

Evaluación del potencial acuífero de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare

Ruben Dario Arismendy Mejia Ingeniero Geólogo, ruben_arismendy@hotmail.com
Juan Fernando Salazar Villegas Ingeniero Civil, estudiante de Maestría, juanfer78@yahoo.com
María Victoria Vélez Otálvaro Profesora asociada Universidad Nacional, mvvelez@unalmed.edu.co
Humberto Caballero Acosta Profesor asociado Universidad Nacional, jhcaball@unalmed.edu.co
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

RESUMEN: Este artículo presenta el análisis del potencial acuífero de un área de 470 km² correspondiente a los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare del departamento de Antioquia, Colombia, en donde se presenta una demanda importante de agua, que puede ser satisfecha, mediante la explotación del agua subterránea. Según este propósito, se siguió un proceso de recopilación de información, estudio hidrológico, prospección geoelectrica (84 SEV), inventario de puntos de agua, levantamiento geológico y geomorfológico, y estudio de la calidad del agua. Durante el desarrollo del estudio se logró construir un modelo geológico tridimensional de la región, que sirvió como apoyo para todo el trabajo posterior. Se implementó un modelo para la estimación de la recarga potencial debida a la precipitación, que fue propuesto en el año 2000 por un grupo de investigadores de la Universidad de Wisconsin (Bradbury et al., 2000). También se analizó la calidad del agua subterránea a partir de 30 ensayos físicoquímicos y bacteriológicos realizados sobre muestras tomadas en diferentes puntos de agua, que permitieron estudiar los principales iones presentes en el agua, y su variación espacial en relación con la geología. Finalmente, se construyó un modelo hidrogeológico que permite obtener información sobre la ubicación y descripción de los acuíferos de la zona, la determinación de las direcciones de flujo predominantes y las zonas de recarga. Además, se evaluó la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos mediante el método DRASTIC.

ABSTRACT: Puerto Berrío and Puerto Nare regions with an 1844 km² area are located in Colombia to the east of Antioquia. This towns demand an important quantity of potable water, that can be satisfy through groundwater exploitation. The project was motivated by the groundwater exploitation possibility and it consisted of the aquifer potential evaluation in a 470 km² area. Consequently, the next process included the stages as follows: bibliography summary, hidrologic study, geoelectrical exploration (with 84 vertical electric soundings), inventory water points, geomorphologic and geologic mapping, and the study of the water quality. A geologic tridimensional model was constructed in the region during the study development. Additionally, a innovationary model was used for the potential recharge estimation that was proposed by an investigation group (Bradbury et al. 2000) in the Wisconsin University. The groundwater quality was analysed with 30 physicochemical and bacteriological essays realized in water samples taken in different water points. The analysed water permitted to study the main water ion contents, and permitted to know the spatial variation related with geologic units where the samples were taken. The contamination vulnerability of the aquifers were evaluated through the DRASTIC method. A hidrogeologic model was made at the end of the study. With this model can be obtained the description and position of the area aquifers, the prevalent flow direction and the recharge zones.

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable de la tierra. En el área de Puerto Berrío y Puerto Nare existe una demanda importante de este recurso, sin embargo, no se tiene un conocimiento adecuado de su potencial de explotación, de sus características físico-químicas, de la geometría, parámetros hidráulicos y tipos de acuíferos de la región.

El único documento que se conoce a ese respecto denominado "Condiciones Hidrogeológicas para un Acueducto de Agua Subterránea en Puerto Berrío, Departamento De Antioquia" elaborado para el Instituto Geológico Nacional por Wolfgang Diezemann y Carlos I. Delgado en 1956, presenta como objetivo la evaluación de la factibilidad de captación de agua subterránea para abastecer el acueducto del citado municipio. En este estudio

se menciona la existencia de condiciones hidrogeológicas favorables para la explotación y utilización del recurso como son, la presencia de dos formaciones porosas terciarias y una cuaternaria, así como la presencia de niveles freáticos relativamente altos (a dos metros de la superficie de la llanura aluvial del río).

Se cuenta además con un estudio realizado para el Municipio de Yondó denominado "Exploración del Potencial Acuífero del Municipio de Yondó, Antioquia" (UNAL, 2000) cuyos acuíferos se encuentran sobre la llanura aluvial del río Magdalena y la Formación Mesa, cuyas características geológicas y geomorfológicas son similares a las existentes en la zona de Puerto Berrío y Puerto Nare

2. ANTECEDENTES

La zona de estudio se encuentra en la jurisdicción de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare localizados al este del departamento de Antioquia y comprende un área aproximada de 470 km² (Fig.1). El municipio de Puerto Berrío, situado a 125 msnm, tiene una extensión total de 1184 km² de los cuales, la cabecera municipal ocupa 2.1 km², está a 125 msnm y tiene una temperatura promedio de

27°C. El municipio limita con las localidades de Puerto Nare, Yondó, Maceo, Caracolí y el río Magdalena.

El municipio de Puerto Nare tiene una extensión total de 660 km² de los cuales, la cabecera ocupa 2.3 km². Esta última tiene una altura sobre el nivel del mar de 125 m y una temperatura promedio de 27°C. Limita con las localidades de Puerto Triunfo, San Luis, Caracolí, San Carlos y Puerto Berrío.

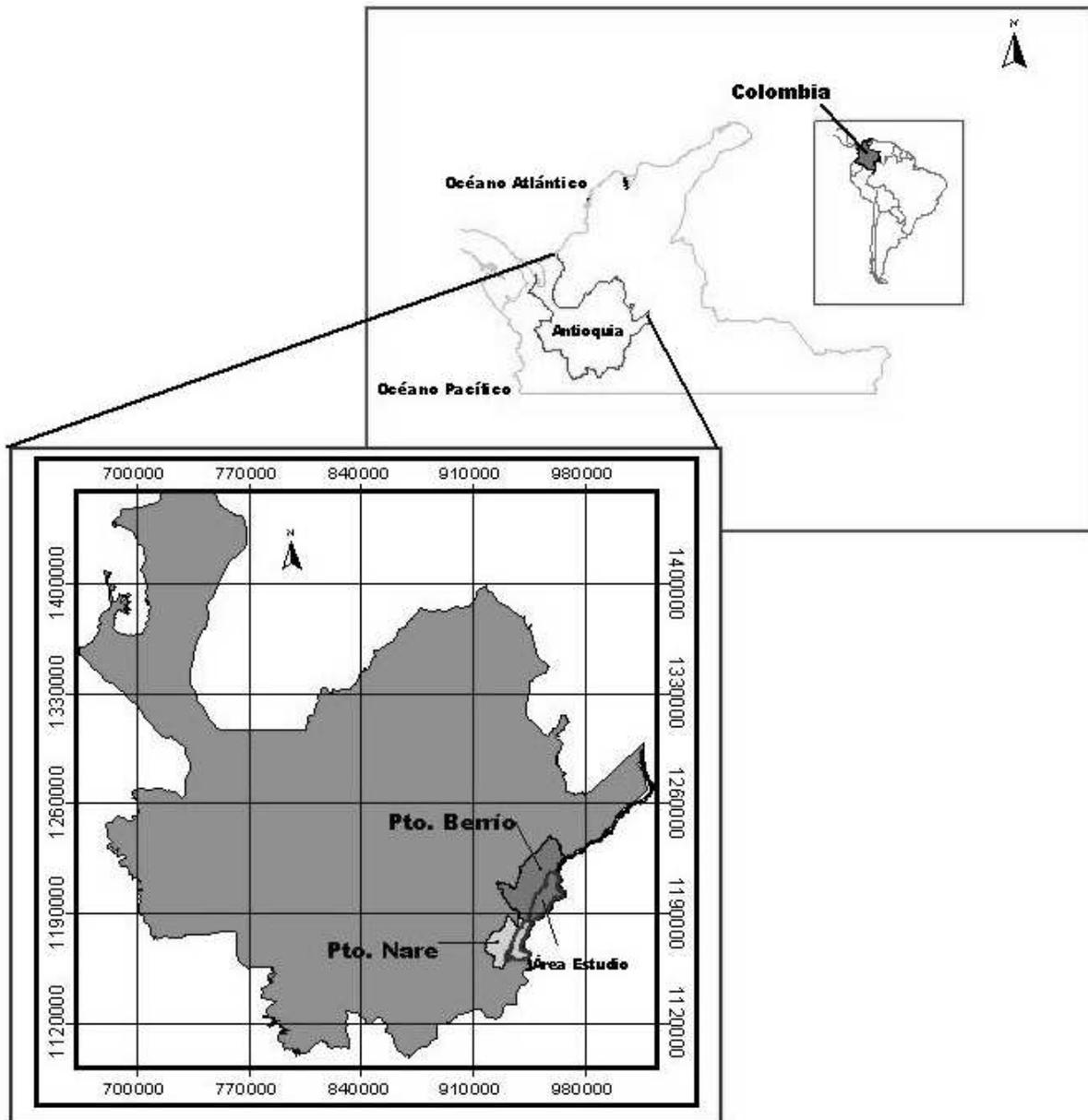


Figura 1. Localización del área de estudio.

3. HIDROLOGÍA

Se realizó un estudio hidrológico con el objetivo principal de estimar la recarga de agua subterránea. La zona de estudio pertenece a la cuenca del Valle Medio del Magdalena con una temperatura promedio de 27°C, una altitud media de 125 msnm y precipitación media anual cercana a 2382 mm/año. Dentro del área de estudio son comunes cuerpos de agua como jagüeyes (depresiones en el terreno construidas para abastecer de agua al ganado) y ciénagas. Las corrientes superficiales más importantes dentro de la zona son: quebrada La Malena, quebrada Balcanes, Caño Negro, río Nare y caño San Pablo. Alrededor del área de estudio están los ríos San Bartolo al norte, Magdalena al oriente y Cocorná al sur.

Se encontró que las mayores precipitaciones se han registrado al norte del área de estudio donde alcanzan 3953 mm/año; mientras que al sur se reportan las menores precipitaciones con 1252 mm/año. En la Figura 2 se muestran las cuatro series de precipitación anual utilizadas.

