

H. T. — *Háblenos de un acontecimiento importante e inolvidable de su vida profesional.*

S. S. — *Uno de los muchos que he vivido fue mi llegada a la Antártida. Cuando se abrió la puerta del aeroplano, entró ese aire increíblemente frío y me golpeó en la cara, sentí como si estuviera en otro planeta. Estar en la Antártida durante tres meses fue una de las experiencias más inolvidables de mi vida. Recuerdo en especial los colores del cielo y el crepúsculo más maravilloso que he visto jamás. Ver por primera vez la aurora fue verdaderamente increíble. Llevaré siempre conmigo muchos recuerdos de la Antártida.*

H. T. — *Si un joven le pidiera consejo para llegar con éxito a ser un químico atmosférico, ¿qué le diría?*

S. S. — *Mi mejor consejo sería que para tener éxito en la ciencia hay que estar centrado. Hay que ser capaz de pensar y absorber ciencia exclusiva y constantemente. Es difícil para los jóvenes de hoy, tienen muchas distracciones. Deberían intentar no mezclar la ciencia con el deporte y con otros intereses. No puedes tener distintos estilos de vida y tener éxito. Los que vuelven más tarde a la especialidad tienden a estar más centrados; saben lo que quieren y eso es una ventaja. Si la ciencia no te motiva lo suficiente para hacer que quieras centrar tu vida a su alrededor, entonces es que probablemente no es para ti.*

H. T. — *¿Le gustaría volver a la Antártida?*

S. S. — *Siempre estaría dispuesta a volver a la Antártida. Cuando fui por primera vez, empecé a leer acerca de la expedición de Scott. Llegó al Polo Sur un mes después que Amundsen. Este último regresó pero Scott murió en el viaje de vuelta. He escrito un pequeño libro sobre lo que le sucedió. La meteorología fue un factor esencial en su muerte. En un año normal, Scott habría sobrevivido en su vuelta del Polo, pero tuvo muy mala suerte y dio con un período en el que la temperatura estuvo permanentemente entre 5 y 10°C más baja de lo que ahora sabemos que es normal. Esta diferencia es enorme y afecta a la energía de las personas, a su comodidad y a su capacidad para moverse. Scott escribe en su diario el gran rozamiento que generaba en los esquís la nieve helada cuando trataban de arrastrar sus provisiones. Cuando está caliente es relativamente fácil: el movimiento del esquí a través de la superficie de la nieve crea una delgada capa de agua líquida que te hace deslizar. Cuando se enfría mucho, no se puede formar la capa de líquido y aumenta el rozamiento sobre la superficie.*

H. T. — *Permítame que la felicite por su carrera, que ha sido no sólo excepcionalmente exitosa en lo científico sino también valiosa en lo personal.*

15

## *Sistemas de información para la gestión de recursos hídricos*

Por Iacovos IACOVIDES \*

### **Introducción**

Las prácticas recomendables de gestión de recursos hídricos, así como el correcto funcionamiento y control de las plantas de tratamiento y depuración de agua requieren vigilancia continua, junto con un eficaz manejo y análisis de datos. Los datos y sus métodos de manejo constituyen el sistema de información que suministra una base conceptual para el desarrollo

de estrategias de gestión de recursos hídricos adecuadas, asegurando que se dispone de los datos correctos en la forma justa y en el lugar y tiempo precisos.

El sistema de información establece los objetivos, o conjunto de objetivos, y las decisiones necesarias para alcanzarlos. En función de ellos, se eligen las variables y parámetros fundamentales que plantean y facilitan la toma de decisiones, haciéndose un seguimiento con la densidad espacial y la frecuencia temporal requeridas.

Se precisa de un sistema de gestión de datos robusto para satisfacer los usos previstos para los que se

\* Jefe de la División de Hidrología, Departamento de Desarrollo Hidrológico, Ministerio de Agricultura, Recursos Naturales y Medio Ambiente, Nicosía, Chipre.

recogieron originariamente los datos y al mismo tiempo también para muchos otros usos no previstos. Para ello se necesita un sistema de datos amigable para el usuario. Se necesita también para la compatibilidad entre la tecnología de toma de decisión, la tecnología de análisis de datos, y la red de datos.

En una red de información bien diseñada, la sinergia está presente en los siguientes aspectos:

- la información no se destruye al ser usada (se debe guardar adecuadamente y debe estar disponible al mínimo coste);
- puede utilizarse la información para mejorar el conocimiento de los procesos que se están controlando; y
- la sinergia evoluciona aprovechando los avances de otros.

