



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIÓN
Y
ADMINISTRACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA
PARA APOYO A LAS COMUNIDADES DE MICHOACÁN.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

P R E S E N T A :

EDGAR OMAR CEBOLLEDO GUTIÉRREZ

TUTOR

DR. OSCAR ARNOLDO ESCOLERO FUENTES

2008



1. Introducción General	3
2. Objetivos.....	4
3. Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD).....	4
4. Requerimientos	5
5. Diseño de un SSD.....	6
5.1 GUI – interfaz	6
5.2 Bases de Datos y SIG	7
5.3 Diseño de clases:	7
5.4 Modelos	8
5.4.1 Interfaz ModFlow-SSD	8
5.4.2 Entrada-Salida	9
5.4.3 Estructura de archivos:	11
5.5 Análisis de decisiones multicriterio: (ADMC).....	12
6. Tipos de usuario:	13
7. Niveles del sistema:.....	14
8. Descripción de servicios posibles:	17
9. Conclusiones:.....	18
10. Limitantes del sistema actual:	18
Bibliografía.....	19

1. Introducción General

En México la disponibilidad y el manejo del agua son problemas urgentes sobre todo en las ciudades y sus zonas conurbadas donde la presión sobre las fuentes de agua ha ido aumentando tanto con el crecimiento de la población como por la contaminación acumulada y presente en los ríos, suelos y acuíferos. Estos problemas hasta ahora no se han podido resolver con el esquema institucional ni los enfoques tradicionales parciales que han ido atacando problema por problema sin una visión integrada del sistema total. Por eso, en los últimos años ha surgido la necesidad de un enfoque integrado y una cooperación más fuerte tanto entre los actores tradicionales como también con nuevas instituciones de los usuarios de agua [14].

La tarea es sumamente compleja, ya que implica la consideración de todo el ciclo de agua urbano desde las fuentes de agua, su extracción, conducción y potabilización, diferentes tipos de usos, descarga y tratamiento de aguas residuales y eventualmente el reuso del agua tratada. La complejidad del problema se incrementa considerando que los diferentes componentes del ciclo de agua se manejan por instituciones separadas, cuya cooperación en el pasado ha sido deficiente en muchos casos tanto con respecto al intercambio de información y la cooperación interinstitucional, como una visión y planeación común [16].

Los quehaceres urgentes requieren el uso de herramientas apropiadas para la integración de la información existente, la estructuración y modelación de los problemas y subsistemas, así como la toma de decisiones en grupo y de manera transparente para los usuarios del agua. Una de las herramientas que cumplen con todas estas funciones son los sistemas de soporte de decisión [9].

La finalidad de este proyecto es el desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para la gestión de agua en zonas urbanas y su entorno, con especial énfasis en el agua subterránea, que es la fuente de agua más importante en México. Se pretende facilitar esta herramienta a los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) que constituyan las asociaciones de usuarios relevantes al nivel de acuífero. El fin es proveerlos con una herramienta que facilite su trabajo de gestión y planeación, que además les permita la posibilidad de ofrecer diferentes servicios tanto a usuarios como a autoridades del agua.

La primera aplicación del sistema está planeada en el Estado de Michoacán, que cuenta con nueve acuíferos sobreexplotados; donde el gobierno del estado impulsó un proyecto para generar planes de manejo de estos mantos acuíferos.

2. Objetivos

El presente proyecto tiene como objetivo ser una herramienta para los COTAS y otros usuarios. Se pretende ayudarlos a tomar mejores decisiones, con base en el conocimiento de expertos y la simulación del flujo del agua. En particular tiene que servir para:

- Mejorar la planeación y cooperación interinstitucional en el manejo de aguas subterráneas.
- Adecuada a las condiciones del Estado de Michoacán, pero a la vez una herramienta útil para el caso específico del Estado de Michoacán, y además que sea una herramienta lo suficientemente general para poder ser usada en otros casos de estudio.
- Proveer de una herramienta de apoyo a las organizaciones de usuarios en sus decisiones y el trabajo diario con respecto a la evaluación de proyectos y toma de decisiones.

3. Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD)

Este sistema provee a los usuarios capacidades de comunicación y resolución de problemas complejos y semiestructurados. Para la solución de este tipo de problemas se requiere un alto grado de organización de la información y reglas específicas de decisión; sin embargo, estos problemas no son completamente programables. Los SSD permiten la combinación de las habilidades cognitivas, sociales y emocionales de las personas que toman las decisiones, con las capacidades computacionales [9].

Turban [17] define un SSD como “un sistema interactivo, flexible y adaptable, el cual usa reglas de decisión, modelos, bases de datos y representaciones formales adecuadas de las peticiones de quien toma las decisiones para indicar acciones específicas y aplicables para resolver problemas, los cuales no pueden ser resueltos por el modelo de optimización de la investigación operacional clásica. Así, asiste al proceso de toma de decisiones complejas e incrementa su eficiencia”.

Un SSD no resuelve problemas. Las funciones limitadas de un SSD son señaladas por Maniezzo: “De hecho los SSD no están pensados para remplazar a quien toma las decisiones al momento de resolver el problema; están contruidos para ayudar al usuario a tomar decisiones responsables y claramente documentadas, los cuales usan la información y material científico disponible tanto como es posible” [10].

