las variables del ciclo hidrológico en un contexto de análisis territorial de la problemática del agua para la generación de iniciativas y políticas públicas que ayuden a su resolución. Este nuevo artículo actualiza y complementa información y conocimiento presentados en el artículo antes citado, y amplía definiciones y conceptos relativos a la geomática provistos en el mismo. Otro elemento innovador del presente manuscrito consiste en hacer énfasis en el papel de los SIG como eje integrador de las otras disciplinas convergentes en el ámbito de la Geomática. El artículo está estructurado en los apartados siguientes: "Geomática", "Resumen actualizado de la problemática del agua en México", "Avances desde la geomática para la resolución de la problemática hídrica en México" y "Apuntes finales". El primer apartado define a la geomática y la ubica en el contexto de su relación con la sociedad y su problemática. El segundo resume la problemática del agua en México, complementando con otros trabajos científicos lo publicado en Tapia-Silva (2011a, 2011b). El tercero aporta una revisión actualizada de los trabajos científicos publicados respecto al tema de generación de soluciones a esta problemática desde el enfoque de las disciplinas integradas en la geomática. El último apartado sintetiza lo incluido en los anteriores y concluye con una serie de reflexiones finales a manera de conclusiones.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, modelaje geoespacial, percepción remota.

Geomática

De acuerdo con autores como Pagiatakis (2013), el término geomática surgió en Canadá a finales

Abstract

TAPIA-SILVA, F.O. *Advances in Geomatic to Solve Water Problems in Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 2, March-April, 2014, pp. 131-148.

As in a previous work (Tapia-Silva 2011a, 2011b, written in 2008), this paper reviews representative studies that are examples of the capabilities of Geomatics and its convergent disciplines to support the study of water cycle variables as part of a territorial analysis of water resources and related problems in Mexico. The aim of the article review is to generate public initiatives and policies to help solve these problems. Therefore, the idea of this new article is to update and supplement the information, knowledge, definitions and concepts about water problems and Geomatics provided in Tapia-Silva (2011a, 2011b). An innovative feature of this manuscript is its emphasis on the role of GIS as an integrating axis for the other disciplines involved in Geomatics. The article is structured as follows: Geomatics, Updated Summary of Water Problems in Mexico, Advances in Geomatics to Solve Water Problems and Final Remarks. The first section defines Geomatics and describes its relationship with society and its needs. The second summarizes water-related problems in Mexico, complementing the information provided in Tapia-Silva (2011a, 2011b). The third section reviews the work published on the subject of creating solutions to this problem from the viewpoint of integrated disciplines in Geomatics. The last section summarizes what is included in the previous sections and concludes with some final thoughts.

Keywords: Geographic information systems, geospatial modeling, remote sensing.

de los años setenta, acuñado por Bernard Dubuisson. Otros autores, como Gomarazca (2010), indican que fue expresado por primera vez en la Universidad de Laval en Canadá a

principios de los ochenta, basándose en el concepto de que el incremento potencial del cómputo electrónico revolucionó la ciencias de la representación y levantamiento de datos en campo, y que el uso del diseño computarizado fue compatible con el tratamiento de grandes cantidades de información. Autores como Pagiatakis (2013) la consideran como una parte de la ingeniería. Al respecto, existe una serie de acepciones con una fuerte tendencia técnica, como la propuesta por Gomarazca (2010): "Geomática es definida como un enfoque integrado, multidisciplinario y sistémico para seleccionar los instrumentos y las técnicas apropiadas para coleccionar, almacenar, integrar, modelar, analizar, recuperar, transformar, desplegar y distribuir datos espacialmente georreferenciados provenientes de diferentes fuentes con características bien definidas de precisión y continuidad en una forma digital". Sin embargo, de acuerdo con Levi (2006): "la disciplina resultante va más allá que la suma de sus partes y se convierte en un sistema de pensamiento, donde no son importantes las fronteras entre las partes ni definir el origen preciso de las aportaciones que integran su marco conceptual, sino que se conforma como una unidad orientada a dar soluciones integrales que presenta la sociedad, mismas que se abordan generalmente desde un marco teórico-metodológico asociado con el análisis espacial". De esta forma, el término puede ser usado para definir un campo del conocimiento transdisciplinario científico para solucionar problemáticas de la sociedad con ocurrencia espacio-temporal. La disciplina emerge en el espacio convergente de otras previas, como sistemas de información geográfica (SIG), cartografía, percepción remota, geodesia y fotogrametría. Asimismo, estudia una serie de métodos de adquisición, procesamiento, representación, comunicación, análisis y sistematización de datos, información y conocimiento con localización y entorno espacial específicos. Geomática es una ciencia tipo II originada por las necesidades de la sociedad y dirigida a solucionarlas (Tapia-Silva, 2011c).

De acuerdo con Reyes y Monroy (2000), la geomática se origina en el proceso de interrelación entre los SIG y la Geografía. Estos autores indican que durante este proceso se detectó la necesidad de integrar otras actividades científicas, como cartografía y geodesia, cuyos desarrollos habían estado aconteciendo de manera paralela y con significativos puntos de contacto. De igual forma mencionan que esta interrelación se traduce en los mapas que constituyen la técnica o herramienta tradicional para almacenar, presentar y analizar datos espaciales. El mapa es entonces uno de los fundamentos de los SIG, al funcionar como fuente y estructura de almacenamiento de datos geoespaciales y como instrumento de análisis y despliegue.

Como puede observarse en la figura 1, los SIG, constituyen un importante eje de integración de las demás disciplinas de la geomática. Elementos provenientes de la teoría general de sistemas (von Bertalanffy, 1979), del modelaje cartográfico, de análisis espacial (incluida la geoestadística), de otras disciplinas emergentes, como cibercartografía y visualización computacional, de geocomputación, de geodesia, del modelaje cuantitativo y cualitativo, y de percepción remota, se integran en mayor o menor medida en los SIG. Esto implica que la disciplina de los SIG requiere integrar una vasta cantidad de elementos provenientes de otras disciplinas que permiten el registro, análisis y visualización de los fenómenos asociados con el territorio (georreferenciados). Otras disciplinas, como la fotogrametría y el procesamiento digital de imágenes, brindan importantes elementos que igualmente son manipulados en el contexto de los SIG.

El desarrollo del campo del análisis espacial en el marco de los SIG ha jugado un papel fundamental en el proceso de surgimiento de la geomática. Rogerson y Fotheringham (1994) escriben que los SIG fueron al inicio generados como herramientas para almacenamiento, búsqueda y despliegue de información geográfica, y que las capacidades de análisis espacial eran pobres o inexistentes en el

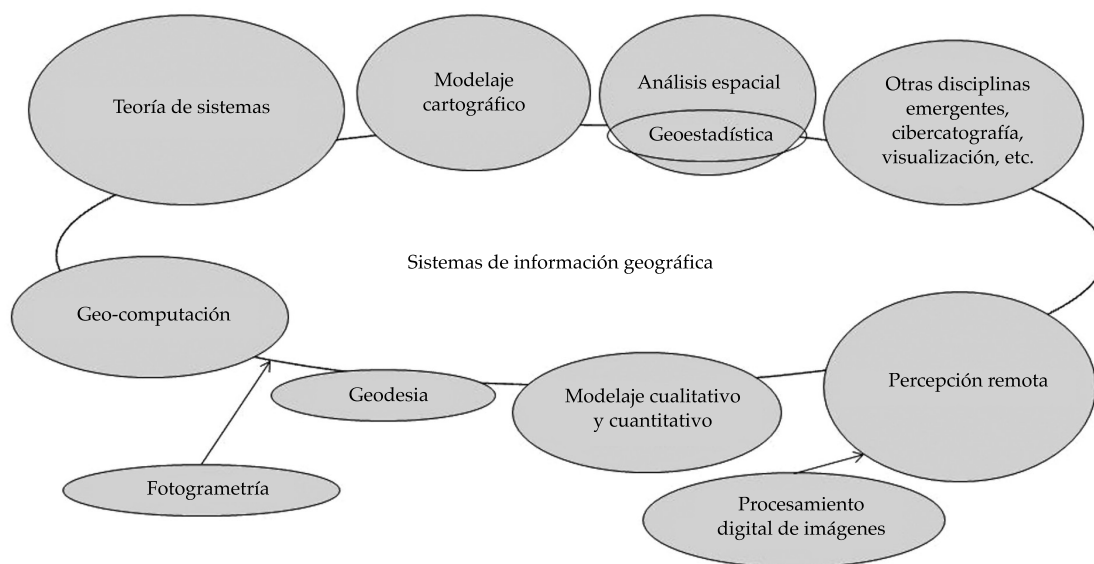


Figura 1. Integración de las disciplinas de la geomática con los sistemas de información geográfica (SIG).

entorno de los primeros sistemas. Star y Estes (1990) precisan que los factores que permitieron la creación de SIG digitales durante los años sesenta fueron los siguientes: refinamientos de la técnica cartográfica, que tiene sus orígenes desde el tiempo de los egipcios (2500 a.C.), rápidos desarrollos en sistemas digitales computarizados y, sobre todo, la revolución cuantitativa en análisis espacial. Al respecto, Demers (2000) afirma que el corazón de un SIG es su capacidad de análisis. Es decir, que sin análisis espacial no hay SIG.