Un sistema de información diseñado para datos de recursos hídricos del tipo adecuado, recogidos y procesados de forma fiable, y a los que se puede acceder fácilmente, se va enriqueciendo a medida que pasa el tiempo, tanto mediante asociaciones con otros registros del mismo lugar, como con otra información afín. El valor objetivo del sistema de información es, por lo tanto, la integración a lo largo del tiempo del valor de la comunidad total de usuarios.

### Inventario y recogida de datos

Normalmente, en todos los países, los diferentes aspectos de la gestión de los recursos hídricos están bajo la responsabilidad y la jurisdicción de numerosas agencias diferentes y en muchos ámbitos distintos (local, provincial y nacional). Es de esperar, por tanto, que la recogida y la disponibilidad de datos estén repartidas en muchas instituciones.

Recoger y organizar todos estos datos puede ser en sí mismo un trabajo voluminoso. Muchas fuentes de datos pueden consistir en registros en papel, incompletos o insuficientemente documentados para poder considerarlos fiables. En las etapas iniciales del proyecto, puede que no se necesite transferir los registros a un formato digital pero, a medida que avanza el trabajo y se recogen nuevos datos, se ve claramente el valor de un sistema de información informatizado.

La confianza es una componente esencial para que las herramientas de análisis y de predicción pasen a formar parte de un sistema de "gestión de decisión". Dentro de cualquier programa de seguimiento y almacenamiento, una parte debería estar constituida por programas de control y garantía de la calidad, incluidos todos los aspectos, desde los protocolos de recogida de muestras a las técnicas de análisis en laboratorio, y el almacenamiento de datos. La confianza en la calidad de la información suministrada debe ir acom-

pañada también de un compromiso para incorporar la información al proceso de toma de decisiones.

### Requisitos y gestión de datos

El sistema de información para la gestión de recursos hídricos debería atender el desarrollo integral y el uso de los recursos hídricos. En consecuencia, implica multiplicidad de datos y estudios relacionados tanto con el medio ambiente físico como con el socioeconómico, así como con las necesidades particulares de la zona.

Aunque la información relacionada con el agua es fundamental para la gestión hídrica, el éxito total depende de la capacidad del sistema de información para ofrecer datos que fomenten el bienestar social y el crecimiento económico de una zona.

La gestión eficaz de los recursos hídricos requiere considerable volumen y variedad de datos, un sistema avanzado de gestión de los mismos y un alto nivel de proceso de información para:

- ayudar a la gestión operativa;
- mantener y mejorar el nivel de los servicios;
- evaluar las componentes del balance hídrico (demanda/suministro, caudales);
- mejorar la fiabilidad operativa;
- aumentar la eficiencia del sistema hídrico;
- abaratar los costes de suministro;
- prever y anticipar futuras demandas y capacidades de flujo del sistema;
- planificar, diseñar y poner en marcha ampliaciones del sistema de depuradoras; y
- obtener una mejora global del funcionamiento del sistema.

Lo anterior requiere el esfuerzo combinado de medidas, sistemas de adquisición, almacenamiento y recuperación de datos, junto con la aplicación de técnicas avanzadas de proceso. En consecuencia, se necesita un sistema integrado de información de datos para la gestión de recursos hídricos, para la planificación, el diseño, los aspectos gestores y administrativos, así como para el funcionamiento y mantenimiento diarios de centrales depuradoras, acuíferos subterráneos, etc.

El rendimiento óptimo de los sistemas de centrales depuradoras y una buena gestión de los recursos hídricos sólo se pueden alcanzar a través de un buen conocimiento de las características de un sistema basado en una información fiable. Se debería incorporar esta información en una base de datos relacional, apoyada, si fuera posible, en un sistema de información geográfica (SIG) para atender las necesidades de análisis, diseño, control, funcionamiento y toma de decisiones.



Habría que planificar la toma y la gestión de datos de tal forma que se adapten a las condiciones locales, al personal disponible y a la capacidad financiera. Esto podría desarrollarse de forma gradual y habría que establecer prioridades para resolver los problemas más inmediatos.

La capacidad para adquirir datos e información, facilitados por ordenadores, puede dar como resultado que se acumulen grandes volúmenes de datos. El sistema primario de proceso de datos debería estar compuesto de control de calidad y de unos sistemas operativos bien diseñados con observaciones de verificación de campo. Estos datos primarios deben estar orientados hacia un fin y seguir un plan para alcanzar los objetivos definidos.

