
“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

ÁREA 2, SISTEMA HIDROLÓGICO NACIONAL AGUAS SUBTERRÁNEAS

“Evaluación de la heterogeneidad del acuífero cárstico en Quintana Roo para fortalecer el manejo adecuado del agua”

Antecedentes.

La Península de Yucatán presenta rasgos estructurales característicos de *formaciones cársticas*, los cuales evolucionan como resultado de la acción erosiva del agua sobre las formaciones calizas que actúan sobre la piedra, disolviéndola, lo cual, tras largos periodos de tiempo, deriva en la formación de cámaras o cavidades subterráneas, conocidas como conductos de disolución. Estas condiciones no permiten la presencia de corrientes superficiales importantes, por lo que gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra al manto subterráneo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos de las calizas. Derivado de esta estructura, el acuífero de la región se ve favorecido por la recarga del agua de lluvia (25,000 hm³) y a su vez es altamente vulnerable a la contaminación que se genera en la superficie. La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, va de extrema (costa) a alta (interior de la península), propiciado por el origen geológico de la roca que almacena el agua, donde la fracturación, la porosidad de la roca calcárea y la presencia de oquedades, contribuyen a una alta permeabilidad y conductividad hidráulica, lo cual facilita la entrada de contaminantes y su rápida propagación.

Se sabe que el acuífero es cárstico, producto de ello son los cenotes, las cuevas secas e inundadas, tan particulares de la región. Algunos de los factores que favorecen los procesos de carstificación son el clima, la hidrología, la tectónica y la configuración estatigráfica vinculada a la sedimentología regional. Reflejo de lo anterior, son las cuevas inundadas que han sido exploradas y registradas como las más largas del mundo en la zona Norte de Quintana Roo y especialmente en la zona conocida como la Riviera Maya QRSS, 2009).

En la PY se registran importantes atributos geológicos que afectan la hidrología de la región. Dentro de estas estructuras se encuentran, la zona de fracturas de Holbox con una distribución Norte - Sur a lo largo de 100 Km de la PY, la Sierrita de Ticul en la zona central Oeste, la falla del Río Hondo en la zona Sur-este y el Anillo de Cenotes en la zona Noroeste de la PY (Perry et al., 2002).

El tipo de porosidad que presenta es alta, derivada ésta de la propia matriz de roca (porosidad intergranular), las fallas y fracturas y los conductos cársticos. La funcionalidad hidrológica de cada una de estas estructuras es diferencial, en el caso de la matriz de roca, su principal función es disminuir la velocidad de flujo del almacenamiento, mientras que en los conductos, es el transporte de agua a mayor velocidad, en grandes volúmenes y a grandes distancias. Estas estructuras, tienen una función ecológica, hidrológica muy importante, puesto que

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

funcionan como un sistema que interconecta las zonas de recarga tierra adentro en las selvas, con las zonas costeras (humedales) y marinas (Arrecife Mesoamericano), a través de los sistemas subterráneos y los sitios de descargas o manantiales. Conocer la heterogeneidad tanto horizontal, como vertical del acuífero, permitirá contar con elementos más apropiados para un manejo integral del agua en la Península de Yucatán.

Uno de los grandes retos para el manejo del agua a escala local en zonas cársticas es la carencia de información más completa sobre la ubicación de las principales estructuras cársticas. En este sentido, la geofísica aerotransportada puede tener un gran potencial para generar dicha información en grandes extensiones de terreno o en sitios de difícil acceso donde los métodos tradicionales no se pueden aplicar; proporcionando datos de gran importancia para integrar en los modelos geohidrológicos de sitios cársticos.

La importancia de la protección y conservación de estas formaciones geológicas y su hidrodinámica, estriba en que el acuífero es extremadamente vulnerable a la contaminación y es prácticamente la única fuente de agua para todos los usos, por lo que el asegurar la cantidad y calidad del agua, es vital para sustentar el desarrollo en el corto, mediano y largo plazo. En este sentido, el conocer la estructura cárstica y dinámica del acuífero en esta zona, donde el flujo subterráneo se encuentra conectado directa o indirectamente con lagunas de aguas marinas interiores y el mar; permitirá valorar los efectos subsecuentemente al medio marino, por agentes contaminantes de las actividades en tierra; lo cual constituye una amenaza a la sustentabilidad de la actividad turística de la región.