Como se indicó previamente, la geomática visualiza a la sociedad como el principal beneficiario de sus estudios y desarrollos, y la incluye en sus modelos de conocimiento sobre el funcionamiento del territorio, al identificar actores que tienen incidencia sobre los cambios al marco natural o al marco construido (Tapia-Silva 2011a, 2011b). En este contexto, en el Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" (CentroGeo) se ha experimentado un proceso de generación de conocimiento basado en la denominada espiral del conocimiento (figura 2). El proceso parte de un trabajo empírico

motivado por las dinámicas de vinculación con las problemáticas de diversas organizaciones de los sectores público, social y privado. Como respuesta se generan prototipos (desarrollos tecnológicos presentados como artefactos de geomática, ver definición abajo) y soluciones de geomática, que posteriormente pueden quedar formalizados en el marco de la investigación básica y empírica, con la idea de generar un impacto en la sociedad relacionado con la inserción de soluciones a los problemas sociales planteados por los usuarios.

Para analizar las problemáticas de tipo territorial (como lo es la hídrica) se requiere un proceso de abstracción geoespacial, donde el observador posee una visión y conocimiento espacio-temporales de los procesos que ocurren en el territorio para integrar y construir los elementos necesarios para su modelación (Freire-Cuesta, 2011). El enfoque sistémico y la generación de información a partir de sensores remotos y modelos geoespaciales incrementan las posibilidades de la geomática para analizar y comunicar el funcionamiento de procesos que toman lugar en el territorio y para apoyar la toma de decisiones (Tapia-Silva 2011a, 2011b).

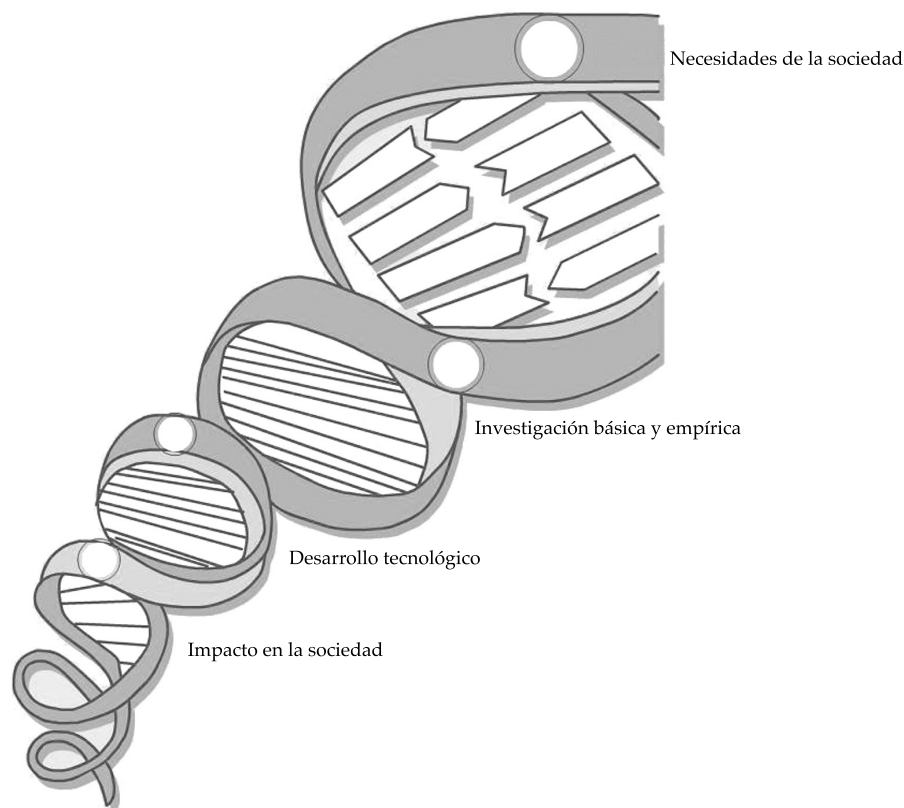


Figura 2. Espiral de generación de conocimiento en geomática (creada por el CentroGeo).

La hidrología es definida como una ciencia geográfica debido a que la ocurrencia del ciclo del agua y su aprovechamiento son fenómenos intrínsecamente asociados con el espacio. Las componentes del ciclo y otros factores involucrados en la compleja problemática del agua tienen una referencia geográfica y variabilidad espacial y temporal observables. Desde un punto de vista territorial, los estudios tendientes a incidir en la resolución de la problemática hídrica deben considerar un enfoque sistémico y requieren de información y conocimiento que reflejen esa variabilidad espacial y temporal de los factores incidentes. En el marco de este enfoque, una visión sistémica debe cumplir la característica de identificar los elementos que conforman el sistema hidrológico en cuestión (una cuenca o un territorio específico delimitado por otro tipo de criterios, por ejemplo políticos) y de analizar las relaciones

y dinámicas de cambio que se observan entre dichos elementos (Tapia-Silva, 2011a, 2011b).

Los artefactos de geomática pueden considerarse el aporte más acabado que la geomática ofrece para la solución de los problemas de corte hidrológico y de otros tipos de problemas del medio ambiente (Tapia-Silva, 2011a, 2011b). Al hablar sobre artefactos de geomática se hace referencia a desarrollos, prototipos y aplicaciones de tipo cibernético, que retroalimentan conocimiento e información geoespacial, como atlas, documentos, sistemas y soluciones en geomática. En su elaboración se combinan una serie de elementos que permiten procesos bidireccionales de comunicación con los usuarios, que a su vez acceden a elementos que posibilitan observarse a sí mismos como actores dentro del entorno específico de cada aplicación. Martínez y Reyes (2005) caracterizan este proceso como cibernético de segundo

orden. Durante la implementación de los artefactos de Geomática se genera un proceso de modificación de la visión de los usuarios del artefacto, quienes proponen mejoras al mismo, lo que les permite acceder de nuevo a otra serie de conceptos, información e ideas para seguir evolucionando en cuanto a la visión y solución de la problemática objeto del artefacto. Una importante característica de los artefactos de geomática es su visión holística y sistémica de los problemas o fenómenos que se tratan de representar. Uno de los ejes de la visión holística es el requerimiento de observar y representar el fenómeno en cuestión, considerando aspectos o características de tipo socioeconómico y técnico-natural. Así, la problemática en el entorno de un artefacto es observada y analizada en forma integral, maximizando la posibilidad de identificar soluciones que pueden ser de tipo socio-económico, técnico, biofísico o mixto. La inclusión de modelos de conocimiento aporta importantes elementos para representar la complejidad de la problemática hidrológica. Como se mencionó antes, los casos de aplicación de artefactos de geomática para la resolución de la problemática hídrica no serán revisados, por considerar que están bien cubiertos en el artículo precedente (Tapia-Silva, 2011a, 2011b) y que desde entonces no se han generado otros desarrollos notables.

