

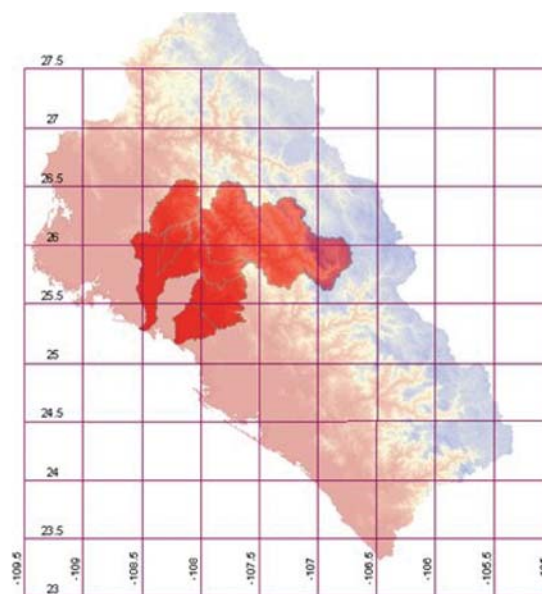
# Tecnología Hidrológica

## Hidrología y mecánica de ríos

La Ley de Aguas Nacionales obliga al cálculo de la disponibilidad de agua por cuenca y región hidrológica con el objeto de hacer un uso más eficiente del recurso. Para ello, se publicó la norma NOM-011-CNA-2000 *Disponibilidad de aguas nacionales*. Dentro de este marco normativo, la Gerencia Regional Pacífico Norte de la Conagua encomendó al IMTA la estimación de la disponibilidad media anual de agua superficial en las regiones hidrológicas 10 y 11. El estudio comprendió las cuencas de los ríos Sinaloa, Mocorito, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro. Asimismo, la Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico solicitó también un estudio de disponibilidad en las regiones hidrológicas 12 y 15. En este caso se incluyó la cuenca de la laguna de Sayula y la totalidad de la región Costa de Jalisco. Además, se realizó una actualización de los volúmenes concesionados en el Registro Público de Derechos de Agua. Se estimaron los volúmenes de consumo por uso y en cada subcuenca, en el periodo 1960 a 2004. El cálculo de la disponibilidad de agua superficial se llevó a cabo por subcuenca y se elaboraron planos georreferenciados para cada una de ellas, ubicando la distribución espacial de sus fuentes de abastecimiento, unidades y distritos de riego, así como los resultados de la disponibilidad, resaltando las zonas de posible concesión o veda del recurso. Los resultados de estos estudios permiten una distribución racional del agua disponible; también, servirán como instrumento de planeación hidráulica a corto, mediano y largo plazos.

Desde hace varios años se ha propuesto el aprovechamiento del río Verde como futura fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de León, Gto., y la

zona de los Altos de Jalisco. En este aspecto, la SGT de la Conagua encomendó al IMTA un estudio hidrológico del proyecto de la presa El Zapotillo. Con el estudio se estimó la creciente de diseño para un periodo de retorno de 10,000 años y se determinó la relación entre la elevación de la cortina y la demanda que sería posible satisfacer. Se consideraron gastos de extracción de 2.5 a 5.8 m<sup>3</sup>/s estimados para valores de déficit medio anual de 3, 2, 1 y 0% (gasto firme). Con los resultados del estudio se dimensionó el embalse requerido, incluyendo su capacidad de azolves, nivel de aguas máximas ordinarias y extraordinarias, así como el bordo libre, altura de corona y la longitud de cresta del vertedor. Una limitación importante en este caso fue que la altura de la corona debe ser tal que no se inunde el poblado Temacapulín, por lo que también se consideraron diques de protección.



DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES EN LA CUENCA DE LOS RÍOS SINALOA Y MOCORITO, REGIÓN HIDROLÓGICA 10. DÉFICIT EN ROJO

Con el propósito de contar con una herramienta para mejorar la operación de las centrales hidroeléctricas Ing. Carlos Ramírez Ulloa, *El Caracol*; Ing. Manuel Moreno Torres, *Chicoasén*, y Peñitas, el IIE solicitó al IMTA desarrollar sendos modelos matemáticos de pronóstico de avenidas en tiempo real. La red de estaciones hidrométricas de la CFE, además de medir variables climatológicas en tiempo real, permitió correlacionar las variables físicas de cada cuenca, utilizando modelos lluvia-escorrentamiento desarrollados por el IMTA. Los modelos permiten estimar las avenidas que ingresan a los embalses de cada una de las centrales, así como pronosticar la evolución de sus niveles. En la etapa de calibración, los resultados se verificaron mediante un procedimiento de tránsito inverso en vasos, también desarrollado en el Instituto.

