

# APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO PARA FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA REGIÓN DE URABÁ

*Teresita Betancur V., María V. Vélez O*

*Posgrado Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional, Sede Medellín*

*Jorge I. Restrepo M. (Florida Atlantic University)*

## RESUMEN

Un modelo es una herramienta de diseño que permite representar la realidad de una manera simplificada y que posee un valor predictivo útil para la utilización del recurso.

Para el adecuado manejo de un recurso natural como el agua subterránea en el Urabá Antioqueño se requiere contar con el apoyo de herramientas que orienten la toma de decisiones para una óptima utilización

Para realizar un proyecto de modelamiento numérico, la mayoría de las veces los datos disponibles no son suficientes, por lo tanto se requiere adoptar estrategias y metodologías que permitan utilizar la información existente: se practican procedimientos de interpolación geoestadística, se hacen suposiciones con criterio técnico y se extienden datos desde zonas conocidas haciendo consideraciones apropiadas.

Para el caso concreto del modelamiento de los acuíferos de Urabá, se obtienen resultados satisfactorios, en la medida en que logra reproducirse la realidad de la forma aproximada y simular escenarios generales con relación a la utilización del recurso agua.

## ABSTRACT

The groundwater in Antioquia's Urabá region constitutes a main source of supply, both for human consumption, for irrigation and for the benefit of the region's plantations, mainly the banana.

For the adequate administration of this resource, Corpouraba requires to count on the support of the adequate tools that orientate the decision making process concerning the exploitation and protection of the groundwater, which is exposed not only to an over exploitation that menaces to finish it, but also to the pollution risk implied by its proximity to the coast and implied by its localization inside a zone exposed to an intense anthropical activity represented in the application of fertilizers and pesticides, the disposal of residual water, the deforestation, etc.

The implementation of a numerical model, supported on a geographic information system, allows the user to simulate different settings that represent different forms of groundwater uses inside the Urabá banana's area and examine the effects that these could produce over the deepest aquiferous, which is the one that has the most important water reserves of the region.

Besides, through an analysis of sensibility, the numerical model enables to test the quality of the hidrogeological information that represents the current knowledge of the aquiferous, and as a result it permits to orientate its efforts in getting new data in a more efficient way, and this permits to update and improve the model itself, and consequently to make the results more reliable and finally to implement more sounded exploitation policies, could be adopted.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la zona bananera de la región de Urabá, al noroccidente de Colombia (Figura 1), el agua subterránea representa la primera fuente de abastecimiento del líquido para los sectores agrícola, industrial y doméstico. Los acuíferos de la región vienen siendo explotados sin ningún control desde hace varios años a través de aljibes y pozos profundos.

Para el adecuado manejo de este recurso se requiere contar con el apoyo de herramientas adecuadas que orienten la toma de decisiones frente a la forma de explotación y protección del agua subterránea.

Los alcances de un proyecto de modelamiento de aguas subterráneas dependen básicamente de la información con que se cuente y la confiabilidad de esta es función del proceso de recolección de datos, la calidad de los registros y la representatividad de ellos (Betancur, Vélez y Restrepo, 1996).

La mayoría de las veces, la información disponible no es suficiente y a veces se presentan casos en los cuales para algunas zonas o algunos tópicos específicos no existe ningún registro. Frente a situaciones como ésta se requiere desarrollar estrategias para la recolección de nuevos datos e implementar metodologías para el análisis y utilización de los existentes.

Para el caso concreto del manejo óptimo de un recurso natural como el agua subterránea, es necesario contar con herramientas de apoyo que permitan predecir con un grado de confiabilidad aceptable, los efectos de las acciones ejecutadas sobre el sistema y en consecuencia tomar decisiones adecuadas. Un modelo numérico en estos casos puede constituir una herramienta ideal.

A partir de la ley 99 de 1993, se le asigna a la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo de Urabá, CORPOURABA, la función de proteger y controlar el uso de las fuentes de

agua de la zona. Desde entonces, se inicia la ejecución de una serie de estudios tendientes a contar con una evaluación hidrogeológica de la región y a desarrollar una herramienta de apoyo para la toma de decisiones relacionados con el adecuado aprovechamiento del agua subterránea en la región.

El primero de estos trabajos fue llevado a cabo por el Instituto de Investigaciones en Geología Minería y Química, INGEOMINAS, entre los años 1993 y 1995. En este estudio se obtiene una descripción de la geología de la región; se realiza un inventario de puntos de agua donde se recoge información relacionada con diseño y caudal de explotación para pozos y aljibes y se obtiene una nivelación piezométrica; se practican algunas pruebas de bombeo con el propósito de determinar los principales parámetros hidráulicos de las unidades acuíferas; se identifican zonas de recarga y se presenta una evaluación preliminar de reservas.

Partiendo de los resultados del estudio anterior se propone la elaboración de un modelo numérico para la simulación del flujo de aguas subterráneas, mediante la interfase entre el Sistema de Información Geográfico ILWIS y el programa de modelamiento MODFLOW (Betancur, 1996). Las exigencias para el desarrollo de esta labor, en cuanto a calidad y cantidad de información, son muy estrictas y una vez evaluados los datos disponibles se llega a la conclusión de que son insuficientes y en algunos casos inconsistentes. Bajo estas circunstancias se plantean dos salidas, no realizar el modelo, ó realizarlo con la información disponible.

La realización de un modelo con escasez de información, se justifica bajo los siguientes argumentos (Wang & Anderson, 1982):

1. Con base en sus resultados se definen estrategias para la adquisición de nuevos datos que permitan actualizar y mejorar el mismo modelo.

2. Es posible obtener resultados satisfactorios mediante simulaciones predictivas, para situaciones generales.

3. Siempre se logra adquirir una mejor aproximación al conocimiento del sistema si existe un modelo, aunque este sea regular, que si no existe ningún modelo.

