

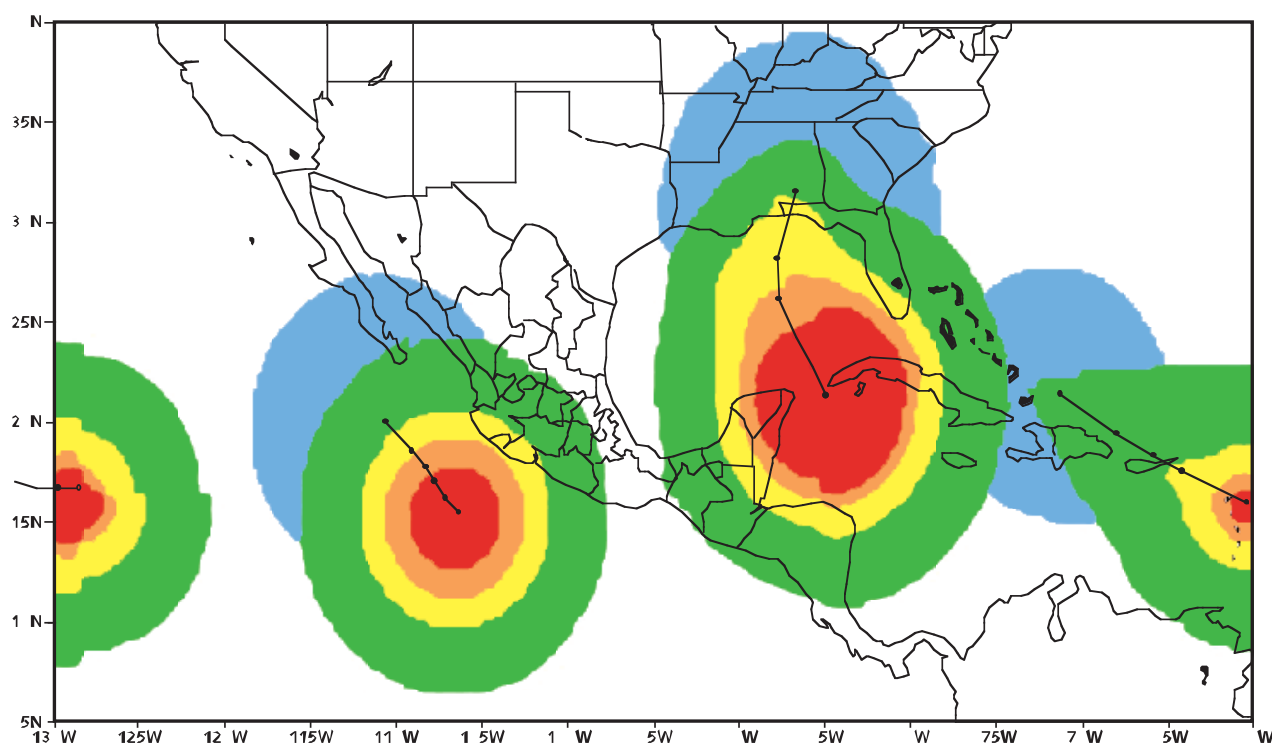
Tecnología Hidrológica

Hidrometeorología

Se automatizó el Sistema de Alerta Temprana de Ciclones Tropicales (*SIAT-CT*) de la Dirección General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación. La versión del sistema, elaborada en 2000, fue mejorada para producir la nueva versión denominada *SIAT-CT 2003*, que considera las fases de acercamiento y alejamiento. En la fase de acercamiento del ciclón tropical a un área afectable se activa el sistema, señalando el tipo de avisos que corresponda cuando el meteoro se aproxime o entre a territorio nacional, y en la fase de alejamiento

se desactiva, dando el tipo de aviso correspondiente cuando se disipe o se aleje del país. Con la elaboración de la herramienta automatizada del *SIAT-CT 2003*, el Sistema Nacional de Protección Civil cuenta ahora con una metodología sencilla, rápida y eficiente para la localización de las regiones que posiblemente sufrirían los efectos de un ciclón tropical que se aproxime a México. Esta herramienta es de gran utilidad para la implementación de acciones encaminadas a la protección de la población ante este tipo de fenómenos.