Las precipitaciones extraordinarias de los últimos años en la zona costera del océano Pacífico han ocasionado inundaciones graves con la consecuente pérdida de bienes y personas. La vulnerabilidad actual de la zona conurbana del puerto de Acapulco puede agravarse debido a la creciente demanda de nuevas zonas habitacionales, a menos que se tomen las medidas de protección que se requieren. Tomando en cuenta lo anterior, la empresa Inveraca, S.A. de C.V., encargada de construir un conjunto habitacional en la zona de Acapulco Diamante, cerca de la laguna de Tres Palos, encomendó al IMTA un estudio hidrológico e hidráulico para la cuenca del río La Sabana con la finalidad de caracterizar la problemática existente en la zona y, en su caso, proponer la construcción de protecciones marginales. Los resultados de este estudio permitieron conocer la magnitud de los fenóme-



TOLVANERAS REGISTRADAS EN LA CUENCA DE LA LAGUNA DE SAYULA, JALISCO

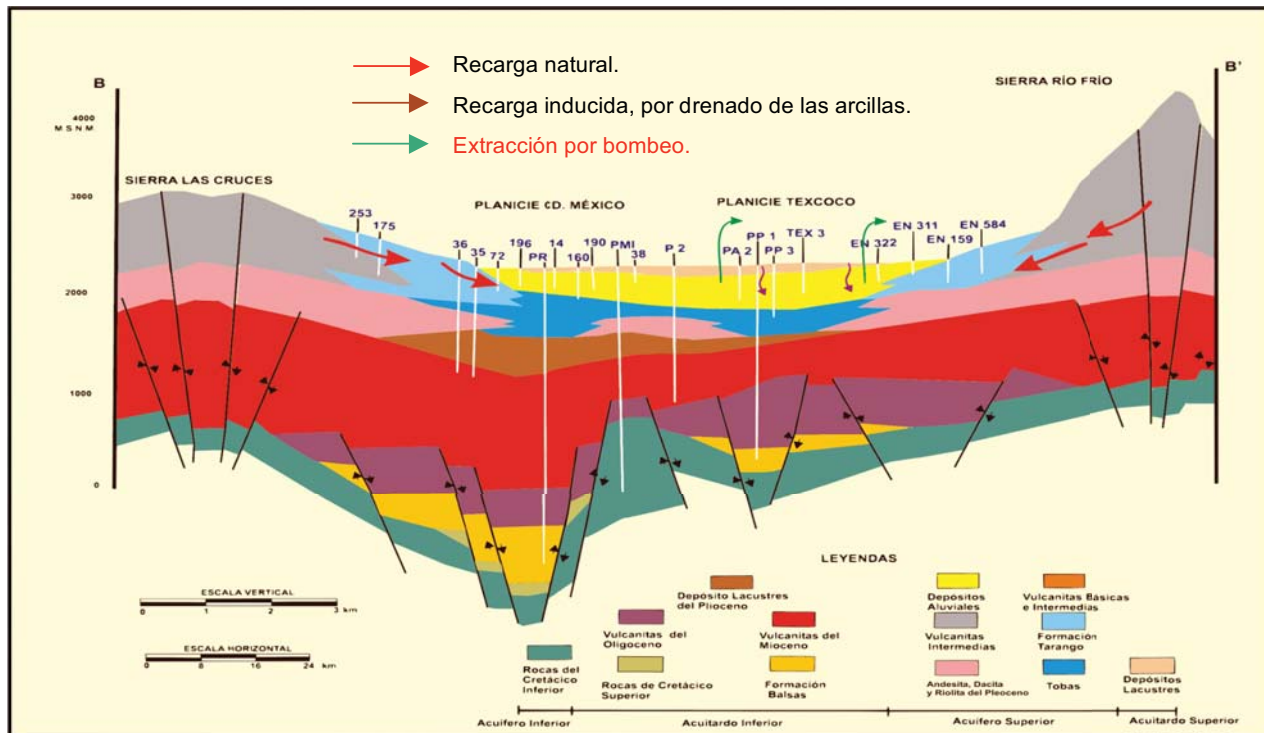
nos hidrometeorológicos extremos que podrían provocar desbordamientos del río La Sabana. Con el análisis hidrológico se estimó un gasto de diseño de 1,800 m<sup>3</sup>/s, para un periodo de retorno de cien años. También se realizó el proyecto ejecutivo de un canal trapecial de sección compuesta con un ancho promedio de 100 m para conducir las aguas excedentes. Además, se determinó la altura de la sobreelevación de la plataforma del terreno que es necesario ejecutar para desplantar la unidad habitacional.