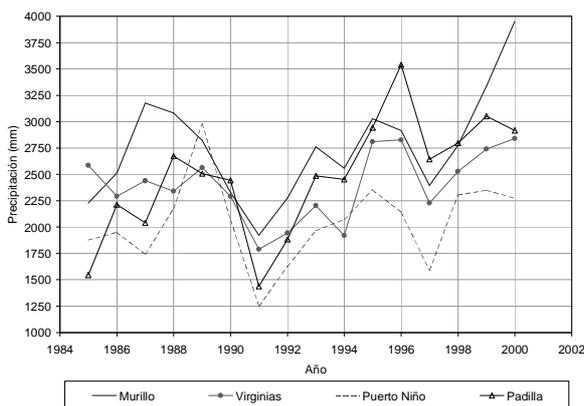


Figura 2. Series de precipitación total anual (mm/año).

Se encontró, según las series estudiadas, un régimen bimodal de la distribución interanual de la precipitación caracterizado por dos temporadas lluviosas en Abril-Mayo y Septiembre-Octubre, y dos temporadas secas en Enero-Febrero y Junio-Julio. Los demás meses pueden catalogarse como de transición.

En la Tabla 1 se presentan los valores de evapotranspiración potencial, usados para estimar la recarga, calculados mediante la ecuación de Thornthwaite:

$$ETP = 1.6 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a \quad 3.1$$

donde, ETP es la evaporación potencial en cm/mes, T es la temperatura media mensual en grados centígrados, I es el índice calórico anual dado por:

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{\text{anual}}}{5} \right)^{1.514} \right) \quad 3.2$$

a es un exponente dado en función de I como se muestra a continuación

$$a = (675 \cdot 10^{-9}) I^3 - (771 \cdot 10^{-7}) I^2 + (179 \cdot 10^{-4}) I + 0.492 \quad 3.3$$

Tabla 1. Evapotranspiración (mm/mes) según la ecuación de Thornthwaite.

Mes	Año 1985-1986	Año 1988-1989	Año 1990-1991
Nov	138.3	137.1	148.8
Dic	153.7	126.8	144.3
Ene	165.4	147.9	153.4
Feb	136.2	143.7	162.9
Mar	151.4	133.6	153.4
Abr	146.9	156.5	151.1
May	156.0	147.9	153.4
Jun	153.7	152.1	165.3
Jul	172.6	161.0	160.4
Ago	180.4	145.7	185.9
Sep	160.6	131.6	165.3
Oct	128.0	133.6	139.9
ANUAL	1843.1	1717.5	1883.9

4. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra ubicada en el valle interandino del Magdalena, el cual se desarrolla entre las cordilleras Central y la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. La Cordillera Central esta compuesta por un basamento polimetamórfico pre-Mesozoico que incluye rocas oceánicas y continentales (McCourt et al. 1984 en Taboada 2000), intruido por varios plutones mesozoicos y cenozoicos (Taboada 2000). El flanco este de la Cordillera Central está compuesto principalmente por rocas ígneas y metamórficas, con edades que van desde el Precámbrico hasta el Jurásico y que se extienden hacia el Valle Medio del Magdalena y son suprayacidas por rocas sedimentarias de edades Jurasicas hasta Terciarias. Por otro lado la Cordillera Oriental esta compuesta por un basamento polimetamórfico de edad Precámbrica y Paleozoica, deformada durante varios eventos orogénicos pre-Mesozoicos (e.g., Irving, 1971 en Taboada 2000).

El Valle Medio del Magdalena es una depresión geomorfológica limitada al norte por la falla de Bucaramanga y al sur por la falla de Cambao, límites cercanos a las poblaciones del Banco (Magdalena) y Jerusalén (Cundinamarca) respectivamente. Cubre un área aproximada de 28300 km², su altitud a nivel del río Magdalena, fluctúa entre 50 y 150 msnm.

5. GEOLOGÍA LOCAL

El área de estudio se encuentra conformada por rocas sedimentarias principalmente, y en menor proporción por rocas ígneas y metamórficas, además de depósitos aluviales y de ladera recientes (Fig. 3).

Las rocas metamórficas presentes en la zona corresponden a Cuarzitas (Pzq), que hacen parte de la unidad litodémica llamada “Complejo Cajamarca” que aflora en la parte occidental de la zona de estudio.

Las rocas ígneas están representadas por el Batolito de Segovia (Jdse) y el Volcánico de La Malena (Jvm). El Batolito esta compuesto principalmente por dioritas y cuarzodioritas de edad Jurásico y que afloran en el límite occidental de la zona de estudio, mientras que el Volcánico de La Malena aflora en el sector occidental del área de estudio y está constituido por flujos volcánicos riolíticos a riolacíticos, brechas volcánicas y tobas hacia la parte superior del conjunto, diques basálticos y pórfidos andesíticos.

Las rocas sedimentarias constituyen la mayoría del área de estudio y están representadas principalmente por la Formación Mesa (Ngm) y una pequeña parte por las Sedimentitas del este de Segovia (Ksh). En la Formación Mesa los estratos yacen horizontales o buzan ligeramente al oeste, aumentando su espesor hacia el Este, donde son disectadas por el Río Magdalena, esta es cubierta por sedimentos recientes, y por ello es probable que áreas cartografiadas como Formación Mesa correspondan en realidad a depósitos de edad más reciente. Esta compuesta por sedimentos débilmente cementados, bien estratificados y compuestos por conglomerados, areniscas bien o mal seleccionadas y limolitas. Esta formación ha sido caracterizada en cercanías al municipio de Honda por su morfología particular semejante a una mesa, generada por procesos de tipo erosivo, de edad Plio-Pleistoceno; está conformada por materiales de origen sedimentario y volcanoclástico, entre ellos conglomerados con cantos de cuarzo, chert, rocas volcánicas y rocas metamórficas. Las edades asignadas a la Formación Mesa varían según los autores y oscilan entre el Mioceno y el Plioceno. La composición y geomorfología que presenta lo que se ha llamado Formación Mesa en el área de estudio, es muy diferente a los materiales y geoformas presentes en el área tipo de Honda y descritas anteriormente, ya que es claro en el valle medio del Magdalena en lo que corresponde a la zona de estudio, la ausencia de cantos de rocas efusivas y de la morfología con topes planos en forma de Mesa.

Por otro lado las Sedimentitas del este de Segovia Afloran al suroccidente del área de estudio y litológicamente están conformadas por lutitas carbonosas de color negro que al meteorizarse toman un color grisáceo, estratificadas con limolitas, areniscas, conglomerados intraformacionales con fragmentos de lutitas negras, cantos de conglomerado cuarzoso, lodolitas y rocas volcánicas básicas, de color gris verdoso

Sobre las unidades anteriormente descritas y de manera discordante se presentan Depósitos Aluviales (Qal) no

consolidados de edad recientes conformados por gravas, arenas y materiales finos de origen aluvial y lacustre que conforman terrazas, llanuras de inundación, bajos y complejos cenagosos. El espesor de estos sedimentos aun no ha sido definido con claridad pero en la zona de Omimex de Colombia ubicada en el sur de la zona de estudio se reportan espesores promedio de unos 17 metros. Los aluviones a lo largo del río Magdalena son depósitos de poca elevación compuestos por material meteorizado, poco estratificado y mal seleccionado o con unos pocos horizontes bien seleccionados.

6. ESTRATIGRAFÍA SUPERFICIAL

Con el fin de obtener un mejor conocimiento los materiales superficiales de edad terciaria y cuaternaria aflorantes en la zona y dada su importancia pues es la unidad predominante y la de mayor potencial desde el punto de vista hidrogeológico, se realizaron 84 ensayos geoelectricos y se levantaron 28 columnas estratigráficas con espesores entre 2 y 28 m., asociadas a cortes de carretera. Las columnas estratigráficas muestran secciones litológicas caracterizadas por estratos horizontales a levemente inclinados ($< 3^\circ$), con intercalaciones arrítmicas de materiales finos a gruesos poco consolidados, estratos bien delimitados sin intervalos erosivos y contactos tajantes en la mayoría de los casos. Se evidencian condiciones predominantemente fluviales con características energéticas variables en el tiempo, que permitieron depositaciones de diferentes tamaños de material, en donde su origen es asociado a las rocas aflorantes en la cordillera Central. El material más característico es el cuarzo lechoso, componente principal en las arenas, fragmentos líticos de rocas ígneas y rocas metamórficas; también hay presencia en menor cantidad de chert, hornblenda, feldespatos y micas. Los materiales terciarios están mal cementados, confundiendo en muchos casos con depósitos más recientes. La forma de las partículas varía desde angulares, hasta redondeadas y se observan estructuras sedimentarias tales como estratificación cruzada y lentes de material conglomerático, ambas típicas de ambientes fluviales y acentuadas por horizontes o niveles de costras ferruginosas, que alcanzan desde pocos centímetros, hasta 10 cm de espesor. Los depósitos recientes en especial los que componen la llanura de inundación del río Magdalena a nivel superficial, están compuestos principalmente por arenas, limos y arcillas y en algunas zonas es posible observar interdigitaciones de materiales arrastrados por corrientes tributarias del Magdalena con materiales depositados por éste. Las columnas estratigráficas levantadas permitieron conocer las áreas con condiciones depositacionales similares, suponiendo así que éstas se mantenían hasta la profundidad de interés del proyecto (250 m), y con ellas también se correlacionaron los registros geoelectricos.

7. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Las unidades geomorfológicas se diferenciaron con ayuda de la fotointerpretación, análisis de imágenes de satélite y el trabajo de campo en donde se obtuvieron seis unidades geomorfológicas (I, II, III, IV, V, y VI), para lo cual se tomaron como base la pendiente, litología, altura y geoformas desarrolladas como resultado de la evolución geológica.

La UG I, Sistemas de colinas bajas y redondeadas con valles amplios, corresponde litológicamente a rocas sedimentarias, correlacionables con la Formación Mesa, representa el 4.2% del área de estudio sistemas de colinas alargadas y ramificadas, con tope redondeado, en donde algunas colinas se encuentran como remanentes de los sistemas, indicando zonas de alta actividad erosiva. Presenta drenajes subdendríticos, con valles amplios con forma de U suave o abierta, planos a suavemente ondulados. Por otro lado la UG II, Sistemas de colinas medias y redondeadas con valles medianamente desarrollados, representa el 8% del área de estudio y es muy similares a la UG I, diferenciándose en el grado de evolución de sus valles y colinas, indicando entonces que la UG II es anterior en evolución con respecto a la UG I. Y se presenta como núcleos de sistemas de colinas que han sido labradas en menor grado por los agentes erosivos y con valles intercolinas menos desarrollados y alturas mayores que las de la UG I, sus drenajes son subdendrítico en U abierta a U levemente cerrada, son suavemente ondulados y no están incisados por drenajes.