Los componentes típicos de un SSD incluyen:

- ◆ Una interfaz gráfica para el usuario, que debe permitir la generación de escenarios y representación adecuada de los resultados.
- ◆ Sistemas de bases de datos que contienen la información, incluyendo información geográfica y conocimientos de expertos.
- ◆ Modelos y cálculos que permiten establecer las relaciones entre las variables de entrada y salida.
- ◆ Herramientas de análisis que facilitan la elección entre diferentes escenarios, como es el análisis multicriterio.

Los componentes descritos fueron establecidos por Paruccini [13] y fueron adaptados para la presente aplicación.

No necesariamente todas estas componentes son obligatorias. Según sus funcionalidades, existe una gran variedad de SSD que se manejan con términos diferentes, como son los sistemas expertos, sistemas de manejo de información, bases de conocimientos, marcos y cadenas de modelos, etcétera [6].

Una revisión bibliográfica de los sistemas de soporte de decisión que se han desarrollado en el campo de manejo de agua, revela una gran variedad en las aplicaciones: agrícola, urbano y calidad de agua, aplicaciones para agua superficial y agua subterránea, manejo de cuencas, etcétera. Con base en esta

revisión de sistemas ya existentes, se tomaron algunas conclusiones sobre los requerimientos al sistema que se va a desarrollar.

4. Requerimientos

Hay tres tipos de usuarios en el sistema: operador, generador de escenarios y espectador.

Los requerimientos generales dictados por el tipo de usuario, el tiempo establecido y recursos disponibles son:

- i) Una herramienta extensible, para poder añadir funciones en el futuro cercano y por el momento resolver lo urgente.
- ii) Considerando que los COTAS muchas veces cuentan con pocos recursos, se pretende el uso de opciones de bajo costo y de software libre.
- iii) La herramienta debe ser sencilla, con una interfaz amigable y comprensible para usuarios que no sean expertos en sistemas computacionales.

Los problemas de gestión de agua en México dictan que se requiere un enfoque fuerte al agua subterránea. Para modelar los efectos detallados de diferentes escenarios sobre el agua subterránea, se requiere incluir un modelo numérico de acuíferos. Sin embargo, también se requiere la facilidad de integrar tanto la disponibilidad de agua superficial como el uso del agua de forma detallada, incluyendo abastecimiento y descargas. Dentro de los 93 proyectos revisados, hay pocos (12) que abarcan este tipo de manejo de cuencas incluyendo agua superficial y subterránea ([3], [4], [7], [8], [15], [18]). Generalmente sus requerimientos de datos hidrológicos y el grado de detalle en agua superficial es mucho mayor a lo que se aspira para los casos de manejo aquí, donde el enfoque es más sobre el agua subterránea. Los paquetes que manejan este tipo de aplicación son generalmente comerciales y por ende caros (por ejemplo: MIKESIM, WATERWARE). Otra opción es el desarrollo de sistemas *stand-alone* [1] cuya aplicación o modificación involucra un problema de adaptación y requiere permiso de los desarrolladores. Ante esta circunstancia, se optó por desarrollar un sistema que en su primera versión sólo incluirá a un modelo numérico de agua subterránea acoplado y ningún otro modelo.

La mayoría de los casos revisados incluyen el acoplamiento del SSD a un sistema de información geográfica (SIG), ya que muchas variables clave tienen una dimensión espacial. Esta dimensión se requiere considerar también en la presente aplicación, por lo que el sistema tiene que facilitar el manejo de mapas y datos espaciales. Sin embargo, analizando los requerimientos actuales (usando el estudio de caso de Michoacán) a las funcionalidades del SSD, se optó por no usar un software de SIG específico sino desarrollar mecanismos como ingresar, guardar y analizar la información espacial requerida en un formato más simple (no vectorial) y fácilmente acoplable con el modelo numérico del acuífero.

En cuanto al análisis de escenarios, la mayoría de las fuentes revisadas proponen el uso de escenarios preestablecidos para facilitar su comparación y cálculo. A pesar de eso, en el presente caso se decidió dejar lo más abierto posible la generación de escenarios por dos razones: i) para facilitar la adaptación paulatina a la disponibilidad de nuevos datos y conocimientos; y porque se pretende crear una herramienta genérica que se pueda aplicar en muchos casos diferentes.

En la literatura se encontraron varios ejemplos en los cuales el soporte de decisión se realizó mediante procesos de optimización matemática. Sin embargo, es importante señalar que las limitaciones en los datos, así como los aspectos y limitantes políticos, sociales y legales que tienen una gran influencia sobre las decisiones en cuestiones de agua, requieren un alto grado de flexibilidad e impiden generalmente poder tomar una solución técnicamente “óptima”. El análisis de decisión multicriterio (ADMC) es la herramienta adecuada para implementar esto, pues permite al usuario incluir todos los factores (“duros” y “suaves”) y provee la transparencia requerida [15].

5. Diseño de un SSD.

5.1 GUI – interfaz

El sistema fue hecho en C++ usando wxWidgets, se usó wxWidgets por su portabilidad, por sus resultados profesionales (las pantallas generadas con wxWidgets se ven igual que una programa hecho con las bibliotecas para Windows) y por su facilidad de uso. Una de las características del sistema es que debe ser fácilmente expandible en un futuro por otros programadores. Se optó por tener una clase por cada pantalla, lo que tiene algunos inconvenientes: el código es más grande, se tiene más creación y destrucción de objetos, pero nos da la modularidad y abstracción deseada. Si un usuario quiere agregar una pantalla, simplemente crea su clase con la información de esa pantalla y modifica las clases que apunten a ella. Esto es bastante útil al momento de trabajar en equipo, porque permite dividir el trabajo y detectar errores más fácilmente. De esta manera las ventajas de este enfoque superan por mucho a las desventajas.