## 2. MODELO CONCEPTUAL

El diseño de un modelo numérico para flujo de aguas subterráneas se inicia con la formulación de un modelo conceptual del sistema y a partir de este, se sintetiza la información relacionada con las unidades hidroestratigráficas y sus parámetros hidrogeológicos, balance hídrico y sistema de flujo (Anderson & Woessener, 1991). Con el modelo conceptual definido se procede al diseño de la malla, se definen fronteras, aportes y salidas de agua, se establecen condiciones de simulación, se ejecuta y calibra el modelo, para finalmente verificarlo y realizar simulaciones predictivas.

### 2.1 Modelo conceptual de los acuíferos de Urabá

La zona bananera del Urabá Antioqueño se caracteriza por la presencia de una topografía suave a ligeramente ondulada con alturas máximas de 50 metros sobre el nivel del mar. Está limitada al oriente por la Serranía de Abibe, al noroccidente por El Golfo de Urabá y es drenada en dirección preferencial oeste-este por numerosas fuentes superficiales de agua (Figura 1).

Dentro del área de estudio afloran rocas de ambiente marino y continental, pertenecientes a unidades geológicas terciarias (38 a 1.8 millones de años) y depósitos aluviales cuaternarios (1,8 millones de años, hasta el presente) (Figura 2a).

La secuencia estratigráfica que se describe en la Figura 3b muestra, de base a techo, la presencia de una unidad inferior, denominada informal-

mente como T1, y que corresponde a una intercalación de areniscas, lodolitas y arcillolitas. A continuación está una unidad terciaria designada como T2, subdividida en tres subunidades: la inferior, T2A, una interestratificación de areniscas de grano fino y medio; la intermedia T2B, con areniscas conglomeráticas y delgadas láminas de lodolitas y la superior T2C, con láminas de lodolitas. Sobre estas se encuentran los depósitos aluviales del Cuaternario, designados como Qal. La intensa actividad tectónica de la región han fallado y plegado las unidades terciarias.

Basado en las características geológicas (litología, granulometría, estructuras) de las diferentes formaciones del área de estudio, teniendo en cuenta sus propiedades geofísicas (variación de la resistividad eléctrica) e hidráulicas (obtenidas a partir de pruebas de bombeo) y complementando con los datos que definen su distribución espacial y en su superficie y la recarga por precipitación, el INGEOMINAS (1995) propone la siguiente clasificación de las unidades hidroestratigráficas para la región de Urabá (Figura 2b):

#### 1. Depósitos de Llanura Aluvial (Qal)

Constituye el acuífero más superficial (acuífero libre). Presenta un espesor variable con máximo 30 m. Los valores de resistividad eléctrica están entre 17 y 30 Ohm.m., disminuyendo hacia el golfo donde la cercanía a la interfase agua dulce - agua salada, provoca una disminución hasta 4 Ohm.m.

#### 2. Unidad T2C

Corresponde a la subunidad superior de la unidad geológica T2, aflora en superficie al sureste del área de estudio y hacia el norte como una franja delgada en dirección sur-norte. En profundidad infrayace a la unidad Qal y se encuentra por encima de la unidad T2B. Los espesores de esta unidad varían entre 5 y 70 m. Por sus características hidro-geológicas esta unidad se clasifica como un acuitardo.

### 3. Unidad T2B

Aflora en superficie al oriente del área de estudio y corresponde a la subunidad media de la unidad geológica T2.

En profundidad infrayace a la unidad T2C y suprayace a la T2A. Este conjunto presenta dentro de la llanura aluvial espesores que varían entre 20 y 190 m. La Unidad T2B constituye un acuífero confinado.

### 4. Unidades T2A y T1

Se clasifican como unidades de importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula y corresponden a la subunidad inferior de la unidad geológica T2 y a la unidad T1 respectivamente.

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidroestratigráficas T2A y T2B se obtienen a partir de la información recopilada durante la realización de 27 pruebas de bombeo. Para la unidad Qal no se conocen dichos parámetros. Los patrones de flujo para las unidades T2B y T2C pueden definirse a partir de los resultados de la nivelación de pozos con base en los cuales se construyen los mapas de líneas isopiezas. En general se observa una tendencia de flujo en sentido sur-norte, diferenciándose tres zonas, una con los niveles más altos (38 m.s.n.m.) hacia el sur de Chigorodó y que se extiende a lo largo del piedemonte. Las otras dos se manifiestan como depresiones entre Turbo y Apartado y al noroeste de Carepa.

Este sistema de flujo permite definir claramente la zona de recarga para T2B, que se ubica al este en la Serranía de Abibe, correspondiendo al área de afloramiento de las unidades T2B y T2C (Figura 2a).

## 3. EVALUACIÓN Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

La información disponible para la implementación del modelamiento de flujo de aguas subterráneas en Urabá se recolecta y se somete a un proceso de evaluación con base en el cual se decide el manejo y utilización que se hace de ella y se establecen los criterios para ajustarla de manera que responda a las exigencias mínimas del modelo a implementar.

La serie de datos básicos necesarios para el modelo son los siguientes:

- Mapa hidrogeológico.
- Mapa topográfico.
- Mapa de espesores de la unidad acuífera Qal.
- Mapa de la base de la unidad T2C.
- Mapa de espesores de la unidad acuífera T2B.
- Mapa de recarga.
- Mapa de isolíneas de conductividad hidráulica para cada una de las unidades hidroestratigráficas.
- Mapas de isolíneas de niveles piezométricos, para diferentes estaciones en el año.
- Mapas de isolíneas de nivel freático.
- Diseño de pozos profundos.
- Caudales de explotación en cada pozos para diferentes estaciones en el año.
- Distribución espacial de coeficientes de almacenamiento.
- Características físicas e hidráulicas de las fuentes de agua superficiales.
- Mapas de uso del suelo.

Cuando se define la extensión del área a modelar se busca que ella esté enmarcada claramente dentro de unas fronteras físicas o hidráulicas y si la información disponible no cubre esa misma extensión, es necesario definir una serie de mecanismos que permitan hacer extrapolaciones de forma adecuada. Frente a la ausencia completa de algunos datos específicos pueden hacerse suposiciones apoyadas en la información existente. En otros casos esa falta de información no puede ser suplida por métodos indirectos y se presentaran limitaciones más

drásticas a los alcances del modelo; por otra parte es indispensable que toda la información existente sea consistente y clara para evitar, en lo posible, que se presenten confusiones.