En este sentido, las propuestas de investigación y desarrollo tecnológico que se presenten, deberán considerar de manera primordial, el que el estudio técnico provea de información técnica a la CONAGUA sobre la estructura cárstica y el comportamiento del acuífero, especialmente para aquellas zonas en donde no se cuenta con un alto grado de conocimiento del mismo, para sustentar la protección de zonas actuales y futuras de almacenamiento de agua, así como la orientación de políticas públicas para la protección del recurso agua y el pago por servicios ambientales hídricos.

Objetivo General

Investigar el grado y direcciones del desarrollo cárstico en las rocas carbonatadas, calidad del agua y el comportamiento del agua subterránea del estado de Quintana Roo a través de estudios técnicos de prospección geofísica y de calidad del agua con tecnologías innovadoras que permitan una mayor cobertura a menor costo que permitan identificar zonas de potencial acuífero, fortalecer el manejo del agua así como el desarrollo de criterios técnicos para la protección del acuífero.

Objetivos Específicos

- Identificar la heterogeneidad espacial hidrogeológica del acuífero, a través de diferentes métodos de geofísica aplicada a la hidrología de alta resolución espacial y vertical como sondeos aéreos electromagnéticos (AEM), sondeos geofísicos de campo y sondeos directos en pozos.

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

- Contar con un diagnóstico sobre la calidad del agua así como con un modelo local de flujos preferenciales de las aguas subterráneas, que reconozca la heterogeneidad espacial hidrogeológica de la zona de estudio y que permita orientar el desarrollo urbano de la región.
- Identificar zonas de mayor potencial para la definición de futuras zonas de reservas de agua a través de la prospección geofísica y del diagnóstico de la calidad del agua.
- Determinar la velocidad real del flujo subterráneo así como las presiones o grado de confinamiento a la que está sometida el agua subterránea en las zonas costeras según sus características estratigráficas y petrofísicas de las rocas.

Impacto socioeconómico.

Particularmente en el estado de Quintana Roo, el sector turismo propicia un acelerado crecimiento poblacional, que demanda servicios sanitarios que rebasan la capacidad de servicio de los municipios. De acuerdo con el conteo de INEGI 2005, la población del estado de Quintana Roo era de 1'135,309 habitantes, mientras que las proyecciones de crecimiento del CONAPO, estiman que esta entidad crecerá al 2012 en 324,385; y se proyecta una población al año 2020 de 1'880,019 habitantes, lo que representa un incremento de 947,290 habitantes (83%) respecto de la población del 2005.

Cabe mencionar que el sector turismo es el sustento de la economía estatal y el eje catalizador del desarrollo poblacional. El inicio de la actividad turística tiene su origen principalmente en Cancún, el destino fue creado en los años setenta y detonó el desarrollo turístico y el crecimiento poblacional en el estado. En los últimos 35 años el incremento poblacional estatal fue de 1,200%. Para el periodo 2000-2005 el crecimiento en la oferta hotelera fue de 25% (SEDETUR, 2007) y de la población de un 30% (INEGI, 2005). Actualmente en el norte de Quintana Roo vive poco más del 50% de la población estatal. Relacionado a dicho incremento poblacional, se encuentra la expansión de la mancha urbana y un incremento en la demanda por agua potable y de servicios de saneamiento. Hoy en día la frontera urbana avanza en las inmediaciones de las zonas de captación y extracción de agua potable para las principales ciudades, esta expansión amenaza la calidad de las aguas subterráneas poniendo en riesgo la salud humana de la población que de ésta se abastece.

