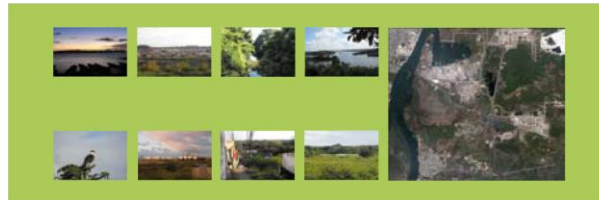


V Congreso Internacional de Ordenamiento Ecológico y Territorial

*"Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sustentable:
de la Teoría a la Práctica"*



Morelia, Michoacán, 24 al 28 Noviembre 2009
CIGA, UNAM, Campus Morelia

Retos para la planeación territorial en sitios kársticos.

Alejandra Fregoso Domínguez¹

Robert Supper²

Klaus Motschka²

Gonzalo Merediz Alonso¹

Miriam Reza Gaona¹

¹Amigos de Sian Ka'an,

. Cancún, Quintana Roo. México

² Geological Survey of Austria

Vienna, Austria

afregoso@amigosdesiankaan.org

Robert.Supper@geologie.ac.at

Klaus.Motschka@geologie.ac.at

gmerediz@amigosdesiankaan.org

mreza@amigosdesiankaan.org

Resumen

En los sistemas kársticos se encuentra el 12% de las reservas de agua dulce y se estima que alrededor del 25% de la población mundial obtiene agua de acuíferos kársticos. Si bien este tipo de sistemas resultan ser de gran importancia por su alta permeabilidad y almacenaje, también son altamente vulnerables a la contaminación, razón por la cual la correcta planeación del territorio y la regulación del uso del suelo resultan de vital importancia.

El estudio se realiza en el área de Tulum y la Reserva de Sian Ka'an, ubicados en la porción centro del estado de Quintana Roo. La región se caracteriza por presentar un alto nivel de carsificación reconocido a través de los más de 801 km lineales de sistemas subterráneos actualmente explorados y por albergar una alta diversidad de ecosistemas terrestres, costeros y

marinos, además de ser una zona con alta presión por transformación antropogénica. En este documento se presentan los resultados de un grupo multidisciplinario de investigación enfocado en abordar uno de los principales retos para el desarrollo sustentable y la planeación de territorios kársticos, la identificación de los principales elementos encargados de la dinámica del sistema geohidrológico: la matriz de roca y los conductos. El proyecto ha desarrollado un marco metodológico que integra métodos y técnicas de geofísica aplicada a la geohidrología a diferentes escalas de trabajo y que permite contar con información detallada como insumo para los procesos de planeación territorial.

Palabras clave: *Geofísica aerotransportada, planeación territorial, sistemas kársticos, Quintana Roo.*

Introducción

Los sitios kársticos son aquellos paisajes caracterizados por cuevas, dolinas y sistemas de conductos subterráneos de diversos diámetros, formados por la disolución de la roca al contacto con el agua (Drew y Hötzl, 1999). Una particularidad de esos paisajes, es la interconectividad de dichos conductos formando sistemas de conductos, los cuales incorporan una heterogeneidad espacial muy importante. Cuando se habla de acuíferos kársticos, esta heterogeneidad es de suma importancia para entender los patrones de flujo y transporte del agua subterránea.

Debido el crecimiento poblacional y a la expansión de asentamientos humanos en sitios kársticos, se estima que hoy en día que alrededor del 25% de la población mundial viven u obtienen agua dulce de acuíferos kársticos (Ford y Williams, 2007). Mientras que tan sólo en Europa, se estima que alrededor del 50% del agua proviene de acuíferos kársticos. Dada la importancia de contar con información sobre estos sistemas, es que algunos países han realizado esfuerzos significativos por actualizar y detallar la distribución de las zonas kársticas. Un ejemplo de ello es la actualización del mapa de sitios kársticos de Estados Unidos (Veni, 2002), en donde alrededor del 20% del territorio es kárstico (Quinlan, 1990).