Pemex Exploración y Producción (PEP) opera una red de medición meteorológica y oceanográfica



MAPA CON ÁREAS DE ALERTAMIENTOS DEL *SIAT-CT* PARA EL CASO DE LA PRESENCIA DE VARIOS CICLONES TROPICALES; DE IZQUIERDA A DERECHA: LA TORMENTA TROPICAL *ISIS*, EL HURACÁN *JAVIER*, EL HURACÁN *IVÁN* Y LA DEPRESIÓN TROPICAL *ELEVEN (JEANNE)*, DEL 13 DE SEPTIEMBRE DE 2004

ca en la sonda de Campeche que permite establecer condiciones de alerta y evacuación del personal que trabaja en las plataformas petroleras. Para mantener dicha red en condiciones apropiadas de operación, se realizó un proyecto integral de rehabilitación del equipo de medición de cinco estaciones meteorológicas: cuatro en las plataformas petroleras Cayo Arcas, Ixtoc-A, Rebomero y Eco-1, y una en el puerto de Dos Bocas, Tab., así como con equipo oceanográfico instalado en las plataformas, consistente en cuatro medidores de ola y marea y cuatro perfiladores Doppler para corrientes marinas en las plataformas. Previamente a la rehabilitación, dichos sensores no funcionaban de forma confiable, pues estaban incompletos, dañados u operaban con deficiencia. Para restablecer el funcionamiento de la red con la confiabilidad adecuada, el IMTA suministró a PEP instrumentos calibrados de medición meteorológica y oceanográfica, además de sensores sustitutos y lotes de refacciones. Cada estación meteorológica consta de sensores de velocidad, ráfaga y dirección del viento, temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, precipitación pluvial y visibilidad, y transmite los datos cada minuto a un servidor. Los medidores de ola y marea están instalados a un costado de una de las piernas-soporte de cada plataforma a 5 m de profundidad y envían la señal a través de un cable submarino cada 30 min. Los perfiladores están instalados en el lecho marino; la señal también se envía a través de cable submarino y los datos se registran cada 15 min. Asimismo, se desarrolló un sistema de gestión de calidad para la red de estaciones. Actualmente, tanto la red como el sistema de gestión de calidad, operan en condiciones satisfactorias.

Para conocer mejor los procesos de circulación atmosférica regionales y locales del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos y emitir mejores pronósticos, la NOAA y otras instituciones llevan a cabo el proyecto *Monzón de América del Norte*. Con este propósito, y debido al deterioro de las redes de observación existentes, el IMTA implementó una nueva red pluviométrica con la colaboración voluntaria de los habitantes de la región. En una primera etapa se instalaron 150 pluviómetros en las regiones menos desarrolladas, en particular donde no existieran estaciones de observación a lo



INSTALACIÓN Y CAPACITACIÓN A LOS VOLUNTARIOS PARA LA TOMA DE REGISTROS DE LLUVIA, EN EL POBLADO DE LA DURA, YÉCORA, SONORA

largo de la Sierra Madre Occidental y, especialmente, en Sonora. En la segunda etapa, se propone instalar otros 150 pluviómetros en Sonora, trescientos en Chihuahua y trescientos en Sinaloa. La experiencia exitosa obtenida en este proyecto muestra la factibilidad de que en el futuro las redes de observación puedan ser administradas y manejadas por voluntarios con interés de informar a sus comunidades, así como de contribuir a conformar una base de datos nacional.

Las variaciones cíclicas del nivel en el lago de Chapala podrían producir cambios en la evaporación que pudieran afectar los patrones de circulación atmosférica y la precipitación en la cuenca. Para evaluar estos posibles cambios, se generaron escenarios climáticos mediante el modelo numérico de mesoescala MM5 usando datos históricos y en la suposición de que el lago se seca completamente y el lecho se cubre de pastizales. Se simularon veinte años, considerando las temporadas de verano. Los resultados indican que el impacto más grande en la lluvia ocurre en el área aledaña al lago de Chapala, donde la lluvia media mensual para el verano se vería reducida hasta en un 40% durante los meses de julio a septiembre. En la cuenca la lluvia media mensual tendería a disminuir en un 20%, aproximadamente.