Resumen actualizado de la problemática del agua en México

El agua se considera de manera cotidiana un recurso natural renovable. Desafortunadamente es posible verificar que no lo es más. La sobreexplotación de acuíferos, la desecación de cuerpos de agua y las problemáticas asociadas con polución, entre otros fenómenos, así lo demuestran. En dos décadas se ha duplicado el consumo de agua en el planeta y México cuenta con recursos hídricos limitados (Oswald-Spring y Sánchez Cohen, 2011). El surgimiento de problemas generados por cambios en los patrones de precipitación (no predecibles

de acuerdo con Allen e Ingram, 2002) como consecuencia del cambio climático agrava los problemas de disponibilidad y exceso de agua. Estos cambios se asocian con mayor incidencia de fenómenos extremos (sequías y lluvias intensas) y desestabilización de los regímenes de precipitación (Easterling *et al.*, 2000). Otro efecto negativo preponderante es el reportado por Douglas (1997), quien determinó un incremento global del nivel del mar de 1.8 mm/año para los últimos 100 años. Además se presentan complicaciones que se agravan en el contexto nacional, causadas por reducción y contaminación de acuíferos y de cuerpos de agua superficial (especificado en los siguientes incisos).

Estos sucesos indican que en un contexto de intervención humana mal planeada del territorio, el agua por sí sola es un recurso que no puede mantenerse en condiciones de seguir permitiendo el desarrollo de la sociedad humana y del ecosistema en el que se desenvuelve. La siguiente lista complementa los problemas de corte hidrológico de mayor trascendencia que se observan en México, presentados en Tapia-Silva (2011a, 2011b):

- Poca disponibilidad de agua. Oswald-Spring y Sánchez-Cohen (2011) mencionan que 58% del territorio nacional se ubica en zonas de poca precipitación (territorios áridos, semiáridos y desérticos). Asimismo, autores como Díaz-Padilla *et al.* (2011) documentan la estacionalidad de la precipitación (87% de mayo a octubre), lo que significa un periodo anual bastante largo con baja o nula precipitación. De acuerdo con Arreguín-Cortés *et al.* (2011), la disponibilidad anual per cápita pasó de 17 742 m³ en 1950 a 4 261 m³ en 2009, lo que significa una impresionante reducción del 76%. Estos mismos autores apuntan que de acuerdo con la definición de disponibilidad de agua por la Ley de Aguas Nacionales (diferencia entre volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca y el volumen de agua comprometido) existen seis cuencas

ubicadas al norte del país (Sonora norte y sur, cuencas cerradas del norte y río Bravo) y en el centro (Lerma-Chapala y río Balsas), que ya no cuentan con disponibilidad de agua.

- Baja eficiencia del uso agua en zonas agrícolas y urbanas. Conagua (2007) reporta un uso para fines agrícolas cercano al 80% del total nacional, lo que sugiere la necesidad de mejorar la eficiencia de riego mediante tecnologías ahorradoras de agua. Al respecto, Oswald-Spring y Sánchez-Cohen (2011) indican que la eficiencia en el sector agrícola es de 40%, lo que significa un porcentaje de pérdidas de agua enorme (60%).
- Desecamiento y contaminación de acuíferos (104 de un total de 653 de acuerdo con Conagua, 2007) por sobreexplotación y por serias deficiencias en la ordenación del uso del territorio, así como por la regulación del consumo de productos potencialmente contaminantes.
- Reducción y desaparición de cuerpos de agua como resultado de balances negativos entre entradas (provenientes de precipitación y de flujos superficiales y subterráneos) y salidas (causadas por evaporación y por tomas para uso antropogénico). Sobre este tema sólo se cuenta con estudios de cuerpos de aguas particulares, como el realizado al lago de Chapala (Lopez-Caloca *et al.*, 2008).
- Incidencia de lluvias torrenciales e impermeabilización de superficies que generan inundaciones y deslaves, y que impiden la recarga de los acuíferos. Respecto a huracanes, Conagua (2007) observa que entre 1980 y 2006 se han presentado 47, y que de 2001 a 2006 se han registrado con mayor frecuencia fenómenos de categoría 3 o superior. Respecto a superficies impermeables, sólo se cuenta con determinaciones aisladas para algunas ciudades (D.F., Campeche, León y Mexicali), que serán revisadas en la sección siguiente.
- Desaprovechamiento de agua de lluvia y contaminación de la misma al mezclarse

con aguas negras. Conagua (2007) reporta que el 36% de las aguas municipales son tratadas, sin embargo los niveles de tratamiento de las plantas son muy variables y normalmente se realizan a un nivel primario con base en información también provista por Conagua (2007).

- Contaminación de aguas superficiales por desecho de residuos contaminantes. De acuerdo con lo reportado por Conagua (2007), de un 8 a un 30% del total de las escorrentías superficiales están contaminadas, considerando los resultados de un monitoreo de tres parámetros de calidad (demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales).
- Incremento de flujos en ríos por deforestación o por uso mal planeado aguas arriba en las cuencas. Al respecto se requiere investigación para definir con precisión la situación actual. Sólo se dispone de algunos resultados preliminares, como los que se indicarán en la sección siguiente.

Estos puntos ilustran la compleja problemática hídrica en México. En la siguiente sección se revisan los avances desde la geomática para incidir en su resolución.

Avances desde la geomática para la resolución de la problemática hídrica en México

Esta sección se divide en varios apartados, que concentran los estudios relativos a aplicaciones de percepción remota, SIG, y otras relacionados con análisis espacial para la resolución de la problemática hídrica. Entre los temas que se tocan están los siguientes: análisis de la eficiencia del uso del agua; estudios integrales de cuencas; variabilidad espacial de acuíferos en cuanto a vulnerabilidad y capacidades de aprovechamiento, sellamiento y superficies impermeables; monitoreo de cuerpos de agua y relación con variables hidrológicas; zonas propensas a inundarse; efectos del uso del

territorio en relación con variables, y servicios ambientales hídricos, y análisis de variabilidad espacio-temporal de variables hídricas.

Análisis de eficiencia del uso del agua

El estudio de zonas con bajos índices de uso eficiente del agua y la generación de propuestas para elevar estos índices es una actividad factible en el ámbito de la geomática. Al respecto, Mo *et al.* (2005) utilizaron capas geográficas de uso de suelo, modelos de elevación digital (MED), texturas de suelo e índice de área foliar de cultivos surgido del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y datos climáticos interpolados para estimar cosecha, consumo de agua y un índice de eficiencia del uso del agua. Los estudios de disponibilidad hídrica en acuíferos, de balance hídrico y de consumo de recursos hídricos para cultivos, se auxilian de estudios de estimación de evaporación mediante percepción remota (Bastiaanssen *et al.*, 2005). Al respecto, Zwart *et al.* (2006) usaron SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998) para estimar productividad de agua en el cultivo de trigo en el valle del Yaqui, en Sonora, México. Garatuza-Payan *et al.* (2001) utilizaron imágenes GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) para obtener valores de radiación y los utilizaron para estimar evapotranspiración de acuerdo con la fórmula de Makkink. Los valores derivados de imágenes de satélite fueron aproximadamente 9% menores que las mediciones en campo. Además de lo anterior, Garatuza-Payan *et al.* (2005) calcularon coeficientes de cultivo en función de índices de vegetación (NDVI y SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index) y de ahí derivaron evapotranspiración real usando evapotranspiración de referencia. Scott *et al.* (2003) validaron la utilización de SEBAL para el cálculo de humedad en el suelo en una zona agrícola en Cortázar, Guanajuato, y analizaron sus resultados en el contexto del manejo del recurso. Respecto a desertificación, Lira (2004) propuso un modelo basado en el índice de vegetación TSAVI (Transformed

Soil-Adjusted vegetation Indice) y lo aplicó a una imagen LandSat de 1996 en la zona norte del país. Coronel *et al.* (2008) estimaron evaporación real para buena parte del territorio mexicano usando las metodologías SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998) y SSEB (Senay *et al.*, 2007), así como datos surgidos de productos MODIS y mediciones de evaporación PAN. En otro estudio, Ojeda-Bustamante *et al.* (2007) muestran las ventajas de la aplicación de un SIG al manejo del agua con fines agrícolas. Entre las funcionalidades reportadas están la generación de mapas de madurez de cultivos y mapas de uso del recurso. Otra investigación es la reportada por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2008), en la que información geográfica como superficie irrigada, superficie cultivada y superficie cosechada fue integrada en un SIG para establecer planes de cambio de patrones de cultivo, con la finalidad de adecuarse a la reducción de la disponibilidad de agua provocada por la construcción de una presa. Los autores reportan éste como un caso de éxito, donde se pudo evitar migración y abandono de tierras como resultado del uso de la información surgida del procesamiento de los datos geoespaciales.