Todos estos aspectos se tienen en cuenta para la implementación del modelo de Urabá, según se plantea enseguida.

### **3.1 Extrapolación de información a toda el área del modelo**

Para este estudio se tiene que extrapolar información, con el fin de cubrir toda el área del modelo y alcanzar el grado de detalle requeridos por el modelo numérico.

Para el mapa de isolíneas de la Unidad Acuífera del Cuaternario, la extrapolación se hace siguiendo la tendencias que tienen los contornos existentes y teniendo en cuenta, que por ser una unidad originada a partir de sedimentos aluviales, su espesor disminuye a medida que se alejan de la llanura aluvial.

El mapa de isolíneas que delimitan la base de la Unidad T2C se completa siguiendo la tendencia de los contornos conocidos.

Para el mapa de espesores de la unidad T2B, se tienen en consideración los efectos del tectonismo que la han afectado produciendo un plegamiento estrecho hacia el oriente y más suave al occidente; en consecuencia, se supone que los cambios de espesor en este último sentido no son tan drásticos y la tendencia en el aumento de espesores es lineal. Esta suposición concuerda con las tendencias de los espesores deducidas a partir de perfiles geoelectrónicos.

Los valores de conductividad hidráulica representan de manera conjunta las características de las unidades T2B y T2C, y no existe información para la unidad Qal. Se sabe que, en general, los valores de conductividad para T2B son casi siempre superiores a 10 m/día y que para T2C menores que ese valor. Con el fin de poder modelar ambas unidades, se construyen dos

mapas de isolíneas de conductividad hidráulica horizontal: para T2B, se adopta el mapa existente y para T2C se le asignan los mismos valores divididos entre 2, partiendo de valores que se encuentran en un rango esperado para esta unidad. La conductividad para Qal y la conductividad vertical para T2B y T2C se ajustan durante la etapa de calibración del modelo, apoyados, hasta donde sea posible, en criterios litológicos.

### **3.2 Información no existente y asumida con base en datos relacionados**

Con mapas topográficos a escala 1:25.000 no es posible obtener un buen grado de información para representar la superficie de una llanura aluvial como la que cubre el área de estudio ya que las curvas de nivel se relacionan cada 50 m. Si se supone que los drenajes que recorren la zona tienen pendiente lineal proporcional a su longitud, es posible obtener entre las cotas de 0 y 25 metros sobre el nivel del mar las coordenadas para las elevaciones de 5, 10, 15 y 20 m, y aplicar luego un método de interpolación geoestadística, como el Kriging para definir los contornos de las curvas de nivel.

Como no hay un levantamiento topográfico de los aljibes, no existe información acerca de la posición del nivel freático. Esta dificultad se soluciona así: a partir de un mapa de uso actual del suelo, teniendo en cuenta las características de los cultivos existentes, se considera el nivel de profundidad de sus raíces y de acuerdo con él, el nivel mínimo promedio al que debe haber agua. Para los diferentes periodos del año se asume que el nivel freático presenta el mismo comportamiento que los niveles piezométricos de las unidades T2B y T2C.

Para muchos de los pozos profundos en los cuales se explota el acuífero T2B, no se conocen ni diseño ni caudales de explotación. La asignación del volumen de agua extraída de cada uno se hace de acuerdo con el promedio establecido para cada uso principal que se le da al agua esto es: consumo doméstico, agricultura

o industria; en el caso en que no se conoce el diseño del pozo se asume que él penetra y capta completamente el acuífero.

### **3.3 Información que no existe y no se puede asumir**

La ausencia de información que permite fijar a los ríos y drenajes como condiciones de frontera dentro del área de estudio y el desconocimiento de las características de la naturaleza de sus lechos y de las propiedades hidráulicas de la unidad hidroestratigráfica Qal, obligan a buscar una solución que permita definir la relación de ellos con las unidades infrayacentes T2B y T2C. En este sentido, se decide proponer superficies de cabeza constante ajustadas a la distribución de las isolíneas de nivel freático.

### **3.4 Análisis de consistencia en la información**

Cuando se presenta inconsistencia en los datos, de manera que para un mismo elemento existe información incongruente, debe adoptarse un criterio para decidir cual es la información correcta. Estas inconsistencias están asociadas, la mayoría de las veces, a los procedimientos de interpolación escogidos para extender a toda el área la información obtenida a partir de unas cuantas estaciones de control.

En estos casos es conveniente recurrir a la fuente original, apoyarse en perfiles geoelectricos, en la información de geología superficial y registros de perforaciones, para practicar las correcciones del caso.

## **4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**

Una vez establecidos los objetivos para la utilización de un modelo de aguas subterráneas y definido el modelo conceptual del sistema, se escogen las dimensiones del dominio, se diseña la malla, se determinan las fronteras, los aportes y salidas de agua para el dominio así definido, se establecen las condiciones para la simulación

en estado transitorio, se ejecuta y calibra el modelo en estados permanente y transitorio, para finalmente verificarlo y realizar simulaciones predictivas.

### **4.1 Diseño del modelo**

Después de haber decidido la utilización de un modelo numérico en diferencias finitas, para definir el espaciamiento nodal, se tienen en cuenta las pendiente de las superficies freática y piezométricas, la variabilidad en las propiedades del acuífero y la distribución de las zonas de recarga y bombeo. Por lo general el espaciamiento vertical coincide con el espesor de las capas, salvo el caso en el que los cambios de cabezas sean muy abruptos y se decida dividir la capa en una o más. El tamaño del modelo y las capacidades del programa a utilizar también son factores que determinan el espaciamiento nodal (Anderson, & Woessner, 1991). Para el caso de Urabá se considera que con una representación de celdas cuadradas con 500 m. de lado cada una, se logran resultados adecuados. La malla sobrepuesta tiene entonces, 160 filas y 76 columnas (Figura 3a) y el espesor de cada celda corresponde con el de la unidad respectiva (Figura 3b).