En este sentido, se debe propiciar la conservación y protección de las zonas de captación y de extracción de agua, así como asegurar la calidad de la misma, regulando las actividades que pudieran generar impactos negativos en su calidad y para lo cual es necesario contar con información técnica que permita proteger el recurso agua, orientar el desarrollo urbano para lograr la conservación de la calidad del agua y por consiguiente, mantener la salud de la población y visitantes de la región además de la salud de los ecosistemas dependientes del agua, mismos que son sustento de la economía del estado.

Productos esperados:

- 1.- Informe del estudio en donde se determine y presente cartográficamente la heterogeneidad espacial y vertical del acuífero en las zonas de estudio propuesta. Así mismo se describa la

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

heterogeneidad hidrogeológica y su funcionamiento, incluidos los criterios técnicos para prevenir riesgos de contaminación del agua y recomendaciones para fortalecer las políticas para el pago por servicios ambientales hidrológicos

- 2.- Un diagnóstico sobre la calidad del agua, los diferentes usos del agua en la zona, así como las fuentes potenciales de contaminación del acuífero.
- 3.- Un modelo geohidrológico local sobre los flujos del agua subterránea.
- 4.- Una propuesta de lineamientos para la protección del acuífero que especifique y justifique técnicamente las áreas de protección al acuífero en las zonas de abastecimiento actual y futura.
- 5.- Recomendaciones para la construcción de infraestructura para la disposición final de residuos sólidos y líquidos, el fortalecimiento de los instrumentos de planeación territorial y el fortalecimiento de las políticas para el pago por servicios ambientales hidrológicos.

Los informes parciales del estudio se deberán entregar en impreso y en medios magnéticos (formato PDF para el caso de envío con correo electrónico y en los formatos originales de elaboración para su entrega al usuario de la información: Comisión Nacional del Agua) con sus correspondientes anexos estadísticos y cartográficos a escala 1:50,000, así como las bases de datos con sus correspondientes metadatos.

Las propuestas deben considerar las acciones requeridas para obtener y especificar de la **zona o zonas de estudios propuestas** en el estado de Quintana Roo, el detalle suficiente de las siguientes actividades:

1. **Recopilación de información y datos geográficos.** Se realizará una investigación documental para compilar y analizar toda aquella información disponible sobre el área de estudio y su zona de influencia. Para ello se solicitará información de publicaciones, reportes técnicos, artículos a diferentes instancias académicas y de investigación sobre aspectos, hidrológicos e hidrogeoquímicos de la zona de estudio.

Asimismo se recopilará información sobre instrumentos de ordenamiento y planeación del territorio clima, bases de datos geográficos de geología, hidrogeología, topografía, uso del suelo y vegetación, fauna, historial de huracanes, espeleología, para identificar atributos importantes del territorio. Se elaborará una base de datos con toda la información recabada. Las bases de datos geográficas deberán integrarse en archivos shape o en formato compatible con ESRI ArcMap y deberán contar con su metadato correspondiente.

2. **Identificación y mapeo de estructuras cársticas.** A partir de un análisis e interpretación en pantalla de imágenes satelitales y fotografías aéreas a escala 1:25,000 se identificará y digitalizarán las estructuras geológicas cársticas de gran envergadura (dolinas, cenotes, grutas, cavidades elongadas, etc.) así como alineamientos u otros atributos geomorfológicos que tengan influencia directa en la permeabilidad de la roca (fallas, fracturas, etc.). Asimismo, para complementar la información, se realizarán muestreos de campo a través de transectos lineales con una orientación perpendicular al patrón de distribución general de las estructuras previamente identificadas. El registro de las estructuras incluirá la ubicación de las estructuras a través del uso de un sistema de posicionamiento global, orientación así

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

como información litológica y registro fotográfico. Toda información recabada se digitalizará y plasmará en un mapa geológico.