La UG III fue definida como sistemas de colinas medias y redondeadas con valles cerrados y corresponde al 10% del área de estudio, caracterizándose por presentar colinas de tope angosto y redondeado, con vertientes cortas, con superficies de homogéneas a rugosas por procesos de reptación, drenajes subparalelos a subdendríticos y valles muy angostos y en forma de V suave o abierta.

Las rocas ígneas y metamórficas de la zona están representadas por la UG IV, sistemas de colinas altas y redondeadas, que cubre el 0.8% del área de estudio. Se caracteriza por colinas de tope redondeado, de laderas suavizadas en la base. La tendencia que sigue la mayoría de los drenajes en esta zona es subparalela y sus valles conservan la forma de V abierta con variaciones en la parte mas baja de la ladera a forma de U abierta. Estas colinas se caracterizan por presentar grandes bloques de roca en sus vertientes, muy diaclasados y con características de meteorización esferoidal. Estos bloques son muy similares a depósitos de vertientes tipo Talus pero se logró corroborar que se encontraban in situ, dando indicios de los altibajos del basamento.

Por ultimo se tiene la UG V; llanuras de inundación, la cual es una de las unidades geomorfológicas más extensas de la zona cubriendo el 77% del total del área estudiada y está ubicada a lo largo de los ríos, quebradas y caños y se presenta como terrenos planos a suavemente inclinados con pendientes entre 0° y 10°. En algunos tramos del río

Magdalena se pudieron observar canales y brazos abandonados y se pudo separar la UG VI, sistemas de orillares caracterizada por zonas bajas formadas por la migración del río especialmente en sectores sinuosos en el lado donde hay depositación de arenas. En dicho proceso se forman numerosos canales y sus respectivos diques, de poca altura, que van siendo abandonados a medida que el río se desplaza lateralmente.

8. MODELO GEOLÓGICO DEL SUBSUELO

La reconstrucción de las características generales del subsuelo se hizo mediante el uso de diferentes herramientas geológicas, geomorfológicas y geoelectricas, las cuales permitieron establecer correlaciones en la zona de estudio, delimitando espacialmente las diferentes unidades de interés para el proyecto. A continuación se describen algunas herramientas e hipótesis claves en la construcción del modelo geológico.

8.1. Geología, Estratigrafía y Geomorfología

Entre las características geomorfológicas cabe resaltar la presencia de bloques de roca correspondientes litológicamente al Volcánico de Malena, observados en el sector noroccidental de la zona de estudio. Estos fragmentos de roca aparecen en algunas laderas de la UG IV y afloran en algunas colinas de la UG II. La posición de los bloques llevó a pensar, inicialmente, en depósitos de vertiente tipo Talus; después de inspeccionar en varios afloramientos se nota que los bloques mayores se encuentran in situ y que debido a su alto grado de diaclasamiento permiten que otros bloques de menor tamaño caigan por gravedad. Percibiendo estas características del paisaje se pudo concluir que estos bloques correspondían al basamento cristalino que en algunos sectores estaba siendo destapado por efectos de erosión, dejando ver lo que correspondería a altibajos en el basamento cristalino.

Además del conocimiento de la geología superficial, la información aportada por la Compañía petrolera Omimex de Colombia Ltd, fue de gran importancia ya que muestra las unidades estratigráficas conocidas en la zona explotada actualmente, ubicada en el extremo suroriental de la zona de estudio.

8.2. Geoelectrica

Para realizar la prospección geoelectrica se hizo un reconocimiento de campo, evaluando aquellas zonas aptas para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV), luego se estableció un malla, separando sus nodos una longitud mayor de 2 km y menor de 4 km.

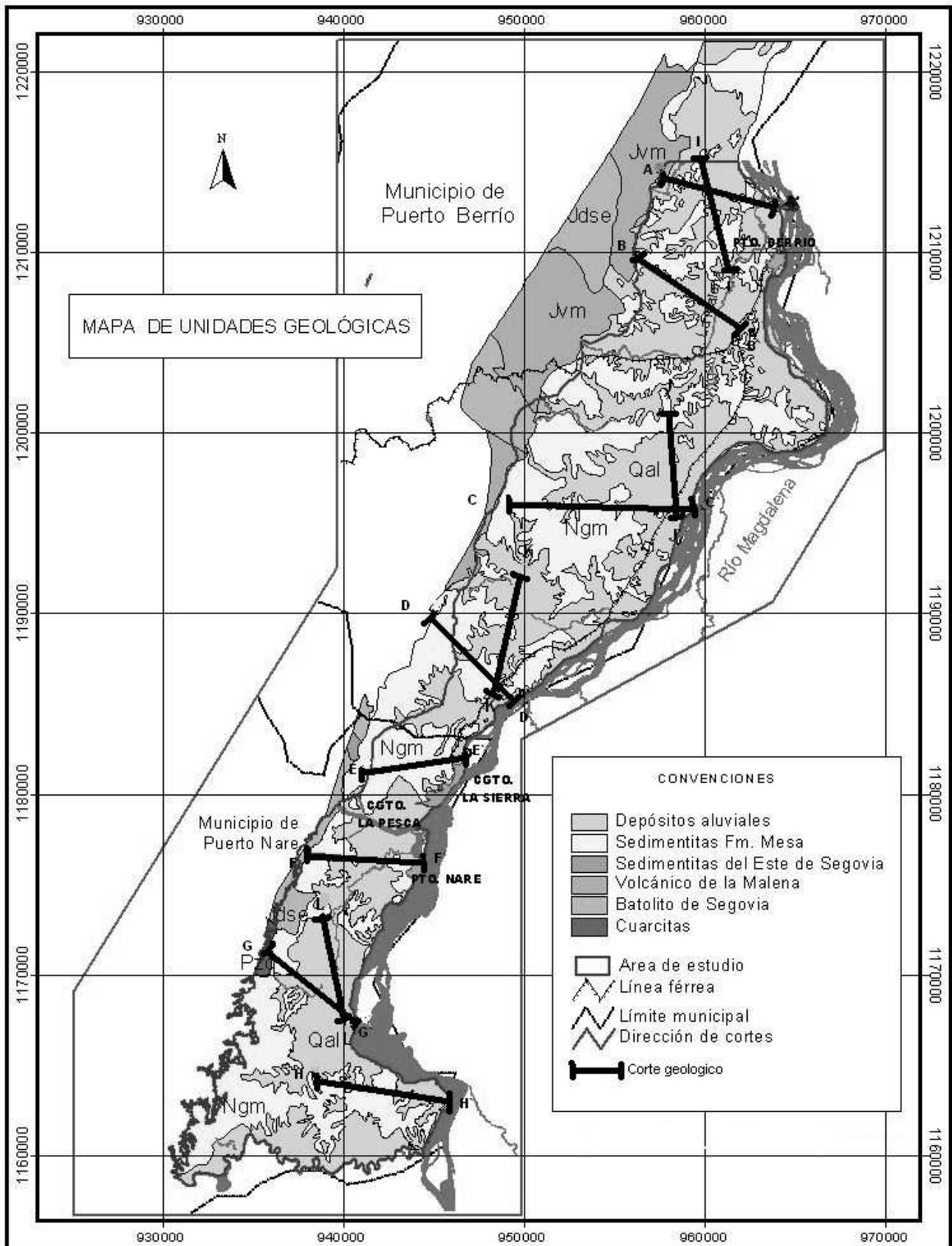


Figura 3. Mapa de unidades litológicas y ubicación de corte geológicos.

Tabla 2. Rangos para las Resistividades de los diferentes materiales.

Tipo de Material	Resistividad(ohm.m)	
	ρ seco	ρ saturado
Arcilla	--	5-10
Limo	30-50	10-15
Arenas finas	50-100	15-50
Arenas media a gruesa	100-250	50-80
Conglomerados	250-500	80-150
Roca	>500	--

Los valores de resistividad usados se pueden observar en la tabla 1. Entre las características más importante encontradas en el análisis geoelectrico, se destacan dos contrastes claramente marcados en las curvas geoelectricas y que se extienden en toda el área de estudio indicando cambios bruscos en los valores de resistividad, y caracterizados por altas pendientes en el tramo final de la curva. La interpretación de dichas curvas mostró que el primer cambio corresponde a rangos de resistividad menores de 500 ohm-m, indicando el paso entre dos formaciones sedimentarias, lo cual correspondería al contacto marcado por la formación Diamante que en esta zona ha sido correlacionada con la Formación Mesa y la formación el Zorro, cuyo equivalente correspondería al grupo Real. Este limite esta marcado por una discordancia que según la petrolera se extiende a lo largo de todos los campos y mediante los ensayos geoelectricos fue detectada a lo largo de la zona de estudio (Fig. 5).

El segundo contraste corresponde al contacto de las rocas sedimentarias terciarias y el basamento cristalino, en donde los rangos de resistividad son cercanos a los 1000 ohm (Fig. 4). Estos valores de resistividades altas que representan rocas cristalinas, fueron encontrados a diferentes profundidades en el área de estudio y apoyan las hipótesis de variabilidad del basamento cristalino, presentándose como bloques hundidos y levantados, que permiten acumulaciones sedimentarias diferentes que permiten que la roca cristalina pueda aflorar por erosión

Teniendo en cuenta las diferentes hipótesis utilizadas se puede concluir que:

- La zona de estudio presenta un alto grado de complejidad geológica por las características tectónicas de la zona que permiten bloques levantados y hundidos.

