

Aplicación del modelo de datos *ArcHydro* en el cálculo de disponibilidad de agua superficial

• María de los Ángeles Suárez-Medina* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

• Carlos Patiño-Gómez •
Universidad de Las Américas, Puebla, México

• Jaime Velázquez-Álvarez • Jaime Rivera-Benites • Ernesto Aguilar-Garduño •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Guillermo Bautista •
Comisión Nacional del Agua, México

• Citlalli Astudillo-Enríquez •
Instituto Tecnológico de Zacatepec, México

Resumen

Suárez-Medina, M. A., Patiño-Gómez, C., Velázquez-Álvarez, J., Rivera-Benites, J., Aguilar- Garduño, E., Bautista, G., & Astudillo-Enríquez, C. (enero-febrero, 2015). Aplicación del modelo de datos *ArcHydro* en el cálculo de disponibilidad de agua superficial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 175-181.

Actualmente, el concepto de base de datos geográfica está siendo utilizado para integrar datos espaciales y series de tiempo de los recursos hídricos de una región. Los sistemas de información geográfica (SIG) basados en este concepto permiten no sólo integrar ambos tipos de información en una base de datos sino que establecen relaciones entre la misma información. Aquí se presenta una herramienta dentro de un SIG para estimar la disponibilidad de agua superficial expresada con base en la ecuación de continuidad, conforme lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 "Conservación del recurso agua – Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 17 de abril de 2002. Para ello es necesario implementar una base de datos geográfica del modelo de datos *ArcHydro*, que aplique los modelos matemáticos y almacene la información asociada con los recursos hídricos en cuencas hidrológicas, puntos de monitoreo y sus correspondientes datos históricos. Las ventajas es que centraliza la información y se reducen los inconvenientes que se presentan al utilizar diversos formatos.

Palabras clave: disponibilidad, *ArcHydro*, geodatabase, SIG, cuenca, región hidrológica.

Abstract

Suárez-Medina, M. A., Patiño-Gómez, C., Velázquez-Álvarez, J., Rivera-Benites, J., Aguilar- Garduño, E., Bautista, G., & Astudillo-Enríquez, C. (January-February, 2015). Application of the *ArcHydro* Data Model to Calculate Surface Water Availability. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 175-181.

The concept of geographic databases is currently being used to integrate spatial data and time series corresponding to water resources in a region. Geographic information systems (GIS), which are based on this concept, not only integrate both types of information into one database but also determine relationships among the information. The present study presents a GIS tool to estimate surface water availability based on the continuity equation, as established by Official Mexican Norm 011-CNA-2000 "Conservation of Water Resources – Establishment of Specifications and the Method to Determine National Annual Mean Availability of Water," published in the *Official Journal of the Federation*, April 17, 2002. Therefore, a geographic database of the *ArcHydro* data model needs to be generated, which applies mathematic models and stores information about the water resources, monitoring points and historical data in a hydrological basin. The advantages are the centralization of information and reducing the inconveniences involved in using different formats.

Keywords: availability, *Arc Hydro*, geodatabase, GIS, watershed, hydrological región.

Recibido: 20/06/11
 Aceptado: 30/06/14

Introducción

Conocer la calidad y cantidad de agua en una zona es prioritario para la toma de decisiones en la distribución del vital líquido, tarea nada fácil cuando la información es escasa o nula. México se compone de 37 regiones hidrológicas que, a su vez, se dividen en 731 cuencas. La disponibilidad del agua superficial se calcula con base en la ecuación de continuidad. Las series históricas y datos adicionales requeridos para el cálculo de la disponibilidad del agua superficial son extensos, por lo que resulta complejo almacenar, organizar y manejar esa información dentro de una estructura lógica y flexible. El modelo de datos *ArcHydro* constituye una solución adecuada a este problema, porque permite integrar en una base de datos geográfica los datos asociados con los recursos hídricos de una región. Aquí se presenta una herramienta dentro de una aplicación GIS que realiza el cálculo de la disponibilidad del agua superficial de una cuenca dentro de la Región Hidrológica 18 Balsas, tomando los valores de las variables de una base de datos con estructura *ArcHydro*.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta computacional para el cálculo de la disponibilidad de agua superficial conectada a una base de datos geográfica con la estructura del modelo *ArcHydro*, para una región hidrológica de México.

Metodología

En esta sección se describe 1) la metodología descrita en la NOM-011-CNA-2000, desarrollada por la Conagua (Conagua, 2005), para el cálculo de la disponibilidad de agua superficial en una cuenca; 2) la forma general, el modelo de datos *ArcHydro* y la implementación de la base de datos geográfica utilizando este modelo, y 3) la herramienta de cómputo que se desarrolló para el cálculo automático de la disponibilidad de agua superficial.