El proceso de ingreso de información al modelo se apoya en operaciones de interfase entre el SIG ILWIS, en el cual se ejecuta un preprocesamiento de datos, y el programa para modelamiento de flujo de aguas subterráneas MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Software, 1995). A partir de la digitalización de una serie de mapas y su enlace con una base de datos espacial, se definen para el modelo numérico las condiciones de frontera, los valores de conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento, la recarga, los caudales de bombeo, pozos de observación y niveles freáticos y piezométricos.

Con en el mapa geológico se establecen las fronteras de no flujo, hacia donde afloran las unidades T2A y T1. Las fronteras occidental y sur del área se establecen con base en criterios

hidrológicos e hidráulicos y representan condiciones de flujo dependientes de los valores de cabezas piezométricas (General Head Boundry, GHB).

Para el modelamiento en estado permanente, se toman valores promedio anuales de todos los parámetros a considerar. Las condiciones para el modelamiento en estado transitorio se establecen de acuerdo con la información hidrológica disponible, definiéndose en consecuencia tres periodos de simulación para un año: Un periodo para el tiempo abril - agosto (150 días), el siguiente para septiembre - noviembre (90 días) y el último para diciembre - marzo (120 días).

#### 4.2 Calibración del modelo

A través de la calibración en estado permanente se busca, mediante una serie de ajustes, definir el valor de diferentes parámetros del modelo, de manera que se logren reproducir, dentro de un margen de tolerancia aceptable, las condiciones de cabezas piezométricas promedio. El proceso de calibración se inicia normalmente ajustando las condiciones de frontera y luego se continúa con los valores de conductividad hidráulica y si es necesario, con los valores estimados de la recarga.

En el caso de Urabá se definieron solamente dos tipos de condiciones de frontera: fronteras de no flujo, donde existen unidades geológicas impermeables y fronteras del tercer tipo GHB, como frontera hidrológica distante hacia el occidente y el sur del área de modelamiento. Según esto, la única posibilidad de calibración a lo largo de una frontera se da para el caso GHB.

Después de hacer algunos intentos ajustando la frontera GHB, se concluye que cada cambio que se haga, solo afecta la distribución de cabezas cerca a la misma frontera pero no hacia el centro del área del modelo, que es la zona de interés.

Mediante cambios en los valores de conductividad hidráulica para las distintas unidades hidroestratigráficas se busca una mejor respuesta del sistema a los intentos de calibración del modelo.

Si bien el acuífero Qal no puede modelarse, el hecho de que aporte agua a las unidades infra-yacentes obliga a que se establezca una conexión vertical entre ellos. Dado que para la Unidad cuaternaria no se cuenta con registros de conductividad, la asignación se hace mediante ensayo y error apoyados en criterios litológicos e hidráulicos (valores de permeabilidad según la granulometría).

A partir de cambios de magnitud en los valores de conductividad vertical empiezan a obtenerse variaciones considerables en la distribución de cabezas modeladas. Para las unidades T2B y T2C se hacen ajustes a los valores de conductividad vertical.

Con estas nuevas consideraciones y después de varias ejecuciones del modelo se logra reproducir de una manera general las tendencias promedio de las superficies piezométricas medias. Apoyados en los datos para 30 pozos de observación y graficando valores de cabezas observadas vs. calculadas (Figura 4a) se observa como todos los puntos caen dentro de un intervalo de confianza del 90%.

Para la ejecución del modelo en estado transitorio debe contarse además de las condiciones de frontera con unas condiciones iniciales. Estas se obtienen, de los resultado de la ejecución del modelo en estado permanente con la información correspondiente al primer periodo de modelamiento. Así se obtienen las cabezas piezométricas para el intervalo de tiempo abril - agosto.

En el estado transitorio debe contarse para cada periodo con datos correspondientes a caudales de explotación, recarga, condición de frontera GHB y nivel freático; con ajustes mínimos en los valores de coeficientes de almacenamiento y

conductividad hidráulica después de pocos intentos se alcanza la calibración.

En la Figura 4(b - d) se muestran los gráficos finalmente obtenidos con relación a los pozos de observación donde se observa que bajo la relación cabezas calculadas vs. observadas todos los puntos se encuentran dentro de un límite de confiabilidad del 90%.

#### 4.3 Análisis de sensibilidad

Los datos de entrada al modelo representados por los parámetros conductividad hidráulica, frontera GIIB, caudales de explotación a partir de pozos y recarga, son sometidos a un análisis de sensibilidad con el propósito de cuantificar los efectos de la incertidumbre asociada con esta información. En cada caso los valores para el modelo calibrado son multiplicados sucesivamente por 4, 2, 0.5, y 0.25.

Puede comprobarse que el modelo no es significativamente sensible a los cambios aplicados, con lo cual se adquiere confiabilidad para su aplicación en simulaciones predictivas.

### 5. RESULTADOS Y PREDICCIONES DEL MODELO

Con estos resultados es posible empezar a simular una serie de escenarios en los cuales los niveles de utilización del acuífero varían y observar los efectos que ello produce en el sistema.

Considerando una serie de situaciones hipotéticas dentro de las cuales la demanda de agua subterránea se duplica, y la recarga se ve disminuida, puede definirse una zona dentro de la cual se producirían abatimientos adicionales de un metro (Figura 5). Esta debe considerarse como una zona de especial atención en la que deben diseñarse medidas de protección.

### 6. CONCLUSIONES

1. Un modelo numérico para flujo de aguas subterráneas, constituye una valiosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones, en relación con el manejo adecuado de ese recurso natural.

2. A partir de un modelo numérico pueden simularse escenarios y predecir las respuestas de un sistema, frente a una serie de medidas que se implementen sobre él.