- Las formaciones terciarias y cuaternarias presentan variaciones significativas en su continuidad, tanto vertical como árealmente, debido principalmente a los cambios de profundidad del basamento cristalino, en donde se formaron depresiones con diferentes configuraciones que actuaron como pequeñas cuencas, permitiendo acumulaciones sedimentarias diferentes

- Los diferentes niveles del basamento se pudieron detectar, en superficie, por medio de afloramientos ubicados en el limite oeste de la zona de estudio y por características geomorfológicas. En profundidad, por ensayos geoelectricos e información suministrada por la petrolera Omimex de Colombia Ltda. Se tienen profundidades desde los 8 m en el sector de Puerto Nare, hasta 287 m en el

municipio de Puerto Berrío y una gran depresión con profundidades de hasta 1000 m en el sector de la petrolera. Igualmente los sondeos geoelectricos permitieron la identificación de la disconformidad que marca el limite impermeable, entre la Formación Mesa y el grupo Real, que es el limite en la vertical de la formación terciaria mas superficial la cual es la formación de interés acuífero para este estudio, en donde se tienen profundidades entre 31 m en el municipio de Puerto Berrío y 287 m en el municipio de Puerto Nare.

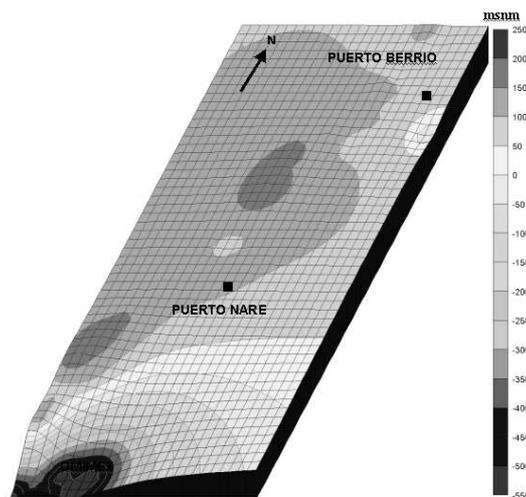


Figura 4. Modelo tridimensional de la superficie del basamento cristalino.

8.3. Perfiles Geológicos

Se realizaron 12 perfiles con el fin de dar una idea general de la disposición de los diferentes materiales sedimentarios a lo largo y ancho de la zona de estudio. Se debe tener en cuenta que los perfiles deben ser corroborados con perforaciones exploratorias. Las distancias verticales y horizontales en los perfiles fueron medidas en metros y las convenciones se observan en la Figura 6.

9. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Con el fin de conocer la variación espacial de la calidad físico-química del agua subterránea y dar pautas para un buen uso de este recurso se realizaron diferentes ensayos químicos en donde se determinó el contenido de Hierro (Fe), Sílice (SiO₂), Cloruros (Cl), Sodio(Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Nitratos, Nitritos, Sulfatos (SO₄), contenido de Coliformes, Alcalinidad, Dureza, Color y Turbiedad. Para el caso del área de estudio uno de los usos prioritarios del agua subterránea es el consumo doméstico, por lo que el análisis de la calidad de las aguas

debe hacerse con los parámetros fijados por el Ministerio de Salud.

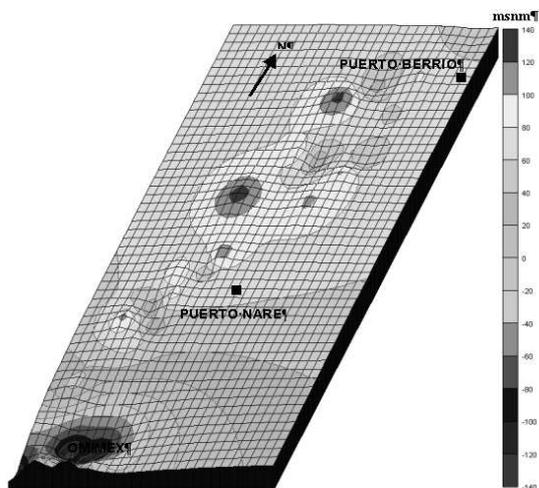


Figura 5. Modelo tridimensional de la superficie sedimentaria que representa el contraste entre la roca sedimentaria correspondiente a la Formación Mesa y al grupo Real.

CONVENCIONES



Figura 6. Convenciones utilizadas para la presentación de los cortes geológicos.

10. ANALISIS DE FACIES HIDROQUIMICAS

Las características químicas del agua de los acuíferos están condicionadas por los diferentes minerales constituyentes de las rocas por las que esta viaja. Según estas características químicas, los cuerpos de agua pueden ser descritos según sus facies hidroquímicas las cuales representan la composición predominante del agua. Para

determinar estas facies hidroquímicas es muy útil representar gráficamente los principales aniones y cationes presentes en el agua, como son el Na+K, Cl, Ca, HCO_3+CO_3 , Mg, SO_4 , Fe, SiO_2 y NO_3 . Una forma de realizar este análisis es por medio de la elaboración de diagramas de Piper y Stiff.

10.1. Diagramas de Piper

Los diagramas de Piper permiten una clasificación de las facies hidroquímicas con base al ion dominante de la facie. Este diagrama permite clasificar la muestra de agua en 6 tipos de iones dominantes divididos en cationes y aniones. En la zona de estudio fue posible encontrar diferentes facies hidroquímicas con un comportamiento general en donde 25 de las muestras tienen como ion predominante el bicarbonato (HCO_3+CO_3) y de estas 16 están ubicadas en la llanura de inundación del río Magdalena y el resto corresponden a depósitos cuaternarios. Cuatro muestras corresponden al tipo sódico o potásico (K+Na) y se encuentran ubicadas en la llanura de inundación de la quebrada la Malena, del río Magdalena y del río Cocorná. Tres muestras pertenecen al tipo calcio (Ca) y están ubicadas en la llanura de inundación del río Magdalena y en depósitos cuaternarios rodeados por colinas. Finalmente 4 muestras corresponde al tipo cloro y se encuentran ubicadas en el sector noroccidental de la zona de estudio, asociada a colinas terciarias y a depósitos cuaternarios de origen aluvial.

10.2. Diagramas de Stiff

Este diagrama permite una visualización rápida para comparar el agua en diferentes lugares. El área del polígono da una idea de la concentración de iones en la muestra en miliequivalentes por litro. Para el área de estudio es claro que la mayor cantidad de iones está asociada a las muestras tomadas en la llanura de inundación del río Magdalena en donde los iones presentes en mayor cantidad son el bicarbonato (HCO_3+CO_3), el sodio más el potasio (Na+K), el calcio (Ca) y el magnesio (Mg) (Fig. 10). Los diagramas de Stiff asociados a muestras tomadas lejos de la influencia del Magdalena, tanto en depósitos cuaternarios como en colinas terciarias, muestran concentraciones mucho menores de iones y una disminución considerable en el ion bicarbonato más carbonato (HCO_3+CO_3) (Fig. 11). Por lo tanto cabe resaltar que según los ensayos químicos el río Magdalena controla de manera importante las características químicas de los acuíferos presente en su llanura de inundación aportando cantidades considerables de HCO_3 y de CO_3 .

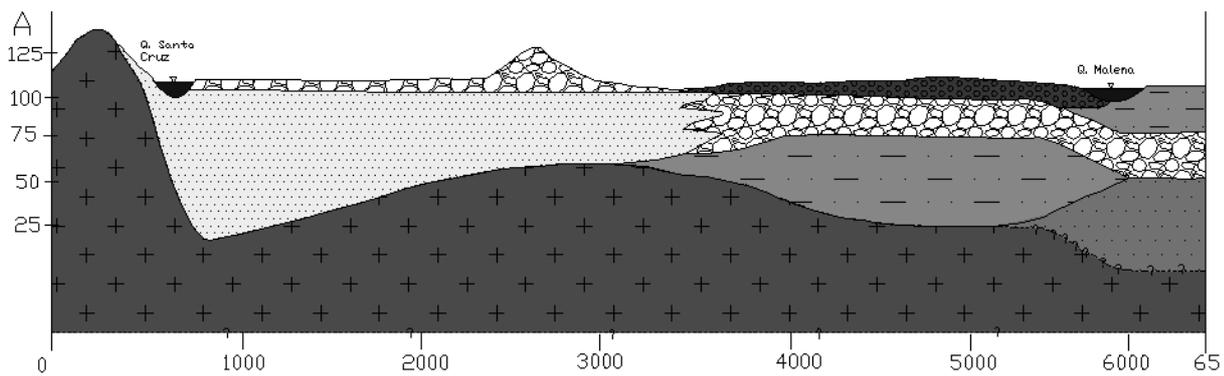


Figura 7. Corte geológico A-A', en las veredas El Jardín y Murillo (Escala horizontal 1:25.000, Escala vertical 1:12.500)

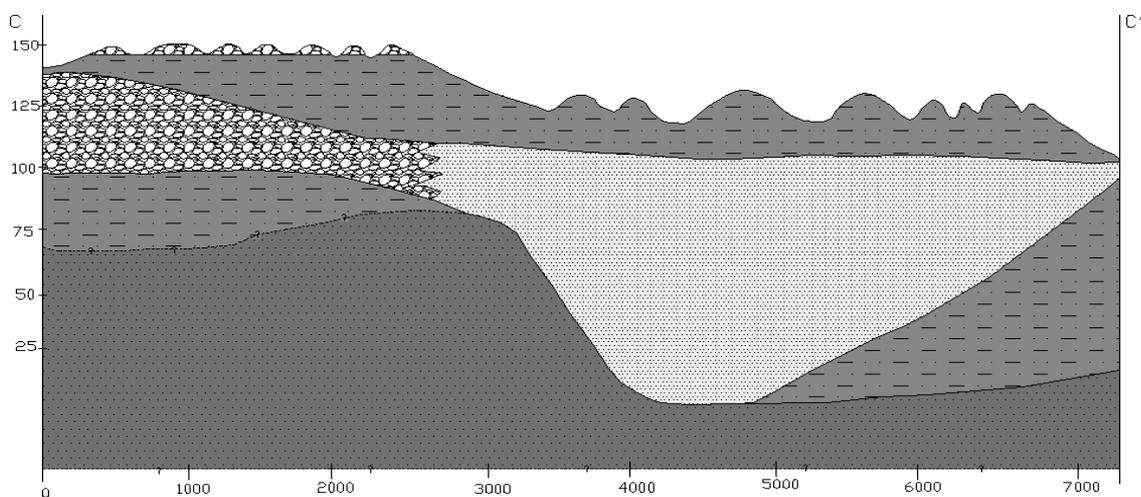


Figura 8. Corte geológico C-C', en las veredas Cristalina y La Malena (Escala horizontal 1:25.000, Escala vertical 1:12.500).