Disponibilidad de agua superficial

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, "Conservación del recurso agua", para calcular la disponibilidad de agua superficial en un sistema de cuencas interconectadas, se recomienda seguir los siguientes tres pasos: a) estimación del escurrimiento aguas abajo, b) distribución de las demandas aguas arriba y c) estimación de la disponibilidad.

a) Estimación del escurrimiento aguas abajo

En el cálculo del escurrimiento de aguas abajo se usa la ecuación de continuidad que se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dV}{dt} = E - S \quad (1)$$

La variación de volumen es igual a las entradas menos las salidas, para un intervalo de tiempo t específico. El intervalo de tiempo es anual y las unidades se expresan en hectómetros cúbicos.

Al tomar como plano de referencia la superficie, la ecuación (1) se transforma en:

$$Ab = (Cp + Ar + Im + R) - (Ev + Ex + Uc + \Delta V) \quad (2)$$

Donde Ab es el escurrimiento aguas abajo; ΔV , el cambio de almacenamiento en la superficie; Cp , el escurrimiento natural o "virgen" por cuenca propia; Ar , escurrimiento aguas arriba; Im , importaciones de cuencas externas; R , retornos; Ev , evaporación en cuerpos de agua y en áreas sin vegetación; Ex , exportaciones a cuencas externas, y Uc son usos de consumo y no consuntivos.

Las variables que se miden in situ son las siguientes: la variación de volumen (ΔV), usos consuntivos y no consuntivos (Uc), importaciones (Im) y exportaciones (Ex). Otras se miden de forma indirecta, como la evaporación (Ev), aguas arriba (Ar) y retornos (R). En caso de no contar con mediciones en los puntos de control

(Ab), C_p se calcula por métodos indirectos conforme se establece en la norma.

La ecuación (2) se aplica sucesivamente a las cuencas parciales del sistema analizado, en dirección de aguas arriba hacia aguas abajo. Cabe aclarar que al estimar la disponibilidad, se toma en cuenta la condición de oferta media, representada por el escurrimiento virgen anual promedio. Para el resto de las variables, se toma el año correspondiente al análisis de disponibilidad.

b) Distribución de las demandas aguas arriba y determinación de los volúmenes reservados y disponibles

Aparentemente todo el escurrimiento que sale hacia aguas abajo de una cuenca podría aprovecharse totalmente dentro de ella; sin embargo, existen aprovechamientos aguas abajo en los que una fracción de este escurrimiento se utiliza para satisfacerse de manera parcial. Esto se debe a que los volúmenes extraídos en el cauce principal de una cuenca intermedia se satisfacen con los volúmenes aportados por los escurrimientos provenientes de aguas arriba; el escurrimiento por cuenca propia; y los retornos de los diferentes usos ubicados en la cuenca y con las importaciones, si es que existen. De esta manera, con excepción de la cuenca más alta, las cuencas dependen en mayor o menor grado de los volúmenes que reciben de las cuencas ubicadas aguas arriba. Para conocer lo anterior, es necesario hacer el análisis tradicional de aguas arriba hacia aguas abajo y el correspondiente análisis de aguas abajo hacia aguas arriba. En este último se procederá a distribuir los requerimientos de agua en forma proporcional a los componentes de la oferta de agua en cada cuenca, para obtener los volúmenes reservados de cada uno de los componentes.

Al respecto, es conveniente definir el escurrimiento reservado aguas abajo de una cuenca x , R_{xy} , como la fracción del escurrimiento superficial que sale de la misma, y contribuye

a satisfacer las extracciones realizadas en la cuenca de aguas abajo y .

De forma similar, el escurrimiento reservado por cuenca propia de una cuenca x , R_{xx} , es la fracción del escurrimiento por cuenca propia que contribuye a satisfacer las extracciones dentro de la misma cuenca x . Cabe mencionar que el volumen reservado hacia aguas abajo R_{xy} , se reserva a la salida de la cuenca x y puede ser utilizado ya sea en la cuenca y o en otras localizadas más aguas abajo. En este sentido, R_{xy} puede leerse también como "volumen reservado en la salida de la cuenca x ".

c) Estimación de la disponibilidad

El volumen disponible a la salida de cada una de las cuencas, D_{xy} , se calcula al restar al escurrimiento aguas abajo el volumen reservado correspondiente:

$$D_{xy} = Ab_x - R_{xy}$$

Donde D_{xy} es el volumen disponible a la salida de la cuenca x ; Ab_x , el escurrimiento aguas abajo, y R_{xy} es el escurrimiento reservado a la salida de la cuenca x . De modo similar, el volumen disponible por cuenca propia, D_{xx} , se calcula substrayendo al escurrimiento virgen por cuenca propia el volumen reservado por cuenca propia, es decir:

$$D_{xx} = Cp_x - R_{xx}$$

en donde D_{xx} es el volumen disponible por cuenca propia correspondiente a la cuenca x ; Cp_x , el escurrimiento por cuenca propia, y R_{xx} es el volumen reservado por cuenca propia.