3. **Prospección geofísica.** El territorio en la zona se caracteriza por presentar un macizo de cobertura vegetal continua altamente densa, haciendo difícil el acceso a grandes porciones del territorio. En este sentido y con la finalidad de contar con información hidrogeológica de manera espacial y continua sobre la heterogeneidad del acuífero, se deberá considerar el empleo de métodos de geofísica aérea y de campo (escala regional, local y sitio). Los sondeos aéreos electromagnéticos se emplearán para generar información continua sobre las variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo así como para la ubicación de principales estructuras cársticas en grandes extensiones del área de estudio, es decir a escala regional. En zonas de fácil acceso y sitios clave se emplearán sondeos de geofísica de campo para generar información sobre variaciones de la resistividad eléctrica del subsuelo en áreas más pequeñas, correspondiendo a la escala de local. Los sondeos se realizarán en sitios clave y servirán para calibrar los datos obtenidos en los sondeos aéreos electromagnéticos. La ubicación de los sondeos geofísicos será perpendicular a la disposición de las fracturas previamente identificadas en la zona de estudio (Actividad 2).
4. **Construcción de piezómetros.** Esta actividad se derivará de la aplicación de métodos geofísicos, siendo ésta la escala de sitio. Se realizarán sondeos directos mediante la construcción de piezómetros de 8” diámetro hasta una profundidad tentativa de 40 a 50 m, los cuales contarán con un ademe de 8” con tubería de PVC hidráulico liso hasta un metro arriba del nivel estático y ranurado hasta la profundidad del pozo. En cada piezómetro se obtendrá el corte litológico a cada metro de profundidad. Asimismo, se determinará el espesor del agua dulce, la interface salobre y la profundidad de agua salina, a través de la ejecución de perfiles de salinidad (esto es variación de la conductividad eléctrica, temperatura y pH del agua subterránea con la profundidad) para varias épocas del año a fin de comparar las variaciones de la posición de la interfase agua dulce – agua marina con lluvias y estiaje, e incluso fenómenos ciclónicos a cada 1 m hasta la profundidad total.

La protección de los pozos construidos deberá considerar estructuras de concreto de acuerdo a las especificaciones que brindará la CONAGUA. Posteriormente se realizará la nivelación de brocales de los piezómetros instalados, respecto al nivel medio del mar, mediante la medición un sistema de posicionamiento global y nivelación topográfica diferencial directa. La nivelación se realizará con lecturas al milímetro de acuerdo al método de nivelación diferencia cerrada. Cada pozo deberá de estar instrumentado con transductores de presión, sensores de conductividad eléctrica y temperatura. Asimismo, la información compilada en esta actividad servirá de insumo para el desarrollo de la Actividad 5 y 6. En los sitios donde se considere recomendable la ubicación de futuras baterías de pozos, se deberá considerar la realización de pruebas hidráulicas en los pozos de monitoreo para obtener la conductividad K y en donde sea posible el almacenamiento; para lo cual será necesario construir los pozos necesarios.

5. **Diagnósticos sobre la calidad del agua y modelo de flujos preferenciales del agua subterránea.** En los piezómetros construidos durante la Actividad 4 así como en pozos existentes en las inmediaciones del área de estudio, se realizará una evaluación sobre la calidad del agua a partir de la colecta de muestras y análisis de parámetros fisicoquímicos para diferentes niveles del acuífero (superficial, medio y profundo) que serán precisados por

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

el personal de CONAGUA. En estos estudios se deberán identificar las relaciones funcionales o causa-efecto de variables físicas del medio y de calidad del agua, así como de la dinámica de concentración de elementos en tiempo y espacio. Asimismo, se realizará un inventario de fuentes de contaminación actual y futura, considerando los diferentes usos del suelo estipulados en los instrumentos de planeación territorial existentes, además de recorridos en campo para identificar las fuentes de contaminación actuales vinculadas a las actividades socioeconómicas que se realizan en la zona y en su área de influencia.