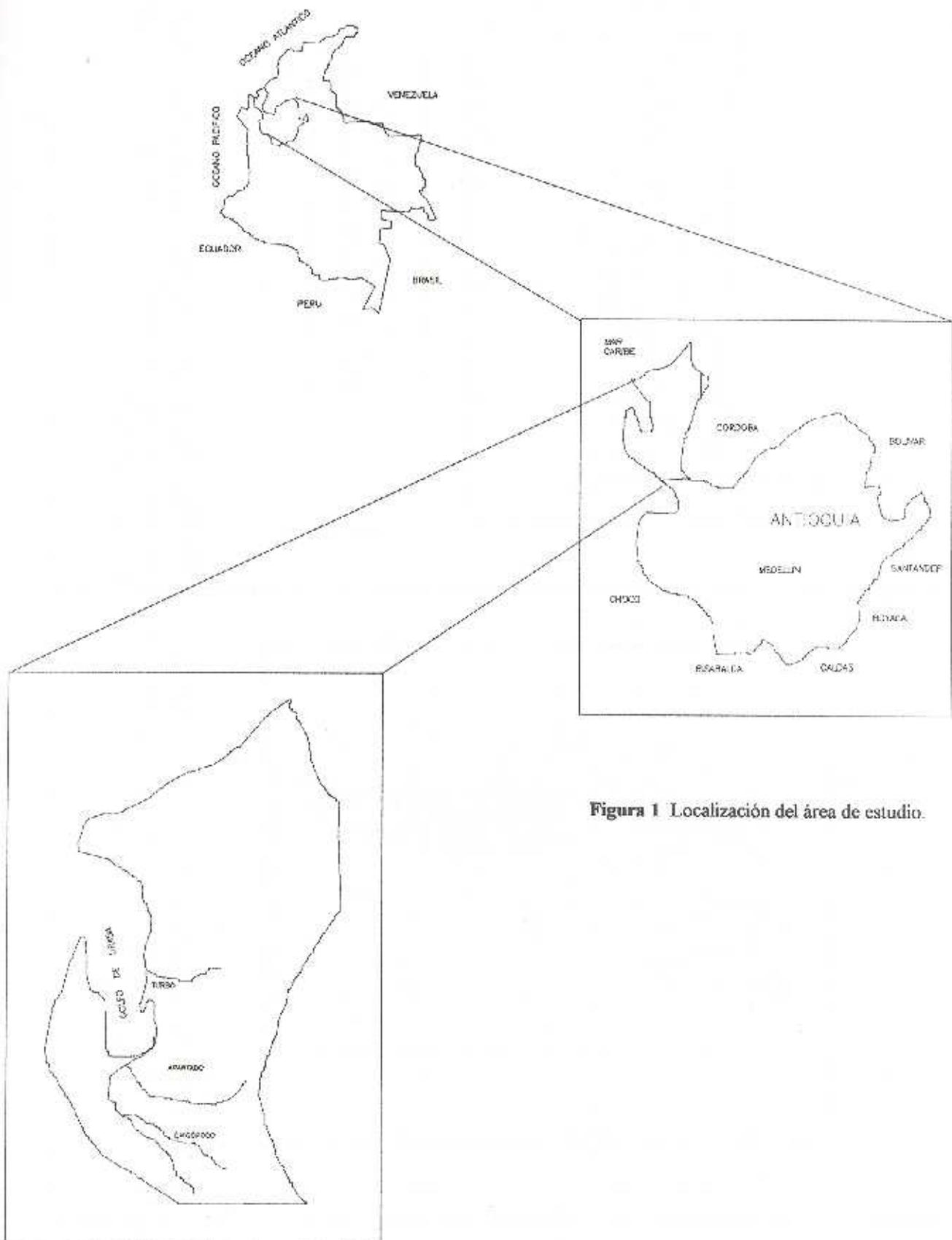
3. Los alcances de un proyecto de modelamiento de aguas subterráneas dependen básicamente de la calidad de la información con que se cuenta.

4. Frente a la escasez de información para implementar un modelo de flujo de aguas subterráneas, se requiere desarrollar estrategias para la recolección de nuevos datos e implementar metodologías para el análisis y utilización de los existentes.

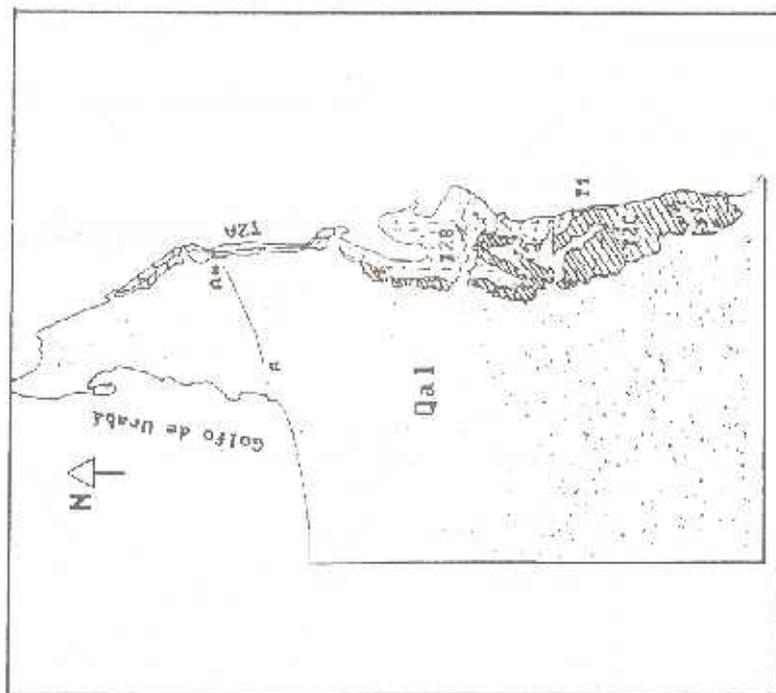
5. La implementación de un modelo con escasez de información, se justifica si se tiene en cuenta que con base en él se pueden definir estrategias para la adquisición de nuevos datos que permitan actualizar y mejorar el mismo modelo. Además, siempre se logra un mejor conocimiento del sistema si existe un modelo, aunque este sea regular, que si no existe ninguno.

6. El modelo de flujo de aguas subterráneas aplicado para los acuíferos de Urabá, a pesar de la escasez de información, logra reproducir las condiciones históricas, satisfactoriamente las pruebas de análisis de sensibilidad y puede ser aplicado para realizar algunas simulaciones predictivas de carácter general.