La SCT recientemente inició la construcción del entronque carretero Copándaro-La Cinta de la autopista Morelia-Salamanca. Dicho entronque cruza la laguna de Cuitzeo en la parte oeste y cuenta con veinte alcantarillas, cuatro pasos lancheros y un puente que cruza el dren La Cinta, el cual en años anteriores dejaba pasar los excedentes de agua de esta laguna a la de Yuriria. Con el fin de garantizar la correcta operación hidráulica de las alcantarillas y pasos lancheros, la SCT encomendó al IMTA una revisión de las obras hidráulicas existentes en el tramo mencionado y el correspondiente análisis del proceso lluvia-escorrentamiento. Los resultados permitieron evaluar el funcionamiento de la laguna y de las estructuras hidráulicas existentes.

## Hidrología subterránea

Para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, el IMTA desarrolló un estudio con el fin de obtener la disponibilidad del acuífero de la zona metropolitana de dicha ciudad a partir de los balances hidrogeológicos de los años 1985, 1990, 1995, 2000 y 2003. El acuífero tiene una superficie de 1,906 km<sup>2</sup> y representa un sistema constituido por un acuitardo superior, un acuífero superior, un acuitardo inferior y un acuífero inferior. El acuífero superior es el que se encuentra actualmente en explotación por alrededor de 660 pozos que extraen 764.3 hm<sup>3</sup>/año, siendo el público urbano el principal uso. Del análisis de la información histórica disponible hasta 2003, se concluyó que la sobreexplotación del acuífero es de 345.8 hm<sup>3</sup>/año, la cual resultó ser 64% menor que la publicada en el *Diario Oficial de la Federación* en ese mismo año.

Los acuíferos de la cuenca Lerma-Chapala están sometidos a una explotación intensiva que ha modi-



ÁREA DE BALANCE DEL ACUÍFERO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ficado los patrones originales de flujo y la calidad del agua subterránea, entre otros fenómenos. De los 36 acuíferos identificados en la cuenca, 21 están seriamente sobreexplotados. Dicha sobreexplotación en las principales ciudades de la cuenca ha provocado acelerados descensos piezométricos, el aumento en la salinidad del agua y los asentamientos y agrietamientos del terreno. La formación de grietas en el terreno es un fenómeno visible y está asociado con la consolidación del terreno debido a la pérdida de presión de poro en los estratos arcillosos. En las zonas de mayor afectación de las ciudades de Celaya y Querétaro se observan abatimientos con valores que rebasan los 2 m/año, lo cual ha ocasionado la aparición de grietas y el asentamiento del terreno de 15 cm/año. El aumento en la salinidad del agua se asocia a la filtración de aguas residuales a través de las grietas, así como a la extracción de agua subterránea con tiempos prolongados de residencia en el subsuelo. Para evitar mayores afectaciones a la infraestructura urbana, se recomienda establecer una red de medición de los asentamientos del terreno y llevar a cabo programas de manejo del agua subterránea que tiendan a reducir el grado de sobreexplotación de dichos acuíferos.

Con el objeto de estructurar un plan de acción a corto, mediano y largo plazos, para hacer frente a los problemas de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Oaxaca y su zona conurbana, la Comisión Estatal del Agua de Oaxaca encargó al IMTA la elaboración de un estudio para proponer soluciones a dicha problemática. Como parte de este estudio se realizaron videoregistros en los pozos de agua potable de la ciudad, sondeos eléctricos y análisis de posibles fuentes adicionales de abastecimiento. Los videoregistros muestran que los pozos exhiben severas incrustaciones y en algunos casos están colapsados, por lo que se requiere su rehabilitación para operar en forma eficiente. Con base en los 95 sondeos geoelectrónicos realizados a 500 y 1,000 m de penetración, se verificó que el acuífero somero en explotación es la única fuente de abastecimiento en la región y que no existe un acuífero profundo. Se definieron, además, los 13 sitios más adecuados para realizar perforaciones exploratorias en la zona de los Valles Centrales de Oaxaca.