6. **Elaboración de un modelo geohidrológico.** Para contar con conocimiento a escala local sobre el patrón de flujo diferencial del agua subterránea en el acuífero cárstico, será necesario desarrollar un modelo geohidrológico que considere las distintas estructuras cársticas del acuífero (matriz de roca, conductos y fallas o fracturas). Se elaborará un modelo geohidrológico que integre la hidrología de medios cársticos y la de medios porosos. Dicho modelo se elaborará con la información obtenida en las actividades anteriores y se calibrará con la información del monitoreo de los piezómetros construidos durante un periodo de por lo menos un año. Sumar información de estudios ya disponibles. Dicho modelo deberá proveer información a escala local sobre los flujos del agua subterránea, sobre el transporte de contaminantes así como de los flujos preferenciales del agua. Asimismo, proveerá de información para la generación de escenarios para la protección del acuífero así como de los ecosistemas dependientes del agua subterránea.
7. **Definición de posibles zonas de explotación de agua y de reserva.** A partir de la información obtenida del modelo geohidrológico y de la obtenida en las actividades anteriores, sobre la heterogeneidad espacial del acuífero a partir de la prospección geofísica, se identificarán aquellas zonas consideradas como zonas de almacenamiento de agua. Las zonas que se definan con potencial acuífero para la explotación del agua y en especial para el abastecimiento público, deberán presentar una buena calidad del agua y poco riesgo a la contaminación de acuerdo al modelo geohidrológico y a la definición de los flujos preferenciales. Para ello se deberá de integrar dicha información en la elaboración de un diagnóstico con escenarios de protección del agua subterránea que sirva de insumo para el futuro desarrollo de zonas de reserva. Se considerarán diferentes niveles de protección y criterios para la regulación de actividades socioeconómicas desarrolladas en las inmediaciones de las zonas propuestas.
8. **Elaboración de lineamientos para la protección del acuífero.** Se desarrollarán una serie lineamientos y recomendaciones para evitar posibles riesgos de contaminación del acuífero, considerando las particularidades de los acuíferos cársticos, así como la información previamente obtenida en las actividades anteriores. Los lineamientos deberán considerar todas aquellas fuentes de contaminación actual y futura (instrumentos de planeación territorial) y deberán de servir para orientar el desarrollo regional sin poner en riesgo las fuentes de abastecimiento de agua. Tal es el caso de recomendaciones específicas para la construcción de infraestructura para la disposición final de residuos sólidos y líquidos con la finalidad de evitar la posible contaminación del acuífero. Asimismo, se deberá de considerar lineamientos que permitan fortalecer la política de pago por servicios ambientales hídricos en la región, identificando los proveedores potenciales del servicio de acuerdo a las zonas definidas en la actividad 7. Se deberá hacer un análisis sobre el funcionamiento del acuífero en las zonas de inyección de las aguas residuales de los hoteles e instalaciones turísticas ubicadas en la zona costera dentro del área de estudio.

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

9. **Presentación de resultados del estudio en el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.** Una vez concluidos los trabajos del estudio, se deberán presentar en el seno del Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán, enfatizando su problemática y propuestas prospectivas para el establecimiento de zonas de protección o reservas de agua actual y futura.

Elaboración de informes. Se elaborarán informes parciales y uno final, de acuerdo al formato establecido por la CONAGUA. El informe final contemplará un apartado en extenso y un resumen ejecutivo de no más de 10 hojas.

Durante el desarrollo del estudio se entregarán informes parciales de cada una de las etapas del proyecto, que deberán contener el avance de cada actividad y tomar como base el modelo de contenido propuesto por personal de la CONAGUA. Sin embargo, de acuerdo al plan de pagos, el número de informes parciales puede incrementarse. Cabe aclarar que dichos informes se considerarán como requisito para el pago de la ministración siguiente. De cada informe parcial se entregarán una impresión original y una copia, así como en medio magnético. Los informes parciales serán revisados por personal de la CONAGUA y se entregarán las observaciones correspondientes para su inclusión, y que tendrán que verse reflejadas en el informe final.