En México, la Península de Yucatán es la zona kárstica más grande del país. La península, es la porción emergida (150,000 Km²) de la Plataforma Yucateca, que divide el Golfo de México del Mar Caribe, compuesta por rocas calcáreas y evaporitas del Cenozoico

(Figura 1) (López, 1975; Escobar Nava 1986). Es en la Península de Yucatán en donde se encuentra una de las reservas subterráneas de agua dulce más importante del país, en el denominado acuífero de Yucatán. Este acuífero es un acuífero kárstico costero conformado por una roca caliza altamente porosa (promedio 14-23%) y permeable (Beddows, 2004) en él encuentra un lente de agua dulce, sobre un lente mucho más denso de agua salada, producto de la intrusión salina y una zona media o zona de mezcla denominada haloclina (Marin, 1994).



Figura 1. Ubicación de la Península de Yucatán.

El acuífero de la Península de Yucatán como en los acuíferos kársticos, ésta se caracteriza por su alta permeabilidad resultado del proceso de carsificación (disolución de la roca al contacto con el agua). Dicho proceso ha dado origen a por lo menos tres diferentes tipos de estructuras con funciones hidrológicas distintas: la *matriz de roca porosa* en donde ocurre gran parte del almacenamiento del agua dulce y la recarga del agua, las *fracturas* en la región el sistema de fracturas de Hol Box es el sistema de mayor importancia con una distribución desde el sur hasta la zona norte del estado de Quintana Roo, y los *conductos* los cuales se presentan en diversos diámetros y son las estructuras encargadas del transporte de grandes volúmenes de agua en largas distancias (Beddows, 2004). Estas últimas estructuras, cuando son de gran tamaño, se les conoce regionalmente como ríos subterráneos.

La porción oeste del acuífero de Yucatán se encuentra altamente carstificado, prueba de ello son los más de 183 sistemas de ríos subterráneos, sumando hoy en día más de 801 km lineales de ríos subterráneos explorados y registrados por el Servicio Espeleológico de Quintana Roo (QRSS, 2009). El QRSS administra y actualiza la información producida por los diferentes grupos de buzos especializados en cuevas que realizan este tipo de tareas desde hace varias décadas. En Quintana Roo se encuentra el sistema de ríos subterráneos más largo del mundo, el Sistema Ox Bel Ha, que hasta la fecha cuenta con más de 180 km de largo y 130 cenotes registrados (Gulden, 2009). En la región es posible adentrarse al acuífero a través de un cenote a 9 km de distancia de la costa, transportarse a través de los sistemas de ríos subterráneos y desembocar en el mar Caribe (Marín, 2005). Esto demuestra la gran interconectividad que existe en el acuífero y la alta vulnerabilidad del mismo al transporte de contaminantes. Si un buzo es capaz de adentrarse al acuífero y

recorrer kilómetros de distancia desde el punto de inmersión, de igual forma lo hacen los contaminantes que hayan logrado entrar al sistema hidrológico subterráneo.

En términos de la dinámica del sistema geohidrológico subterráneo de Quintana Roo, estas estructuras cumplen con una función ecológica e hidrológica muy importante (Beddows *et al.*, 2007), pues funcionan como un sistema que interconecta las zonas de recarga tierra adentro en las selvas, con las zonas costeras (húmedales) y marinas (arrecife Mesoamericano) a través de los sitios de descarga del agua subterránea o manantiales. Asimismo, el acuífero representa un recurso estratégico para el desarrollo social y económico del estado, ya que el acuífero es la única fuente de agua dulce que provee de agua a una población permanente que hace hoy en día a más de 1.4 millones de personas, además de los 12 millones de visitantes anuales, que generan una derrama económica del 1/3 de las divisas turísticas del país (SEDETUR, 2007). Si bien el sistema hidrológico subterráneo es clave para el desarrollo, recientemente la funcionalidad y conectividad entre los sistemas ecológicos y socioeconómicos por medio del agua, se ven amenazadas por una carencia en la planificación del desarrollo. Algunas de las amenazas con mayor afectación son los procesos de fragmentación de selvas, la degradación de los ecosistemas y la contaminación del agua ocasionada principalmente por aguas residuales de uso doméstico, así como por lixiviados producidos en los tiraderos de basura a cielo abierto (CONAGUA, 1997). A la par de esto se tiene que el crecimiento poblacional en Quintana Roo es muy acelerado, el cual es impulsado por la industria turística, de tal forma que en su mayoría el desarrollo urbano ocurre a lo largo de la zona costera. Dicho crecimiento, ha traído consigo una creciente demanda de agua y por consiguiente, una creciente generación de aguas residuales y de desechos sólidos. Si bien el acuífero constituye la fuente principal de agua, también es el reservorio final de todos los contaminantes producidos por las distintas actividades socioeconómicas que se desarrollan en la región (CONAGUA, 1997).