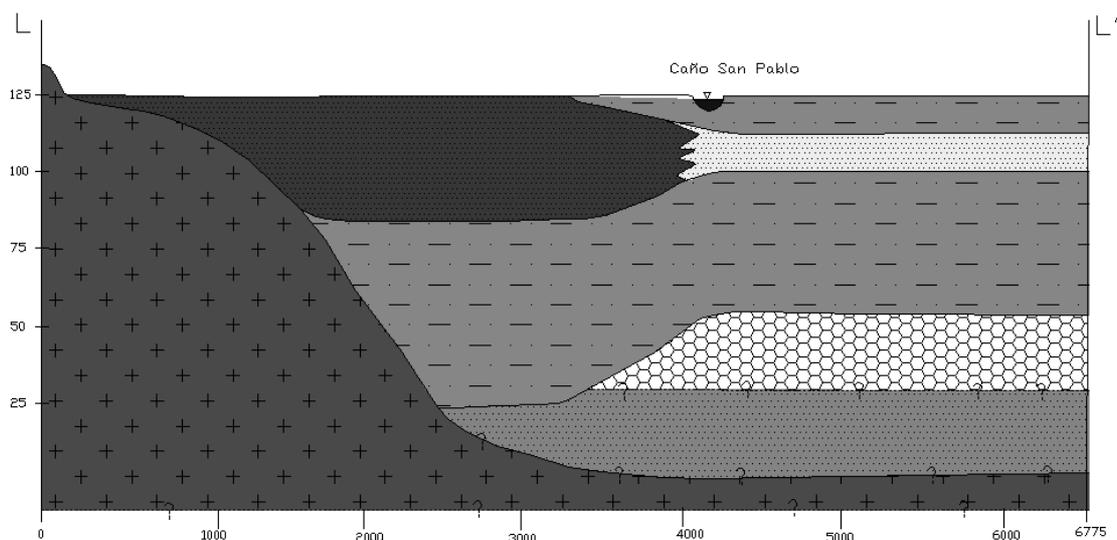


Figura 9. Corte geológico L-L' en las veredas Peña Flor y Mulas (Escala horizontal 1:25.000, Escala vertical 1:12.500)

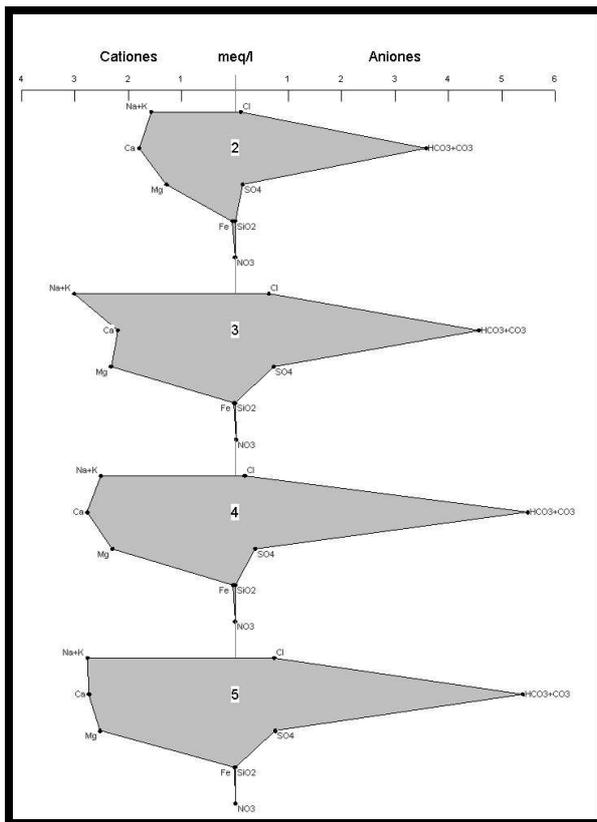


Figura 10. Diagramas de Stiff de las muestras 1 a la 5 en llanura de inundación del río Magdalena

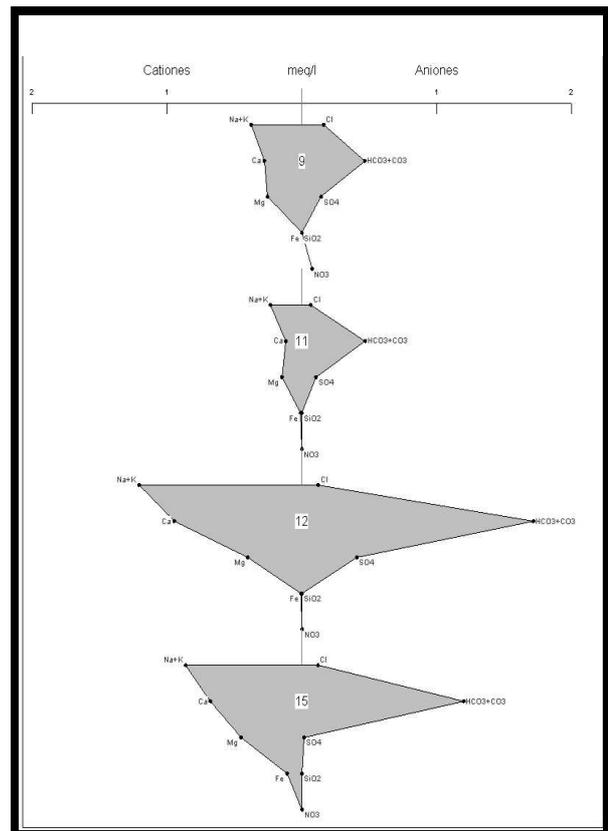


Figura 11. Diagrama de Stiff de muestras alejadas de la llanura de inundación del río Magdalena

11. RECARGA

Se estimó la recarga potencial debida a la precipitación mediante un método iterativo, basado en la aplicación de un balance hídrico celda a celda sobre una representación digital del área de estudio (Bradbury et al., 2000). Este método permite cuantificar la variabilidad espacial de la recarga, resultante de los diferentes parámetros hidrometeorológicos y del terreno considerados. Se obtuvieron mapas de recarga anual para tres períodos con condiciones hidrológicas diferentes: normal (1985-1986) (Fig. 12), año Niña (1988-1989) y año Niño (1990-1991) (NOAA / NATIONAL WEATHER SERVICE / CLIMATE PREDICTION CENTER).

De acuerdo a la Figura 12, la recarga en un año de condiciones climáticas promedio equivale a entre el 5% y el 23% de la precipitación, lo cual es comparable con las relaciones entre la precipitación y la recarga comúnmente referidas en la literatura (Rushton K. R. y Ward C., 1979). Por otra parte, en un año Niño la recarga puede ser nula en algunas zonas dentro del área de estudio, mientras que durante un año Niña la recarga puede aumentar en más de un 100% con respecto a la condición normal.

La distribución espacial de la recarga que se observa en la Figura 12, es similar a la de la precipitación en cuanto que es mayor al norte del área de estudio y disminuye hacia el sur.

12. HIDROGEOLOGÍA

12.1. Isopiezas

A partir de lecturas de niveles piezométricos se trazaron isopiezas (líneas equipotenciales) como se muestra en la Figura 13. Para este trazado se tuvo en cuenta que las líneas de flujo deben ser siempre ortogonales a las isopiezas (Freeze y Cherry, 1979), y que una línea de flujo no puede ser interceptada más de una vez por la misma línea equipotencial. En la frontera del área de estudio (en particular en el río Magdalena) no se puede garantizar la coherencia con estas condiciones debido a la ausencia de información por fuera de la zona.

El mapa de isopiezas es una herramienta a partir de la cual se pueden aproximar direcciones de flujo, ubicación de zonas de recarga y profundidades del nivel freático, entre otros. Así pues, es claro en la Figura 13 que la dirección predominante del flujo es de oeste a este, es decir, el agua fluye desde las cuencas que componen el área de estudio hacia el río Magdalena. A pesar de este patrón regional de flujo, se nota una importante influencia de controles locales como el río Nare que atrae un flujo de agua hacia su cauce a la vez que avanza hacia el río Magdalena. Hay también una relación entre la permeabilidad del medio acuífero y la separación entre las isopiezas, de modo que una mayor separación se asocia con una permeabilidad más alta, y