### Uso de sistemas de almacenamiento y de recuperación de datos

Una organización de gestión de recursos hídricos puede verse inundada fácilmente por miles de datos que abarcan todo el espectro de sus operaciones. Algunos de estos datos se procesan para un fin específico y hay que almacenar otros para análisis futuros. Por otra parte, hay que mantener algunos para fines de registro, tales como análisis de tendencia, análisis de rendimiento, etc.

La mayor parte de los datos y de los registros se pueden almacenar hoy en día de forma digital en discos magnéticos, en CD-ROM y en otros medios electrónicos que necesitan muy poco espacio y a los que se puede acceder fácilmente para recuperarlos y procesarlos rápidamente a través de ordenadores electrónicos. Tales bases de datos permiten el almacenamiento, la actualización y la recuperación, de forma ordenada, de toda la información y de todos los datos. Una base de datos y todos sus usos posibles tales como búsquedas, clasificación en subgrupos de datos, análisis estadísticos, relaciones, etc. deben de planificarse y diseñarse con antelación. Con ello se facilitará la creación de una base de datos más funcional y relacional, permitiendo la identificación del *software* de proceso necesario y la selección del paquete de base de datos adecuado.

La base de datos es la unidad básica de todo sistema de información. Obviamente cuesta dinero recoger los datos. También cuesta dinero analizar los datos, pero si los datos no se analizan nunca, nos podríamos preguntar por qué habría que soportar el gasto de recogerlos. Afortunadamente, las herramientas que suponen los ordenadores personales facilitan en gran medida la creación y el mantenimiento de bases de datos digitales que simplifican el proceso de análisis y de preparación de informes para los encargados de tomar decisiones, ya que debe tenerse en cuenta que el

fin último de todos los datos es ayudar en la toma de decisiones.

Una jerarquía lógica para describir las distintas transformaciones que sufren los datos a medida que son utilizados en los distintos niveles de mando podría ser la siguiente:

- Datos: números "en bruto", hechos, medidas.
- Información: datos clasificados y organizados, resúmenes estadísticos.
- Apoyo a la decisión: interpretación de la información, síntesis, capacidad predictiva.

En el sistema de información para la gestión de recursos hídricos, es fundamental como primer paso desarrollar un diseño de base de datos adecuado. Aunque es obvio que las distintas agencias recogen datos para fines distintos, un diseño económico permitirá compartir los datos de cierto modo. Esto implica también que habrá que diseñar el sistema con un alto grado de confianza en la credibilidad de los datos, ya que una de las quejas más frecuentes respecto al uso de datos ofrecidos por otras organizaciones es la falta de confianza en los mismos.

Estos esfuerzos no son triviales. El desarrollo de un diseño de base de datos compartida requiere un alto nivel de cooperación entre las agencias que pueden tener distintos objetivos y estar acostumbradas a trabajar de una forma fragmentada que a veces considera a las otras agencias como competidoras. Sin embargo, se obtienen importantes beneficios a través de programas de cooperación, incluidos un uso más eficiente de los recursos de recogida y almacenamiento de datos, la creación de capacidad local para una visión más global de los problemas de la gestión hídrica, el aumento de la credibilidad de los datos entre un conjunto mayor de usuarios potenciales, y el suministro de un foro inicial para futuras asociaciones.

Hay numerosos paquetes comerciales de bases de datos y, dependiendo del volumen de datos y del proceso necesario, existe una gran oferta para elegir. Gestionar una base de datos grande es un asunto especializado y requiere dedicarse muchos años a trabajar en recogida, introducción, mantenimiento y uso real de datos. Para tales aplicaciones, habría que consultar a los especialistas al planificar, poner en marcha y organizar la base de datos.

Hay que crear procedimientos y rutinas para el control de los datos entrantes (en cuanto a tipo, volumen y precisión) y para definir hasta dónde pueden tener acceso los usuarios de los datos, en el acceso y edición de los mismos. De forma similar, se necesitan procedimientos para actualizar los datos y para establecer el tipo de los mismos, así como los horizontes temporales en que dichos datos se examinarán y actualizarán.