Estudios integrales de cuencas

Ejemplo de este tipo de investigaciones es el efectuado por Galván-Fernández (2011), en el que se estudiaron aspectos como hidrología, fisiografía, clima, suelos, vegetación y sistemas productivos de una cuenca costera para definir acciones de gestión territorial. Ello en el marco de manejo de información geoespacial en SIG. En otro estudio, Carrera-Hernández y Gaskin (2008) proponen un SIG para mejorar el manejo regional de los datos de la cuenca del Valle de México. El SIG comprende datos climatológicos, de pozos y de escorrentías. En el estudio se presentan ejemplos de consultas espaciales de datos geográficos, así como análisis geoestadístico (*kriging* con deriva externa), para estimar con mayor precisión la variabilidad espacial de

la precipitación. En otro estudio realizado por Mendoza *et al.* (2010), se implementó un modelo distribuido de balance hídrico, con la idea de definir la influencia regional del uso del suelo y su variación temporal en la cuenca del lago Cuitzeo en Michoacán. En el estudio se aplicaron métodos de percepción remota y la información geográfica se integró en un SIG. Los resultados mostraron un mejoramiento (atípico respecto al común de los sistemas hidrológicos en México) de las condiciones hidrológicas regionales. Los estudios de disponibilidad del recurso por cuencas hidrogeológicas son también de gran valor. Al respecto, Ramos-Leal y Hernández-Moreno (2008) presentan una serie de reflexiones sobre la conveniencia de un enfoque regional para el estudio y manejo de las cuencas hidrogeológicas del San Luis Potosí y el Valle de México.

Variabilidad espacial de acuíferos en cuanto a vulnerabilidad y capacidades de aprovechamiento

La determinación de la variabilidad espacial de la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado y la ubicación de fuentes de contaminación (puntos o zonas geográficas) de cuerpos de agua superficiales o subterráneos se ha realizado con éxito en el marco de las disciplinas integradas en la geomática. Un estudio de este tipo fue el efectuado para el caso de la ciudad de México y su zona metropolitana por Ramos-Leal *et al.* (2010). En otro estudio semejante, en el contexto de una implementación de una base de datos geoespacial en el entorno de un SIG, Ramos-Leal *et al.* (2011) aplicaron la técnica de análisis espacial de regresión geográficamente pesada (GWR, por sus siglas en inglés) y el método SINTACS (Civita y De Maio, 1997), para definir vulnerabilidad del acuífero y calidad del agua en los valles centrales de Oaxaca. En la figura 3 se muestran imágenes surgidas de esta investigación, indicando las capas utilizadas para la generación del índice de fuentes de polución (PSI) y una superficie de

este parámetro, así como una determinación geográfica del índice SINTACS, los coeficientes ajustados de correlación local de la GWR y una gráfica mostrando su distribución espacial en la zona de valles Centrales de Oaxaca, México. Esta información es útil para identificar las zonas con mayor vulnerabilidad a ser contaminadas, asociadas con los factores contaminantes potenciales. Con otro estudio de Ramos-Leal *et al.* (2012), se estableció la vulnerabilidad del acuífero de la zona de Chapala, en Jalisco, a ser contaminado. En esta ocasión fue posible estudiar el movimiento vertical de contaminantes por medio del método SINTACS y el movimiento lateral por medio de GWR.

En un estudio reciente, Marín *et al.* (2012) utilizaron procedimientos de análisis espacial como establecimiento de zonas de influencia (*buffers*) de variables espaciales (cuerpos de agua, asentamientos humanos y ríos, entre otros) en el entorno de SIG. Este procedimiento permitió localizar áreas adecuadas para establecer un relleno sanitario en el estado de Morelos, considerando las características hidrogeológicas del lugar. Rangel-Medina *et al.* (2011) generaron un esquema de integración en el entorno de un SIG de información hidrogeológica previamente disponible de caudales de pozos en operación, de mediciones de calidad del agua subterránea y de interpretación de imágenes satelitales para proponer esquemas de aprovechamiento adecuado de acuíferos costeros del noreste del país. En este estudio se presentan vistas tridimensionales generadas en SIG, que constituyen importantes elementos para fortalecer las capacidades de análisis visual de la información procesada. En otro estudio realizado por Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez (2011), se analizó la subsidencia y la contaminación de agua subterránea provocada por actividades antropogénicas. En esta investigación se identificaron fallas y fracturas en terrenos afectados por subsidencia, se geoposicionaron las fallas y en el entorno de los SIG se sobrepusieron dichas fallas con

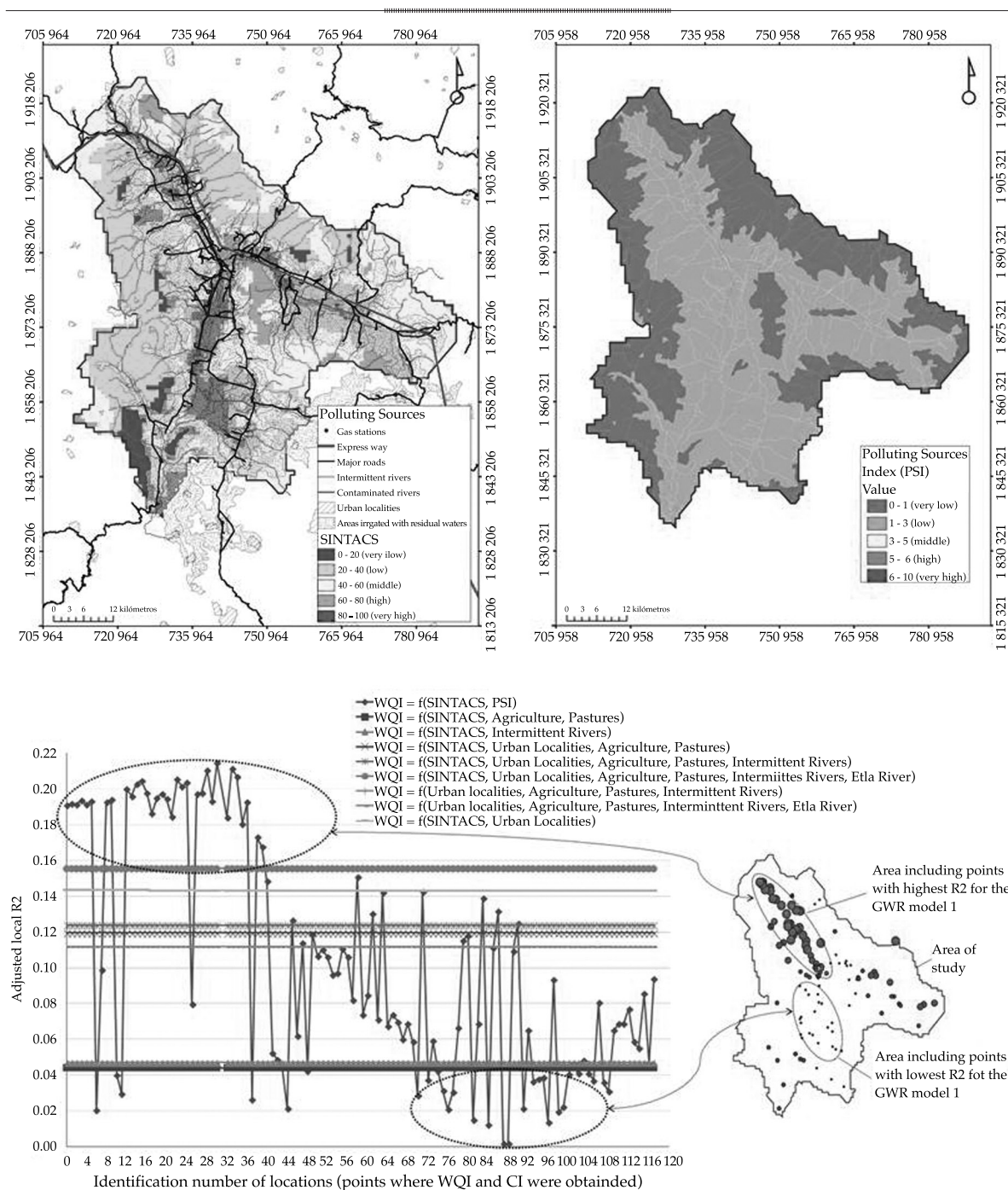


Figura 3. Capas utilizadas para la generación del índice de fuentes de contaminación (PSI), sobre una determinación geográfica del índice SINTACS (arriba izquierda). Especialización de PSI (arriba derecha). Resultados (coeficientes ajustados de correlación local) de la regresión geográficamente pesada (abajo izquierda), así como su distribución espacial en la zona de valles Centrales de Oaxaca, México (abajo derecha) (Ramos-Leal *et al.*, 2011).

planos urbanos para identificar daños y zonas en riesgo. Con este tipo de estudios, es posible proponer la ubicación de puntos de acondicio-

namiento de pozos de recarga del acuífero o de puntos de captación de agua de lluvia o superficial, tal como lo hicieron Saraf *et al.* (2004).