Se continuó con el monitoreo semanal de mercurio contenido en el agua de lluvia en dos estaciones instaladas en Huejutla, Hgo., y Puerto Ángel, Oax. Este proyecto se inició en 2002 y se realiza con

apoyo de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, en colaboración con la CNA. Las concentraciones promedio registradas en Huejutla y Puerto Ángel fueron de 21 y 215 ng/m²-semana, respectivamente, valores que caen dentro del rango registrado en todas las estaciones de Estados Unidos y Canadá. Lo anterior sugiere que las emisiones de mercurio en México no son significativamente superiores a las registradas en el resto de América del Norte. Las concentraciones de mercurio son mayores durante las primeras lluvias y se reducen a medida que avanza la época húmeda. En septiembre de 2004 se obtuvo la certificación de los sitios de muestreo de México por el Programa Nacional de Depositación Atmosférica de Estados Unidos.

Hidrología y mecánica de ríos

El Cañón de los Laureles, en la cuenca del río Tijuana, desemboca en la zona del estuario de este río en California, Estados Unidos. Se trata de una cuenca con un área de 11.7 km², caracterizada por laderas con declives pronunciados, suelos arenosos y áreas de vegetación endémica. La zona se caracteriza también por la presencia de asentamientos irregulares y con infraestructura urbana precaria o inexistente, que genera también condiciones de insalubridad. Por ejemplo, en las laderas se observan profundas grietas producto de la erosión. Los habitantes de esta zona han improvisado retenes y estructuras de soporte con llantas usadas rellenas de tierra con el fin de evitar el deslave del suelo; sin



ÁREAS INSALUBRES E INESTABILIDAD FÍSICA EN LAS ZONAS CON PENDIENTES PRONUNCIADAS. CAÑÓN DE LOS LAURELES, TIJUANA, BAJA CALIFORNIA

embargo, estas acciones no han sido satisfactorias. A petición del Instituto Municipal de Planeación de la ciudad de Tijuana, el IMTA realizó un diagnóstico de este cañón que comprendió la propuesta de alternativas de solución para problemas de erosión e insalubridad. Se propusieron acciones tales como reforestación, obras de control de azolves, tratamiento de aguas residuales, manejo de desechos sólidos y obras de control de la erosión, por mencionar algunas. Con esto se pretende mejorar las condiciones de vida de los pobladores, disminuir riesgos a su salud e integridad física, así como prevenir efectos indeseables, tales como azolvamiento y contaminación en las zonas bajas y en la desembocadura del río.

La ciudad de Morelia y su zona conurbada, debido a su topografía y al crecimiento de la mancha urbana, han sido afectadas periódicamente por inundaciones causadas por eventos pluviales de gran intensidad y el consecuente desbordamiento de los ríos Chiquito y Grande. En especial, las lluvias de septiembre de 2003 provocaron graves daños a la población y a la viabilidad de la ciudad. Asimismo, el crecimiento urbano ha generado asentamientos humanos en el sistema de drenaje natural de la cuenca, ocasionando un peligro para la integridad de las personas y la infraestructura. Mediante el análisis y diagnóstico de la situación del sistema de drenaje pluvial, se hicieron diversas recomendaciones para diferentes horizontes temporales. Se presentaron estudios detallados para puentes, cauces, confluencias, obras especiales y zonas susceptibles de albergar infraestructura hidráulica. Se identificaron acciones de mejoramiento de la red de drenaje pluvial, incluyendo el desazolve periódico de los cauces, la remoción de la vegetación arbustiva y la delimitación de zonas inundables para manejo de avenidas. Adicionalmente, se estableció una cartera jerarquizada de proyectos ejecutivos de obras hidráulicas y se realizaron los correspondientes a cinco lagunas y dos presas para control y regulación de avenidas.

El grado de azolvamiento de las presas, la construcción de nuevas obras aguas arriba de las mismas y la disponibilidad de nueva información hidrométrica, contribuyen a que la avenida de diseño cambie con respecto a la definida para su construcción. De acuerdo con lo anterior, se determinó la avenida de diseño para un periodo de retorno de



INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN

10,000 años utilizando un análisis bivariado, modelos lluvia escurrimiento y un análisis de frecuencias de gastos máximos para las presas Abelardo L. Rodríguez, B.C.; Abelardo Rodríguez y Adolfo Ruiz Cortines, Son.; Sanalona, Sin., y El Infiernillo, Mich. Los diferentes análisis se realizaron en su mayor parte con metodologías desarrolladas por el Instituto.