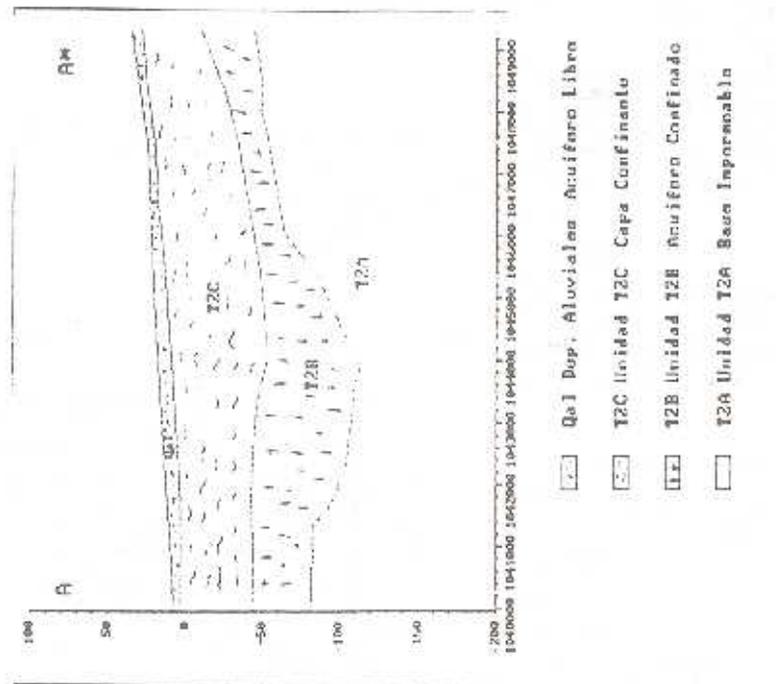
7. Los SIG. constituyen un apoyo al proceso de modelamiento numérico, principalmente durante las etapas de pre y post procesamiento de la información.



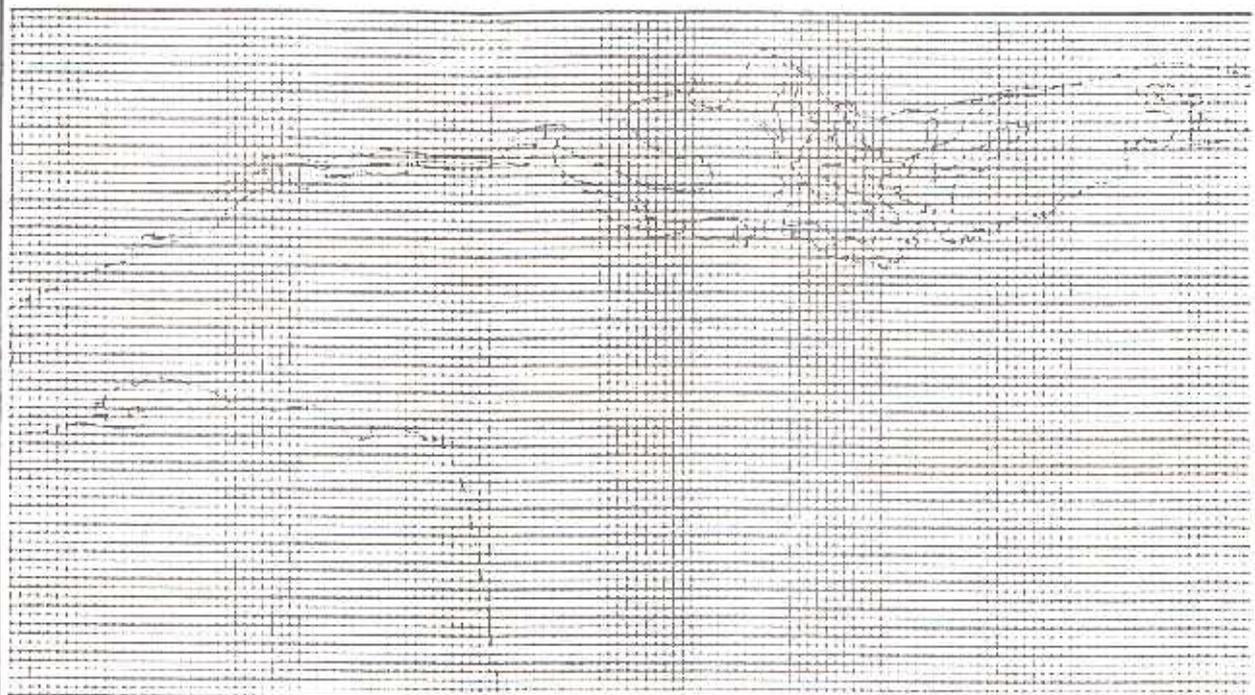
**Figura 1** Localización del área de estudio.



**FIGURA 2a.** Mapa Geológico de la Región de Urabá, Los sitios de afloramiento de las unidades T2B y T2C, representan la principal zona de recarga.



**FIGURA 2b.** Modelo Conceptual para la región de Urabá. Se establece la relación entre las Unidades Geológicas e Hidroestratigráficas.