El agua abastecida a una parte de la ciudad de Pátzcuaro y a la isla Janitzio, Mich., presenta evidente deterioro en su calidad. Para identificar las fuentes de contaminación, se realizó un diagnóstico del pozo Huecorio, que aporta cerca del 40% del volumen



CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL POZO DE HUECORIO

total que suministra el sistema de agua potable de Pátzcuaro, así como del pozo que abastece a toda la población asentada en la isla. Los resultados indican que el agua del pozo Huecorio proviene de una mezcla de agua subterránea, del agua que se infiltra del río Guani y de parcelas irrigadas con aguas residuales del ejido Ibarra. La presencia del agua residual se identificó a partir de los elevados valores de coliformes fecales y totales. Para solucionar este problema, se recomendó entubar o revestir el cauce del río Guani al menos 350 m aguas arriba y 150 m aguas abajo del pozo Huecorio para limitar la infiltración del agua residual. Con respecto al pozo de la isla Janitzio, el deterioro de la calidad del agua se relaciona con la falta de mantenimiento del pozo, el deficiente control higiénico del sistema de almacenamiento y distribución, la interconexión hidráulica del pozo con el lago de Pátzcuaro y la defectuosa operación del sistema de cloración, entre otros aspectos. Para solucionar este problema se recomendó desazolvar el pozo, cepillar el ademe, "pistonear" el interior del pozo, reparar o cambiar la bomba sumergible, así como rehabilitar y limpiar periódicamente el tanque de almacenamiento.

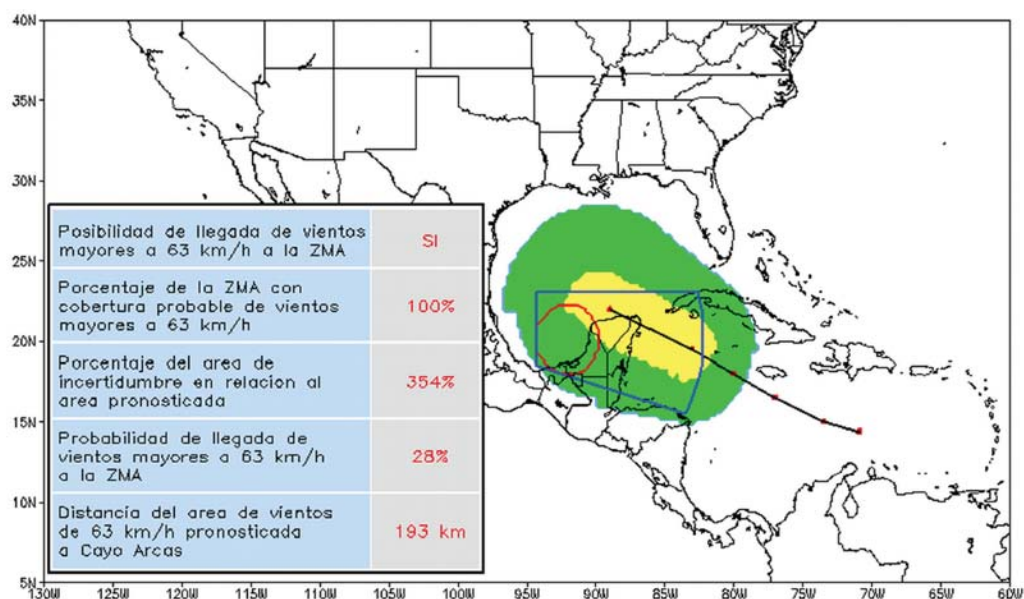
## Hidrometeorología

Con el fin de garantizar el funcionamiento de la red hidrometeorológica y oceanográfica de Pemex Exploración y Producción (PEP), ubicada en la Sonda de Campeche, se llevó a cabo el mantenimiento y la calibración de su red de estaciones hidrometeorológicas.