Aprovechamientos hidráulicos

Para apoyar a la CNA en los trabajos de reglamentación de las aguas superficiales de la cuenca Lerma-Chapala, orientados a restablecer su equilibrio hidrológico y ambiental, el IMTA desarrolló y aplicó diversas herramientas de simulación y optimización para buscar y probar políticas óptimas de asignación del agua. Las alternativas planteadas se dividieron en dos grupos: el primero consistió en emplear modificaciones al acuerdo de distribución de 1991; y el segundo, en utilizar reglas obtenidas con técnicas de optimización. El primer grupo de opciones fue descartado debido a que al evaluarlas resultaron inferiores a las optimizadas. En la búsqueda de alternativas de distribución óptimas se consideraron criterios de garantía para el suministro de riego que aseguran al menos el 50% del volumen concesionado a cada sistema, aun en situaciones críticas, y volúmenes mínimos de conservación en el lago de Chapala (1,000, 1,500 y 2,000 hm³). Las alternativas se simularon utilizando 52 años de registro de precipitación y se evaluaron a través de los siguientes indicadores: volumen promedio entregado a los distritos y unidades de riego, frecuencia y magnitud

del déficit en la entrega, volumen para abastecer a Guadalajara, volumen promedio registrado en el lago de Chapala y porcentaje de reducción en el volumen entregado de cada alternativa con respecto al escenario base, que corresponde al comportamiento de la cuenca operando con el acuerdo de 1991. La política seleccionada para el nuevo convenio de distribución, denominada Política Óptima Conjunta, proviene de optimizar el funcionamiento del sistema al fijar el almacenamiento mínimo de Chapala en 2,000 hm³. Para transparentar el proceso de negociación del nuevo convenio se capacitó al personal de la CNA y de los estados que integran la cuenca, a través de la realización de cursos enfocados al uso de las herramientas. Los trabajos dieron el soporte científico-tecnológico para llevar a buen término las negociaciones del nuevo *Convenio de coordinación y concertación para el manejo de las aguas superficiales de la cuenca Lerma-Chapala*, firmado el 14 de diciembre de 2004 por los cinco gobernadores de los estados de la cuenca y ratificado por los usuarios el 14 de enero de 2005.

Con el objeto de realizar una evaluación del uso de los recursos hídricos en la cuenca del río Lerma, incluyendo el lago de Chapala, se realizó un balance hídrico. En la metodología empleada se utilizó la NOM-011-CNA-2000 *Conservación del recurso*, que permite calcular la disponibilidad del agua, tanto superficial como subterránea. Para el balance superficial se consideraron las 17 subcuencas en que la CNA ha subdividido la cuenca, y para el balance subterráneo, los 37 acuíferos que la subyacen. Como ocurre en general en todo el país, la mayor demanda se presenta en la agricultura, pues es del orden de 89%, y la correspondiente al uso doméstico de 6%. El balance superficial arroja una disponibilidad nula en las 17 subcuencas. Destaca que en Guanajuato se tienen las mayores demandas y en particular en la subcuenca del río Salamanca se presenta el mayor déficit. Los resultados del balance subterráneo también indican que existe una sobreexplotación en la mayoría de los acuíferos: 24 muestran una disponibilidad negativa, cuatro están en equilibrio, ocho presentan disponibilidad positiva y uno no cuenta con datos. Cabe resaltar que en Guanajuato, en particular en el acuífero de Celaya, es donde se encuentra el mayor número de pozos.