5.2 Bases de Datos y SIG

Todos los datos del sistema se guardan en archivos XML. De esta forma es posible que los usuarios puedan leer (aunque no es recomendado) y modificar los archivos fuera del programa, además de que no nos ata a ninguna base de datos. De nuevo, esto tiene inconvenientes: todo está en archivos de texto y seguramente en una base de datos ocuparían menos espacio en disco. Pero con el fin de hacer un sistema amigable para el usuario y para el desarrollador que quiera expandir el sistema se optó por usar XML.

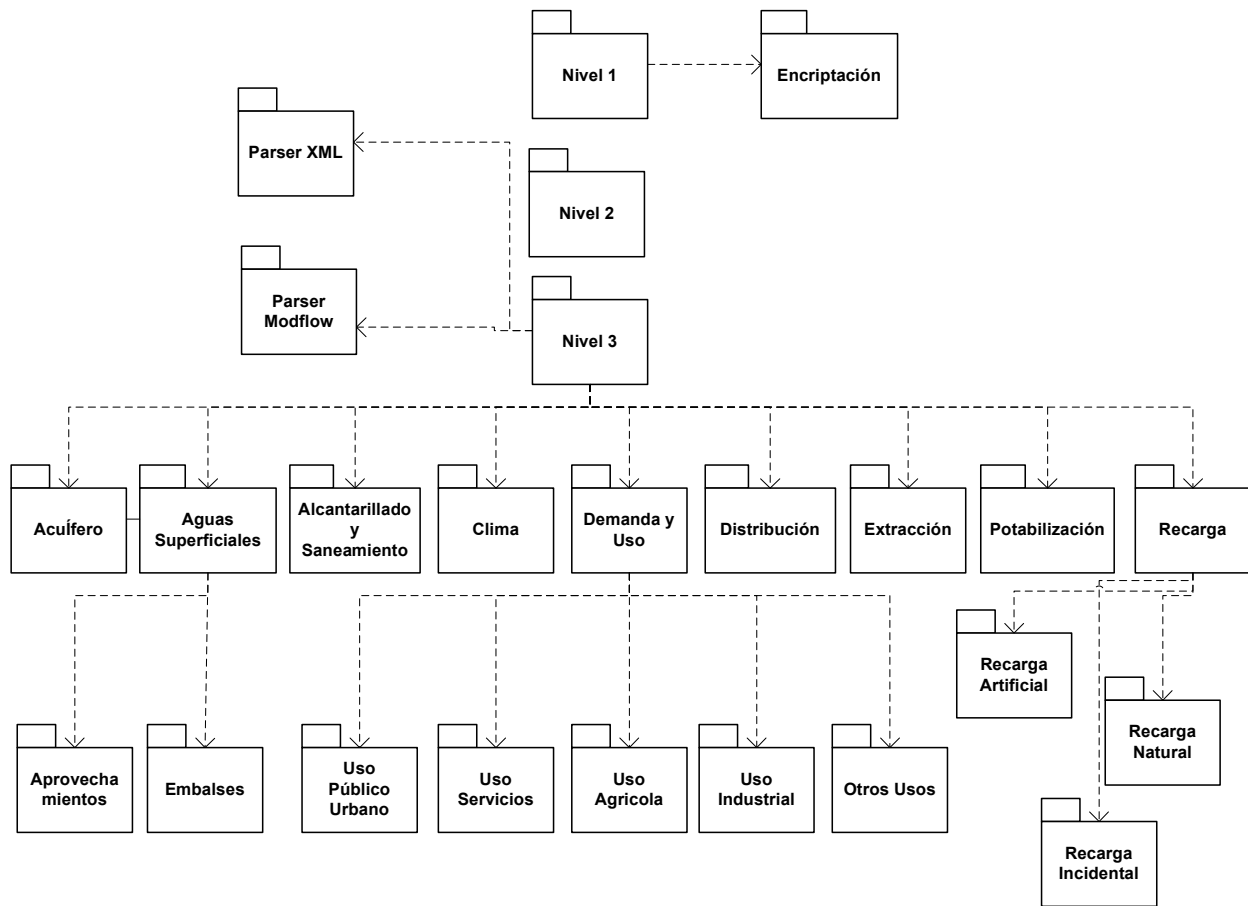
Los archivos relacionados con Modflow (explicado en la sección 5.4) se guardan con su extensión correspondiente en el formato usado por Modflow.

Para facilitar el uso de información geográfica y el acoplamiento con Modflow al mismo tiempo, el operador tiene que indicar las coordenadas de su área de estudio y generar una malla sobre este mismo. A partir de allí, todos los objetos y áreas que tienen una referencia espacial se pueden dibujar sobre una imagen (usando la GUI) y serán guardados no en formato XML sino en mallas o *grids*. Cada malla guarda valores flotantes, limitado a 255 diferentes valores. En el archivo se guarda el ancho y alto de la malla, un arreglo de *doubles* de tamaño 256 y un arreglo de bytes del ancho y alto indicados, donde cada byte apunta a una posición del arreglo de *doubles*. Esto se hizo así por motivo de espacio, ya que estamos limitados en cuanto a valores diferentes, pero se ahorra demasiado espacio en disco comparándolo con guardar un arreglo bidimensional de doubles.