a

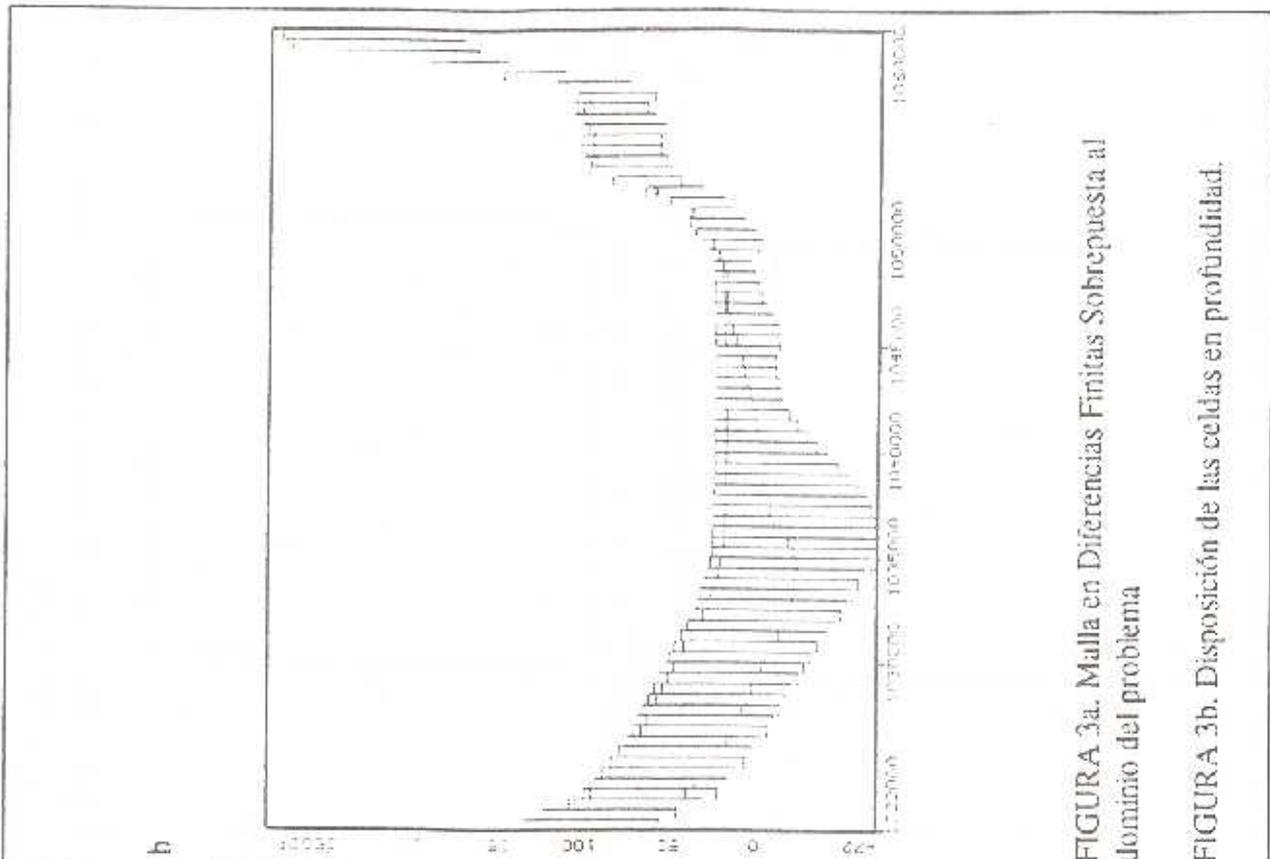
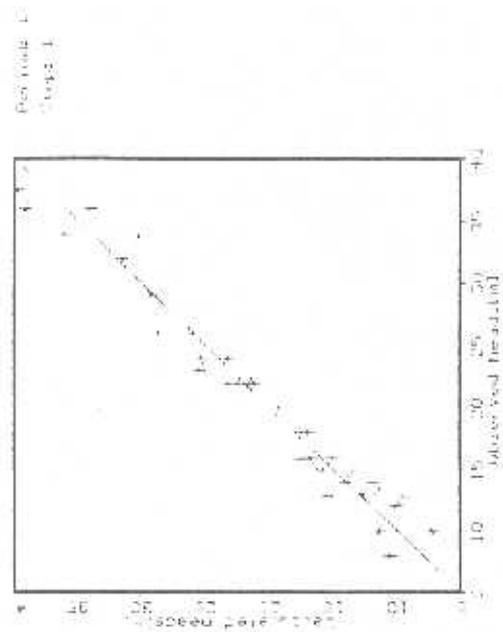
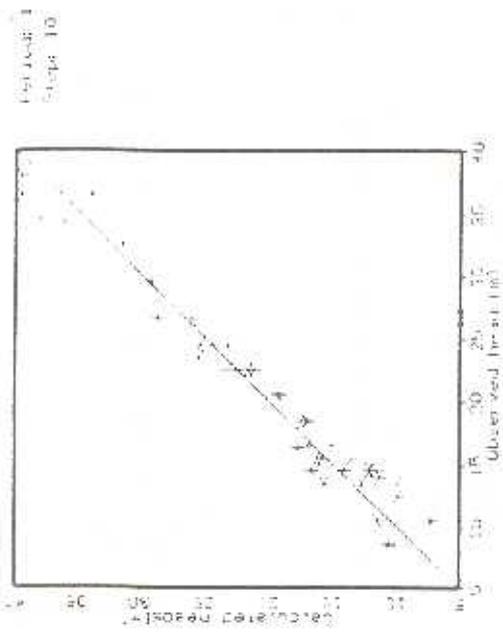


FIGURA 3a. Malla en Diferencias Finitas Sobrepuesta al dominio del problema

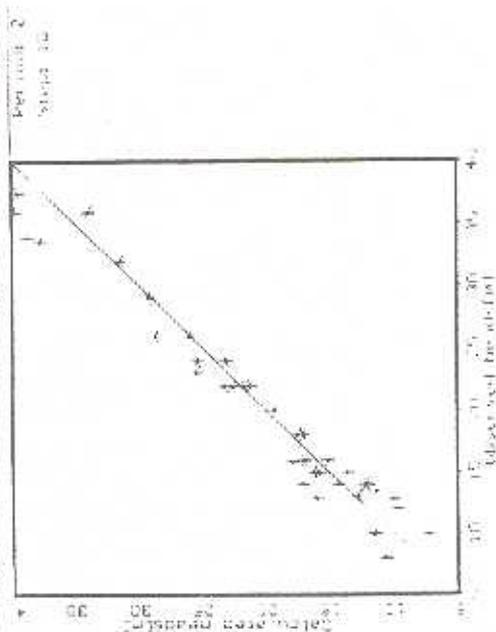
FIGURA 3b. Disposición de las celdas en profundidad.