Se elaborará un informe final en extenso y un resumen ejecutivo. El contenido del informe final y del resumen ejecutivo será definido por personal de la CONAGUA. En términos generales, para el informe final, se deberán desarrollar los siguientes capítulos:

- Introducción
- Situación actual del área de estudio
- Base de datos bibliográfica y geográfica
- Informe escrito sobre la distribución regional de las estructuras cársticas en la zona de estudio y en su área de influencia.
- Mapa con la distribución de los sitios empleados en la prospección geofísica.
- Modelo espacial calibrado sobre las características de resistividad eléctrica del subsuelo en la zona de estudio.
- Mapa con la localización integrada de todos los desarrollos cársticos visibles y no visibles identificados con base en la información consultada y la generada en el propio estudio.
- Diagnóstico de la calidad del agua y modelo local de los flujos preferenciales de las aguas subterráneas que integra la información sobre la estructura cárstica de la zona de estudio y área de influencia.
- Diagnósticos para la protección del agua subterránea.
- Lineamientos para la protección del acuífero.
- Archivo fotográfico de las actividades.
- Conclusiones y Recomendaciones.
- Anexos.

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

El contenido de cada capítulo será definido por personal de la CONAGUA. Se entregará para revisión del informe final una impresión original, una copia impresa y una copia en medio magnético. Una vez revisado por el personal de la CONAGUA, se realizará una presentación del mismo en el sitio que designe la CONAGUA. Se deberá incluir en los anexos del informe final el manual del usuario del modelo matemático utilizado y se instalará el mismo en un equipo de cómputo que designe el personal de la CONAGUA. Asimismo, se entregará un disco de instalación de dicho modelo y se dará una capacitación a personal que designe la CONAGUA para la utilización del mismo.

En cuanto al resumen ejecutivo, el contenido será definido por personal de la CONAGUA. Se entregará para revisión una impresión original, una copia y una copia en medio magnético.

Una vez revisado y aprobado el informe final se entregarán 10 originales a color, así como 10 respaldos en discos compactos. Para la edición del informe se utilizará Microsoft Office 2007. Todos los archivos deberán entregarse en formato que el sector pueda trabajar directamente con la información. Se deben proporcionar dos juegos originales de las cartas topográficas de INEGI de la zona de estudio en la escala 1:50,000. Se integraran al informe final los anexos fotográfico y cartográfico.

Supervisión y Propiedad de los Trabajos.

La CONAGUA, a través del personal que ésta designe, llevará a cabo la supervisión del desarrollo de las actividades del estudio. La CONAGUA podrá revisar actividades específicas, tales como muestreos, aforos o análisis de laboratorio, entre otros, y podrá pedir que sean realizados nuevamente en caso de que no se realicen de acuerdo a lo estipulado en estos términos de referencia.

Toda la información recopilada y generada, así como los resultados obtenidos y productos adquiridos en y para el presente trabajo son propiedad exclusiva de la CONAGUA y serán entregados a ella.

Ni el sujeto de apoyo, ni el personal involucrado directa o indirectamente con la información recopilada y generada, así como los resultados obtenidos y productos obtenidos de los trabajos a desarrollar, podrán usar, divulgar, comercializar o editar parcial o totalmente dicha información, sin previa autorización expresa por escrito de la CONAGUA.

Para el seguimiento de los trabajos de este estudio, la CONAGUA, llevará una bitácora en la que se anotarán los avances y modificaciones de los trabajos que se acuerden entre las partes.

Insumos y apoyo que proporcionará la CONAGUA

La CONAGUA proporcionará lo siguiente:

- Información de la Red Nacional de Monitoreo.
- Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales.
- Inventarios Nacionales de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Información hidrométrica y climatológica.

“Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua”

- Normativa aplicable en materia de agua.
- Resultados y datos del proyecto de definición de la zona de reserva para el abastecimiento de los Mpos. Benito Juárez e Isla Mujeres.
- Apoyo para consolidar la participación de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo (CAPA) y la concesionaria del servicio de agua potable para el norte del estado, AGUAKAN.

Duración y Fechas de Inicio y Terminación de los Trabajos

La duración total de los trabajos y su respectivo calendario no será mayor de 24 meses. La fecha de inicio de los trabajos se considerará como la fecha de firma del Convenio de Asignación de Recursos.

Solicitante y Usuario de la Información

Dirección Local CONAGUA Quintana Roo
Ing. Salvador Arizmendi Guadarrama
Director Local
salvador.arizmendi@conagua.gob.mx
(01 983) 83 26404