A la problemática anteriormente descrita, se suma la falta de información y conocimiento sobre el sistema geohidrológico así como la falta de coordinación entre los tomadores de decisiones encargados de la planeación territorial y de la administración del agua. Bajo este contexto y con la finalidad de contribuir a conservar los recursos naturales de la región y en especial el recurso agua, Amigos de Sian Ka'an, A.C. en el año 2005, establece una alianza estratégica con el Servicio Geológico de Austria y la Universidad Técnica de Dinamarca, para generar información detallada y actualizada sobre el sistema geohidrológico de Quintana Roo.

La alianza inició sus trabajos bajo un marco metodológico que integra métodos y técnicas de geofísica aplicada a la geohidrología y métodos de geohidrología a diferentes escalas, tanto a escala local como a escala regional. El estudio se enfoca en resaltar la heterogeneidad del subsuelo a través del reconocimiento de los principales elementos kársticos encargados de la dinámica del sistema: *la matriz de roca y los conductos o cuevas inundadas*. De esta manera el grupo de investigación multidisciplinario, aporta información relevante que sirve de base para enfrentar uno de los principales retos de la planeación de territorios kársticos: conocer e incorporar la heterogeneidad espacial geohidrológica en los procesos de ordenamiento del territorio y a la regulación del uso del suelo.

Objetivos

Caracterizar el sistema geohidrológico para su incorporación en el desarrollo de instrumentos de planeación y conservación de los recursos naturales de Quintana Roo.

Objetivos específicos:

Conocer y comprender la heterogeneidad espacial del subsuelo a partir de métodos geofísicos aplicados a la geohidrología.

Resaltar la importancia de la presencia de cuevas inundadas o ríos subterráneos, en

los procesos de planeación del territorio.

Materiales y métodos

El estudio se realiza en el área de Tulum y la zona de influencia de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, ubicados en la porción centro de la costa de Quintana Roo. La zona ha sido ampliamente explorada por diversos grupos de espeleobuceo, los cuales han avanzado sustancialmente en el mapeo los sistemas de ríos subterráneos (Figura 2). Gracias a su trabajo se ha evidenciado que la densidad de dichas estructuras kársticas por kilómetro cuadrado en esas región, es sumamente alta (dato). Algunos de los retos que ha tenido el mapeo de estas estructuras a través del espeleobuceo son, el libre acceso a los cenotes por los cuales se introduce directamente al acuífero (terrenos con tenencia del tipo privada o ejidal), el tiempo de muestreo, la calidad de los datos ya que en ocasiones los diversos grupos de espeleobuzos no emplean con el rigor debido las técnicas de levantamiento de datos, así como el riesgo intrínseco que conlleva dicha actividad.

Con la finalidad de conocer y entender la estructura y dinámica regional de sistema hidrológico subterráneo, se ha desarrollado una metodología basada en el uso de diferentes técnicas y métodos geofísicos de exploración del subsuelo para la caracterización del acuífero. La metodología empleada se basa en un enfoque anidado que integra muestreos aéreos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia (FDEM) y, muestreos de campo electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM), ambas técnicas basadas en la capacidad conductiva del subsuelo.