Los volúmenes reservados son utilizados ya sea en la cuenca y o en alguna cuenca aguas abajo. Al respecto hay dos consideraciones: 1) cuando la cuenca y está en el extremo aguas abajo, las salidas totales no tienen volúmenes comprometidos para reservarse hacia aguas abajo; 2) cuando la cuenca y está en el extremo aguas arriba, las entradas totales se generan en la misma cuenca, siempre que no tengan

importaciones que representan un volumen de reserva considerado como hacia aguas abajo de la cuenca que exporta dicho volumen.

Por otra parte, los retornos (R) dentro de la cuenca e importaciones de otras cuencas (Im), si es que se tienen, deberán ser considerados dentro de la oferta para satisfacer los volúmenes comprometidos de la misma cuenca x , y parte de las cuencas aguas abajo y .

Base de datos con la estructura ArcHydro

El *ArcHydro* es un modelo de datos que propone una estructura estándar para almacenar en una base de datos geográfica la información asociada con los recursos hídricos de un área determinada (Maidment, 2002). El *ArcHydro* usa el modelo vectorial y otros modelos de datos geográficos para almacenar la información de objetos de la superficie terrestre relacionados con el agua. La información asociada con los recursos hídricos se compone principalmente de dos partes:

1. Información geoespacial. Se refiere a los rasgos de la superficie terrestre relacionados con el recurso; se almacena en forma vectorial o matricial.
2. Series de tiempo. Son datos históricos resultantes de la medición de variables o parámetros asociados con el recurso, en un lugar y periodo de tiempo específicos.

Este modelo busca solucionar problemas y mejorar la calidad de los datos usados. La base de datos geográfica (*geodatabase* en inglés) es la columna vertebral de un sistema de información hidrológica, que se puede definir como un sistema de cómputo. Las capas que se incluyeron en la base de datos con estructura *ArcHydro* fueron cuerpos de agua, estaciones hidrométricas, climatológicas y de calidad del agua, presas, y aprovechamientos superficiales y descargas del Registro Público de Derechos de Agua (Repda). La descripción de las estaciones climatológicas, hidrométricas y de calidad del agua, así como los aprovechamientos

Repda fueron proporcionadas por la Conagua (2005). La base de datos fue implementada para la Región Hidrológica 18 Balsas, la cual se compone de 12 cuencas exorreicas y tres cuencas endorreicas. La escala considerada para la información vectorial fue 1:50 000 y fue generada por el INEGI. El sistema coordinado que se utilizó fue la proyección Lambert, con los parámetros propuestos por INEGI para México y el *datum* ITRF92. Como primer paso se revisaron y editaron las líneas de corriente, para verificar que éstas estuvieran totalmente conectadas, sin ciclos y con dirección de flujo asignada (figura 1). Posteriormente se delimitaron los parteaguas de cada una de las cuencas usando el MDE a escala 1:50 000. Para ello se definieron puntos de control a la salida de cada cuenca abierta y puntos virtuales en cada cuenca cerrada. Los puntos de control fueron estaciones hidrométricas y puntos a la salida de presas; a dichos puntos se les determinaron sus coordenadas geográficas con GPS para tener una mejor precisión. Cada cuenca se procesó por separado y al final se unieron los resultados de cada una para tener la región hidrológica completa, aplicando el proceso de regionalización (Patiño, McKinney, & Maidment, 2007). Por otro lado, se integraron en una sola tabla los datos de estaciones hidrométricas, climatológicas y de calidad del agua del área de estudio; estos datos se almacenan en la *Feature Class Monitoring Point* dentro de la *geodatabase*. Se agregaron campos para almacenar características relacionadas con las coordenadas y campos adicionales para dar una mayor descripción a las estaciones. Se hicieron también procedimientos para transformar las series de tiempo de hidrometría, climatología y datos de almacenamientos al formato de cuatro columnas que define *ArcHydro*, y se agregó una dimensión más para indicar el origen de los datos. Los datos de climatología e hidrometría fueron tomados de los sistemas *Clicom* y *Bandas*, respectivamente (Bandas, 2002). Se consideraron gastos medios diarios y valores diarios de precipitación, evaporación, y temperaturas.