5.3 Diseño de clases:

Como expreso en la sección anterior, todas las pantallas son clases, pero no todas las clases son pantallas. Como ya se mencionó, este sistema tiene que interactuar con Modflow y guardar y leer

archivos en formato XML entre otros. A continuación, en la Gráfica 1 se muestran los paquetes desarrollados y la forma cómo se organizaron. No se incluirán ni las variables ni las funciones como en la mayoría de los diagramas UML por motivos de espacio, solamente se incluyen los paquetes y sus relaciones.



Gráfica 1: Arquitectura del Sistema

5.4 Modelos

Para este proyecto el modelo numérico de aguas subterráneas, desarrollado y calibrado a priori en ModFlow 2000, es el único modelo que está acoplado al SSD.

5.4.1 Interfaz ModFlow-SSD

Modflow es un programa de computadora que fue originalmente desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en 1988, para resolver numéricamente la ecuación de flujo tridimensional para aguas subterráneas en un medio poroso usando un método de diferencia finita (finite-difference). El programa tiene un diseño estructurado modular para facilitar el entendimiento y funcionamiento; ha

sido modificado muchas veces desde su creación [5]. Para la versión actual se usa el proceso de flujo de aguas subterráneas (PFAS) de ModFlow 2000 e incluye todos los aspectos de la ecuación, abarcando la formulación de las ecuaciones de diferencia finita, entrada de datos, solución a las ecuaciones simultáneas resultantes y salidas de datos.

ModFlow 2000, incluso teniendo varias limitantes comparado con otros programas como FeFlow, fue escogido por las siguientes razones:

- 1) Es probablemente el software con la mayor cantidad de aplicaciones prácticas en México.
- 2) Al momento de escribir este reporte, el modelo de Modflow para el acuífero del Estado de Michoacán ya estaba en desarrollo.
- 3) El software es gratuito.
- 4) La estructura sencilla y modular de Modflow 2000 facilita la modificación y lectura de los archivos externos usados por Modflow.

El modelo numérico de aguas subterráneas tiene que ser desarrollado y calibrado para la zona respectiva de estudio; posteriormente puede ser acoplado al SSD.

Al inicio de la entrada de datos para el SSD, el operador tiene que especificar el nombre del modelo y ruta a los archivos de ModFlow. En ese momento se genera una copia del modelo original y se guarda bajo el nombre por omisión; este modelo se vuelve la base para los demás escenarios y el modelo original no se ve afectado.

En el momento que el usuario del SSD crea un nuevo escenario automáticamente se crea otra copia del modelo de Modflow, así los cambios realizados sobre este escenario no afectan el modelo por omisión. Además, cada escenario tiene sus archivos de Modflow asociados. Después de cada sesión sobre algún escenario, el modelo de Modflow se ejecuta dos veces: primero en estado en transito(*transient*) para simular los efectos del escenario en el acuífero durante el tiempo de planeación, que son 20 años, y después en estado estable (*steady*), para dar una aproximación de los efectos a largo término. La salida resultante puede ser procesada y vista en el modo de “Análisis de Escenarios”.

El intercambio de información entre el SSD y Modflow es estático; el SSD funciona como una interfaz gráfica a ModFlow, quien modifica los archivos de entrada de Modflow, ejecuta el programa y muestra los resultados.

5.4.2 Entrada-Salida

Entrada del SSD al modelo de simulación de Modflow

El modelo de simulación de aguas subterráneas recibe entrada del SSD en términos de recarga y extracción. Esto significa, que por cada escenario que es generado, también se genera un nuevo paquete

de archivos de Modflow. Actualmente la recarga y la extracción son los únicos parámetros del modelo de Modflow que pueden ser cambiados dentro del SSD.

Salida de Modflow a la interfaz del SSD

La salida provista por Modflow al SSD incluye las siguientes variables:

Geometría

Para la geometría del acuífero debe haber compatibilidad entre el modelo numérico y el SSD, incluso si:

- i) En muchos casos el modelo puede no incluir la extensión completa del acuífero; y
- ii) Los límites administrativos del acuífero relevante para la especificación de la extracción de pozos puede ser muy diferente de los límites hidrogeológicos.

La extensión del acuífero profundo es tomada automáticamente del modelo, derivado de las células activas de éste a cierta profundidad especificada por el operador. La extensión de los acuíferos someros tiene que ser dibujada manualmente con la ayuda de que debe estar basado en las especificaciones de parámetros hidráulicos dentro del modelo (básicamente conductividad hidráulica, que marca las extensiones de los acuitardos). Para la diferenciación vertical de diversas capas del acuífero, pueden ser cargados por el operador una imagen de la intersección (*cross section*) hidrogeológica y la geometría del modelo.

Tiempos y Nivel promedios de aguas subterráneas y abatimiento en áreas específicas y a profundidades especificadas.

Los procesos de aguas subterráneas como extracción, recarga, abatimiento, entre otros, están sujetos a fuertes fluctuaciones y la respuesta del acuífero implica retrasos de duración variable. Para evitar complicaciones, sólo los efectos a largo plazo de las decisiones pueden ser modelados y evaluados por el SSD.