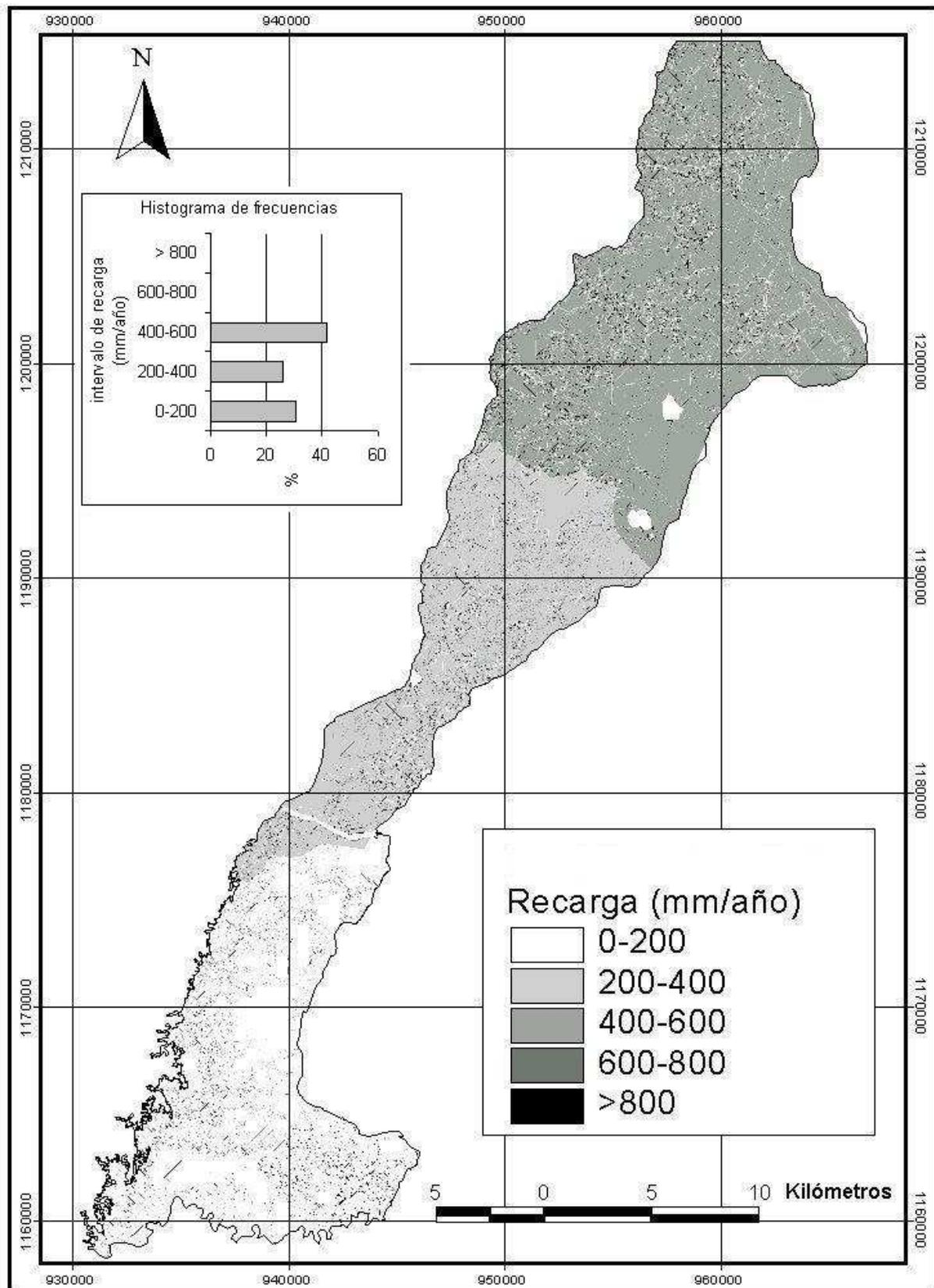


Figura 12. Mapa de recarga en un año norm

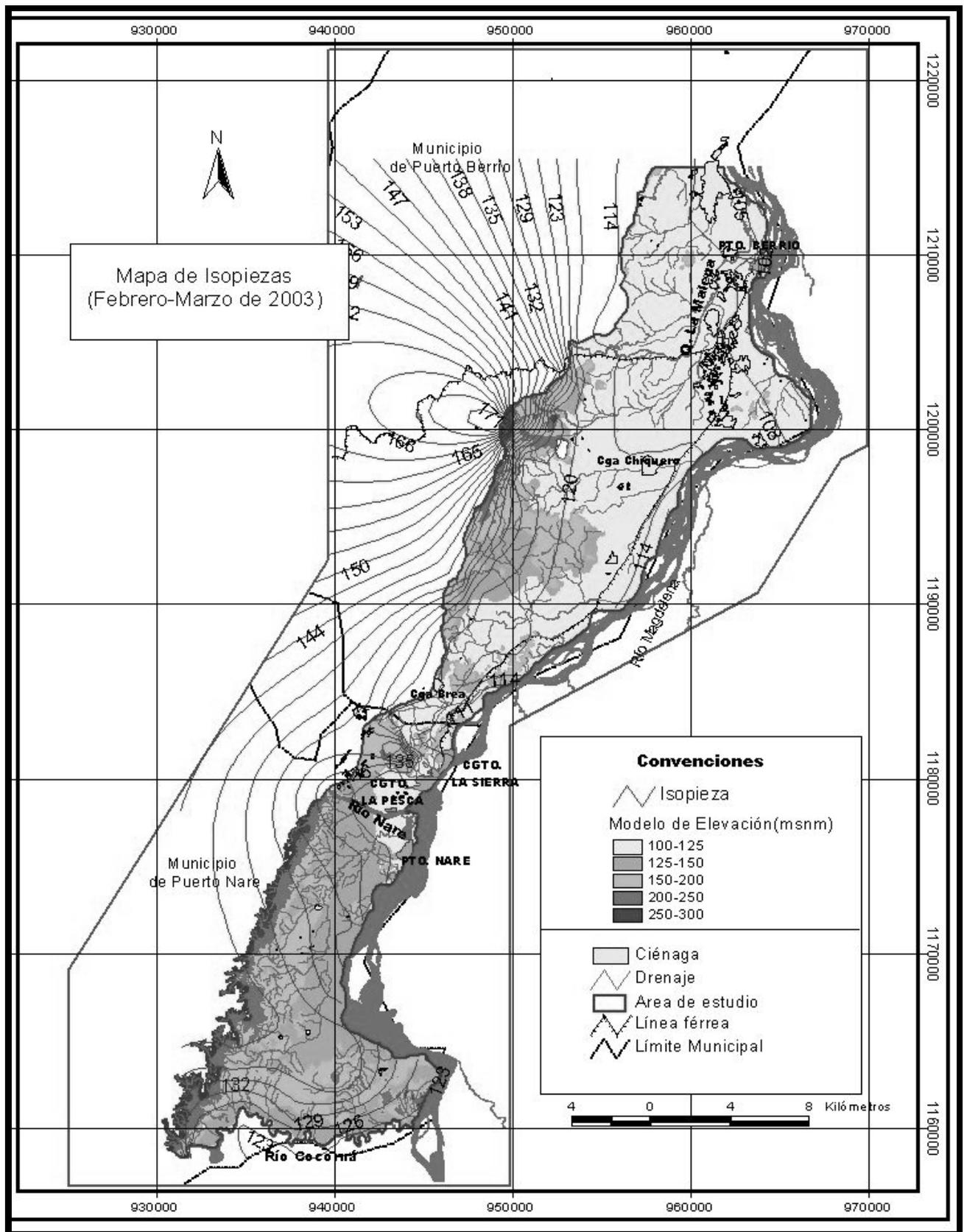


Figura 13. Mapa de isopiezas

viceversa. Según esto, se reafirma el hecho, previsto en el estudio litológico, de que en las zonas más altas (oeste del área de estudio) se encuentran permeabilidades menores porque corresponden a materiales más competentes. Así mismo, en las llanuras aluviales aparecen más separadas las isopiezas indicando por lo tanto una mayor permeabilidad. Las zonas hacia donde se orienta predominantemente el flujo de agua subterránea constituyen zonas potenciales de recarga. De acuerdo con esto, los acuíferos ubicados en las llanuras aluviales en el municipio de Puerto Berrío, son recargados por un flujo proveniente del oeste. Al sur del área de estudio, hay un flujo atraído hacia los ríos Nare y Cocorná que recarga los acuíferos aledaños a estas corrientes, cuyas llanuras de inundación son menos extensas que las encontradas en Puerto Berrío.

12.2 Pruebas de Bombeo

Se realizaron 5 pruebas de bombeo localizadas cerca o dentro de la cabecera urbana de Puerto Berrío. Además, se obtuvieron los resultados de 5 pruebas hechas en el campo petrolero de Omimex S. A. localizado al sur del área de estudio entre los ríos Magdalena y Cocorná. Las características de las captaciones encontradas no permitieron realizar pruebas sobre todos los acuíferos delimitados, y por ende los resultados obtenidos no son exportables a toda el área de estudio.

Se obtuvieron permeabilidades entre 0.5 y 20 m/d, lo cual corresponde a medios acuíferos compuestos por materiales finos (Referencia). Estos valores de permeabilidad fueron hallados usando el espesor total del acuífero y no la longitud de los tramos donde efectivamente existiese rejilla, debido a que no se disponía de esa información relativa al diseño del pozo. Esto supone que las permeabilidades reales deben ser mayores.

12.3 Unidades Hidroestratigráficas

Según el modelo geológico obtenido a partir de las diferentes herramientas geológicas, geomorfológicas y geofísicas se realizó una caracterización física y espacial de las diferentes zonas con potencial acuífero.

El área de estudio es de una alta complejidad geológica, con profundidades del basamento muy variables. Este basamento sirve en muchos casos como frontera impermeable no solo en la vertical, si no también lateralmente para las diferentes capas acuíferas, que a su vez no presentan continuidad en la zona de estudio. Teniendo en cuenta la no continuidad de las capas acuíferas y la definición de unidades hidroestratigráficas, que permite incluir unidades geológicas con propiedades similares en una unidad hidroestratigráfica y/o, a su vez que varias formaciones geológicas pueden estar combinadas dentro de una única unidad hidroestratigráfica, o una formación

geológica puede ser subdividida en acuíferos y unidades confinantes, se dividió el área de estudio en zonas acuíferas libres y confinadas las cuales están compuestas por sedimentos terciarios que integran colinas de la Formación Mesa, sedimentos cuaternarios, o ambos. Estas formaciones no se pudieron diferenciar con precisión en la vertical, ya que no fue posible establecer un contacto marcado entre ellas, debido a la similitud entre la competencia de sus materiales.

La integración de ambas unidades geológicas terciarias y cuaternarias para la conformación de diferentes zonas acuíferas con comunicación hidrogeológica en algunos casos y en otros sin ella, se plantea teniendo en cuenta:

- La baja competencia que presentan los materiales que constituyen la Formación Mesa (?), en muchos casos muy similar a la de los materiales cuaternarios.

- La cercanía que presentan los depósitos cuaternarios al basamento, descansando en muchos casos directamente sobre este.

- Los ensayos geoeléctricos no muestran un cambio marcado del valor de resistividad entre materiales terciarios y cuaternarios, lo cual corrobora lo similar de la competencia de dichas unidades.

- La presencia de materiales muy permeables como gravas y arenas expuestas en algunas colinas y que permiten la recarga del agua lluvia hacia los acuíferos terciarios y posiblemente hacia los cuaternarios.

Esta conexión hidrogeológica entre ambas unidades ya había sido planteada por Diezenmann en 1956 quien en su estudio "Condiciones Hidrogeológicas para un Acueducto de Agua Subterránea en Puerto Berrío" propone para las formaciones que se encuentran cercanas al casco urbano del municipio de Puerto Berrío una conexión en donde el espejo de agua es continuo entre ambas formaciones, tanto en la horizontal como en la vertical.