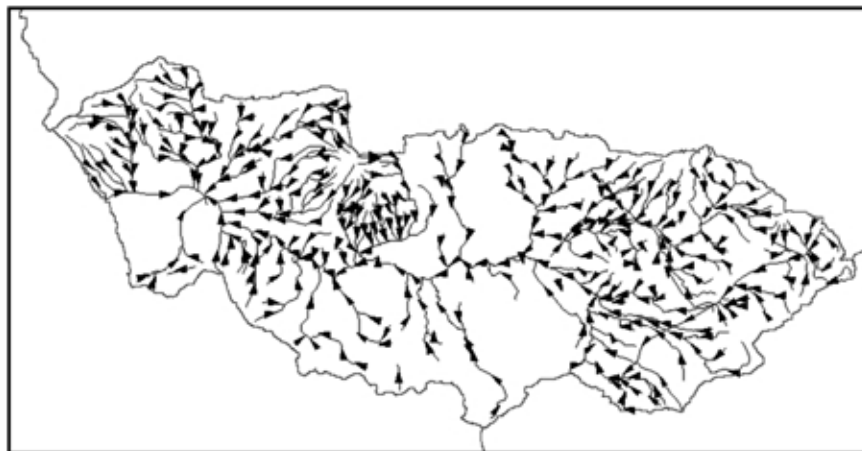


Figura 1. Red hidrográfica modelada como red geométrica.

Interfaz de usuario para cálculo de la disponibilidad de agua superficial

En esta componente del trabajo se elaboró una herramienta computacional, consistente de una interfaz de usuario y las rutinas que se conectan a la base de datos *ArcHydro*, para realizar el cálculo de disponibilidad y mostrar los resultados en forma gráfica. El programa fue desarrollado en lenguaje *Visual Basic for Applications* con el software *ArcGIS*, en versión 9.2; el modelo de datos *ArcHydro* requiere el nivel *ArcEditor* o *ArcInfo*.

La herramienta computacional permite hacer el cálculo del escurrimiento hacia aguas abajo, partiendo de las cuencas altas y posteriormente en sentido inverso. Esta herramienta está incluida dentro de un proyecto de la aplicación *ArcMap* de *ArcGIS* (archivo con extensión *mx*d).

El proyecto contiene las capas geográficas necesarias para realizar el cálculo y la consulta de la disponibilidad e información de contexto, como estados, municipios, hidrografía y estaciones climatológicas; si se requiere, se agregan las capas necesarias. Las opciones para el cálculo están disponibles al usuario en una barra de herramientas dentro del proyecto mencionado (figura 2).

El sistema interactúa con la aplicación de *ArcGIS* a través del mapa, así como con *VBA* a través de interfaces amigables, obteniendo y almacenando los datos en la base de datos. El programa muestra al usuario, a través de una interfaz gráfica, las opciones para el cálculo de disponibilidad, permitiéndole seleccionar la subcuenca y el año deseado. Posteriormente, obtiene, a través de una consulta en *SQL* a la tabla *VARIABLEANUAL* contenida en la base de datos *ArcHydro*, los datos correspondientes al año seleccionado de Aguas abajo (*Ab*), Exportación (*Ex*), Importación (*Im*), Retornos (*Re*), Usos consuntivos (*Uc*) del año indicado por el usuario, los cuales serán almacenados en la tabla general *DATOANUAL*, que almacena las variables necesarias para realizar el cálculo de disponibilidad de agua. Además, los valores promedio de las variables Cuenca propia (*Cp*), Desviación estándar (*Dv*) y Evaporación (*Ev*), considerando un periodo que terminará hasta el año indicado por el usuario, serán almacenados en la tabla *DATOANUAL* de la base de datos *ArcHydro*. Se calculan entonces las variables faltantes utilizando la información existente, almacenando los resultados en la tabla de *DATOANUAL*.