Se realizaron dos mantenimientos preventivos menores y un mantenimiento mayor a cinco estaciones meteorológicas automáticas, cuatro medidores de ola y marea, y cuatro perfiladores Doppler de corrientes marinas. Asimismo, para asegurar la confiabilidad de los equipos instalados en dicha red, se calibraron 35 sensores meteorológicos y cuatro registradores de ola y marea, entregando a las contrapartes los respectivos reportes de calibración. Por otro lado, con el propósito de asegurar la confiabilidad de los resultados del proceso de operación de la red de monitoreo hidrometeorológico en la Sonda, se implantó un sistema de gestión de la calidad. Para ello, se elaboraron los documentos que integran dicho sistema y se realizaron cursos-taller con el personal involucrado, en los cuales se revisaron el proceso y los documentos requeridos por la norma ISO 9001:2000. También, se auditó al personal que interviene en las actividades de la red de monitoreo hidrometeorológico en la sonda. Como resultado se detectaron diversas no conformidades, a las cuales se dio seguimiento hasta su atención satisfactoria. Adicionalmente, con el objeto de apoyar la toma de decisiones ante la presencia de ciclones tropicales cercanos a la Sonda de Campeche, se desarrolló un esquema automático que estima la probabilidad de arribo de ciclones a esa zona considerando los requerimientos que establece el Plan de Respuesta a Emergencia por Huracanes de PEP. Este esquema, denominado PACT (Probabilidad de Arribo de Ciclones Tropicales a la Sonda de Campeche) se validó con datos históricos de la temporada ciclónica 2005. El PACT considera el estado actual del margen de error en los pronósticos de trayectorias de los ciclo-



MANTENIMIENTO PREVENTIVO A EQUIPO OCEANOGRÁFICO



GrADS: COLA/IGES

2006-01-10-15:55

COBERTURA PROBABLE DE VIENTOS MAYORES A 63 KM/H DE 48 A 72 H PARA EL HURACÁN EMILY, CALCULADA A PARTIR DEL AVISO DEL NATIONAL HURRICANE CENTER

nes tropicales en el océano Atlántico, junto con los pronósticos operativos en tiempo real, la programación y el despliegue de las zonas de alertamiento, así como la generación automática de mapas. El PACT ha sido instalado en un servidor de PEP para su funcionamiento en forma experimental durante la temporada de ciclones tropicales de 2006.

Se desarrolló un estudio para conocer los posibles efectos en el clima que provocaría el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el noroeste de México. Los cambios de vegetación se supusieron siguiendo el escenario esperado del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), considerando el doblamiento de las concentraciones del bióxido de carbono atmosférico preindustriales, condición esperada alrededor de la segunda mitad de este siglo. El estudio comprendió dos simulaciones de diez años en un modelo climático de circulación general (CAM3): la primera, sin cambios en la vegetación actual y la segunda realizando las modificaciones en vegetación mencionadas anteriormente. El análisis estadístico muestra que en el invierno la región al este de la zona de estudio tendría un aumento en la precipitación y que habría un aumento de temperatura durante el verano en la región suroeste de los Estados Unidos de América. Por otro lado, para evaluar los

servicios ambientales del lago de Chapala como regulador del clima, se usó el modelo de mesoescala MM5 para simular, en un periodo de 22 años, el estado de la atmósfera en un escenario hipotético que supone la desaparición del lago. Se encontró que la lluvia presentaría disminuciones hasta del 80% sobre el lago y de 20 a 30% en el resto de la cuenca, afectando particularmente al estado de Guanajuato.

### Aprovechamientos hidráulicos

Para dar soporte al manejo integrado del agua en las cuencas del país se continuaron los trabajos de modelación matemática de las cuencas Lerma-Chapala, Balsas, Valle de México y Bravo. Para la cuenca Lerma-Chapala, entre 2002 y 2004 se desarrolló el modelo dinámico de simulación *Lerma* y el de optimización *Simop*. Ambos modelos permitieron determinar y analizar políticas para optimizar el aprovechamiento del agua superficial en esta cuenca, en función de los escurrimientos generados el año antecedente. Con la utilización de estos modelos, en diciembre de 2004 se firmó el nuevo convenio de distribución del agua superficial para la cuenca. En dicho convenio se reconoció la necesidad de revisar e incor-



PANTALLA DE RESULTADOS DEL MODELO LERMA

porar nueva información básica, así como mejorar el funcionamiento del modelo dinámico. Para ello, durante 2005 se revisaron y modificaron en el modelo dinámico los módulos que calculan el escurrimiento superficial y el flujo base, así como el algoritmo que distribuye el volumen de escurrimiento virgen que ingresa a los principales almacenamientos y a las presas virtuales. Adicionalmente, se modificó el funcionamiento del distrito de riego 061, mejorando la simulación del comportamiento de los manantiales existentes en la subcuenca Duero. El modelo se calibró para los años agrícolas 1996-1997 y 1997-1998 y se validó su comportamiento usando los tres años siguientes a los de calibración. Con estos cambios, se logró una mejora sustancial en el ajuste de los volúmenes de entrada a los puntos de control con respecto a los registrados. Posteriormente, se simuló el comportamiento de la política óptima conjunta establecida en el convenio, utilizando registros históricos de precipitación y diversos escenarios climáticos, encontrándose que dicha política cumple con las condiciones impuestas para su funcionamiento; esto es, maximizar la entrega del agua para riego y garantizar niveles en el lago de Chapala. Utilizando como base este modelo, en 2006 se explorarán nuevas políticas de asignación

del agua superficial incorporando al modelo los aspectos probabilísticos de los escurrimientos.