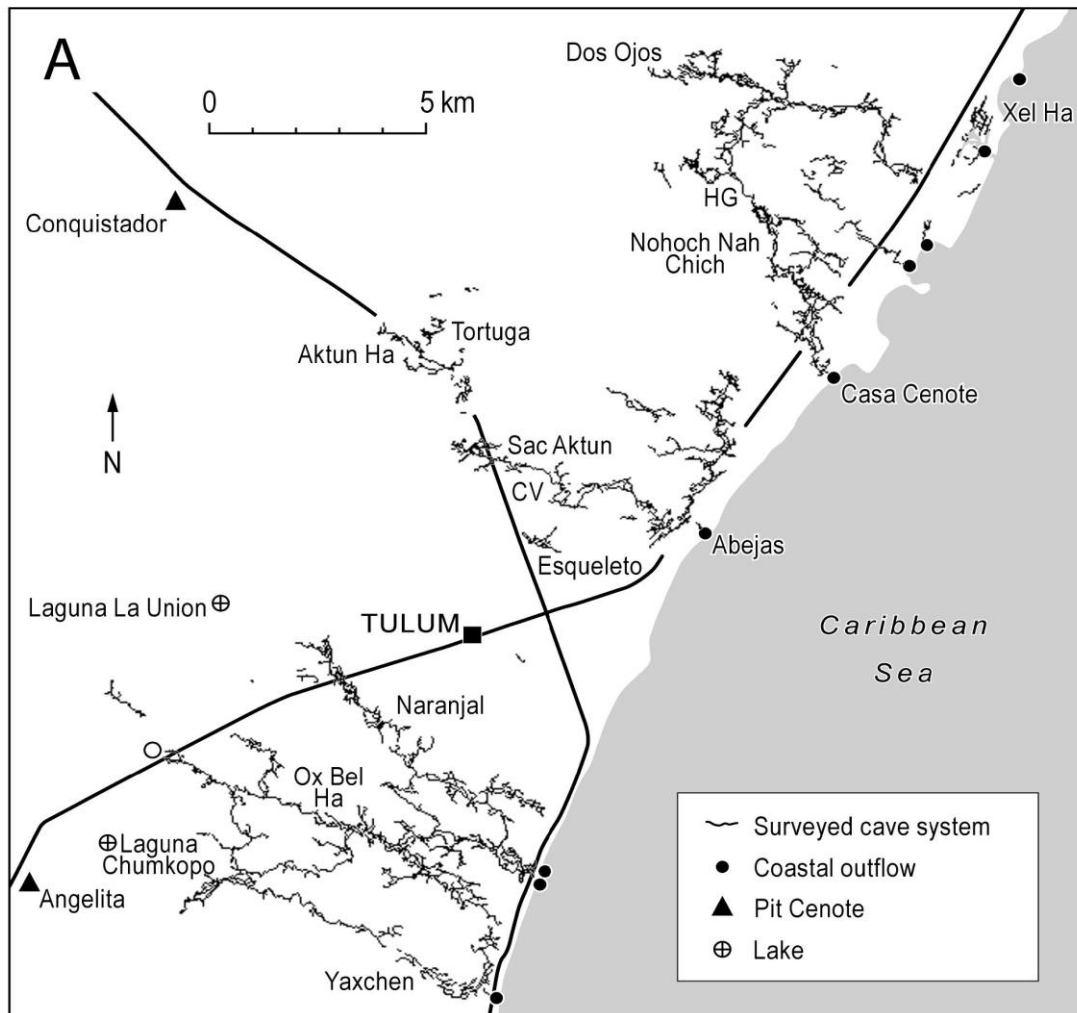


Figura 2. Distribución de los sistemas de cuevas inundadas o ríos subterráneos explorados en los alrededores de Tulum (Tomado de Smart, P. *et al.*, 2006).

Los muestreos aéreos electromagnéticos (AEM) se ejecutan con el sistema de geofísica aerotransportada del Servicio Geológico de Austria (SGA). El sistema consiste de una sonda electromagnética GEOTECH - "Bird" de 5.6m de largo y que contiene 4 transmisores y 4 receptores con una disposición geométrica particular (co-axial, co-planar). Los transmisores emiten una campo alterno electromagnético en cuatro frecuencias: 434 Hz, 3212 Hz, 7190 Hz y 34133 Hz. Las diferentes frecuencias y la disposición geométrica de las

bobinas, permiten obtener información de resistividad del subsuelo a diferentes profundidades de penetración de la señal. En esta técnica, la colecta de datos se realiza de modo aéreo y a través de transectos lineales con una distancia de espaciamiento de 100 m. Para ello, un helicóptero transporta la sonda GEOTHECH a una distancia del terreno de aproximadamente 30 metros y a una velocidad de 100 km/hora. A través del empleo del método VLF (*very low frequency*) se obtiene información sobre los cuerpos altamente conductivos (baja resistividad), de esta forma se pueden identificar las anomalías del subsuelo y resaltar así las zonas de menor resistividad. Los muestreos de campo constan de mediciones geoelectricas multielectrodo y perfiles electromagnéticos (EM-34).

Al inicio del proyecto durante el 2005 y 2006 se realizó un esfuerzo coordinado junto con un grupo de espeleobuzos para conocer y probar los alcances de las técnicas geofísicas de campo aplicadas a las características kársticas de la región. Para ello se realizaron perfiles geoelectricos en la superficie del terreno en donde se tenía conocimiento de la presencia de cenotes y de sistemas de ríos subterráneos. Esto permitió corroborar los valores de conductividad eléctrica, obtenidos por el muestreo subacuático por parte de los espeleobuzos, con los con los valores derivados del muestreo geofísico de campo (Figura 3).

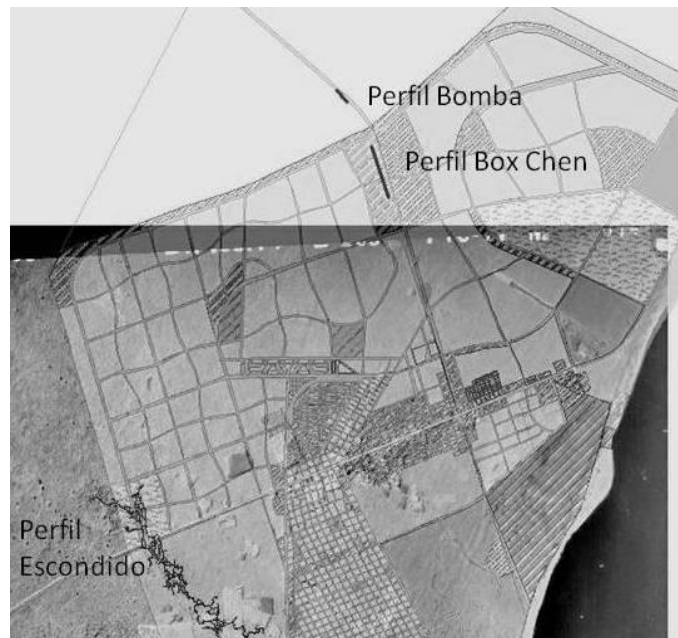


Figura 3. Distribución de perfiles geoelectricos realizados, la imagen de fondo es el la propuesta del Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Tulum.

Posteriormente, la primera fase del estudio se realizó en el 2007, como un estudio piloto para conocer y probar los alcances de la geofísica aerotransportada en la región. Esta fase se llevó a cabo en la porción norte de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an y sobre el sistema de ríos subterráneos previamente explorado y mapeado por grupos de espeleobuzos e identificado como el sistema más largo del mundo, el sistema Ox Bel Ha.

En el 2008 se realizó la segunda campaña aérea, cubriendo la zona urbana y costera del reciente municipio de Tulum. Ese mismo año se realizó un taller participativo para definir las áreas prioritarias para el mapeo de las aguas subterráneas de Quintana Roo. El taller contó con la participación de diversos actores tanto del sector público de los tres niveles de gobierno, del sector académico y representantes de la sociedad civil organizada. Las áreas prioritarias propuestas coinciden con las áreas de mayor presión antropogénica y coinciden con zonas de alta biológica (Figura 4).

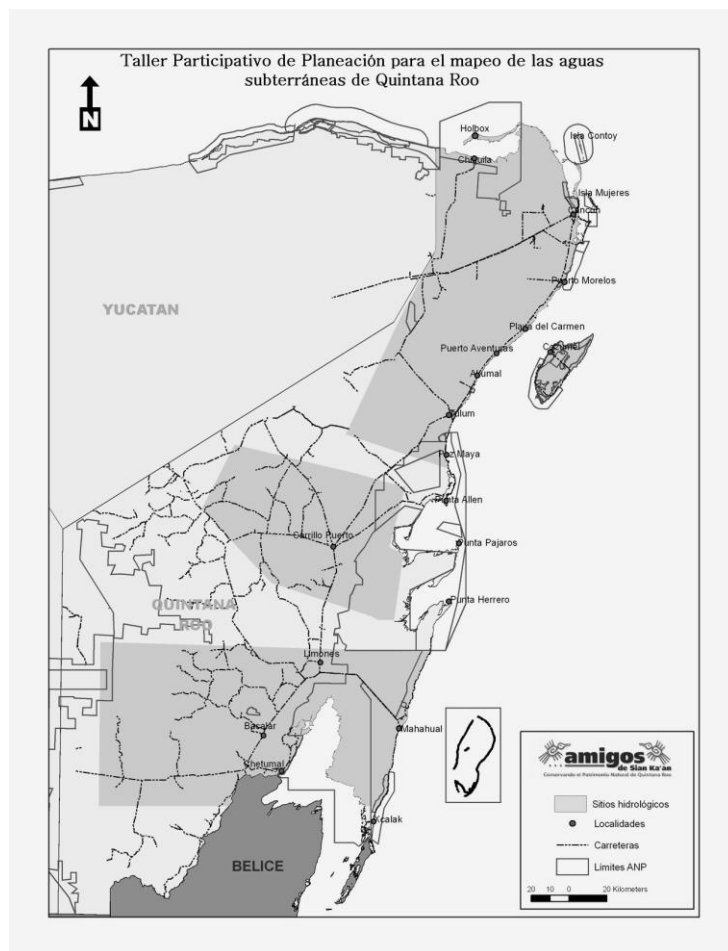


Figura 4. Zonas identificadas como prioritarias para el mapeo de las aguas subterráneas de Quintana Roo.

Resultados.

A partir de los muestreos geoelectrónicos se ha podido corroborar la presencia de cenotes y de ríos subterráneos, a través de las mediciones de conductividad eléctrica tomadas tanto por los espeleobuzos directamente al interior de la cueva, como a través de los muestreos de campo. Con el análisis de los datos fue posible la construcción de modelos de resistividad del subsuelo (Figura 5), con la finalidad de seleccionar los mejores parámetros para la inversión de los datos así como para identificar limitantes. Si bien es factible conocer la distribución de estas estructuras kársticas, aún es necesario trabajar para

reconstruir con exactitud, la geometría y la profundidad de dichas estructuras. Asimismo, resulta necesario avanzar en obtener estimaciones más precisas sobre la resistividad de la zona de mezcla (15-50 Ohmm) y del agua salada (1-4 Ohmm). Estos retos pueden estar relacionados con la alta permeabilidad de la roca, creando zonas de transición difusas, en donde no suceden variaciones de resistividad altamente definidas. Para contar con mayor información al respecto, es necesario continuar con la fase de verificación de los datos a partir de la perforación de pozos, para obtener información detallada sobre los cambios en la geología y los cambios en la conductividad eléctrica. Esta actividad se realizará a inicios del año 2010.

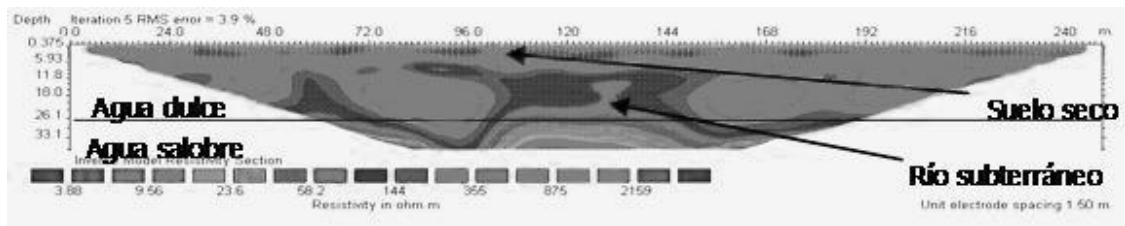


Figura 5 Corte transversal del subsuelo en Tulum. Los colores representan la distribución de valores de resistividad relacionados con la distribución del agua dulce y agua salada a lo largo del transecto de 250 m de largo.

La información obtenida de los muestreos aéreos electromagnéticos ha permitido mapear y caracterizar el subsuelo de una superficie de 150 km² hasta el momento y con especial énfasis en la distribución de cuevas inundadas y sitios de almacenaje de agua subterránea. Durante la campaña del 2007 se sobrevoló la zona del sistema de ríos subterráneos Ox Bel ha, sistema que ha sido mapeado por el grupo de espeleobuzos y que permitió corroborar la información geofísica tanto de campo como la aérea. Para excluir del análisis errores relacionados con factores intrínsecos de la técnica de muestreo (*drift error*), los relacionados a variaciones altitudinales y el generado por cuerpos antrópicos (edificios),

se realizó el procesamiento de los datos. Una vez filtrado el “ruido” y con el empleo de los parámetros seleccionados a partir de los modelos de la información de campo, se desarrollaron algoritmos que permiten resaltar las anomalías de los datos relacionados con la resistividad del terreno o bien, con la presencia de agua en el subsuelo ya sea en el interior de las cuevas inundadas o bien, en zonas de matriz de roca porosa.

De esta forma es posible generar mapas sobre la resistividad de las características del subsuelo (Figura 6). La capacidad de penetración está en relación al tipo de frecuencia emitido, de tal forma que la información proveniente de la frecuencia más baja, es la información de mayor profundidad. En lugares con la presencia de cuevas inundadas, la señal obtenida refleja anomalías de mayor amplitud, lo cual está relacionado a una mayor conductividad eléctrica de las cuevas inundadas, por la presencia del agua. Estos valores contrastan con los de la matriz de roca (seca), presentando una mayor resistividad (menor conductividad) en la superficie aledaña. Es probable que la frecuente presencia de agua salada en las cuevas (que a menudo están parcialmente llenas con agua salada y en parte, con agua dulce sea un factor que contribuya y permite la detección de las cuevas a partir de los muestreos aéreos electromagnéticos. Se observa que alrededor de estas anomalías se encuentran zonas de alta permeabilidad (baja resistividad) posiblemente relacionado con procesos de carsificación. En la Figura 6, se puede observar las zonas oscuras tierra adentro que se relacionan con la presencia de ríos subterráneos que aún no han sido explorados. Por otro lado, las zonas oscuras cercanas a la costa, representan zonas de baja resistividad vinculadas con zonas de humedales, en donde el subsuelo se encuentra saturado con la presencia de agua salobre.

Conclusiones

La aplicación de los métodos aéreos electromagnéticos en combinación con otras técnicas de geofísicas brinda información de alta resolución espacial y a distinta profundidad, para entender la estructura del subsuelo de Quintana Roo. A partir de la colecta, el procesamiento, la interpretación e integración de datos geofísicos y de información, es posible identificar la presencia de cuevas inundadas o ríos subterráneos así como la presencia de zonas en donde la matriz de roca almacena grandes volúmenes de agua. A partir de la información generada, es factible establecer sitios para la protección del acuífero así como definir una regulación específica de los diferentes usos del suelo para áreas específicas. Al contar con áreas de protección o regulación de las actividades, será posible prevenir impactos negativos al acuífero y a los sistemas asociados (social, económico y ambiental).

A nivel nacional, la fuente de información más común sobre el agua subterránea y sobre el subsuelo, es la obtenida a partir de pozos (información puntual). En este sentido, la densidad de pozos necesarios para obtener información detallada que refleje la complejidad hidrogeológica de una región, y que sirva de sustento en la toma de decisiones para la planeación urbana y para la protección del recurso agua, resulta demasiado alta y costosa. En regiones como la Península de Yucatán con un acuífero kárstico costero altamente complejo, con zonas de difícil acceso y con una alta vulnerabilidad a la contaminación, obtener un muestreo detallado a nivel regional a partir de pozos, resulta una tarea inoperable. En este sentido, la geofísica aerotransportada es una herramienta factible para la obtención de información y la protección del acuífero.

En zonas como Tulum, donde existe una alta densidad de estructuras kársticas por Km² y en donde existe un acelerado proceso de cambio de uso del suelo y urbanización,

resulta necesario generar información no sólo puntual, sino espacial sobre las principales características del subsuelo. El contar con información detallada es indispensable para prevenir la contaminación de la única fuente de agua dulce en la región, el acuífero. A través de dicha información es factible generar mapas con información detallada sobre zonas de alta permeabilidad y así generar escenarios de riesgo a la contaminación del agua y programas de contingencias por afectación ambiental o a la salud humana:

Esta información es la base para orientar decisiones tan importantes como la ubicación de zonas para la protección del agua subterránea, la definición de políticas para la disposición final del agua residual así como para la selección sitios para la construcción de rellenos sanitarios. Incorporar esta información en el diseño de las redes de monitoreo de la calidad del agua, podría ser de gran utilidad. Hoy en día no se monitorean las zonas descarga ni las vías de rápido transporte de agua y de contaminantes como los ríos subterráneos.

En este sentido, la toma de decisiones fundamentada en el conocimiento de las características del subsuelo, permitirá evitar poner en riesgo la salud humana tanto de residentes y de visitantes así como evitar riesgos relacionados a la contaminación de las zonas de extracción de agua para la población.

Esta información será considerada en el proceso de planeación del futuro Programa de Ordenamiento Ecológico y Local de Tulum, así como para la regulación de las actividades productivas. La integración de la presente información podrá evitar la contaminación del agua y del acuífero así como prevenir el daño o la pérdida de infraestructura ocasionada por el derrumbe del techo de las cuevas, así como el deterioro de ecosistemas clave, como es el caso del Arrecife Mesoamericano.

El manejo sustentable del agua y de sitios kársticos, debe basarse en información detallada y actualizada sobre las características geohidrológicas de los mismos, considerando especialmente los procesos de transporte y almacenamiento del agua. La planeación territorial en sitios kársticos no debe asumir condiciones geohidrológicas homogéneas, sino por el contrario, debe incorporar las características intrínsecas de éstos para no poner en riesgo la calidad del agua así como la salud humana y de los ecosistemas. Lograr la adecuada planeación y regulación de los usos del suelo en sistemas kársticos, permitirá asegurar la calidad del agua del 12% de las reservas de agua dulce a nivel mundial.

Agradecimientos

El estudio ha sido posible gracias al financiamiento de *International Corporate Wetland Restoration Partnership* (ICWRP) formado por la Fundación de Naciones Unidas a través de UNESCO, *The Nature Conservancy*, *Gillette*, *Joyce Coleman*, la Fundación Bepensa y AGUAKAN, la *Hausman Foundation for Environmental Solutions*. Además de agradecer el apoyo a: la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, la agencia Aduanal NAFTA del Sureste y la Agencia Aduanal del Valle, Fundación *Royal Resorts*, Fundación Oasis, CINDAQ. En especial quisiéramos agradecer el invaluable apoyo de la Secretaría de Marina y Armada de México.

Bibliografía

- Beddows, P., (2004). *Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonate aquifer: Caribbean coast of the Yucatan's Peninsula, México*. PhD Thesis, University of Bristol, 303 pp.
- Beddows, P., L. Smart, F. Whitaker y S. Samantha (2007), "Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity". *Journal of Hydrology*. Vol. 346, num. 1-2, Elsevier Science, Amsterdam, Países Bajos , pp. 18– 32.
- Gulden B 2009, A list of world's longest caves [<http://www.caverbob.com/wlong.htm>: 10 de agosto de 2009].

- Comisión Nacional del Agua – CONAGUA, (1997), *Diagnóstico de la Región XII, Península de Yucatán*; CNA Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Yucatán.
- Drew, D. y H. Hötzl (1999) *Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications*. Balkema, Rotterdam.
- Escobar Nava (1986), *Geografía general del Estado de Quintana Roo*. Gob.Edo. Q. R., Mérida.
- Ford, D. y P. Williams (2007), *Karst hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex.
- López Ramos E. 1975, Geological summary of the Yucatan peninsula. En: A. Nairn y F. Stehli (Eds.), *The Ocean Basins and Margins: The Gulf of Mexico and the Caribbean*. (pp. 257-282). New York: Plenum Press.
- Marin, L (2005), *Improving ground water management: Mexico*. En “Examples of Successful Experiences in Providing Safe Drinking Water”. UNDP vol. 11 pp. 87-95. [http://www.aguaenmexico.org/images/estados10enero/Quintana%20Roo/Capitulos/Chpt_7%20TWAS.pdf: en 5 agosto 2009].
- Marin, L. y E. Perry (1994), “The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatán, México”, *Geofísica Internacional*, vol.33, num. 4, pp.619-623.
- Quinlan, J., (1990), *Special Problems of Ground-Water Monitoring in Carst Terrenes*, En: Nielsen D. y Johnson A. (Eds), *Ground Water and Vadose Zone Monitoring*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- QRSS – Quintana Roo Speleological Survey, 2006. Survey and cartography of the underwater caves of Quintana Roo, Mexico. [www.caves.org/project/qrss/qrss.htm; 2 de septiembre de 2009].
- Smart, P., P. Beddows, S. Doerr, S. Smith y F. Whitaker (2006), *Cave development on Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico*. En: Harmon R. & Wicks C. (Eds), *Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology & Geochemistry*. Geological Society of America Special Paper 404 pp. 105-128
- Secretaría de Turismo del Estado de Quintana Roo -SEDETUR, 2007. [<http://sedetur.groo.gob.mx/estadisticas>:20 de septiembre de 2008]
- Veni, G. (2002), “Revising the carst map of the United States”, *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. num 1. National Speleological Society, Alabama, USA, 45-50