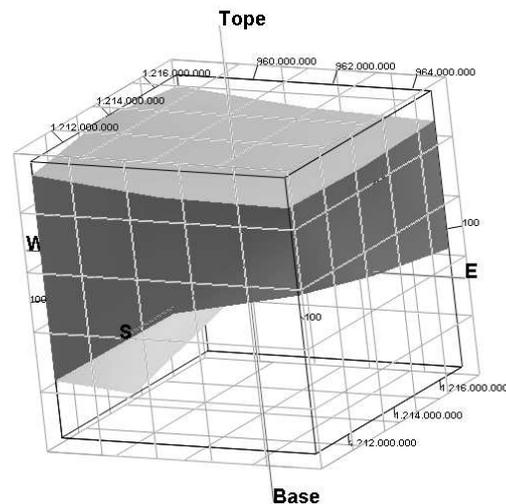


Figura 14. Diagrama de bloque de la zona acuífera libre ZAL-1^a

Para efectos de la definición de las zonas acuíferas en el área, se han definido 16 zonas acuíferas generales (fig. 16 y 17). Estas 16 zonas acuíferas se definen principalmente en profundidad donde se plantea 7 zonas acuíferas libres más superficiales y 9 zonas acuíferas confinadas, más profundas. Las zonas acuíferas libres y confinadas se presentan en las Figuras y respectivamente. Las zonas con potencial acuífero se aprecian espacialmente en la Figura, en donde el área restante se clasificó como área sin interés hidrogeológico, a excepción de dos pequeñas zonas sin información suficiente para ser clasificadas. En este caso se habla de "interés hidrogeológico" haciendo referencia a la posibilidad de explotación de agua subterránea en un punto determinado.

Con un grado de detalle de las zonas acuíferas, se describieron, caracterizando su comportamiento, sus tipos de materiales, sus variaciones espaciales de profundidad y el tipo de agua encontrada en cada una de ellas, además de la realización de un diagrama de bloque (Fig. 14 y 15) para cada una, que permite una ubicación espacial tanto en planta, a partir de sus coordenadas, como en la vertical dando una idea de los espesores y las profundidades.

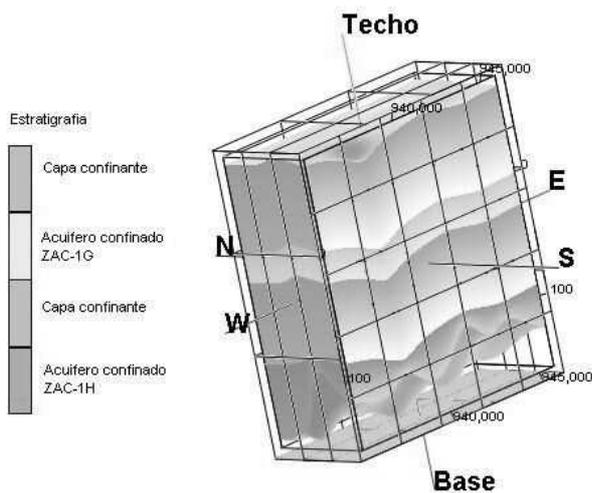


Figura 15. Diagrama de bloque zonas acuíferas confinadas ZAC-1g y ZAC-1h

12.4 Vulnerabilidad

El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se usa para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, S. y Hirata, R., 1991). Se obtuvo un mapa de vulnerabilidad (Figura 18) mediante el método DRASTIC (Aller, L. et al., 1987), que se fundamenta en 4 hipótesis principales:

- El contaminante se introduce por la superficie del terreno

- El contaminante fluye hacia las aguas subterráneas por medio de la precipitación
- El contaminante tiene la movilidad del agua
- El área evaluada es mayor de 0.4 km²

Además, la aplicación del método se basa en una cuantificación de la influencia en la vulnerabilidad de los siguientes siete factores.

- Profundidad del nivel freático, D_r (Depth to Ground Water)
- Recarga (Recharge rate), R_r
- Medio acuífero (Aquifer media), A_r
- Tipo de suelo (Soil media), S_r
- Topografía (Topography), T_r
- Impacto de la zona vadosa (Impact on vadose zone), I_r
- Conductividad hidráulica (Conductivity), C_r

Cada uno de estos parámetros tiene un valor base en un sistema de clasificación desarrollado por Aller. Estos factores se multiplican por un factor de peso y luego se suman para calcular el índice DRASTIC, así:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

A partir de la información disponible y con base en la interpretación de las diferentes características del área de estudio, se decidió que para calcular el índice DRASTIC, era válido considerar uniformes los parámetros: medio acuífero, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica. Por lo tanto, los parámetros más importantes que condicionan la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la región son: profundidad del nivel freático, recarga, tipos de suelos y la topografía. Estos parámetros obedecen a condiciones naturales que pueden variar y no son controlables; en consecuencia, se considera que las políticas de protección del recurso agua subterránea deben dirigirse a la reducción de la amenaza que representa la presencia de cargas contaminantes, teniendo especial cuidado con las zonas catalogadas como de alta vulnerabilidad.

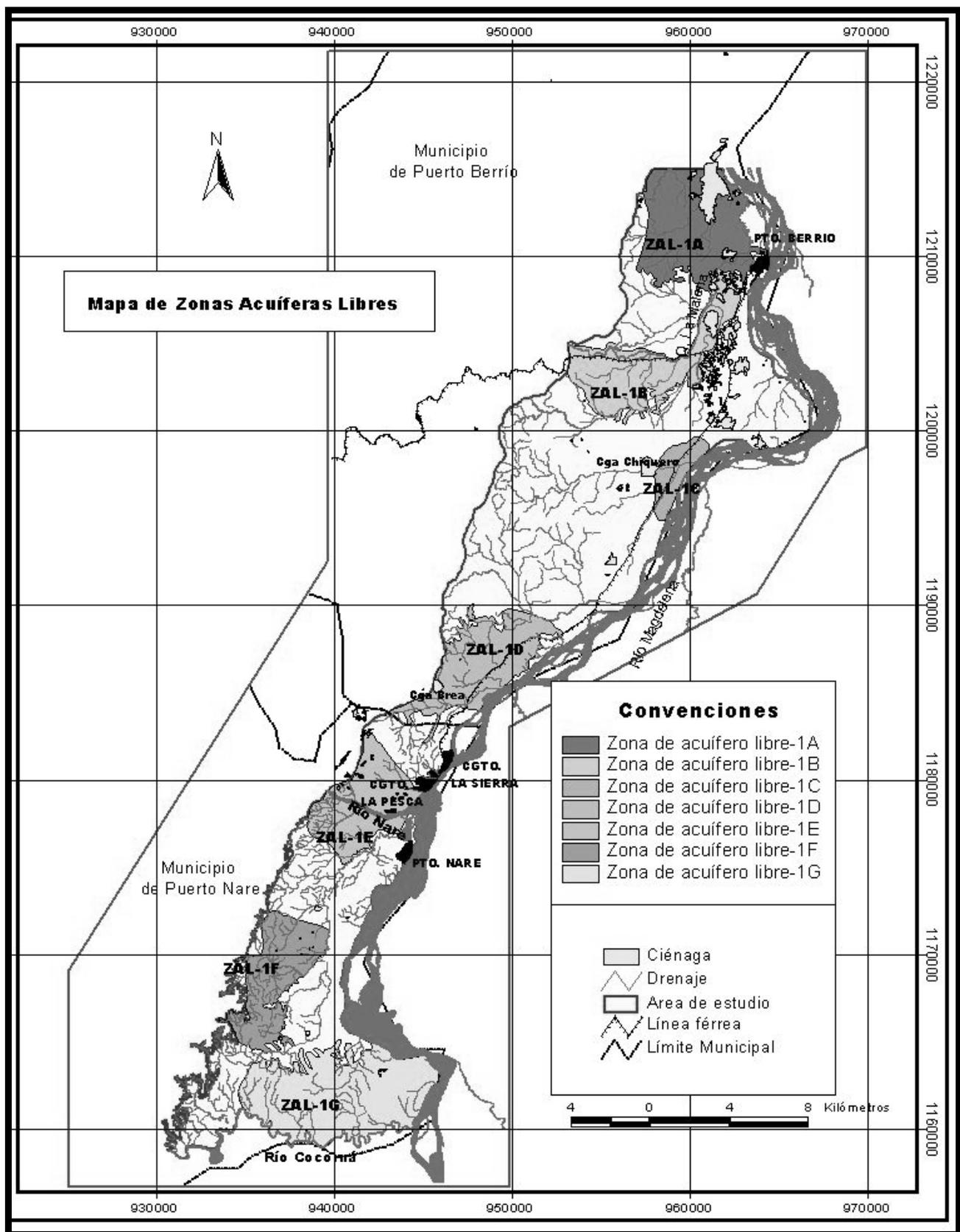


Figura 16. Ubicación de las diferentes zonas acuíferas libres.