El horizonte de planeación dentro del SSD es de 20 años, lo que significa que a diferentes tiempos durante esos 20 años se pueden implementar distintas medidas en una base anual (es decir, añadir pozos o extensiones de crecimiento urbano). La ejecución de Modflow provee los efectos de las medidas de administración en esos 20 años. Aun así, si una gran cantidad de pozos son añadidos en el año 19, sus efectos en el abatimiento difícilmente pueden ser estimados un año después.

Por ende, para simular los efectos a largo plazo (relevante especialmente en los niveles del acuífero y la disminución de la abstracción, debido a la sequía de pozos) se ejecuta otra corrida del modelo, con un tiempo de simulación de 40 años.

5.4.3 Estructura de archivos:

Modflow trabaja con “paquetes” o “módulos”. Esto significa que los diferentes parámetros se guardan en diferentes archivos. Así se facilita la lectura y manipulación de los datos.

El SSD tiene que leer los siguientes archivos:

.**dis**: contiene la geometría de las celdas, el número y longitud de los periodos de simulación y tiempo.

.**ba6**: las cargas iniciales de este archivo se usan para calcular el abatimiento promedio; el arreglo IBOUND se usa para identificar celdas activas y generar la malla con la localización del acuífero profundo.

.**bcf**: se requiere la conductividad hidráulica de cada celda para asignar abstracción de pozos a capas específicas.

.**hed**: contiene la información de las cargas hidráulicas de todas las celdas del modelo y periodos de stress. Se calcula un promedio de las cargas hidráulicas para capas específicas que son escogidas por el operador y representan el acuífero somero, intermedio y profundo. Se generan configuraciones para áreas de interés específicas. El archivo también provee la información sobre qué celdas están secas, lo cual es usado para los cálculos de la abstracción de pozos.

.**lst**: contiene un resumen de todas las entradas, cálculos y ciertas salidas del modelo. El presupuesto (*budget*) de aguas subterráneas acumulativo del último paso de tiempo de cada periodo de stress se usas para estimar la recarga regional comparando flujos laterales de entrada y salida, además de proveer valores de comparación para la estimación de la abstracción total de pozos, así como de la recarga artificial y de montaña.

Los siguientes archivos deben ser leídos y modificados:

.**oc**: contiene las especificaciones de salida. El archivo .**oc** original será modificado para asegurarse que sólo los parámetros requeridos son impresos al archivo .**lst** y guardado en el archivo .**hed**.

.**wel**: contiene las especificaciones de los pozos: renglón, columna, capa y radio de abstracción. Los pozos añadidos con el SSD se escriben directamente a este archivo. Además, un archivo adicional con todos los pozos se guarda, puesto que Modflow no lleva la cuenta del número real de pozos. La recarga artificial por inyección y de montaña tienen que ser puestos como pozos de inyección.

.**rch**: contiene el arreglo con las recargas de las aguas subterráneas de la primera capa de celdas activas para todos los periodos de *stress* predeterminados.

5.5 Análisis de decisiones multicriterio: (ADMC)

El objetivo de ADCM es clasificar diferentes alternativas de acuerdo a múltiples criterios. Además se construye una matriz de decisión y se llena con el desempeño de las alternativas disponibles con base en la importancia de los criterios. Cada alternativa se evalúa calificándola en cada criterio, se agregan esos puntajes y después se comparan los puntajes de cada alternativa.

El módulo ADCM dentro del SSD se basa en otros ADCM y consta de los siguientes pasos:

Matriz de Análisis:

El usuario escoge los escenarios que quiere comparar y los indicadores que serán usados. Estos indicadores tienen una jerarquía de tres niveles:

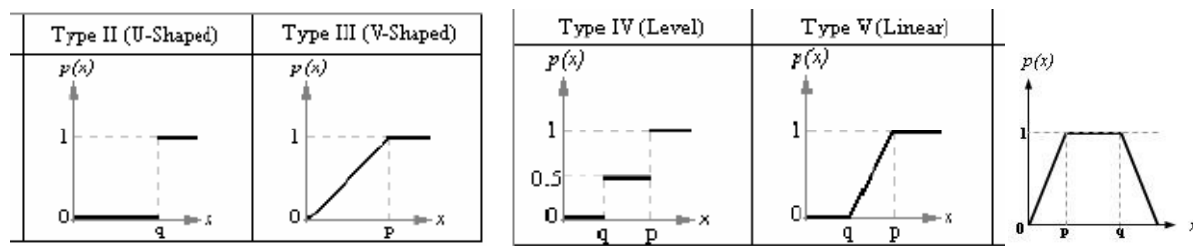
Dimensiones: representan las facetas generales del problema (aguas subterráneas, económicos, social, ambiental, eficiencia, entre otros).

Objetivos: Están dentro de las dimensiones, representan las metas del manejo del agua.

Criterios: Cada objetivo puede tener sus propios criterios, pero al menos un criterio debe escogerse por cada objetivo.

Funciones de preferencia:

Los valores de las funciones se usan para traducir los indicadores de desempeño a valores entre 0 y 1 (desempeño relativo). La función usada para traducir los valores se elige de entre una selección de cinco funciones, cuatro de ellas de las funciones estándar de PROMETHEE propuesto por Brans [2], donde el usuario escoge los parámetros p y q , así como el valor mínimo y máximo; además indica si el objetivo es maximizar, minimizar u optimizar (para este caso sólo puede usarse la 5ª función).



Pesos:

Los puntajes finales en la matriz de decisión se generan asignando un peso a cada criterio y multiplicando su desempeño relativo por ese peso. El peso es un valor numérico entre 0 y 100. Los pesos se normalizan para sumar 100 automáticamente antes de que el proceso empiece.

La asignación de pesos se realiza de manera jerárquica: primero los objetivos tienen que ponderarse (sumando 100) y después el criterio se pesa de acuerdo a su importancia dentro de cada objetivo.

Regla de decisión:

El mecanismo de simple adición de pesos (*Simple Additive Weighting*) fue escogido por su claridad y simplicidad. Así, los puntajes de la matriz de decisión se suman para cada alternativa, el cual da el puntaje total y provee la base para calificar las alternativas.

6. Tipos de usuario:

En el sistema hay tres tipos de usuarios:

Operador:

Es el usuario experto, él puede modificar los valores por omisión del modelo, cargar mapas y modelo de Modflow; los cambios que hace son sobre los valores del programa y los del escenario por omisión. Este usuario requiere una contraseña para poder acceder.

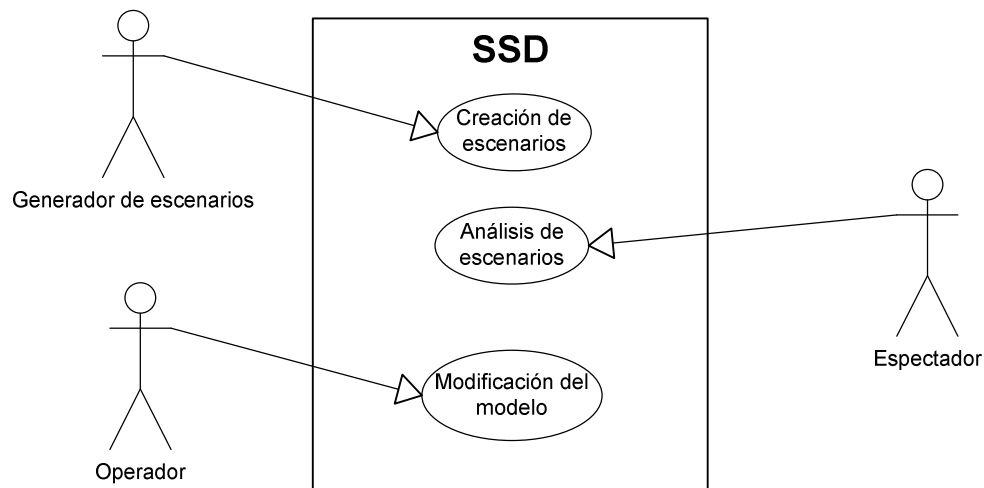
Generador de escenarios:

Este usuario no puede modificar los valores del sistema ni los del escenario por omisión; sin embargo, puede crear escenarios (los cuales copian los valores del escenario por omisión) y modificar las variables de ese escenario.

Espectador:

Este usuario no puede modificar nada, simplemente puede ver los escenarios ya generados, incluyendo el escenario por omisión y ver los resultados de la simulación, tanto en modo *steady* como *transient*.

Estos usuarios no son excluyentes; el operador puede entrar como usuario espectador o generador de escenarios en caso de querer crear escenarios que no concuerden con la realidad o puede entrar como espectador para ver los resultados. El espectador puede generar escenarios y viceversa; el único protegido es el usuario operador que requiere contraseña para poder acceder, ya que él es el único que puede modificar variables del sistema. En la gráfica 2 se muestran los casos de uso del sistema.



Gráfica 2: Casos de uso

7. Niveles del sistema:

El sistema se divide en cuatro niveles:

Nivel 1:

Este nivel consta de las pantallas del sistema relacionadas con los datos generales de los escenarios y es aquí donde el operador carga el modelo de Modflow, los mapas e indica las coordenadas de inicio y fin del modelo.

Nivel 2:

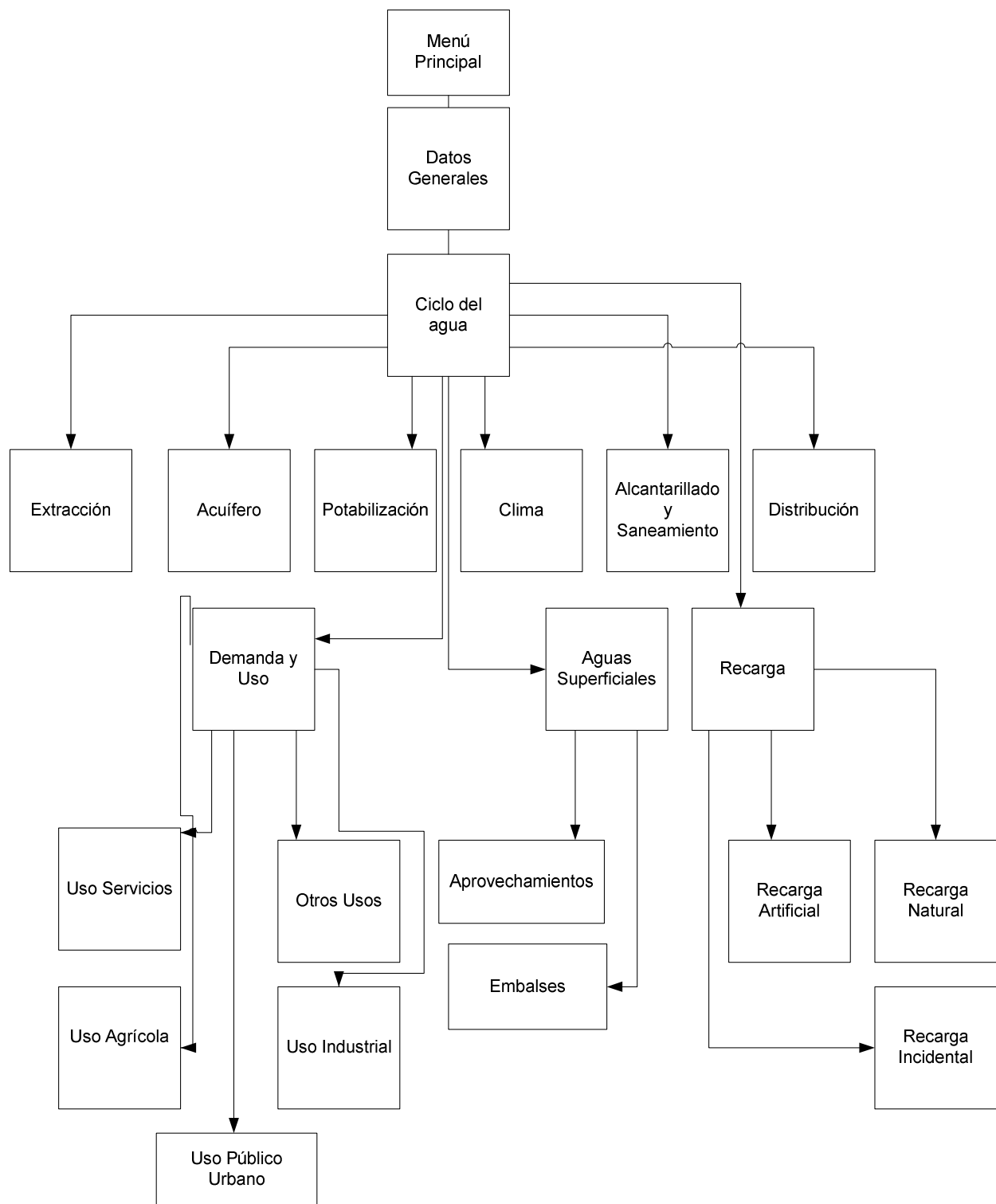
Este nivel contiene las pantallas con el ciclo completo de agua urbana y así constituye la síntesis e integración de todos los subcomponentes del sistema. Se despliega la cantidad de agua que fluye entre los diferentes subcomponentes, como salida de los cálculos más detallados en cada una de ellas. Los diferentes componentes de la imagen del ciclo de agua sirven como liga para entrar al nivel 3.

Niveles 3 y 4:

El Nivel 3 engloba los 9 módulos que constituyen las partes del ciclo de agua:

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| - <i>Demanda y Uso</i> | - <i>Potabilización</i> |
| - <i>Alcantarillado y Saneamiento</i> | - <i>Recarga</i> |
| - <i>Distribución</i> | - <i>Extracción</i> |
| - <i>Clima</i> | - <i>Acuífero</i> |
| - <i>Agua superficial</i> | |

La mayor funcionalidad del sistema recae en este nivel, ya que es aquí donde se especifican todas las variables de entrada y se presentan los resultados detallados de cada escenario. El nivel 4 existe para todos aquellos módulos que se tenían que dividir todavía más para llegar a mayor nivel de detalle (por ejemplo, Recarga natural y artificial, Demanda agrícola y urbana). Las pantallas son diferentes con base en el tipo de usuario usando el sistema. En la Gráfica 3 se pueden ver los diferentes niveles del sistema.



Gráfica 3: Niveles del sistema.

8. Descripción de servicios posibles:

La funcionalidad del sistema está dividida en nueve módulos, cada uno provee varios servicios al usuario; a continuación se describen éstos y su principal función:

Demanda y Uso:

Crear y modificar zonas de demanda, modificar población y crecimiento poblacional, políticas agropecuarias, crecimiento industrial, porcentajes de uso y reuso , así como el consumo de agua en sus diferentes tipos de uso.

Alcantarillado y tratamiento:

Agregar y modificar plantas de tratamiento y coeficientes de fugas en la red de drenaje.

Distribución:

Pérdidas de agua potable.

Clima:

Modificar datos del clima (evaporación y precipitación, entre otros).

Agua superficial:

Agregar y modificar presas o aprovechamientos de agua superficial.

Potabilización:

Agregar o modificar plantas de potabilización.

Recarga:

Modificar áreas y coeficientes de recargas. Incluye la recarga artificial.

Extracción:

Agregar y modificar volúmenes de extracción y ubicación de pozos.

Acuífero:

Vista principal de datos de salida.

Pre-procesamiento de datos (especificar zonas y profundidades de interés).

Configuración y evolución del abatimiento del acuífero.

9. Conclusiones:

Se crearon clases para el manejo de los archivos usados por Modflow y para el manejo de las estructuras usadas en el sistema, así como clases auxiliares de lectura de datos, lo cual facilita la creación de nuevas clases para el manejo de archivos. También se crearon clases auxiliares para la creación de pantallas del sistema, lo cual ayuda a la creación de nuevas pantallas.

En general se creó un SSD base, el cual se puede ampliar y extender fácilmente, en parte por la forma en que se diseñó y en parte por las herramientas proporcionadas al desarrollador.