La organización física de ficheros en la base de datos es importante para la disponibilidad de almacenamiento suficiente, y muy importante para la facilidad de recuperación y utilización de la base de datos. La organización secuencial de ficheros es sencilla, puede usarse en todas las formas de almacenamiento y es adecuada para datos de series temporales. Los ficheros secuenciales indexados son adecuados para datos o grupos de datos a los que hay que acceder individualmente. La organización de acceso aleatorio emplea discos o disquetes pero necesitan mayores requerimientos de volúmenes de almacenamiento. La recuperación de los datos es más rápida en los modos aleatorios y se puede acceder directamente a los registros individuales. Algunos sistemas de bases de datos usan una mezcla de técnicas para maximizar la eficiencia de almacenamiento y de recuperación. Determinadas bases de datos usan sistemas de gestión de bases de datos (SGBD) y sistemas relacionales de bases de datos para el almacenamiento conjunto de datos y de otra información.

El almacenamiento de datos *en línea* y el acceso interactivo a los datos, facilitado por los avances de la tecnología de ordenadores, los medios de almacenamiento y las comunicaciones (Internet, páginas *Web*, HTML, etc.) se están haciendo cada vez más comunes. Este modo de enfocar la cuestión permite que los datos estén disponibles siempre para su examen, edición, recuperación y análisis. Las operaciones en tiempo real en la mayor parte de las utilidades hídras demanda el uso de datos *en línea* y la eficiencia y gestión mejorada del sistema garantizan el uso de tales bases de datos, factibles y económicamente atractivas.

Un sistema de recuperación global debería tener las siguientes características:

- un conjunto amplio de criterios de selección de datos;
- interpolación y agregación de datos en el tiempo y en el espacio;
- computación de parámetros estadísticos básicos;
- un número seleccionado de aplicaciones de *software* de procesado estándar; y
- selección de formatos y de dispositivos de salida.

La recuperación de datos debería poder generarse por parte de los usuarios de datos rutinarios, usuarios específicos, y recuperación *en línea* (interactiva) de datos.

El tema del almacenamiento y de la recuperación de datos es demasiado amplio para ser tratado en forma de resumen, en particular en vista del rápido ritmo de cambio de la tecnología tanto en *hardware* como también en *software*, además de en las comunicaciones. La estrategia elegida deberá permitir que las nue-

vas tecnologías sean fácilmente adaptables y la organización de la base de datos deberá permitir una conversión fácil sin mucha inversión de tiempo ni de dinero.

Las bases de datos rígidas corren el riesgo de volverse obsoletas antes de que estén completamente en funcionamiento. Por esta razón, se debe invertir mucho esfuerzo en la etapa de planificación y de aplicación.

## Modelos

Un sistema de información también debería incluir un modelo, o modelos, de interpretación de datos, de síntesis y de predicción. Los modelos pueden ser sencillos o complejos, estáticos o dinámicos, agrupados o distribuidos espacialmente, estocásticos o deterministas. Se pueden ejecutar con papel y lápiz, gráficos, tablas y mapas, aunque generalmente lo que se entiende por "modelo" es una herramienta de ordenador para realizar una miriada de cálculos iterativos.

Hay, obviamente, un "ciclo de retroalimentación" en el proceso de diseño de una base de datos y en la selección del modelo. Habría que diseñar las bases de datos pensando en un modelo —o al menos, en un tipo de modelo(s)—. Esto facilitará la integración futura de los datos recogidos en la plataforma de modelización y asegurará que no exista ninguna laguna por datos defectuosos. Un diseño integrado también ayudará a asegurar un programa de recolección de datos económico que evite la recogida de datos que no tengan una utilidad particular para el proceso de evaluación. La estructura de la base de datos también debería facilitar la extracción automática de datos por parte del modelo (si se elige un modelo informatizado) para evitar duplicación del trabajo de entrada de datos y los potenciales errores de transcripción que pudieran ocurrir.

Antes de seleccionar el modelo, es esencial fijar los objetivos de la modelización. Este proceso puede ser complicado, en especial cuando hay implicados muchos intereses distintos. Se debe establecer de forma clara lo que se espera del modelo.

## Uso de un sistema de información geográfica (SIG)

A través de un SIG se puede manejar mejor mucha información relacionada con la gestión de recursos hídricos. El SIG puede ayudar a los gestores a realizar tareas rutinarias y complicadas, presentando en capas y desplegando grandes volúmenes de datos espaciales y no espaciales. El SIG, como herramienta de integración de muchas fuentes y tipos diferentes de datos, ofrece un enlace para extracción automática de datos de los modelos, proporciona gráficos, tablas y mapas asimilables de forma fácil, y es una de las técnicas



nuevas más excitantes de las que se dispone para la evaluación medioambiental.