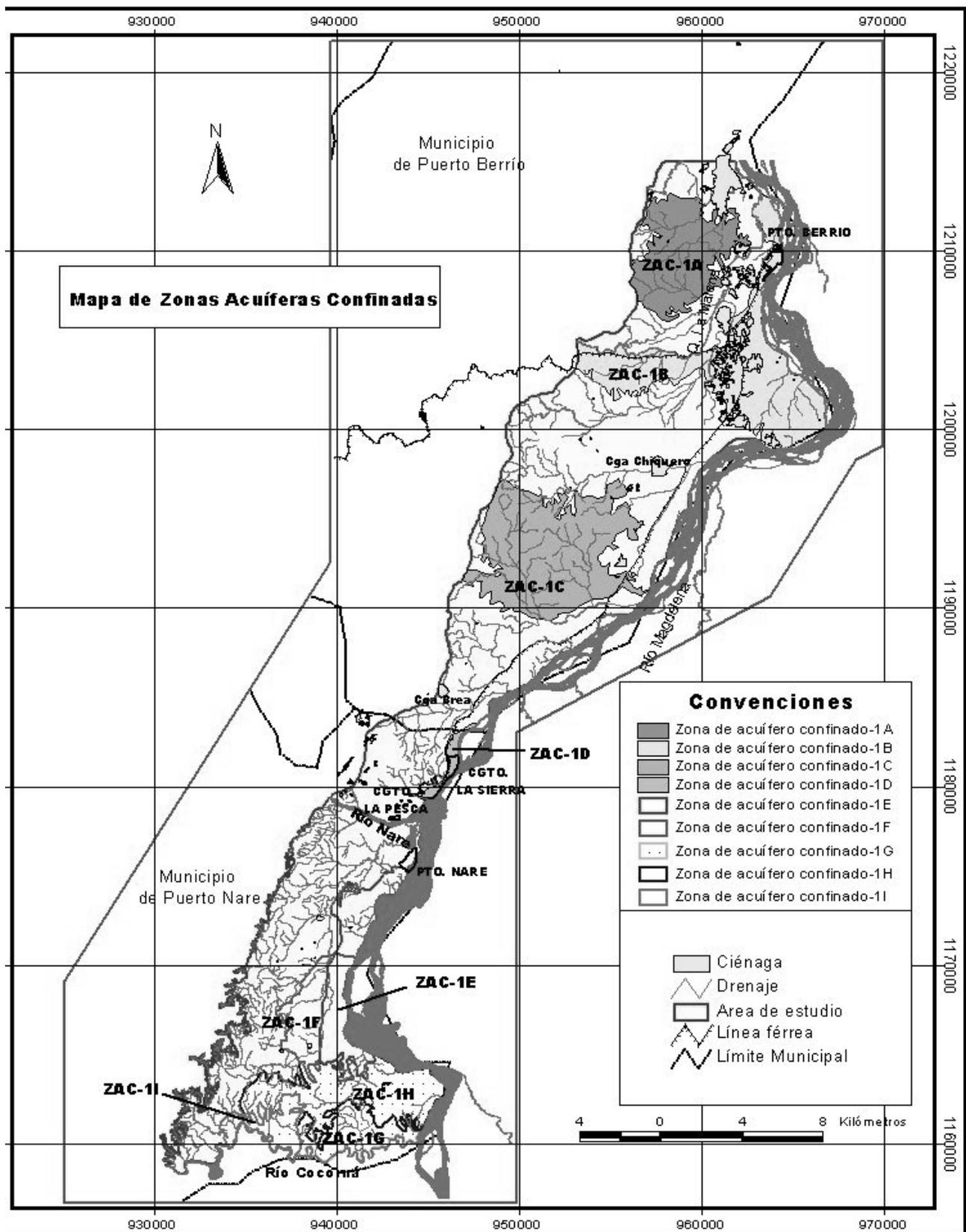


Figura 17. Ubicación de las zonas acuíferas confinadas

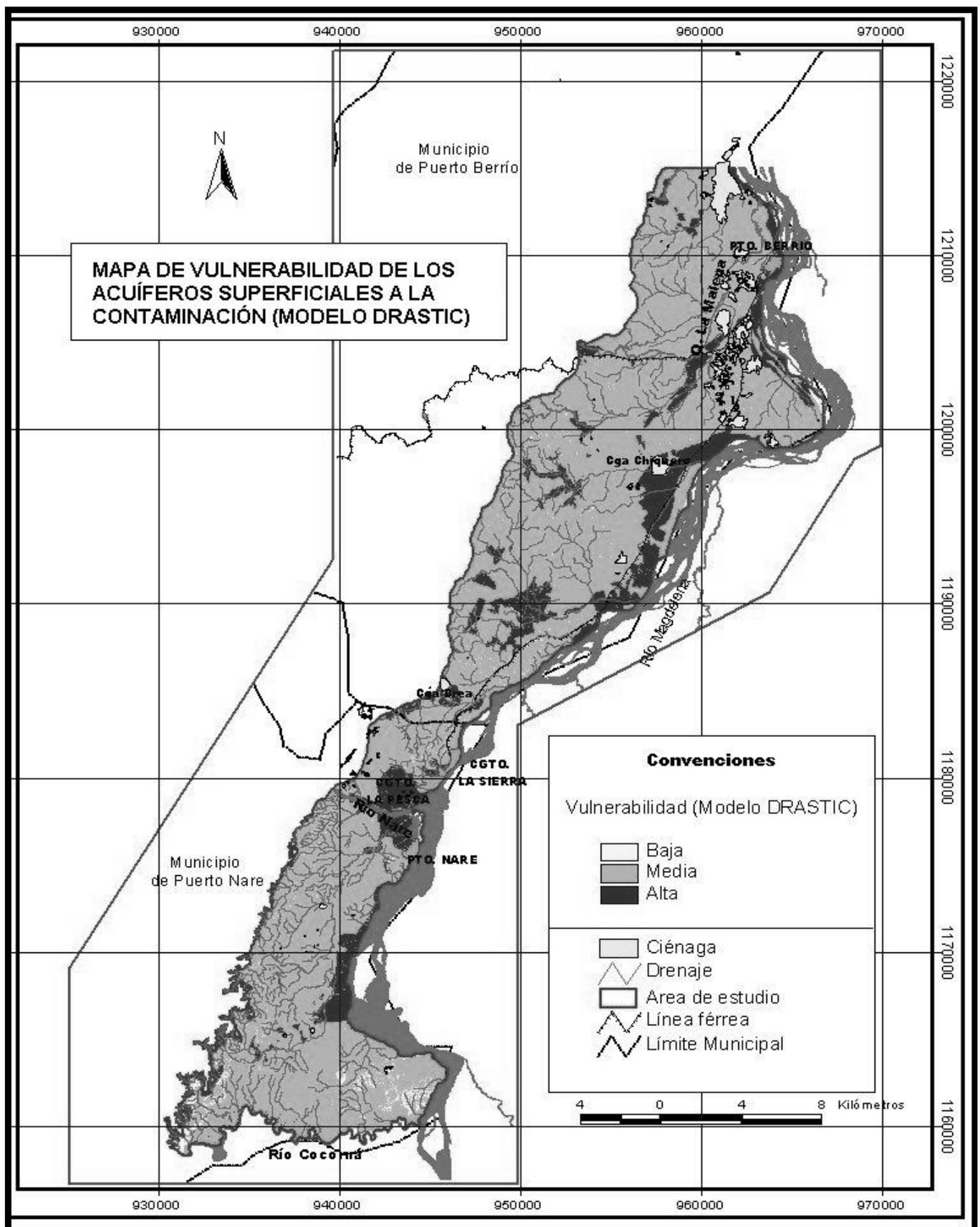


Figura 18. Mapa de recarga en un año normal

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CORANTIOQUIA y a las autoridades, las empresas y las comunidades de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare, por permitir la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ALLER, L. et al., 1987. DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential using Hydrogeological Settings. E. P. A./600/2-87/035.

BARCELONA, M., KEELY, J. F., PETTYJOHN, W. A. y WEHRMANN, A., 1988. Handbook of Groundwater Quality Protection. Science Information Resource Center, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC., USA.

BERMUDEZ, J. M. y CUBILLOS, J. 1991. Prospección Geofísica y Perforaciones en la Mina el Guayacán. Minas Unidas Puerto Nare Antioquia, informe n.IR-183.

BOYD, T., 1999. Introduction to Geophysical Exploration. En internet: http://www.mines.edu/fs_home/tboyd/GP311/introgp.shtml

BRADBURY, K. et al., 2000. Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates. University of Wisconsin, USA. 84p.

CASTANY, G. 1975. Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas. Omega, Barcelona. 738p.

DE PORTA, J., 1965. Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario en el Extremo Sur del Valle Medio del Magdalena. En: Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

DIEZEMANN, W. y DELGADO, C. 1956. Condiciones Hidrogeológicas para un Acueducto de Agua Subterránea en Puerto Berrío, Departamento de Antioquia. Instituto Geológico Nacional. Colombia.

DUEÑAS, H. y CASTRO, E. 1981. Asociación Palinológica de la Formación Mesa en la Región Salán - Tolima, Colombia. En: Geología Norandina, Bogotá, Colombia. (3): 27-36.

EDMUNDS W. M. y SMEDLEY P. L., 1996. Groundwater Geochemistry and Health: an overview. En: Environmental Geochemistry and Health. Editado por: J. D. Appleton, R.

Fuge, G. J. H McCall. Geological Society Special Publication. (113) 264 p.

FEININGER, T., BARRERO, D., y CASTRO, N. 1972. Geología de parte de los Departamentos de Antioquia y Caldas (subzona II-B). Boletín Geológico vol. XX (2): 24-28.

FETTER, C., 1988. Applied Hydrogeology. Macmillan, New York, USA. 592p.

FOSTER, S. y HIRATA, R., 1991. Determinación del Riesgo de Contaminación de Agua Subterránea: una metodología basada en datos existentes. Segunda Edición. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS. Lima, Perú. 81p.

FREEZE, A. R. y CHERRY, J. A., 1979. Groundwater. Prentice Hall, New Jersey, USA. 604p.

GONZÁLEZ, H., 1996. Memorias Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Ingeominas, Colombia.

GOVEA, C. y AGILERA, H., 1985. Cuencas Sedimentarias de Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos. Manizales, Colombia.

HOME, M., 1969. Geologic Studies of the Mesa Group (pliocene?) Upper Magdalena Valley. Bogotá, Colombia. HUBACH, E., 1957. Contribución a las Unidades Estratigráficas de Colombia. Bogotá, Colombia.

HUGUETT, A., 1989.. Mapa Hidrogeológico de Colombia 1989: Memoria Explicativa. Ingeominas. Colombia. INGEOMINAS. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia: Geología, Recursos Minerales y Amenazas Potenciales. Escala 1:400.000.

IDEA UNAL, 2001. Prediagnóstico Físico Y Socio Cultural Participativo del Estado Ambiental de los Humedales del Magdalena Medio Antioqueño en la Jurisdicción de Corantioquia. Medellín, 193 p.

JULIVERT, M., 1961. Estructura del Valle Medio del Magdalena y su Significación. En: Boletín de Geología, Bucaramanga, Colombia. (6): 33 - 52.

MAXEY, G. B., 1964. Hydrostratigraphic Unities. Journal of Hydrology (2): 124-129.

MOJICA y FRANCO, 1990. Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. En: Geología Colombiana. Bogotá. (17): 41-64.

NOAA / NATIONAL WEATHER SERVICE / CLIMATE PREDICTION CENTER. Cold and Warm Episodes by season. En internet:

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.html

PÉREZ P., J. A., 1997. Manual de Potablización del Agua. 3ra edición. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 504 p.

RUSHTON, K. R. y WARD, C., 1979. The estimation of groundwater recharge. En: Journal of Hydrology, No 41. p. 345-361.

TABOADA A. et al. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, vol. 19, N° 5, pp. 787-813

UNICEF, 2001. En internet: <http://www.npwa.freeseerve.co.uk/unicef.html>

VAN OVERMEEREN, R., 1987. Aplicación de los Métodos Geodésicos en Trabajos de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá.