Integración de Herramientas para la Operación de Sistemas de Recursos Hidráulicos

INTRODUCCIÓN

En Cuba se presentan diversas situaciones que acarrean dificultades de cara al uso y manejo de los recursos hidráulicos y requieren de soluciones que garanticen un mejor aprovechamiento de estos. Considerando el agua para consumo humano, para un análisis de las causas, los efectos y posibles soluciones a los problemas de disponibilidad y uso de este recurso, se hace necesario considerar tanto los aspectos relativos a las condiciones en que se encuentran las fuentes, como los asociados a los procedimientos y herramientas de trabajo existentes en las entidades encargadas de administrarlos. Este último aspecto, no ha sido abordado con la amplitud con la que se ha tratado el primero. A continuación se resumen las cuestiones más relevantes de ambas aristas de este problema.

Los recursos hidráulicos de Cuba se estiman en 38.1 km^3 de agua anuales; de ellos 31.7 km^3 escurren por los sistemas de drenaje superficial de las 632 cuencas hidrológicas del país, 6.4 km^3 se encuentran en las 165 unidades hidrogeológicas que existen (83 y 17% del total respectivamente). De ellos, pueden aprovecharse 23.9 km^3. La tabla I muestra su distribución por fuentes.

Del agua para consumo humano en Cuba, el mayor aporte se obtiene de las fuentes de aguas subterráneas. Estas se estiman en poco más de un 30% del potencial total disponible [1], [2]. En el seno de las rocas carsificadas de Cuba se encuentra, aproximadamente, el 90% de los recursos de agua subterránea de que dispone el país. La elevada vulnerabilidad a la contaminación convierte al carso en uno de los ecosistemas más frágiles y de mayor necesidad de atención y protección. Los más importantes acuíferos subterráneos se localizan en la parte occidental del país, muchos de ellos abiertos al mar provocando la pérdida de agua potable. La estacionalidad de las precipi-

Resumen / Abstract

La aplicación conjunta de las herramientas para la operación de los recursos hidráulicos ha sido abordada de manera parcial hasta ahora. En este trabajo, se describe una solución para esta problemática en términos de una Plataforma Modular Integrada y la estrategia de aplicación de estas herramientas, desarrollada en el Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE.
La solución planteada puede contribuir a resolver problemas relacionados con el agua en cuanto a: el suministro adecuado a los consumidores, la detección temprana de escasez, la calidad del agua, el monitoreo del comportamiento de la infraestructura propiamente dicha y la detección de irregularidades por parte de operadores y usuarios.

Palabras clave: gestión de recursos hidráulicos, modelos operacionales, modelación matemática sobre sistemas de información geográfica, sistemas de tiempo real.

The joint application of tools for water resources operation has been addressed so far in a partial way. In this work, a solution for this problem is given in terms of an Integrated Modular Platform under a strategy for application of the tools, developed in the Centro de Investigaciones Hidráulicas of CUJAE. The proposed solution can contribute to solve a set of water related problems such as: adequate supply to consumers, early detection of water scarcity, water quality, infrastructure behavior monitoring and detection of irregularities caused by operators or consumers.

Keywords:water resources management, operating models, mathematical modeling over geographic information systems, real time systems.

Modesto R. Gómez Crespo, CIH. CUJAE
Alcides J. León Méndez, CIH. CUJAE
José B. Martínez Rodríguez, CIH. CUJAE

TABLA I- DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS EN CUBA

Situación	Unidad de medida	Aguas superficiales	Aguas subterráneas	Total
Potencial Hiperanual	**km³**	**17.9**	**6.0**	**23.9**
Año 1999	**km³**	**7.9**	**1.7**	**9.6**
	%	**44.1**	**28.3**	**40.2**

taciones, única fuente de alimentación del escurrimiento superficial y subterráneo en el archipiélago, condicionan un régimen de escurrimiento altamente contrastante [3]. Para provincias como La Habana, Matanzas y Ciego de Ávila, las aguas subterráneas constituyen la fuente de abasto más importante. De modo general, más del 50% del agua total que se utiliza es de origen subterráneo y de ella más del 80% se obtiene de las cuencas costeras [2].

Los problemas que ocasiona la intrusión salina en las fuentes de agua subterránea, la vulnerabilidad de los acuíferos costeros y los riesgos a que se encuentran sometidos en las actuales circunstancias, imponen la aplicación de soluciones que garanticen un manejo eficiente y multifacético del recurso agua [2], [4].

Hasta el presente se han realizado numerosos trabajos y estudios sobre el comportamiento hidrodinámico de los sistemas fuentes, que incluyen la concepción de modelos matemáticos de simulación y optimización de la operación, así como la implantación de sistemas de medición, monitoreo y control, basados en la toma de datos mediante mecanismos tradicionales y electrónicos. Por otra parte, se observa en la literatura una clara tendencia a realizar análisis a partir de datos espaciales a través de sistemas de información geográficos.

A pesar del nivel de actualización en el empleo de algunas de estas herramientas que hoy presentan las empresas de distribución y suministro de agua [5], [6], uno de los problemas fundamentales que se manifiestan es la ausencia de estrategias y metodologías de trabajo que contribuyan al desarrollo y puesta en práctica de modelos operacionales para el monitoreo diario del servicio y el apoyo a la toma de decisiones.

Enlazar diferentes sistemas y aplicaciones de software tales como modelos matemáticos, sistemas de información geográfica (SIG) y sistemas de adquisición de datos y control con supervisión (SCADA) es frecuentemente una tarea compleja que requiere la creación de equipos de trabajo y coordinación entre las partes para compartir los objetivos esenciales que permitan lograr las metas trazadas [7].

En los últimos años han comenzado a aparecer reportes que intentan brindar una perspectiva más integral de tales sistemas [8], [9], pues la complejidad de las herramientas de análisis hace que los enfoques actuales sean básicamente parciales, abordando sólo aspectos específicos como técnicas y herramientas para la simulación y el desarrollo de modelos matemáticos, técnicas y herramientas para el análisis espacial de los datos, técnicas y herramientas para el análisis temporal de los datos, entre otras.

Los estudios más recientes coinciden en afirmar que un enfoque integral de estos sistemas mediante la aplicación de las herramientas de la informática y la electrónica, permitiría la interconexión, validación y realimentación de los resultados parciales, redimensionando el alcance de éstos y las posibilidades reales de su impacto concreto en el mejoramiento del estado y funcionamiento de los sistemas fuentes y la calidad de los servicios de entrega de agua para el consumo.