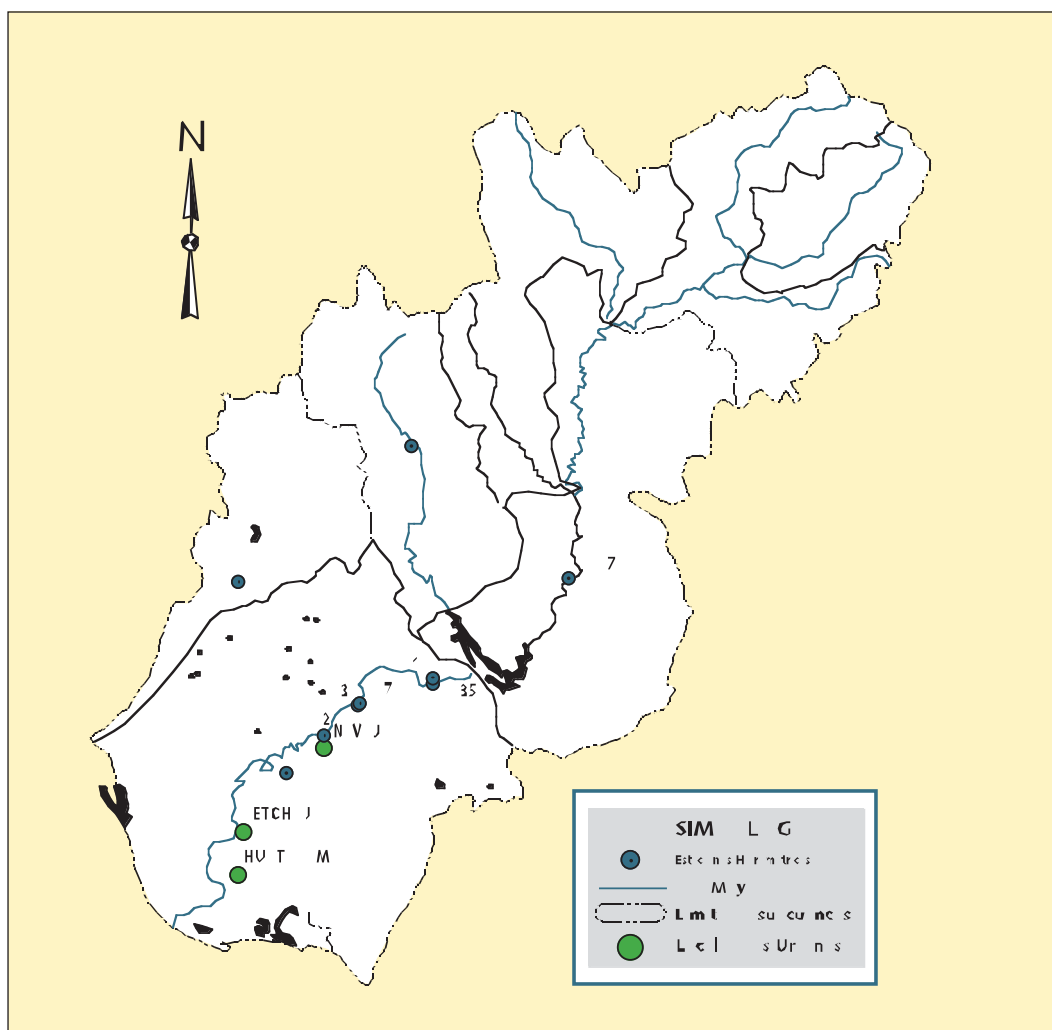
COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL ALMACENAMIENTO DEL LAGO DE CHAPALA, DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS CON EL ACUERDO DE DISTRIBUCIÓN DE 1991 (ADASUP), PARA 52 AÑOS DE SIMULACIÓN

Como consecuencia de la reciente sequía, la presa Adolfo Ruiz Cortines, sobre el río Mayo, Son., ha sido operada en forma errática, lo cual ha impedido satisfacer los volúmenes de aguas superficiales comprometidos con el distrito de riego 038 Río Mayo, Son., al principio de cada ciclo agrícola, y ha provocado la sobreexplotación del agua subterránea. Para resolver esta problemática, la Comisión Estatal de Agua de Sonora solicitó al IMTA la determinación de políticas óptimas de operación conjunta presa-acuífero. Para tal efecto, se emplearon metodologías basadas en programación dinámica y algoritmos genéticos. Como resultado, se recomendó una política de operación que considera un volumen de extracción de la presa dependiente del almacenamiento al inicio del ciclo agrícola. Específicamente, se determinó un volumen de extracción mínimo de 400 y máximo de 1,100 hm³. Esta política permite eliminar el déficit en los volúmenes de aguas superficiales comprometidos con el distrito de riego y reducir las extracciones del acuífero Valle del Mayo.