Un SIG es un sistema informático para la toma, el almacenamiento, el análisis y la presentación de datos (geográficos) espaciales. Tiene la capacidad de digitalizar datos espaciales y de asignar atributos a la información almacenada, de analizar estos datos en función de estos atributos y de cartografiar los resultados. Estos tipos de *software* constan de muchas componentes, habitualmente las siguientes:

- Una base de datos espaciales y de atributos que es una colección de mapas y de información asociada en forma digital. La base de datos espaciales describe la forma y situación de las características de la superficie terrestre, y la base de datos de atributos describe los distintivos o las cualidades de esas características.
- Una aplicación de presentación cartográfica que puede generar una salida en forma de mapa, bien en pantalla o impresa, basándose en elementos seleccionados de la base de datos.
- Una aplicación para digitalización de mapas que convierte los mapas al formato digital mediante digitalizadores o escáner.
- Un sistema de gestión de base de datos usado para introducir, gestionar, analizar y obtener determinadas características de los datos.
- Un sistema de análisis geográfico que puede analizar datos espaciales. Los resultados de las consultas o la asociación de distintos datos espaciales se pueden añadir a la base de datos para enriquecerla.
- La mayor parte de los sistemas SIG incluyen también características de apoyo a la decisión tales como un proceso de toma de decisión de asignación de recursos, mapas de idoneidad con varios criterios, decisiones de asignación de localizaciones con múltiples objetivos, etc.

Hay disponible una gran variedad de *hardware* y de *software* de sistemas informáticos de SIG, e incluso algunos de ellos especializados en aplicaciones hídricas. Unos sistemas son más fáciles de usar que otros y algunos tienen más posibilidades y prestaciones que el resto. Los costes varían también de unos modelos a otros, pero su tendencia es a disminuir.

El SIG se puede usar como una herramienta de toma de decisiones para facilitar análisis que requieren datos estadísticos y cartográficos. Puede actualizar mapas basándose en datos de distintas fuentes. Mejora la precisión de los análisis usando grandes volúmenes de información. Es rápido, ya que reduce el

tiempo necesario para procesar grandes volúmenes de datos. Presenta la información a los responsables de la toma de decisiones de forma clara y demostrativa, pudiendo simular los efectos potenciales de distintos escenarios de decisión.

Los sistemas de gestión de información intensificados con el poder del SIG tienen enormes consecuencias sobre la gestión de los recursos hídricos. Además de su excelente capacidad visual y gráfica y de su característica de realizar y editar mapas, el SIG es una herramienta de análisis excelente, en especial cuando la complejidad del sistema es considerable.

## Conclusión

El valor de los datos en la gestión de recursos hídricos es inmenso. Sin embargo, los programas de toma de datos de recursos hídricos son muy vulnerables a los recortes de gasto público, ya que no se considera que tengan un efecto inmediato sobre la comunidad. Puede que durante muchos años no se vean los efectos adversos que resultan de un recorte de estos programas. Por otra parte, debido a la creciente demanda de recursos hídricos y a la cada vez mayor degradación medioambiental consecuencia de las actividades humanas, están aumentando las demandas de datos de recursos hídricos. Al mismo tiempo, se está haciendo evidente una mayor exigencia respecto a la fiabilidad de los datos y mayores expectativas de que los datos sean de una calidad más alta.

Lo expuesto anteriormente lleva definitivamente a la conclusión de que es necesario un sistema de información bien pensado y tecnológicamente avanzado para la gestión de los recursos hídricos. Tal sistema debería definir el tipo y el alcance de los datos necesarios y tendría que ofrecer toda la información necesaria para la gestión integrada de los recursos hídricos. Con este fin, debería incluir un sistema de base de datos, el uso de modelos y un sistema de información geográfica para facilitar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

## Referencias

- Margeta, J., I. Iacovides, M. Sevenser y E. Azzopardi, 1999: *Guidelines for integrated coastal urban water system planning in the Mediterranean*. PAP/RAC, Split (segundo borrador).
- Margeta, J., I. Iacovides y E. Azzopardi, 1997: *Integrated approach to development, management and use of water resources*. PAP/RAC — MAP, Split.
- OMM, 1994: *Guía de Prácticas Hidrológicas*. OMM — Núm. 168.
- NU, 1986: *Aplicación de la tecnología informática al desarrollo y gestión de recursos hídricos en países en vías de desarrollo*. NU — Departamento de Cooperación Técnica para el Desarrollo, TCD/WATER/I, Informe Técnico.