La Gravamexsc solicitó al IMTA el desarrollo de un modelo dinámico de simulación para el análisis hidrológico y la construcción de consensos sobre gestión integrada del agua en el valle de México. El modelo determina el balance hídrico superficial y subterráneo, con intervalo diario en un horizonte multianual de simulación. Una interfaz amigable permite definir y valorar escenarios de gestión sobre: cambio de tendencias a 25 años en la demanda de agua por uso, importación de agua de otras cuencas mediante proyectos nuevos o la ampliación de los existentes, control de pérdidas en la red de distribución de agua, mejoramiento de eficiencia en el uso de agua para riego agrícola y recarga artificial de acuíferos. Los datos de entrada se detallan por municipio o distrito de riego. Los resultados son agregados para su análisis temporal por mes, año y horizonte de planeación, y espacialmente por subcuenca, cuenca, región hidrológica, acuífero, estado y región administrativa. Adicionalmente, se ha participado activamente en las reuniones del Grupo Especializado de Ordenamiento, derivado del Consejo de Cuenca, con el fin de validar la orientación del estudio, obtener información básica y,

finalmente, transferir la tecnología para la construcción de consensos con soporte del modelo dinámico. En 2006 se explorarán escenarios de gestión para establecer reglas de asignación del agua en la región, que por sus características y problemática es de las más complejas del mundo.

En la cuenca del río Balsas se desarrolló la primera etapa de un proyecto bianual solicitado por la Gerencia Regional Balsas de la Conagua, que cubre la parte alta de la cuenca hasta la presa El Caracol, e incluye dos modelos de simulación coordinados que dan soporte a la gestión integrada del agua. El primer modelo es de tipo dinámico, análogo al desarrollado para el valle de México, a excepción de que tiene los módulos de funcionamiento de vasos y uso para la generación de energía, y no presenta los de drenaje pluvial, tratamiento de aguas residuales y reúso del agua. El segundo modelo es de tipo hidrológico distribuido y genera series multianuales de caudal medio diario en 869 puntos sobre la cuenca, que corresponden a unidades hidrológicas relativamente homogéneas con superficie media de 60 km<sup>2</sup>. El modelo hidrológico ha sido calibrado para cada subcuenca en un periodo de siete años, que comprende periodos húmedos y secos. Por otra parte, el cálculo del balance hídrico para la cuenca indica que los volúmenes disponibles de agua en las partes alta y media del Balsas están totalmente comprometidos para las concesiones de generación de energía en las tres plantas hidroeléctricas ubicadas en el medio y bajo Balsas (El Caracol, El Infiernillo y La Villita). Finalmente, para toda la cuenca se construyó una base de datos geoespacial que contiene información de la red hidrográfica de la cuenca y series de tiempo, que podrán ser utilizadas directamente por los modelos de gestión. En 2006 se completará el modelo dinámico de gestión de la parte media y baja del Balsas y se explorarán escenarios de manejo del agua.

Para la cuenca completa del río Bravo/Grande, que incluye tanto territorio de México como de Estados Unidos de América, se desarrolla un sistema integral de planeación en el que participa un consorcio de instituciones de investigación, universidades y organizaciones ecologistas, gubernamentales y no gubernamentales de los dos países. El objetivo general del proyecto es buscar oportunidades de incremento de los beneficios del uso del agua en la cuenca del río

Bravo/Grande; asimismo, se busca satisfacer de mejor manera el conjunto de objetivos específicos, entre los que se incluye reducir el impacto de los periodos de sequía en la agricultura, mejorar el abasto de agua a zonas urbanas y restaurar las funciones ambientales del río en el sistema de la cuenca. El modelo será usado para evaluar un conjunto de acciones para mejorar el manejo del agua disponible. A la fecha, se tiene construida una base de datos sobre los recursos hídricos de la región que dará soporte y alimentará un modelo hidrológico para la planeación que representará a la cuenca, y que reside en una base de datos geoespacial; se tiene, asimismo, configurada la topología de una primera versión del modelo que representa las condiciones actuales del sistema.