Para incorporar una base de datos geoespacial (*geodatabase*) a modelos dinámicos de simulación en cuencas, se revisaron y probaron mecanismos de entrada de datos a los modelos dinámicos desarrollados en plataformas de simulación *PowerSim* y *GoldSim*. La conexión con *PowerSim* se logró me-

dante tablas de *Excel* y con *GoldSim* mediante la construcción de una estructura de datos propia de la plataforma. Con base en estos resultados, la *geodatabase* de la cuenca del río Conchos, Chih., se conectó al modelo dinámico desarrollado para la misma cuenca. Esto permite realizar análisis de escenarios en forma mucho más precisa y expedita.

El sistema hidroeléctrico del bajo Balsas comprende tres aprovechamientos en cascada constituidos por las presas El Caracol, El Infiernillo y La Villita, y genera en promedio 5,300 GWh por año. La CFE ha propuesto incrementar la capacidad instalada conjunta de 1,862 a 3,000 MW mediante la repotenciación y ampliación de las centrales El Infiernillo y La Villita. Para contar con elementos de decisión, la CFE contrató los servicios del IMTA a fin de determinar el esquema óptimo de ampliación, repotenciación y operación. Para ello se empleó un modelo dinámico de simulación-optimización que representa los aspectos hidráulicos, energéticos y económicos del sistema. Se utilizaron series históricas de 25 años de datos diarios de operación y se evaluaron 158 escenarios. Como resultado, se determinó que la ampliación óptima debe ser de 400 MW en La Villita y de 500 MW en El Infiernillo, combinación que implica una relación beneficio-costos a valor presente de 1.41.



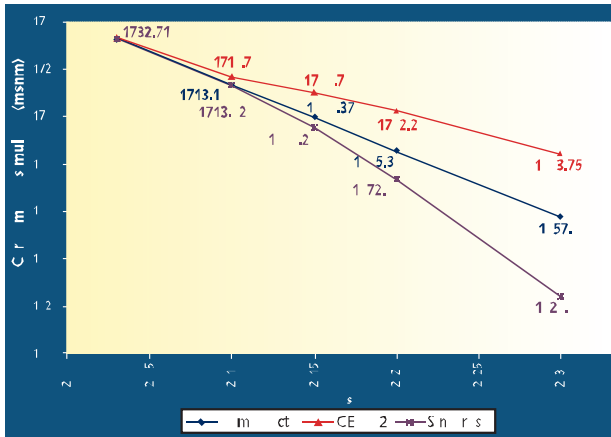
SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MAYO

Hidrología subterránea

El valle del río Mayo, Son., se ubica en una región árida del territorio mexicano donde el agua y su disponibilidad están sujetas a la fuerte variabilidad climática. De acuerdo con información publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, el acuífero que subyace a este valle se encuentra seriamente sobreexplotado. Sin embargo, dicha clasificación fue realizada con información de estudios que datan de los años sesenta. Ante tal panorama, la Comisión Estatal de Agua de Sonora encomendó al IMTA un estudio para actualizar el balance y determinar la disponibilidad actual de agua del acuífero. Del análisis efectuado, se concluyó que las principales fuentes de recarga del acuífero son las pérdidas por conducción en los canales de distribución y los retornos de riego, de tal suerte que la recarga inducida se esti-

ma en $230 \text{ hm}^3/\text{año}$ y la disponibilidad del acuífero en 13 hectómetros cúbicos por año.

La Comisión Estatal de Aguas de Querétaro solicitó al IMTA un estudio para evaluar el impacto de la construcción de la presa Extóraz en la recuperación de los niveles del acuífero del valle de Querétaro. Mediante un modelo numérico de flujo calibrado, verificado y actualizado hasta el año 2003, se simularon diferentes escenarios de reducción en el abastecimiento de agua a la ciudad de Querétaro proveniente del acuífero durante el periodo 2003-2030. Los escenarios simulados fueron comparados contra la opción de continuar explotando las aguas subterráneas para abastecer a la población. Los resultados obtenidos muestran una recuperación promedio de 50 m en los niveles del acuífero, gracias a que dejarán de extraerse $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, al sustituirlos por agua proveniente de la presa. Se propuso, además,