El proceso de desarrollo excedió el tiempo planeado y desafortunadamente la versión actual es solo una versión preliminar de lo que se espera sea el sistema.

Faltan pruebas con usuarios finales para poder obtener retroalimentación y poder mejorar esta herramienta. Esta versión es la “1.0”, el punto de inicio, y se espera ir mejorando el sistema con base en la retroalimentación de sus usuarios.

En un futuro se necesitarán leer y modificar más archivos de ModFlow, así como ser menos restrictivo con el formato usado para los datos de entrada. Se anexarán nuevos módulos y nuevas funcionalidades. Actualmente tenemos nuevos módulos en construcción no mencionados en este reporte y, en base a la retroalimentación, se anexarán todavía más módulos o más funcionalidades con base en las necesidades de los usuarios finales.

Este sistema, aunque pensado para uso general, se aplicó como base al caso de estudio del Estado de Michoacán; se necesitan más pruebas y estudios para evaluar su transferibilidad y aplicabilidad a otros lugares.

10. Limitantes del sistema actual:

Tiempo:

Por ahora la simulación sólo puede ser ejecutada a 20 años o a 40; en este último caso se trata de simular los efectos a largo plazo.

Modelo de Modflow:

Actualmente se imponen ciertas restricciones sobre el modelo, las cuales se indican en las pantallas correspondientes del sistema; en una versión futura se espera poder eliminar esas restricciones.

Bibliografía

- [1] Andreu J., Solera A., Paredes J. (1991): *Decision Support Systems for integrated Water Resources Planning and Management*. (www.nornet.oulu.fi/noriba/finlan.pdf), consultada en noviembre del 2007.
- [2] Brans, J. P., Vincke P., Mareschal, B. (1986). "How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method." *European Journal of Operational Research* 24: 228-238.
- [3] Fedra K. (2005): *Water Resources Simulation and Optimization: a web based approach. Proceedings from IASTED/SMO 2005*, Oranjestad, Aruba, August 2005. (<http://www.ess.co.at/WATERWARE/>), consultada en octubre del 2007.
- [4] Gaiser T., Printz A., Stahr K. (2005): *RIVERTWIN – development of a regional model for integrated management of water resources*. RIVERTWIN – workshop proceedings, 2005. (<http://www.rivertwin.de/Publications&Reports.htm>), consultada en octubre del 2007.
- [5] Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model— User Guide to Modularization Concepts and the Groundwater Flow Process*. U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Open-File Report 00-92. Virginia 2000.
- [6] Hersh M.A. (1999). *Sustainable Decision Making: The Role of Decision Support Systems*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews* Vol. 29 (No.3): 395-409.
- [7] IRESO A., MAKROPOULOS C., MAKSIMOVIC C. (2006): *Water Resources Modelling under Data Scarcity: Coupling MIKE BASIN and ASM Groundwater Model*. *Water Resources Management* (2006) 20: 567–590
- [8] Letcher, R.A. (2005): *Implementation Of A Water Allocation Decision Support System In The Namoi and Gwydir Valleys*. (<http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/letcher.pdf>) , consultada en septiembre del 2007.
- [9] Malczewski J. (1997). *NCGIA Core Curriculum in GIScience, Unit 127: Spatial Decision Support Systems*. (<http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u127/> , consultada en octubre del 2007.
- [10] Maniezzo V., Mendes I., Paruccini M. (1991): *Decision Support for Siting Problems*. (<http://www.csr.unibo.it/~maniezzo/ijdss.ps>) , consultada en noviembre del 2007.
- [11] McLeod R. (1998): *Management Information Systems - Chapter 14*, Online-Course University of Illinois at Chicago, copyright Prentice-Hall Inc. (<http://www.uic.edu/classes/ids/ids531/mclppt/chap14.ppt#256,1>, Chapter 14) , consultada en septiembre del 2007.
- [12] Nauta T.A., Bongco A.E., Santos-Borja A.C. (2003): *Set-up of a decision support system to support sustainable development of the Laguna de Bay, Philippines*. *Marine Pollution Bulletin* 47, no.1-6 (2003) p. 211-218

[13] Paruccini M. (ed.) (1994) "*Applying Multiple Criteria Aid for Decision to Environmental Management*", Kluwer, Dordrecht.

[14] PNH, 2002-2006. *Programa Nacional Hidráulico*. (<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>), consultada en enero del 2008.

[15] Sieker H. Bandermann S., Schröter K., Ostrowski M. et al. (2007): *Development of a decision support system for integrated water resources management in intensively used small watersheds*. (www.Wsm300.de), consultada en octubre del 2007.

[16] Torregrosa M.L. (2006): *Gestión Integrada, Descentralizada y con Participación social del agua en México. Un proceso en Construcción*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Instituto de Investigaciones Sociales UNAM. (energia.guanajuato.gob.mx/gaceta/Gacetaideas/Archivos/12042006_GESTION_INTEG_DESCENT_PART_SOCIAL_AGUA.pdf), consultada en septiembre del 2007.

[17] Turban, E. (1990). *Decision Support and Expert Systems*. New York: Macmillan.

[18] Zhang Y., Hawkins D., Zeng W. (2005): *The Framework of GIS-based Decision Support Systems (DSS) for Water Resources Management at the Flint River Basin*. Proceedings of 2005 Georgia Water Resources Conference, April 25-27, 2005, University of Georgia, Kathryn, J. Hatcher, editor, Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, Georgia.