Los datos almacenados en la base de datos *ArcHydro* son diarios, pero las consultas

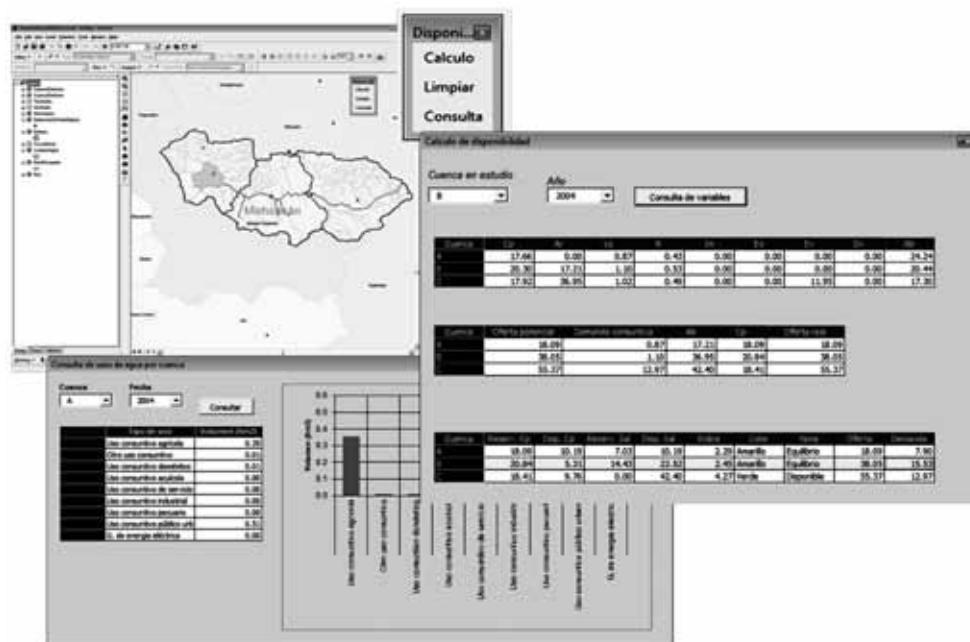


Figura 2. Resultados del cálculo de disponibilidad.

son anuales para cada uso. El sistema utilizará los datos de la tabla DATOANUAL para determinar, a través de las fórmulas correspondientes, la disponibilidad de agua de la zona seleccionada.

Finalmente, el sistema muestra los resultados de forma tabular a través de una interfaz gráfica, dichos resultados son almacenados en la base de datos *ArcHydro* para futuras consultas (figura 2).

Conclusiones

El modelo de datos *ArcHydro* permitió integrar en un solo depósito de datos (base de datos geográfica) toda la información requerida para el cálculo de disponibilidad, así como los resultados del mismo. La estructura es estándar, flexible y adaptable a los requerimientos del cálculo. La base de datos almacena los metadatos de cada capa incluida ahí, de manera que el usuario conoce las características de la información y con ello la calidad de la misma. Por otro lado, la interfaz de usuario permitió automatizar y facilitar el cálculo, y constituye

una herramienta útil en la toma de decisiones relacionada en la gestión del recurso hídrico. Aun cuando el proyecto ya está finalizado, el modelo permite hacer los ajustes necesarios para contar con la información que el usuario desee; de igual manera, se podrá agregar información adicional. Los resultados de la disponibilidad de agua superficial para el Balsas están publicados en la página de la Conagua.

Referencias

- Bandas (2002). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Conagua (2005). *Estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Maidment, D. R. (2002). *ArcHydro GIS for Water Resources*. Redlands, USA: ESRI Press.
- Patino, C., McKinney, D., & Maidment, D. (September/October, 2007). Sharing Water Resources Data in the Bi-National Rio Grande/Bravo basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*. American Society of Civil Engineers, 133(5), 416-426.

Dirección institucional de los autores

M.I. María de los Ángeles Suárez-Medina

M.C. Jaime Velázquez-Álvarez

M.I. Jaime Rivera-Benites

M.I. Ernesto Aguilar-Garduño

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Hidrología
Subcoordinación de Planeación Hídrica
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: + 52(777) 3293 600, extensiones 257, 531, 374, 478
Fax: + 52 (777) 3293 685
msuarez@tlaloc.imta.mx
jaimevel@tlaloc.imta.mx
jriviera@tlaloc.imta.mx
eaguilar@tlaloc.imta.mx

Dr. Carlos Patiño-Gómez

Universidad de Las Américas, Puebla, México
Sta. Catarina Mártir
72810 Cholula, Puebla, México
Teléfono: +52 (222) 229 2000
carlos.patino@udlap.mx

Ing. José Guillermo Bautista Bárcenas

Comisión Nacional del Agua, México
Insurgentes Sur número 2416, noveno piso, ala sur, Colonia
Copilco El Bajo, Delegación Coyoacán
04340 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +(52) (55) 5174 4000, extensión 1317
Guillermo.bautista@conagua.gob.mx

M.T.I. Citlalli Astudillo-Enríquez

Consorcio Empresarial ADPER, S.A. de C.V.
Manuel Ávila Camacho 1903 int 600 A
Ciudad Satélite
53100 Naucalpan de Juárez, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 2199 545
xitlae@gmail.com