Sellamiento y superficies impermeables

En el ámbito de percepción remota y SIG, es posible realizar estudios de sellamiento de superficies permeables y aptas para el proceso de recarga del acuífero (como el realizado por Tapia-Silva y Mora 2004). Respecto a la caracterización de superficies impermeables, es posible generar metodologías como la implementada por CentroGeo (2007), usando imágenes SPOT-5 para un estudio de asentamientos precarios encargado por la Secretaría de Desarrollo Social de México. Esta metodología incluye la aplicación del modelo V-I-S (vegetación-superficie impermeable-suelo desnudo; Ridd, 1995). Éste es un modelo empírico que relaciona datos de cobertura terrestre obtenidos con percepción remota y aspectos biofísicos de los ambientes urbanos dentro de un esquema jerárquico de decisiones. En otro estudio, Freire-Cuesta (2011) estableció una metodología consistente y replicable con enfoque geomático, para estimar el porcentaje de sellamiento de los tipos de cobertura superficial de un área de captación urbana, utilizando para esto imágenes ópticas multiespectrales de alta resolución espacial. La autora aplicó los resultados a modelos hidrológicos de escorrentías (SIMWE, Mitsova *et al.*, 2004), tomando como entradas los resultados de una estimación de sellamiento superficial y datos de elevación generados mediante tecnología LiDAR. El trabajo demostró la factibilidad de un enfoque basado en las disciplinas de la geomática para establecer zonas en peligro de ser afectadas por inundaciones, en relación con el grado de impermeabilización de las zonas ubicadas aguas arriba en las áreas de captación urbanas (cuencas determinadas a un tamaño homogéneo adecuado para fines de planeación y gestión del territorio). Estas investigaciones han atendido la necesidad de definir superficies selladas sólo para algunas regiones aisladas en el país, quedando mucho por hacer para contar con la información básica requerida para generar iniciativas que permitan controlar el

negativo proceso de sellamiento de superficies permeables.

Monitoreo de cuerpos de agua y relación con variables hidrológicas

Otra opción en geomática consiste en monitorear cambios en la extensión de lagos y relacionarlos con la tendencia de las variables hidrológicas y climáticas, y con otras variables, como extracción y disponibilidad de agua en los cuerpos superficiales. Un ejemplo es el estudio del lago de Chapala realizado por Lopez-Caloca *et al.* (2008) del que se definió una secuencia temporal (imágenes correspondientes a 10 años en el periodo de 1973 a 2007), que muestra cambios en la extensión del lago de Chapala monitoreados con LandSat y SPOT. En este estudio y en el de Lira (2006) se aplican métodos de segmentación basados en la interpretación de índices de agua como NDWI (Normalized Difference Water Index). Este último autor delimitó lagos como el de Pátzcuaro, los pantanos de Centla y los lagos de la ciudad de México. Otra posibilidad en el monitoreo de cuerpos de agua consiste en determinar por medio de procedimientos de percepción remota valores de características relacionadas con su productividad y salud. Al respecto, Martínez-Clorio *et al.* (2011) reportan una serie de investigaciones de diversos cuerpos de agua (laguna de Meztitlán en Hidalgo y lagos de Montebello en Chiapas), para establecer relaciones entre variables medidas en campo como clorofila *a* y sólidos suspendidos con productos de percepción remota, con la idea de generar esquemas de monitoreo que eliminen o reduzcan la necesidad de medir en campo. Ello debido a los grandes costos asociados con este proceso. En la figura 4 se muestran resultados de este estudio, indicando la factibilidad de estimar clorofila *a* y transparencia del agua, utilizando el método de demezclado espectral (Adams *et al.*, 1986), que en esencia estima para cada píxel el grado de composición por parte de los denominados píxeles puros (asociados con un solo tipo de material en el píxel, como

agua clara, clorofila, etcétera). Respecto a este tema de monitoreo de cuerpos de agua mediante métodos de percepción remota y análisis espacial hay mucho por hacer para incidir positivamente en el reto de extender la existencia de los cuerpos de agua.

Zonas propensas a inundarse

Otra aplicación muy actual de las técnicas de geomática es la definición de zonas propensas a inundarse súbitamente. Un ejemplo de este tipo de estudios es el realizado por Tapia-Silva *et al.* (2007b) para la zona de barrancas urbanas de la ciudad de México. Respecto a este tema, es posible generar mapas en

tiempo real de zonas inundadas que permitan una planeación de actividades de respuesta inmediata al desastre, como lo reportan Matgen *et al.* (2007). Otro ejemplo de lo anterior son los mapas de las inundaciones en Tabasco publicados por UNOSAT (2007), en el cual directamente el 7 de noviembre de 2007 se contó con esta información primordial para atender el desastre que inició una semana antes y terminó a fines de noviembre. En este caso, los sensores utilizados fueron MODIS y SRTM (2003). El estudio antes mencionado de Freire-Cuesta (2011) muestra la factibilidad de incluir en una propuesta metodológica integral la definición de zonas propensas a inundarse en el ámbito urbano. Como se indicó antes,

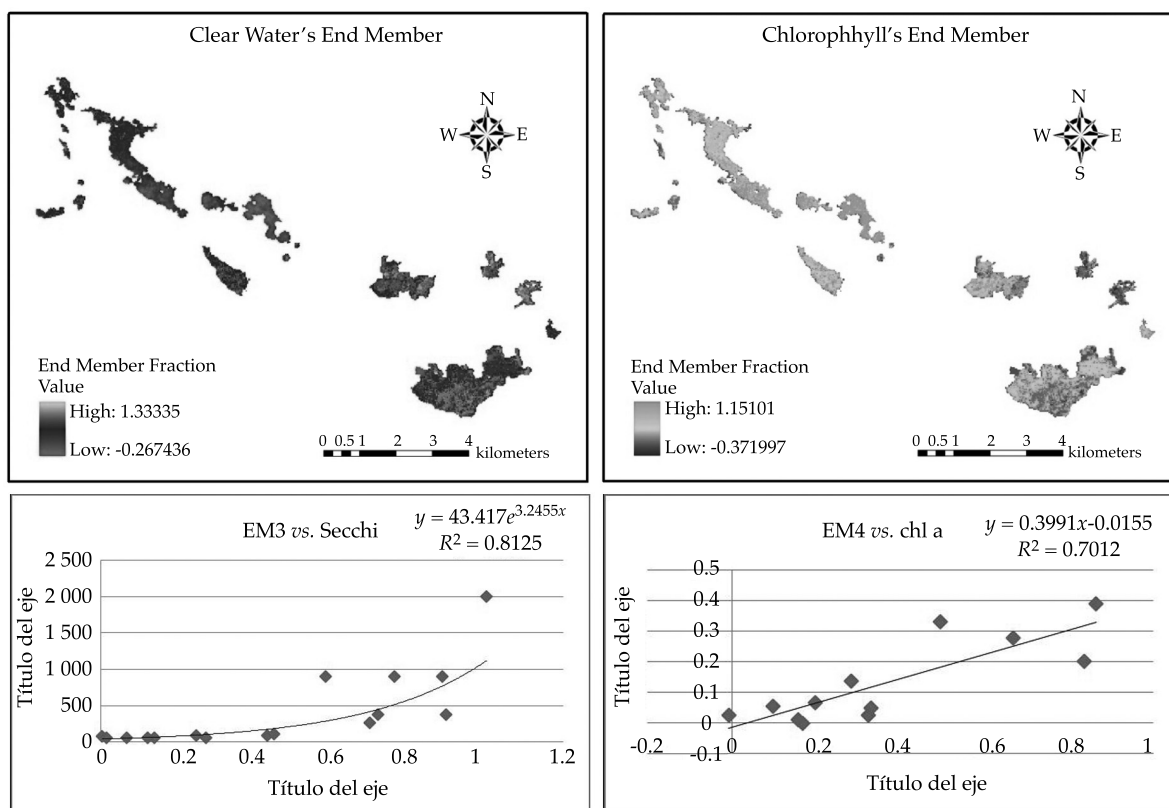


Figura 4. Fracciones de componentes puros para imágenes de los lagos de Montebello (Chiapas) para agua clara (arriba izquierda) y clorofila a (arriba derecha). Abajo izquierda: diagrama de dispersión entre profundidad de secchi (indicador de la transparencia de un lago) y el componente puro 3 (EM3). Abajo derecha: diagrama de dispersión entre clorofila a y el componente puro 4 (EM4). En las partes de abajo de la figura se muestran los coeficientes de correlación (R^2), así como las ecuaciones obtenidas que muestran la factibilidad de estimar estos parámetros para cada píxel, utilizando imágenes de satélite (en este caso se utilizaron imágenes Landsat) (Martínez-Clorio *et al.*, 2011).