En el presente trabajo se propone una plataforma para el manejo de los recursos hidráulicos, basada en las potencialidades de la electrónica y la informática de conjunto con los modelos de simulación de los procesos hidráulicos y las fortalezas asociadas a los sistemas de información geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para un análisis de los sistemas fuentes, es común presentar un grafo topológico conceptual esquemático (Figura 1), con vistas a identificar sus principales elementos [10]:

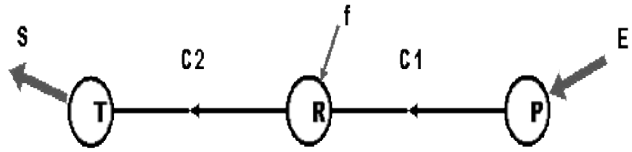

Figura 1. Grafo topológico conceptual de los sistemas fuentes de distribución de agua.

El nodo **P** es una abstracción de un conjunto de pozos que pueden extraer agua del acuífero e introducirla a través del arco **C1**. La flecha denotada por **E** simboliza el caudal total que se bombea por los pozos. De acuerdo con el esquema, este es un flujo exterior de entrada. El arco **C1** representa las conductoras que conducen el agua

hasta el nodo **R**. Por su parte el arco **C2** representa las conductoras que conducen el agua hasta el nodo **T**. El nodo **R**, intermedio entre los dos arcos descritos, también es una abstracción que incluye varios componentes: bombas horizontales, tanques de rebombeo, pozos (similares a los representados en el nodo **P**) que descargan directamente a tanques de rebombeo.

Las bombas horizontales toman de este tanque para impulsar el agua hacia el arco **C2**. La flecha **f** es el segundo flujo de entrada procedente de los pozos intermedios mencionados. Finalmente se destaca el nodo T que representa la existencia del almacenamiento en la forma de tanques reguladores. Los tanques reciben y almacenan el flujo que proviene del arco **C2** y descargan el flujo representado por la flecha **S** que es el tercer flujo exterior, el de salida.

Muchos de los estudios asociados a la operación de sistemas fuentes, en particular, y los Sistemas de Gestión de la Distribución de Agua (SGDA), en general, han estado dirigidos al desarrollo de técnicas vinculadas con las disciplinas del control de los procesos, la modelación matemática y la informática. A continuación se caracterizan estos métodos.

La operación de los sistemas dinámicos desde la perspectiva del control automático de procesos

Con el incremento del grado de dependencia de la sociedad moderna de los sistemas y procesos tecnológicos complejos (redes de distribución y producción de energía, agua, etc.), su disponibilidad y correcto funcionamiento se han convertido en cuestión de primer orden. Su incorrecto funcionamiento puede provocar pérdidas económicas, peligro para los operadores, inconvenientes para los usuarios, etc., [11].

Una de las principales áreas de investigación del control automático ha sido el desarrollo de tecnologías y equipamiento para mantener el funcionamiento de las plantas e instalaciones en los niveles deseados de operación. Para ello se destina parte del equipamiento electrónico a garantizar, mediante lazos de control, los parámetros óptimos de desempeño del proceso [12]. Tales objetivos han conducido además, a considerar las posibles anomalías (perturbaciones o cambios en los valores de referencia) o fallas (desperfectos o roturas de la instrumentación) en el proceso o los componentes del sistema que pudieran ocurrir durante la operación.

Este enfoque exige disponer de un sistema de diag-

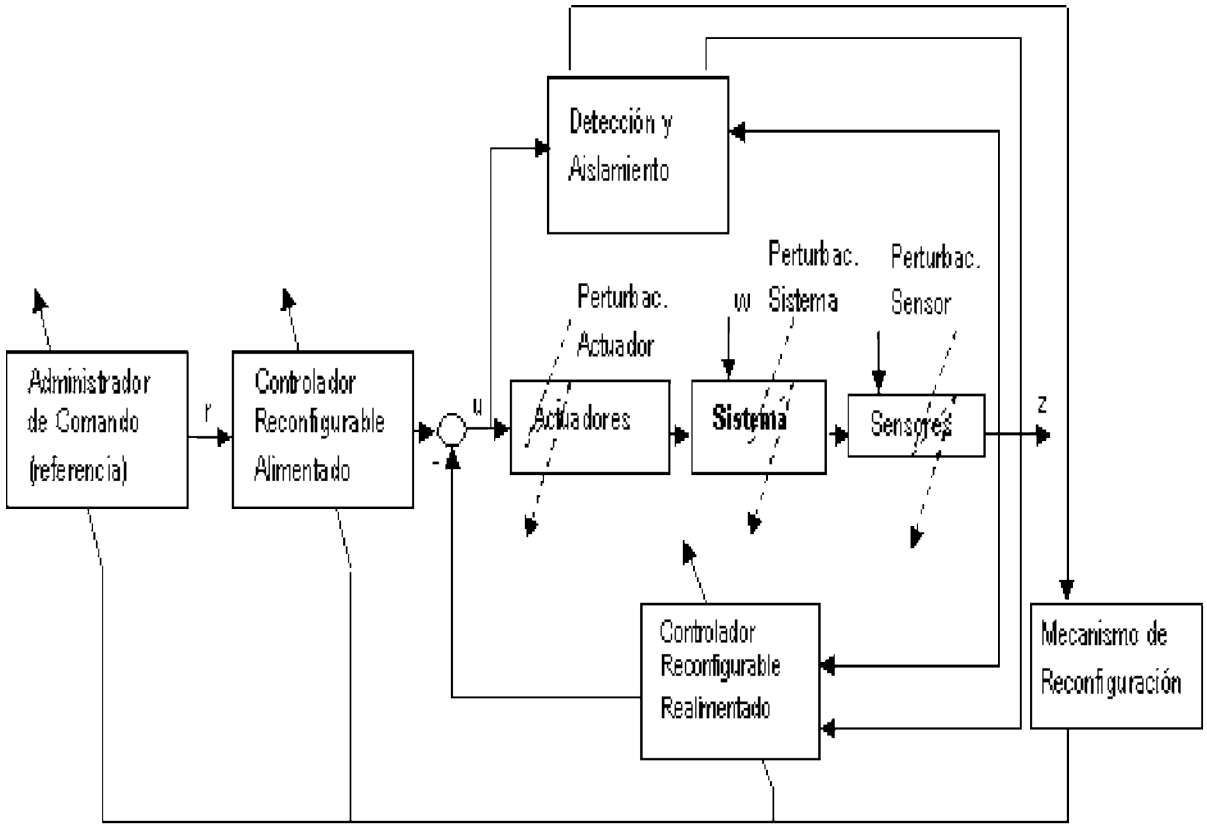

Figura 2. Esquema de respuesta del controlador.

nóstico, que en tiempo real, pueda dar información a un sistema supervisor para que active algún mecanismo de acción correctiva [13].

La Figura 2 muestra el esquema de respuesta del sistema de control básico formado por 1) el controlador reconfigurable, 2) el esquema de detección y aislamiento, 3) el mecanismo de reconfiguración, y 4) el administrador de comando/referencia.

El principio de diagnóstico está basado en la consistencia entre el comportamiento normal y el real de un proceso, este último, obtenido a través de mediciones mediante sensores y dispositivos electrónicos, ubicados en las instalaciones de campo [14]. Para ello, se hace uso de diversos tipos de modelos y de un análisis considerando escenarios posibles de perturbaciones, incluyendo efectos de propagación. En este sentido, resulta crucial tanto el tipo de modelo usado en el diagnóstico como las fallas asumidas [15].

La detección temprana se logra recopilando información referente al sistema, en forma de modelos matemáticos, especialmente utilizando las relaciones entre variables. La tarea del diagnóstico consiste en determinar el tipo, tamaño y localización de la afectación, así como también el tiempo de su detección, basado en los síntomas analíticos y heurísticos observados. Si no se dispone de más información sobre sus causas, se pueden aplicar métodos de clasificación que permitan un mapeo de los vectores de síntomas en vectores de afectación. La tendencia actual para el diagnóstico es el desarrollo de métodos de detección y diagnóstico basado en modelos cualitativos y cuantitativos [14].

Empleo de modelos matemáticos sobre sistemas de información geográfica

Paralelo al desarrollo de sistemas de control de la operación, han ido surgiendo y perfeccionándose múltiples métodos y herramientas informáticas para la modelación matemática y representación de la información. Dentro de las soluciones y herramientas más reconocidas en el campo de la Hidráulica se encuentran los desarrollos siguientes:

♦ HydroGeo Analyst, [16]: Tecnología para la administración y visualización del comportamiento de las aguas subterráneas y acuíferos que permite la gestión de los datos del acuífero, el análisis del comportamiento de los niveles de agua para la entrega a distritos y la elaboración de mapas sobre las formaciones geológicas.

♦ AquaChem, [17]: Diseñado para el análisis y manejo de los proyectos de estudio de la calidad de las aguas. Permite calcular los índices de dureza del agua para el uso por las plantas de tratamiento, las tendencias de mineralización y salinización de las aguas, así como los niveles de calidad que esta presenta para el consumo humano.

♦ AquiferTestPro, [18]: Diseñado para el análisis gráfico y la generación de reportes basados en los datos de las pruebas de bombeo. Analiza los datos de las pruebas de bombeo para predecir las propiedades hidráulicas de un acuífero (conductividad hidráulica, almacenamiento y trasmisividad).

♦ Visual ModFlow, [19]: Constituye la herramienta de modelación más avanzada de Waterloo Hydrogeologic Software en términos de combinaciones de características y funcionalidades que ofrece. Permite gran flexibilidad para su aplicación en diversos escenarios de simulación, incluidos las configuraciones de acuíferos más complejas, la predicción del impacto de la intrusión salina durante el bombeo y la simulación de la atenuación natural de los compuestos orgánicos. La articulación con la tecnología SIG permite seleccionar los sitios para el bombeo y delinear las áreas principales para la protección de los pozos.

♦ Mike Basin, [20]: Herramienta versátil de soporte a las decisiones basada en SIG para el manejo y planificación integrada de los recursos hidráulicos. Brinda soluciones alternativas para la asignación de agua y la atención a los problemas de escasez de ésta, optimiza la operación de embalses y establece medidas de costo-beneficio dentro de la temática de la calidad del agua. Permite resolver problemas de asignación multisectorial de agua y los problemas ambientales que se presentan en una cuenca.

♦ Mike She, [21]: Plataforma para la modelación, que permite adicionar el ciclo hidrológico al modelo de agua subterránea o adicionar todos los datos de uso del terreno al modelo de lluvia-escorrentía. Permite realizar estudios del impacto de cambios en el uso de la tierra y el clima, inundaciones, y de transporte de sólidos en aguas subterráneas y superficiales.

♦ FeFlow, [22]: Herramienta para la modelación del flujo y transporte de sustancias disueltas. La discretización del elemento finito permite utilizar mallas complejas no estructuradas, que se ajustan con gran precisión a la estructura natural, al tiempo que obedecen a requerimientos como tamaño del elemento, ángulos de los elementos, entre otros. Sus aplicaciones fundamentales se dirigen hacia el análisis de problemas de intrusión salina, recuperación del agua subterránea, interacción entre agua subterránea y superficial, entre otras.

♦ Temporal Analyst for ArcGIS, [23]: Única extensión de ArcGIS que resuelve las limitaciones tradicionales del tratamiento del factor tiempo en las bases de datos procesadas por el SIG. Esta extensión permite el tratamiento de series temporales de datos directamente dentro de ArcGIS, el almacenamiento, manejo y visualización de datos temporales, en un contexto espacial, así como análisis y procesamiento de datos desde múltiples discipli-

nas. No obstante, su concepción no permite el manejo de información en línea, ni la conexión con sistemas SCADA para la operación de los recursos hidráulicos.

♦ Water Evaluation and Planning, [24]: Desarrollado por el Stockholm Environment Institute, sede en Boston. Incorpora los tópicos de evaluación y planificación del agua mediante un instrumento práctico para la planificación integrada de los recursos hídricos. Mantiene en bases de datos la información de demanda y oferta de agua para realizar balances de masa en arquitectura conexión-nodo. Realiza cálculos basado en simulaciones de la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento y descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas. Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo de agua y toma en cuenta los diferentes usos de los recursos hidráulicos.

♦ Aquatool, [25]: Desarrollado por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos que forma parte del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (España). El sistema consta de una serie de módulos, entre los que se encuentran: AquiVal, Equalizador, MashWin, OptiWin, SimRisk y SimWin. Ellos están integrados en un sistema único en el que la unidad de control del usuario permite la definición gráfica del esquema del sistema, el control de las bases de datos, la utilización de los módulos mencionados y el análisis gráfico de los resultados.

De este análisis se concluye:

♦ A medida que los procesos a controlar aumentan su complejidad y escala, se hace más necesario acudir a soluciones que integren herramientas y aspectos como la implementación de nuevos algoritmos, hardware y estructuras de software. Lo anterior se hace presente en los sistemas de gestión de los recursos hidráulicos a gran escala. En estos casos no es suficiente la existencia de sistemas de control automático, la operación requiere, además, del apoyo de otras herramientas y áreas del conocimiento.

♦ Las plataformas profesionales, no obstante sus altas potencialidades en el tratamiento y representación de la información, desarrollan sólo aspectos relativos a la modelación y simulación hidrodinámica de los sistemas, bajo la ocurrencia de determinadas circunstancias y escenarios, pero sin integrar, en una misma plataforma, el conjunto: monitoreo y control en tiempo real que facilite las tareas de operación de los sistemas, manejo temporal del dato y mecanismos que permitan compartir información para la comunicación e interrelación dinámica de estos componentes sustanciales de un sistema de recursos hidráulicos de gran escala. Es decir, por sí solas no permiten la gestión completa de los recursos hidráulicos de una región o zona de interés.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La posibilidad de acceder y analizar datos en tiempo real de las instalaciones de campo a partir de interfaces gráficas, que faciliten los procesos de toma de decisiones, adquiere cada vez un interés mayor para los fines de operación de los sistemas con marcada componente dinámica.

El desarrollo de soluciones donde concurren sistemas SIG y sistemas SCADA se encuentra ante la disyuntiva de determinar a cuál de estas herramientas adjudicarle la responsabilidad de manipular la información. Los requerimientos actuales de la operación se hacen cada vez más complejos y la necesidad de consolidar los datos espaciales y los de tiempo real continúa siendo un elemento central.

Un SGDA con carácter modular permitiría que los sistemas SCADA, SIG y otros coexistan de manera natural, coherente y articulada. El método modular permite establecer diseños según requerimientos propios, mediante la instalación de aplicaciones de software específicas que satisfagan las necesidades identificadas. Ello permite, además, que el sistema se introduzca sumando módulos de una manera controlable.

A continuación se ilustra el procedimiento de aplicación de estrategia propuesta a la gestión de una cuenca, tomando como ejemplo de aplicación el acuífero Ariguanabo. La operación se enmarca en la simulación, supervisión y control de su red de pozos de observación y bombeo, mediante la ejecución interrelacionada de los módulos de la plataforma.

Aplicación de la Plataforma Modular Integrada a la operación del campo de pozos del acuífero Ariguanabo

Según [26], la zona de estudio abarca un área total de 259,7 km^2 y contempla toda la cuenca Ariguanabo y la subcuenca Aeropuerto de la cuenca Almendares, en la provincia de La Habana, Cuba. El periodo de calibración seleccionado es de tres años, comprendidos entre el 01/04/1982 y el 31/03/1985. Se hace uso de la herramienta SIG AQTriGeo [27], con vistas a desarrollar el proceso automático de triangulación, numeración de los elementos y nodos, y asignación de sus atributos. El resumen de la información resultante de este proceso se muestra en la tabla II.

La calibración automatizada de los parámetros hidrogeológicos del modelo se realizó aplicando el algoritmo SCE-UA [28], [29], implementado dentro del programa de computación WinAQE. Los parámetros de control del algoritmo se muestran en la tabla III. El intervalo para la búsqueda de los parámetros se muestra en la tabla IV.

TABLA II- RESUMEN DE LA ETAPA INICIAL DE MODELACIÓN

Número Elementos	Número Vértices	Número Nodos	Número Materiales	Número PuntosAdic.	Número Elementos Matriz
46	**34**	**113**	**15**	**181**	**1522**

TABLA III- PARÁMETROS DE CONTROL DEL ALGORITMO SCE-UA SELECCIONADOS

Número Complejos	Puntos por Complejo	Puntos en Población Inicial	Puntos por Subcomplejos	Pasos de Evolución por Complejo
20	**150**	**3000**	**80**	**30**

TABLA IV- INTERVALO DE BÚSQUEDA DE LOS PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Trasmisividad			**Coeficiente de almacenamiento**		
Min.	**Max.**	**Triángulos**	**Min.**	**Max.**	**Triángulos**
10	100	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 25, 38, 39, 43	0.005	0.05	1, 2, 3, 5, 6, 7, 13, 38, 39, 43, 44
50	500	23, 28, 29, 32, 33, 35, 37, 42, 44	0.01	0.1	10, 11, 12, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 32, 33, 37, 42
100	1000	1, 5, 34	0.05	0.15	4, 8, 9, 14, 15, 19, 20, 25, 34
1000	10000	18, 24, 36, 40, 46	0.1	0.2	26, 27, 30, 31, 36, 40, 41, 45, 46
5000	30000	11,12	0.025	0.25	35
5000	50000	10, 16, 17, 21, 22, 41, 45			
10000	50000	26, 27, 30, 31			

TABLA V- RESUMEN DE LA DISCRETIZACIÓN ASOCIADA AL MODELO LOCAL PARA EL ESTUDIO DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS POZOS CH1, CH2 Y CH3

Número Elementos	Número Vértices	Número Nodos	Intervalo Tiempo	Número Elementos Matriz
274	**148**	**569**	**1 trimestre**	**117053**

TABLA VI-VALORES DE CARGA ASOCIADOS A LOS POZOS DE EXPLOTACIÓN EN LOS MODELOS LOCAL Y REGIONAL

	Modelo local			Modelo regional		
	Pozo CH-1	Pozo CH-2	Pozo CH-3	Pa 182	Pa 183	Pa 184
tiempo	h(m)	h(m)	h(m)	h(m)	h(m)	h(m)
1	44	43.01	44.46	52.03	52.117	52.55
2	47.37	46.76	47.8	51.871	51.872	52.149
3	45.39	44.59	45.83	51.713	51.791	52.078
4	47.07	46.82	47.53	52.18	52.375	52.528
5	47.06	46.63	47.52	52.81	53.029	53.178
6	47.97	47.63	48.43	53.431	53.641	53.783
7	48.24	47.37	48.64	53.614	53.708	53.917
8	48.31	47.59	48.69	53.688	53.729	53.968
9	48.37	47.5	48.72	53.725	53.728	53.989
10	47.7	47.53	48.03	53.405	53.365	53.624
11	47.37	46.85	47.7	52.922	52.878	53.126
12	46.77	46.4	47.08	52.38	52.336	52.577

Integración del modelo local con la herramienta WinAQE

La integración del análisis local dentro del problema regional se logra a partir de la generación de nuevos escenarios, en los que se realiza un refinamiento de la discretización, dado el manejo de memoria realizado en la herramienta WinAQE que no impone restricciones en la cantidad de elementos, ni en el tamaño de la matriz del sistema de ecuaciones.

El nuevo modelo se somete a un nuevo proceso de calibración. La tabla V muestra el resumen del resultado de este proceso para modelar la explotación de tres pozos CH1, CH2 y CH3, utilizando 12 pasos de tiempo. Los valores de carga obtenidos por ambos modelos se muestran en la tabla VI. La Figura 3 muestra gráficamente la diferencia entre los resultados obtenidos por el modelo regional y el local, para el pozo CH1.

Como se observa, la diferencia entre los niveles calculados por el modelo local y regional manifiesta un decrecimiento de los primeros, con relación a los segundos. Este comportamiento se ajusta más a los valores reales de abatimiento que se producen en los pozos de explotación, durante la operación. La aplicación del análisis local mediante la tecnología Aqüimpe, parece efectivo para estimar el comportamiento de los niveles en aquellas zonas de mayor interés hidrodinámico.

El sistema de adquisición de datos, supervisión y control en tiempo real

El sistema SCADA implementado para la operación (Figura 4), se prevé correr ininterrumpidamente en las instalaciones administrativas del campo de pozos del acueducto de Ariguanabo.

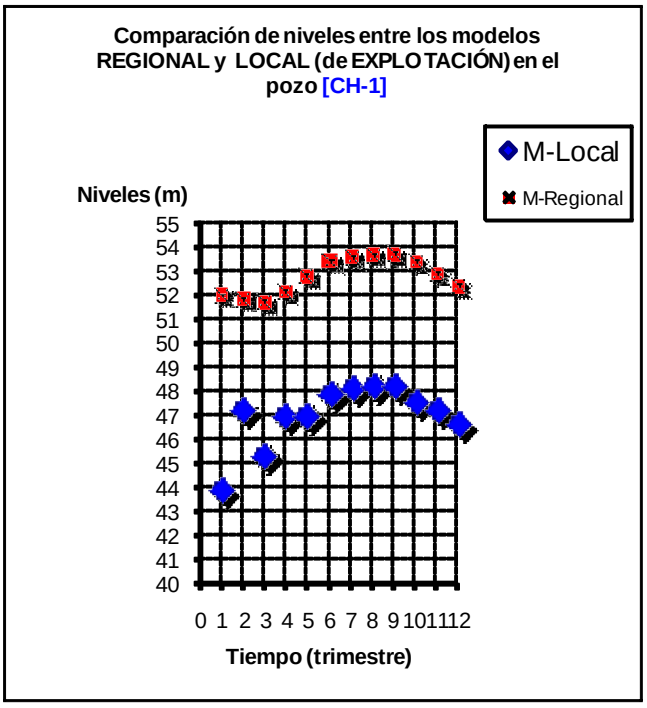

Figura 3. Comportamiento de los niveles en el pozo CH-1 dado los modelos local y regional.

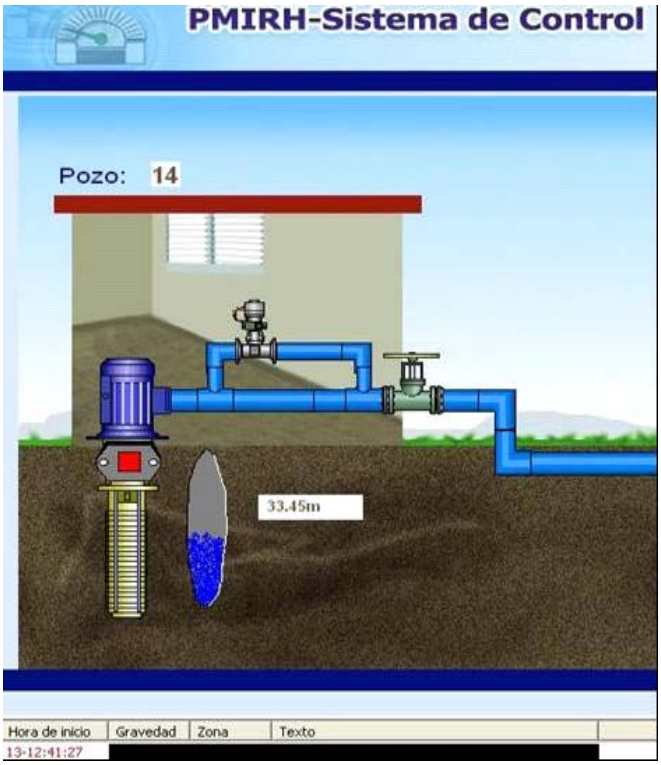

Figura 4. Vista ejemplo de la interfase de la aplicación SCADA para la supervisión.

Los objetivos del sistema SCADA son los siguientes:

♦ Monitoreo y control sobre todo los parámetros de funcionamiento de la instalación, asegurando que los requerimientos del desempeño de este siempre se logren.

♦ Reducir los niveles de operación del personal, a través de la automatización o mediante la operación del sistema desde un solo Puesto Central, minimizando la necesidad de visitas rutinarias a sitios remotos.

♦ Almacenar datos sobre el comportamiento del sistema y, por lo tanto, lograr el total cumplimiento de los requerimientos de reporte para cualquier ente regulador

♦ Suministrar información sobre el desempeño del sistema en cualquier instante de tiempo y establecer procedimientos efectivos para la comunicación remota con los recursos de campo.

♦ Establecer una operación y control eficientes del sistema para reducir potencialmente el consumo de energía durante la operación a través del empleo de técnicas de optimización operacional.

♦ Suministrar un sistema de alarma que permita que las fallas sean diagnosticadas desde el Puesto Central y se eviten incidentes que puedan ser costosos al medio ambiente.

La infraestructura de automatización en el terreno se fundamenta en la instalación de una estación remota en cada uno de los pozos de la red. Se garantiza, de esta forma, la independencia desde el punto de vista de las comunicaciones, [30]. La comunicación se implementó usando la transmisión por radio, dada las distancias que separan las estaciones remotas del Puesto Central, el menor costo de instalación y las ventajas de este medio para establecer la comunicación en un rango amplio de condiciones de explotación. Desde el Puesto Central se supervisa el funcionamiento de todos los pozos y se acciona de manera remota el arranque/parada de los equipos de bombeo y la apertura/cierre de las válvulas de la red.

Para determinar las variables que serán medidas, se tomó en cuenta las necesidades de la operación definidas por los usuarios del sistema, las propias necesidades del automatismo y la estrategia de selección del tiempo de entrada en la base de datos de la Plataforma: tiempo real y tiempo diferido. La tabla VII resume estas especificaciones de medición para las variables del sistema de adquisición automatizado.

La Plataforma Modular Integrada establece el registro de tiempo diferido como una opción económica dentro del entorno de medición, para aquellas variables con razón de cambio lenta y mayor holgura en cuanto al momento de actualización en la base de datos. Como aparece en la tabla VII, la aplicación de la plataforma a la gestión de la cuenca Ariguanabo, emplea esta estrategia para la medición de la calidad del agua que sale de la fuente, la lluvia que cae sobre la cuenca y los niveles en los pozos de observación.

Los equipos registradores de variables de tiempo diferido deben ser configurados de manera semejante en cuanto al intervalo de muestreo de las variables y la puesta en hora del reloj de tiempo real. De esta forma, en la memoria portable para registro de tiempo diferido se almacenan los valores de las variables definidas y se puede tener una base de datos de las variaciones de éstas, con mediciones simultáneas, sin necesidad de realizar transmisión de datos en tiempo real.

A través de la herramienta WinRM se realiza la transferencia de información con la memoria portable para registro de tiempo diferido. En [11] se discuten las restricciones que presentan los programas de aplicación desarrollados sobre plataforma Windows de 32 bits y superior para acceder a direcciones de puerto de la PC. No obstante existir numerosos controladores de dispositivos suministrados con la instalación del sistema operativo y otros desarrolladores de aplicaciones, las especificidades del trabajo con equipos industriales exigen implementar soluciones propias, que en áreas como esta, adquieren mayor nivel de complejidad.

El método de intercambio de información entre la herramienta WinRM y la memoria de registro, finalmente quedó estructurado en dos fases:

1- Consulta al controlador de dispositivo genérico, especificando el tipo de operación (lectura o escritura) y la dirección del puerto paralelo de la PC.

2- Codificación y decodificación de flujo de bytes, su

TABLA VII- DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA

Variable	Frecuencia Muestreo	Modo de Entrada a Base de Datos	Equipamiento / Tecnología
Caudales de agua que salen de la fuente	15 minutos	Tiempo Real	SCADA
Calidad del agua que sale de la fuente	24 horas	Tiempo Diferido	Registrador de Variables
Lluvia que cae sobre la cuenca	24 horas	Tiempo Diferido	Registrador de Variables
Niveles dinámicos en los pozos de explotación	5 minutos	Tiempo Real	SCADA
Niveles en los pozos de observación	24 horas	Tiempo Diferido	Registrador de Variables
Estado de los equipos de bombeo	Cada vez que sea requerido	Tiempo Real	SCADA
Presiones en la red de conducción forzada y tanques de almacenamiento	15 minutos	Tiempo Real	SCADA
Parámetros eléctricos de los equipos de bombeo	3 minutos	Tiempo Real	SCADA
Abertura de válvulas	Cada vez que sea requerido	Tiempo Real	SCADA
Acceso a las estaciones remotas	Cada vez que sea requerido	Tiempo Real	SCADA

interpretación y procesamiento, según corresponda de acuerdo con los esquemas y mapas de direcciones definidos para el registro de variables en la memoria.

Implementación de la gestión integrada de la operación

La gestión integrada de la operación del sistema fuente de la cuenca Ariguanabo (Figura 5), mediante la Plataforma Modular Integrada, es controlada por el módulo Supervisor General de la Operación (SGO). Este tiene como función principal coordinar la activación y ejecución del resto de las herramientas de la plataforma e implementar la estrategia de operación que se expone en este trabajo. En condiciones normales, su ejecución transcurre como tarea de segundo plano.

Al igual que el sistema SCADA, el SGO es una aplicación de tiempo real que se ejecuta de manera ininterrumpida y garantiza la sincronización de las tareas, el control sobre los parámetros de la operación y el cumplimiento de los requerimientos de respuesta y alerta temprana ante la ocurrencia de eventos críticos.

El flujo de control para ejecutar las órdenes de operación, toma en cuenta los resultados que aporta la modelación matemática dentro de la Plataforma Modular Integrada, tal como se muestra en el esquema de la Figura 6. La estrategia de operación que se implementa se basa en un conjunto de decisiones que imponen las órdenes de accionamiento que emite el SCADA a los elementos finales de control, para regular el estado de éstos.

Figura 5. Interfase principal para la gestión del módulo Supervisor General de la Operación.

El conjunto de decisiones que se establecen, adoptan la forma de Reglas de Operación (RDO). Por lo tanto, un cambio en las decisiones sobre la ejecución del sistema, implica un cambio de las RDO de éste.

La explotación del recurso se decide a partir de la selección y corrida de un escenario de simulación con la herramienta WinAQE, y la política de operación que indi-

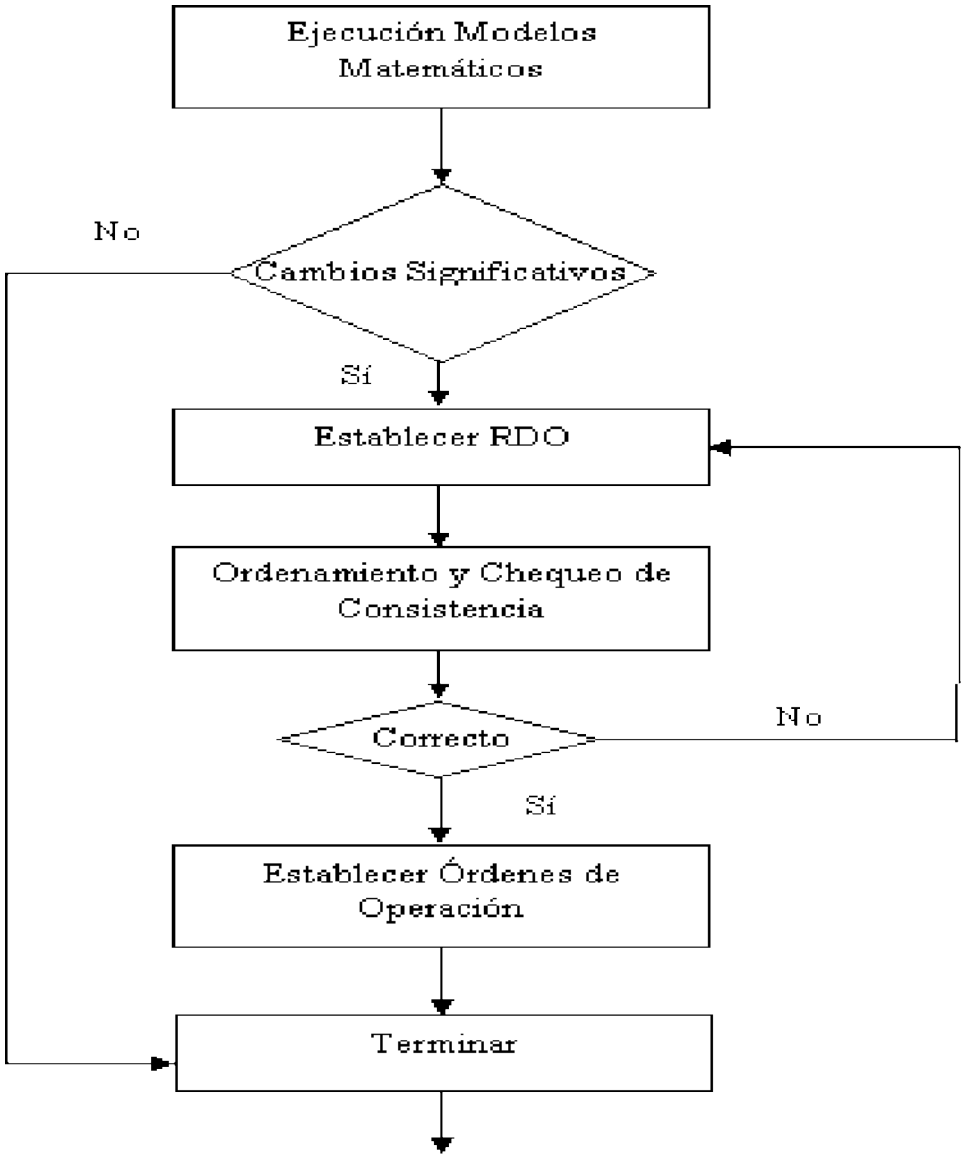

Figura 6. Esquema general de implementación de las órdenes de operación.

ca el empleo de los modelos de optimización y los criterios de los especialistas. Las RDO que finalmente se generan, deben ser sometidas a inspección continua para comprobar si las restricciones de abatimiento en los pozos de bombeo, calidad de la fuente y demanda a satisfacer, son cumplidas durante la operación.

El flujo de control de la explotación, dentro del SGO (Figura 7), es el encargado de supervisar los parámetros generales de la operación y realizar el tratamiento adecuado, en caso de no cumplirse alguna de las restricciones planteadas. Al igual que en los casos anteriores, la información asociada a las restricciones a monitorear, se almacenan en la base de datos de la plataforma de integración.

El flujo de control de la explotación conforma el conjunto de opciones de alerta temprana que presenta la Plataforma Modular Integrada y les permite a los operadores jugar un rol más supervisor, centrándose en problemas de mayor envergadura que aquellos derivados de la operación diaria. Consecuentemente, el sistema puede dirigirse de manera más económica, predecible y práctica.

CONCLUSIONES

La aplicación de la Plataforma Modular Integrada a la gestión de la operación de la cuenca Ariguanabo y su acuífero subyacente demuestra la efectividad y validez de los conceptos y estrategias que sustentan los principios de diseño de esta solución y el aporte que encierra desde el punto de vista de la preservación del recurso natural y el uso eficiente de los recursos económicos y energéticos.

Se obtuvieron diferencias significativas entre los resultados del comportamiento de los niveles en los pozos de explotación aplicando el modelo regional y el modelo local para el mismo intervalo de tiempo. Se demuestra que el

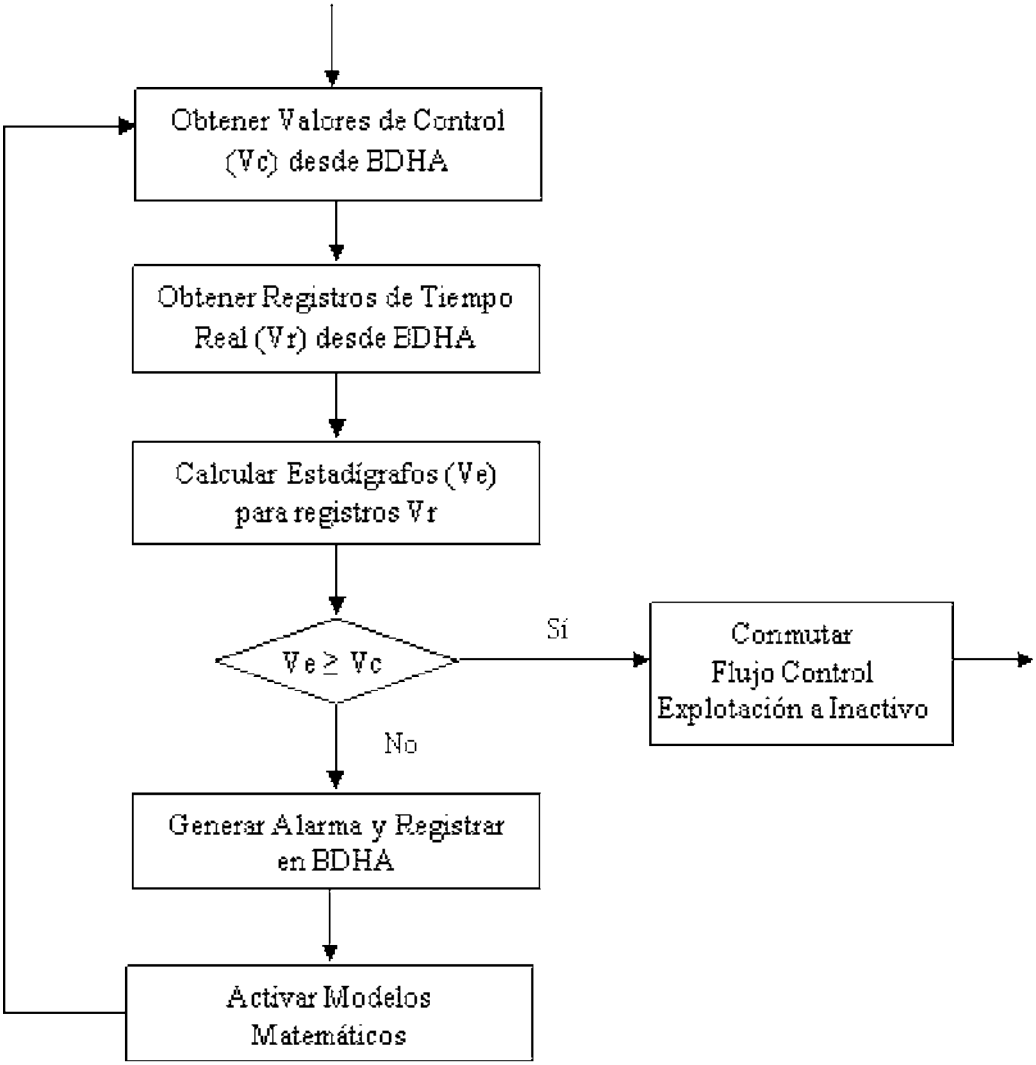

Figura 7. Secuencia específica de activación de las órdenes de operación.

modelo regional es válido para hacer estimaciones a largo plazo de la explotación de los recursos, mientras que el modelo local se adapta mejor a los problemas de operación diaria de las fuentes.

Los datos de tiempo real y tiempo diferido son adquiridos empleando un sistema SCADA, equipos registradores de variables, memorias portables para registro de tiempo diferido y la herramienta WinRM. En la Plataforma Modular Integrada las aplicaciones SCADA y WinRM, representan las principales herramientas para la actualización, con carácter histórico, de los datos de las variables de campo.

La gestión integrada de la operación del sistema fuente fue resuelta con la creación del módulo Supervisor General de la Operación. Los flujos de control que contiene, atienden los requerimientos de la operación, de forma independiente.

REFERENCIAS

[1] Dilla, F. Modelos de Administración óptima de acuíferos costeros. Primer Taller de Expertos en vulnerabilidad de acuíferos costeros en el caribe insular. Ciudad de La Habana, Cuba. 2004

[2] Hernandez, A. et al. *Modelación de acuíferos*. Monografía, La Habana, Cuba. 2001.

[3] Díaz, J.A. Palabras del Vice Ministro José A. Díaz Duque en la apertura oficial del Primer Taller de Expertos en Vulnerabilidad de acuíferos costeros en el Caribe Insular. Primer Taller de Expertos en vulnerabilidad de acuíferos costeros en el caribe insular. Ciudad de la Habana, Cuba. 2004.

[4] Pérez, F. Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea. 1. La hidráulica de pozos y la simulación regional de acuíferos. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XVII, núm. 4, 2002, pp. 57-77.

[5] Barakat y Chamberlin, I. The Value of Supply Reliability: Results of a Contingent Valuation Survey of Residential Customers. Oakland, California Urban Water Agencies. 1994.

[6] Bertoldi, G. L., R. H. Johnston, et al. Ground Water in the Central Valley, California - A Summary Report. Was-

hington D.C., U.S. Geological Survey. 1991.

[7] Bredehoeft, J. D. y R. A. Young. "Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water for Irrigated Agriculture: Risk Aversion." Water Resources Research 19(5). 1983. 1111-1121.

[8] MWD. Southern California's Integrated Water Resource Plan Executive Summary. Los Angeles, Metropolitan Water District of Southern California. 1996.

[9] MWD. Southern California's Integrated Water Resources Plan, Volume 1: The Long-Term. 1996.

[10] León, A., et al. Propuesta de Oferta para Automatización del Sistema Fuente de Abasto de Agua de la Ciudad de Manzanillo, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas. 2004.

[11] Gómez, M. *Sistemas en Tiempo Real para el Estudio de Procesos de la Hidráulica.* Tesis presentada en opción del título de Master en Informática. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Informática y Sistemas. 2000.

[12] Loaiciga, H.A., R.J. Charbeneau, L.G. Everett, G.E. Fogg, B.F. Hobbs, y S. Rouhani. Review of groundwater quality monitoring network design. J. Hidraul. Eng. 118(1). 1992. 11-37.

[13] Blanke, M., M. Kinnaert J. Lunze y M. Staroswiecki. *Diagnosis and fault-tolerant control. Springer-Verlag.* Germany. 2003.

[14] Gómez, M., C. Verde. La detección de fallas y las redes de distribución de agua. Una revisión. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXVIII, No. 1. 2007.

[15] Puig, V., J. Quevedo T. Escobet B. Morcego y C. Ocampo. *Control tolerante a fallos (Parte I): Fundamentos y diagnóstico de fallos.* Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 2004. pp 15-31.

[16] Hydrogeo Analyst. Disponible en: http://www.waterloohydrogeologic. com/software/Hydrogeo_Analyst/Hydrogeo_analyst_ov.htm. Consultado: 12/junio/2007.

[17] AquaChem. Disponible en: http://www.waterloohydrogeologic.com/ software/aquachem/aquachem_ov.htm. Consultado: 12/junio/2007.

[18] AquiferTest Pro. Disponible en: http://www.waterloohydrogeologic.com/ software/aquifertest_pro/aquifertest_pro_ov.htm. Consultado: 12/junio/2007.

[19] Visual ModFlow. Disponible en: http://www.waterloohydrogeologic.com/ software/visual_modflow_pro/visual_modflow_pro_ov.htm. Consultado: 21/ junio/2007.

[20] Mike Basin. Disponible en: http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/ dhi/mikebas/Mbasmain.htm. Consultado: 14/junio/ 2007.

[21] Mike She. Disponible en: http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/ mikeshe/Mshemain.htm. Consultado: 14/junio/ 2007.

[22] FeFlow.Disponible en: http://www.swstechnology.com/software_product. php?ID=43. Consultado: 12/junio/2007.

[23] Temporal Analyst for ArcGIS. Disponible en: http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro05/Time/DHI_Temporal_Analyst/TA-productsheet. pdf. Consultado: 21/junio/2007.

[24] SEI. Water Evaluation And Planning System. Stockholm Environment Institute. 2007.

[25] AquaTool. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos (HÍDRICOS). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España. 2004.

[26] Dilla, F. *La modelación matemática del flujo subterráneo y las técnicas de optimización aplicadas en la investigación y explotación de acuíferos a escala regional.* Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas. 1993.

[27] Cabrera, E. *Elementos para la simulación de acuíferos con el empleo de un sistema de información geográfico.* Tesis presentada en opción al grado científico Maestro en Ciencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, 2007.

[28] Duan, Q., V. K. Gupta y S. Sorooshian. "Optimal use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models", J. Hydrol., vol. 158. 1994. pp. 265-284.

[29] Mesa, H. *Solución del Problema inverso en Modelo de Flujo de Agua Subterránea mediante algoritmo de convergencia Global*. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Departamento de Matemática, Fac. Ing. Civil, ISPJAE. 2000.

[30] León, A., et al. Informe Propuesta de Plataforma Modular Integrada para el campo de pozos -La Joya- en Santo Domingo, R. Dominicana. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, 2003.

Recibido: Marzo del 2009
Aprobado: Abril del 2009