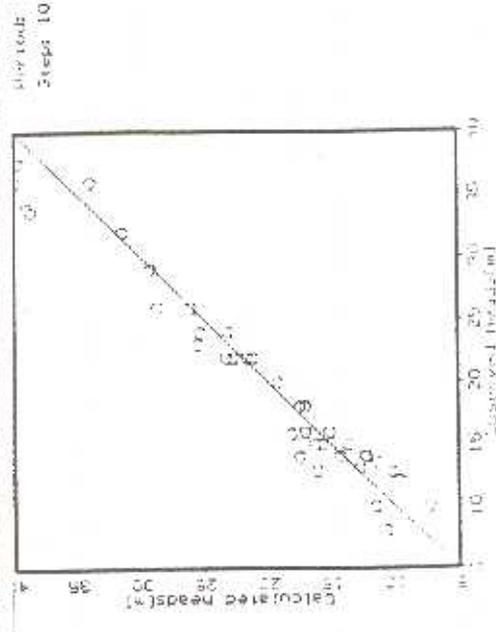
**FIGURA 4a.** Calibración en Estado Permanente



**FIGURA 4b.** Calibración en estado Transitorio. Periodo  
Abril - Agosto



**FIGURA 4c.** Calibración en Estado Transitorio. Periodo  
Septiembre - Noviembre



**FIGURA 4d.** Calibración en Estado Transitorio. Periodo  
Diciembre - Marzo

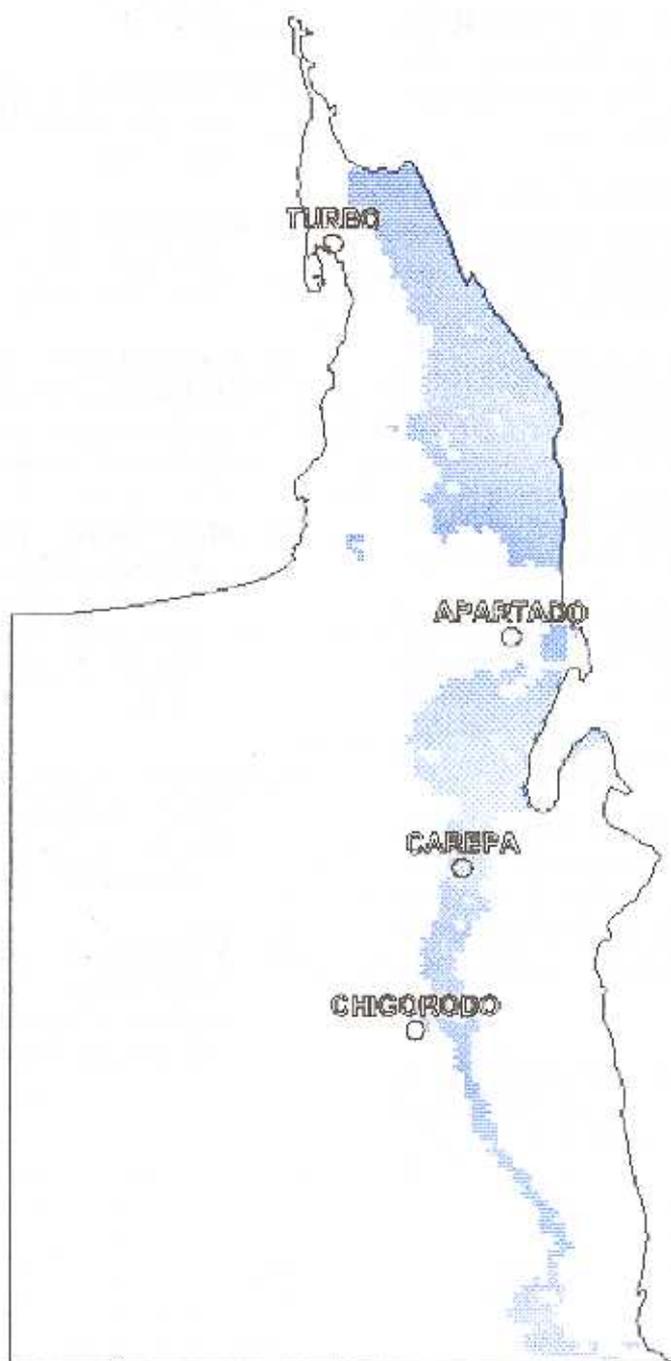


Figura 5 Zonas Susceptibles de Presentar Abatimientos Superiores a un Metro por Aumento en la Demanda y Disminución en la Recarga.

## REFERENCIAS

1. **ANDERSON M. & WOESSNER W.** Applied Groundwater Modeling, simulation of flow and advective transport. 1991, London. 381 p.
2. **ANTENUCCI J, BROW, J, CROSWELL P, & KEVANY M.** Geographic Information System a Guide to the Technology. 1991, New Yoork. 301 p.
3. **ARONOF. S.** Geographic Information System a management perspective. 1989, Canadá. 294 p.
4. **ATKINSON, K.** An Introduction to Numerical Analysis. 1978, New York. 693 p.
5. **BETANCUR T.** Modelamiento de acuíferos Utilizando Sistemas de Información Geográfica para la Región de Urabá. Tesis de Maestría , Universidad Nacional. 1996, Medellín, 215 p.
6. **BETANCUR T. , VELEZ M. V. y RESTREPO J.** Modelamiento de Flujo de Aguas Subterráneas con escasez de Información. XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá. 1996, 12 p.
7. **CARNAHMAN. B, LUTHER. H & WILKES. J.** Applied Numerical Methods. 1969, New York. 604 p.
8. **CUSTODIO. E y LLAMAS. M.** Hidrología Subterránea. 1976, Barcelona. Tomo I, 1157 p.
9. **CUSTODIO. E y LLAMAS. M.** Hidrología Subterránea. 1976, Barcelona. Tomo II, 2359 p.
10. **HAMMING, R.** Numerical Methods for Scientists and Engineers. 1987, Inc, New York. 721 p.
11. **INGEOMINAS.** Evaluación del Agua Subterránea en la Región de Urabá, Departamento de Antioquia. 1995, Santafé de Bogotá. 288 p.
12. **MEIJERINK. A, BROUWER. II, MANNAERTS. C, & VALENZUELA. C.** Introduction to the Use of Geographic Information System for Practical Hydrology. 1994, Holanda. 243 p.
13. **WANG II. & ANDERSON M.** Introduction to Groundwater Modeling. Finite Difference and Finite Elements Methods. 1982, London. 256 p.
16. **WATERLOO HYDROGEOLOGIC SOFTWARE.** Visual MODFLOW Reference Manual. Canada. Volumen en varias paginaciones. 1995.