este estudio incluye el uso de imágenes de satélite de alta resolución espacial, modelos de elevación de alta precisión obtenidos mediante tecnología LIDAR, aplicación de técnicas de clasificación contextual de imágenes satelitales y la utilización de un modelo espacialmente distribuido de base física (SIMWE, Mitsova *et al.*, 2004). También sobre este tema falta mucho por hacer en el país a efecto de apoyar el proceso de toma de decisiones para la prevención y atención de las inundaciones.

Efectos del uso del territorio en relación con variables y servicios ambientales hídricos

Igualmente es posible la determinación de la influencia de la deforestación en el incremento de escorrentías. El estudio de Benítez *et al.* (2004) lo ilustra. Para el caso de las cuencas Grijalva y Usumacinta (sureste mexicano y Guatemala), Tapia-Silva *et al.* (2007a) procesaron imágenes LandSat y efectuaron procedimientos de modelación hidrológica para definir tasas de deforestación entre 1990 y 2000, y su relación con el incremento de escorrentías. Un estudio similar fue realizado por Preciado *et al.* (2004) para la cuenca del Quelite en la frontera con Guatemala.

En cuanto a actividades de ordenamiento territorial para asegurar un uso del suelo más sustentable desde el punto de vista hídrico, la geomática posibilita la identificación de zonas de mayor aptitud a la recarga del acuífero y que deben mantenerse intactas, o de zonas que no deben ser urbanizadas u ocupadas con fines habitacionales debido a que pueden representar serios peligros por acumulación de escorrentías. Ejemplo de lo anterior es el estudio de Tapia-Silva y Arauz (2007). En otro interesante estudio realizado para PAOT (Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del D.F.), por parte de CentroGeo, se llevaron a cabo una vasta serie de determinaciones basadas en percepción remota y análisis espacial, e integración de información geográfica en SIG para caracterizar las denomi-

nadas Zaves (zonas de alto valor ecosistémico). La intención es utilizar estas áreas como instrumento de ordenamiento del uso del territorio, ya que fueron definidas con base en su alta capacidad de prestación de tres servicios ecosistémicos primarios que brinda el suelo de conservación del Distrito Federal: aptitud a infiltración, captura de carbono y provisión de hábitat. En este trabajo se considera la definición de las antes mencionadas áreas de captación (AC) como unidades geográficas básicas de análisis y de generalización de las estimaciones puntuales hechas para los servicios ecosistémicos de referencia. Lo anterior se fundamenta en que las AC son los espacios fundamentales de ocurrencia y funcionamiento del ciclo hidrológico, aspecto que a su vez ejerce una influencia directa para posibilitar la prestación de los servicios ecosistémicos mencionados. Otro aspecto importante de este estudio es que se pudieron identificar Zaves amenazadas por procesos como urbanización y deforestación. A manera de ejemplo de los productos cartográficos generados para este proyecto, la figura 5 muestra Zaves por infiltración amenazadas por el crecimiento de la mancha urbana.

Análisis de variabilidad espacio-temporal de variables hídricas

Gochis *et al.* (2007) presentan una serie de análisis de las características espacio-temporales de la intensidad de precipitación en el noreste de México para el periodo comprendido entre 2002 y 2004. Golicher y Morales (2004) utilizan *kriging* universal para la definición de patrones de precipitación y temperatura relacionados con el fenómeno del niño en la frontera sur. En Tapia-Silva (2011a) se presentan resultados de un procedimiento de interpolación de precipitación diaria multi-anual para septiembre en la Ciudad de México. El método utilizado es *kriging* con deriva externa, considerando la dependencia lineal entre los valores de precipitación y elevación. Díaz-Padilla *et al.* (2011) probaron diferentes



Figura 5. Ejemplo de productos cartográficos del proyecto realizado por CentroGeo para PAOT que muestra Zaves (zonas de alto valor ecosistémico) con alto potencial de infiltración y las amenazas representadas por la presencia de la mancha urbana.

métodos de interpolación espacial (inverso de la distancia al cuadrado IDW, *kriging*, *cokringing* y Thin Plate Smoothing Spline, TPSS) de datos de precipitación acumulada anual y de mayo a octubre, en el ámbito nacional, ajustados a una distribución de probabilidades gamma. Los autores encontraron buen ajuste a esta distribución para todos los datos procesados y observaron que TPSS ofreció los menores cuadrados medios del error. Brito-Castillo *et al.* (2011) integraron mediciones históricas

en campo de precipitación y escorrentía, y estimaciones de temperatura superficial del mar proveniente del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), en un esquema de análisis estadístico para comprobar un patrón anómalo en las lluvias del mes de máxima precipitación en el noreste del país. En otro estudio realizado por Rosales y Tapia-Silva (2011) se analiza la viabilidad de generar modelos de estimación de temperatura del (T_a), utilizando productos de temperatura

de superficie (LST) de MODIS a diferentes niveles de agregación espacial. En el estudio se definió que considerando la configuración espacial de la ubicación de estaciones en México (número de estaciones y distancia entre ellas), la agregación espacial a nivel país de las estaciones no es la más adecuada para representar la variabilidad espacial de Ta . Cabe aclarar que Ta es una variable climática altamente asociada con variables de corte hídrico, evaporación y precipitación. En este estudio se observó que sólo para regiones semiáridas con condiciones de nubosidad poco pronunciadas es posible generar modelos funcionales basados en correlación entre las variables analizadas.

Apuntes finales

Los temas de la problemática hídrica que más han sido estudiados mediante disciplinas enmarcadas en el ámbito de la geomática son los que se mencionan a continuación: análisis de eficiencia del uso del agua, variabilidad espacial de acuíferos en cuanto a vulnerabilidad y capacidades de su aprovechamiento, efectos del uso del territorio en relación con variables y servicios ambientales hídricos, y análisis de variabilidad espacio-temporal de variables hídricas. La anterior observación no implica que respecto a estos temas ya se haya investigado lo suficiente. La extensión del territorio mexicano y la variabilidad espacio-temporal de los procesos asociados con el ciclo hidrológico y el uso del recurso se traducen en una enorme necesidad de realización de nuevos estudios que respondan a la creciente complejidad de la problemática hidrológica. Sin embargo, estos estudios generados en el campo de las disciplinas integradas en la geomática ejemplifican la posibilidad de aportar información, conocimiento y métodos de análisis para contribuir en el proceso hacia una mejor gestión del recurso hídrico. Con la revisión efectuada se puede verificar qué técnicas de análisis espacial, así como de obtención de información y conocimiento por

medio de percepción remota permiten el estudio de variables hidrológicas y de otras asociadas que posibilitan la identificación de soluciones adecuadas a las condiciones específicas de las regiones geográficas estudiadas.

Los temas de la problemática hídrica que han sido menos estudiados son los siguientes: reducción y desaparición de cuerpos de agua como resultado de balances hídricos negativos, incidencia de lluvias torrenciales e impermeabilización, contaminación de aguas superficiales por desecho de residuos contaminantes e incremento de flujos en ríos producidos por deforestación. Estudios sobre estos temas apoyados en las disciplinas de la geomática deben ser fomentados. Generar información y conocimiento sobre estos temas puede representar un importante aporte de la geomática en el proceso de toma de decisiones. Asimismo, estudios sobre estos temas basados en la generación de escenarios significan una excelente posibilidad que ha sido poco explorada y que puede acen-
tuar el potencial de la geomática para incidir en la resolución de la problemática del agua. Además, la atención a esta problemática por su complejidad puede requerir de su modelación en artefactos de geomática como los vistos en Tapia-Silva (2011a, 2011b). Como se explica en ese artículo, los artefactos permiten el análisis de situaciones complejas y la generación de soluciones acordes con esta complejidad, de forma tal que se facilite el proceso de toma de decisiones para incidir en la solución de la problemática hídrica en nuestro país.

Recibido: 15/06/2012

Aceptado: 27/06/2013

Referencias

- ADAMS, J.B., SMITH, M.O., and JOHNSON, P.E. Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 91, 1986, pp. 8098-8112.
- ALLEN, M.R. and INGRAM, W.J. Constraints on Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle. *Nature*. Vol. 419, 2002, pp. 224-232.

- ARREGUÍN-CORTÉS, F.I., LÓPEZ-PÉREZ, M. y MARENGO-MOGOLLÓN, H. *Los retos del agua en México en el siglo XXI*. Cap. 1. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias UNAM, 2011a, 754 pp.
- BASTIAANSEN, W.G.M., NOORDMAN, E.J.M., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B.P., and ALLEN, G.R. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 131, No. 1, 2005, pp. 85-93.
- BASTIAANSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES, R.A. and HOLTSLAG, A.A.M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*. Vol. 212-213, 1998, pp. 198-212.
- BENÍTEZ, J.A., SANVICENTE, H., LAFRAGUA, J., ZAMORA, P., MORALES, L.M., MAS- CAUSSEL, J.F., GARCÍA, G., COUTURIER, S.A., ZETINA, R., CALAN-YAM, R.A., AMABILIS-SÁNCHEZ, L., ACUÑA, C.I. y MEJENES, M.C. Sistema de Información Geográfica de la cuenca del río Candelaria: reconstrucción histórica de los cambios en la cobertura forestal y su efecto sobre la hidrología y calidad del agua. En Kauffer, M.E.F. (editor). *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur, 2004, 543 pp.
- BRITO-CASTILLO, L., FILONOV, A., TERESCHENKO, I., PALACIOS-HERNÁNDEZ, E. y MONZÓN, C. Interrupción de la secuencia del mes de máxima precipitación y sus implicaciones en el entendimiento de las lluvias de verano. Cap. 11. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- CARRERA-HERNÁNDEZ, J.J. and GASKIN, S.J. The Basin of Mexico Hydrogeological Database (BMHDB): Implementation, Queries and Interaction with Open Source Software. *Environmental Modelling & Amp. Software*, Vol. 23, No. 10-11, 2008, pp. 1271-1279.
- CENTROGEO. *Metodología para el mapeo y caracterización de asentamientos precarios* [en línea]. México D.F., 2007. Consultado el 11 de diciembre de 2008. Disponible para World Wide Web: <http://xsei.centrogeo.org.mx/ap/campeche/MainCMP.htm>.
- CIVITA, M. y DE MAIO, M. SINTACS. *Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della Vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione*. Bologna, Italia: Pitagora Ed., 1997, 191 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2007, 259 pp.
- CORONEL, C., ROSALES, E., MORA, F., LOPEZ-CALOCA, A.A., TAPIA-SILVA, F.O., and HERNANDEZ, G. Monitoring Evapotranspiration at the Landscape Scale in Mexico: Applying the Energy Balance Model Using Remote Sensing Data. En *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing*. Volume 7104-Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology X. Wales, United Kingdom: University of Wales Institute, Cardiff Cardiff, 2008.
- DÍAZ-PADILLA, G., SÁNCHEZ-COHEN, I. y GUAJARDO-PANES, R.A. Análisis de series de tiempo de clima para tomar decisiones en México. Cap. 3. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- DOUGLAS, B.C. Global sea rise: a redetermination. *Surveys in Geophysics*. Vol. 18, No. 2, 1997, pp. 279-292.
- EASTERLING, D.R., MEEHL, G.A., PARMESAN, C., CHANGNON, S.A., KARL, T.R. and MEARNS, L.O. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science*. Vol. 289, 2000, pp. 2068-2074.
- FREIRE-CUESTA, T. *Estimación del sellamiento de suelo en áreas de captación urbana y sus efectos en la escorrentía*. Tesis de Maestría en Geomática. México, D.F.: Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A.C., 2011.
- GALVÁN-FERNÁNDEZ, A. Determinación de los espacios de Intervención en una cuenca costera. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- GARATUZA-PAYAN, J., PINKER, R.T., SHUTTLEWORTH, W.J., and WATTS, C.J. Solar Radiation and Evapotranspiration in Northern Mexico Estimated from Remotely Sensed, Measurements of Cloudiness. *Hydrological Sciences*. Vol. 46, No. 3, 2001, pp. 465-468.
- GARATUZA-PAYAN, J. and WATTS, C.J. The Use of Remote Sensing for Estimating ET of Irrigated Wheat and Cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*. Vol. 19, 2005, pp. 301-320.
- GOCHIS, D.J., WATTS, C.J., GARATUZA-PAYAN, J., and RODRIGUEZ, J.C. Spatial and Temporal Patterns of Precipitation Intensity as Observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002 to 2004. *Journal of Climate*. Vol. 20, No. 9, 2007, pp. 1734-1750.
- GOLICHER, J.D. and MORALES, J. Correlations between Precipitation Patterns in the State of Chiapas and the El Niño Sea Surface Temperature Index. En Kauffer, M.E.F. (editor). *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur, 2004, 543 pp.
- GOMARAZCA, M.A. Basis of Geomatics. *Applied Geomatics*. Vol. 2, 2010, pp. 137-146.

- GUTIÉRREZ-CASTORENA, E.V., ORTIZ-SOLORIO, C.A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, M.C., CAJUSTE-BONTEMPS, L., and ROCHA-AGUILAR, M. Technical, Economical and Social Actions of Farmers to Mitigate Water Deficit in Tamaulipas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Amp., Environment*. Vol. 128, No. 1-2, 2008, pp. 77-85.
- LEVI, S. Geografía Humana y Geomática. *Bolletim Goiano de Geografia*. Vol. 26, No. 1, 2006, pp. 11-29.
- LIRA, J. A Model of Desertification Process in a Semi-Arid Environment using Employing Multi-Espectral Images. En Sanfeliu, A., Martínez-Trinidad, J. F. y Carrasco-Ochoa, J. A. *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications*. 9th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, Puebla Mexico: CIARP, Springer, 2004, 703 pp.
- LIRA, J. Segmentation and morphology of open water bodies from multispectral. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 27, No. 18, 2006, pp. 4015-4038.
- LOPEZ-CALOCA, A.A., TAPIA-SILVA, F.O., and ESCALANTE, B. Lake Chapala Change Detection Using Time Series. *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing*. Vol. 7104. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology X. Wales, United Kingdom: University of Wales Institute, Cardiff Cardiff, 2008.
- MARÍN, L.E., TORRES, V., BOLONGARO, A., REYNA, J.A., POHLE, O., HERNÁNDEZ-ESPRIÚ, A., CHAVARRÍA, J., GARCÍA-BARRIOS, R., and PARRA-TABLA, H.F. Identifying Suitable Sanitary Landfill Locations in the State Of Morelos, México, Using a Geographic Information System. *Physics and Chemistry of the Earth*. Parts A/B/C. Vol. 37-39, 2012, pp. 2-9.
- MARTÍNEZ-CLORIO, M.I., TAPIA-SILVA, F.O., and GARCÍA-CALDERÓN, J.L. *Use of Remote Sensing for the Limnological Characterization of Mexican Lakes and Reservoirs*. Poster 14th World Lake Conference: Lakes, Rivers, Groundwater, and Coastal Areas: Understanding Linkages October, 31-November 4, 2011, Austin, Texas.
- MARTÍNEZ, E. and REYES, C. Cybercartography and Society. In Taylor, F. (editor). *Cybercartography: Theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier Scientific, 2005, 594 pp.
- MATGEN, P., SCHUMANN, G.H., HOFFMANN, J.B., and PFISTER, L. Integration of SAR-Derived River Inundation Areas, High-Precision Topographic Data and a River Flow Model toward Near Real-Time Flood Management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 9, No. 3, 2007, pp. 247-263.
- MENDOZA, M.E., BOCCO, G., LÓPEZ-GRANADOS, E., and BRAVO-ESPINOZA, M. Hydrological Implications of Land Use and Land Cover Change: Spatial Analytical Approach at Regional Scale in the Closed Basin of the Cuitzeo Lake. Michoacán, Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*. Vol. 31, No. 2, 2010, pp. 197-214.
- MITASOVA, H., THAXTON, C., HOFIERKA, J., MCLAUGHLIN, R., MOORE, A., and MITAS, L. Path Sampling Method for Modeling Overland Water Flow, Sediment Transport and Short Term Terrain Evolution in Open Source GIS. *Proceedings XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources, USA*. Elsevier, 2004, pp. 1479-1490.
- MO, X., LIU, S., LIN, Z., XU, Y., XIANG, Y., and MCVICAR, T.R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*. Vol. 183, 2005, pp. 301-322.
- OJEDA-BUSTAMANTE, W., GONZÁLEZ-CAMACHO, J.M., SIFUENTES-IBARRA, E., ISIDRO, E., and RENDÓN-PIMENTEL, L. Using Spatial Information Systems to Improve Water Management in Mexico. *Agricultural Water Management*. Vol. 89, No. 1-2, 2007, pp. 81-88.
- OSWALD-SPRING, U. y SÁNCHEZ-COHEN, I. Introducción. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- PAGIATAKIS, S.D. *Encyclopedia of Environmetrics Wiley Online Library*. Publicado en línea el 15 de enero de 2013, doi: 10.1002/9780470057339.vnn121.
- PRECIADO, M.E., RAMÍREZ, A.I. y OCÓN, A.R. Metodología para el uso de los sistemas de información geográfica para la estimación de la pérdida de bosque y el cálculo de los números de escurrimiento. Caso de aplicación: la cuenca del río El Quelite. En Kauffer, M.E.F. (editor). *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur, 2004, 543 pp.
- RAMOS-LEAL, J.A., TAPIA-SILVA, F.O., and ISMAEL-SANDOVAL, I. Analysis of Aquifer Vulnerability and Water Quality using SINTACS and Geographic Weighted Regression. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 66, No. 8, 2011, pp. 2257-2271.
- RAMOS-LEAL, J.A., NOYOLA, C., and TAPIA-SILVA, F.O. Aquifer Vulnerability and Groundwater Quality in Mega Cities: Case Mexico Basin. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 61, 2010, pp. 1309-1320.
- RAMOS-LEAL, J., NOYOLA-MEDRANO, C., TAPIA-SILVA, F., SILVA-GARCÍA, J., and REYES-GUTIÉRREZ, L. Assessing the Inconsistency between Groundwater Vulnerability and Groundwater Quality: The Case of Chapala Marsh, Mexico. *Hydrogeology Journal*. Vol. 20, 2012, pp. 591-603.
- RAMOS-LEAL, J.A. y HERNÁNDEZ-MORENO, J.I. Las cuencas hidrogeológicas desde el punto de vista regional. *Aquaforum*. Vol. 48, 2008, pp. 14-18.
- RANGEL-MEDINA, M., MONREAL-SAAVEDRA, R. y WATTS, C.J. Los acuíferos costeros de Sonora, México.

- Un reto de análisis hidrogeológico para mantener su equilibrio sustentable. Cap. 14. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- REYES, C. y MONROY, G.S. Sistemas y geomática. *Memoria 3er. Seminario Internacional de Ingeniería de Sistemas*, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México, noviembre de 2000. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (FI-UNAM) y Academia Mexicana de Ingeniería A.C. (AMIAC), pp. 2-107 a 2-112.
- RIDD, M.K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote Sensing: Comparative Anatomy for Cities. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 16, No. 12, 1995, pp. 2165-2185.
- RODRÍGUEZ-CASTILLO, R. y RODRÍGUEZ-VELÁZQUEZ, I. Subsistencia y contaminación acuífera: ni desastre ni conflicto. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- ROGERSON, P.A. and FOTHERINGHAM, S. GIS and Spatial Analysis: Introduction and Overview. In Fotheringham, S. and Rogerson, P.A. (editors). *Spatial Analysis and GIS*. London: Taylor & Francis, 1994.
- ROSALLES, E. y TAPIA-SILVA, F.O. Efectos de la agregación espacial en la estimación de temperatura del aire mediante imágenes MODIS. En Maas, J.F. (editor). *Aplicaciones del Sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Morelia, México: SEMARNAT, INE, UNAM, CIGA-UNAM, 2011, 318 pp.
- SARAF, A.K., CHOUDHURY, P.R., ROY, B., SARMA, B., VIJAY, S., and CHOUDHURY, S. GIS Based Surface Hydrological Modelling in Identification of Groundwater Recharge Zones. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 25, No. 24, 2004, pp. 5759-5770.
- SCOTT, A.C., BASTIAANSEN, W.G.M., and AHMAD, M.U.D. Mapping Root Zone Soil Moisture Using Remotely Sensed Optical Imagery. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, September/October, 2003, pp. 326-335.
- SENAY, G.B., BUDDE, M., VERDIN, J.P., and MELESSE, A.M. A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields. *Sensors*. Vol. 7, 2007, pp. 979-1000.
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). *The Shuttle Radar Topography Mission SRTM-30, Global 1 km Digital Elevation Model 2003* [en línea]. Consultado el 19 de diciembre de 2008. Disponible para World Wide Web: ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/SRTM30/SRTM30_Documentation.
- STAR, J. and ESTES, J. *Geographic Information Systems, An introduction*. Englewoods Cliffs: Prentice Hall, 1990, pp. 665.
- TAPIA-SILVA, F.O. Advances in Geomatics and Geospatial Technologies to Solve Water Problems in Mexico. In Oswald-Spring, U. (editor). *Water Resources in Mexico. Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011b, 524 pp.
- TAPIA-SILVA, F.O. Avances en Geomática y tecnología geoespacial para la resolución de la problemática del agua en México. En Oswald-Spring, U. (coordinador). *Retos de la investigación del agua en México*. Cuernavaca, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM, 2011a, 754 pp.
- TAPIA-SILVA, F.O. Geomática y sociedad, ciencia emergente para generar conocimiento hacia la resolución de la problemática socioambiental. *Geopuce. Revista de la Escuela de Ciencias Geográficas Puce, Quito, Ecuador*. Vol. 2, 2011c, pp. 7-16.
- TAPIA-SILVA, F.O. and ARAUZ, G. Geomatics Procedure to Allocate Infiltration Areas and to Relate them with Green Areas in the Mexico Basin. *Proceedings 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2007, San José, Costa Rica.
- TAPIA-SILVA, F.O. y MORA, F. The Application of Spatial Analysis in the Implementation of a Qualitative Infiltration Model to Evaluate the Aquifer's Potential Recharge for Conservation Areas of Mexico City. *Proceedings of the 19th International CODATA Conference, The Information Society: New Horizons for Science*, Berlin, Germany, 2004.
- TAPIA-SILVA, F.O., MORA, F., and NUÑEZ, J.M. Characterization of Tropical River Basins in Mexico and Central America by Remote Sensing and Hydrological Spatial Analysis. *Proceedings 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, San José, Costa Rica, 2007a.
- TAPIA-SILVA, F.O., NUÑEZ, J.M., and LÓPEZ-LÓPEZ, D. Using SRTM DEM, LANDSAT ETM+ Images and a Distributed Rainfall-Runoff Model to Define Inundation Hazard Maps on Urban Canyons. *Proceedings 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, San José, Costa Rica, 2007b.
- UNOSAT. *Mexico Maps*. 2007 [en línea]. Citado el 21 de enero de 2009. Disponible para World Wide Web: http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/prod_free.asp?id=70.
- VON BERTALANFFY, L.V. *Perspectivas en la teoría general de sistemas*. Madrid: Alianza Universidad, 1979, 203 pp.
- ZWART, S.J., BASTIAANSEN, W.G.M., GARATUZA-PAYAN, J., and WATTS, C.J. SEBAL for Detecting Spatial Variation of Water Productivity for Wheat in the Yaqui Valley, Mexico. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 852. Guadalajara, Jalisco, 2006, pp. 154-161.

Dirección institucional del autor

Dr. Felipe Omar Tapia Silva

Universidad Autónoma Metropolitana
Departamento de Hidrobiología
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Avenida San Rafael Atlixco 186
Vicentina, Iztapalapa
09340 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5804 4600, extensión 3056
feomtasi@yahoo.com.mx