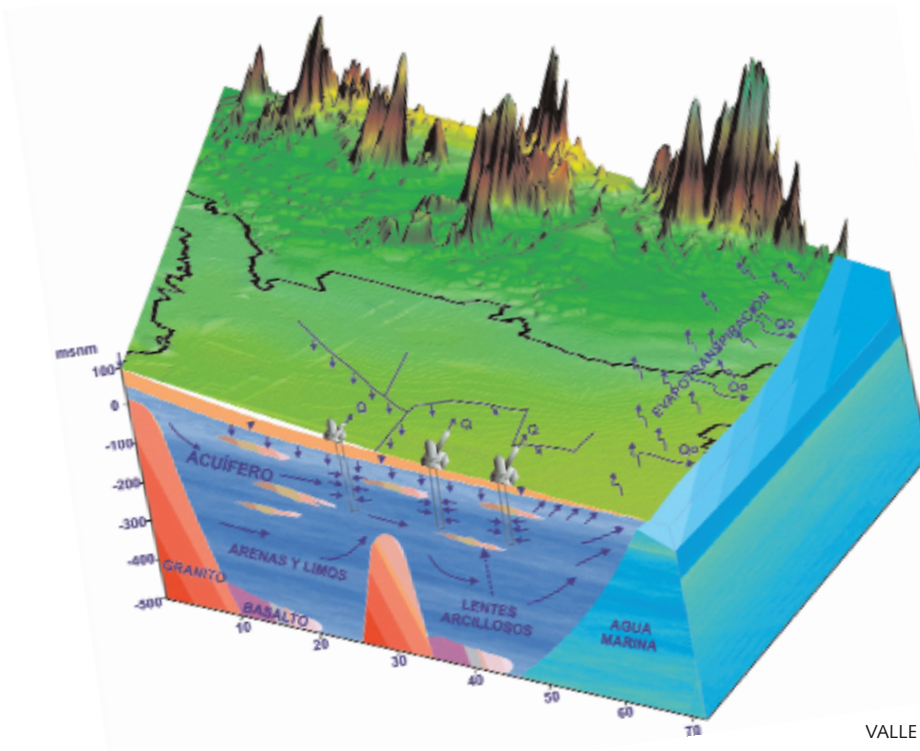
ESCENARIOS DE REDUCCIÓN EN EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE QUERÉTARO, PROVENIENTES DEL ACUÍFERO DURANTE EL PERIODO 2003-2030

una red de monitoreo compuesta por 36 pozos para vigilar las variaciones de los niveles subterráneos una vez al año.

El Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia, Mich., solicitó al IMTA un estudio para determinar el origen de las inundaciones en el ejido Morelos, localizado 4 km al suroeste de Morelia. Al extremo sur del ejido se ubica el manantial La Mintzita con un gasto estimado de 2 m³/s, aprovechado para el abastecimiento público de la ciudad. Las aguas del manantial se conducen mediante un canal no revestido de 1 km de

longitud, localizado al oriente del ejido. Los ejidatarios argumentaban que las filtraciones de este canal contribuían a las inundaciones en sus parcelas. Sin embargo, los resultados indican que, por sus características topográficas, la zona en estudio constituye una planicie de inundación sin drenaje suficiente para desalojar los volúmenes de escurrimiento superficial generados por las lluvias y que éstas son las causantes directas de las inundaciones. Esto se agrava por el hecho de que los suelos están constituidos por rellenos aluviales y lacustres de baja permeabilidad, lo cual impide la infiltración del agua de lluvia al subsuelo.

Los procesos de flujo en medios porosos saturados se llevan a cabo en diversas escalas de longitud. Los modelos actuales sólo son capaces de reproducir las escalas grandes debido al alto costo computacional y a la escasa información existente. El IMTA desarrolló un modelo matemático de flujo que considera los efectos de las escalas pequeñas en las escalas grandes, mediante técnicas de filtrado espacial. Para ello, se desarrolló una plataforma en PC que permite implementar la metodología de las escalas grandes en acuíferos heterogéneos, para procesos de flujo transitorio. Asimismo, se probó dicha metodología y plataforma en el acuífero del valle de Querétaro.



VALLE DEL MAYO, SONORA