ESTUDIO TECNICO DEL ACUIFERO MORROA

Elaborado por:
GRUPO DE AGUAS
Subdirección de Gestión Ambiental

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SUCRE
CARSUCRE

Sincelejo –mayo de 2017

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 4

2 GENERALIDADES. 5

2.1 LOCALIZACIÓN. 5
2.2 HIDROLOGÍA 6
2.2.1 HIDROGRAFÍA. 6
2.2.2 INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA. 6
2.2.3 PRECIPITACIÓN. 6
2.3 DEMANDA DE AGUA 7
2.4 OFERTA HIDRICA 10

3 GEOLOGÍA 11

3.1 GEOMORFOLOGÍA. 11
3.1.1 PAISAJE DE MONTAÑA: 11
3.1.2 PAISAJE DE LOMERÍO: 11
3.2 ESTRATIGRAFÍA 12
3.2.1 FORMACIÓN SINCELEJO 12

4 HIDROGEOLOGÍA 14

4.1 NIVELES DEL ACUÍFERO MORROA (FIGURA 8). 16
4.1.1 NIVEL ACUÍFERO A. 16
4.1.2 NIVEL ACUÍFERO B. 16
4.1.3 NIVEL ACUÍFERO C. 17
4.1.4 NIVELES ACUÍFEROS D Y E. 17
4.2 BALANCE HIDRICO DEL ACUÍFERO MORROA (FIGURA 8). 18
4.3 RED DE MONITOREO 19
4.3.1 VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS NIVELES. 20
4.3.2 VARIACIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES 21
4.3.3 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS DEL ACUÍFERO MORROA 23
4.3.4 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA 24
4.4 CARACTERIZACION HIDROQUIMICA E ISOTOPICA. 25
4.4.1 HIDROQUÍMICA 25
4.4.2 ISÓTOPOS (IAEA/WMO, 2015) 26
4.4.3 HIDROQUÍMICA E ISOTOPÍA DEL NIVEL A 28

4.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y MODELO SÍSMICO REGIONAL 31

5 MANEJO SOSTENIBLE DEL ACUIFERO MORROA 33

6 REFERENCIAS 36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del acuífero Morroa. 5
Figura 2. Precipitación media mensual multianual, Estación, Aeropuerto Las Brujas (Corozal) 1984 - 2014 7
Figura 3. Niveles acuíferos de Morroa 10
Figura 4. Geomorfología del acuífero Morroa. Paisaje de Lomerío y montañoso 11
Figura 5. Corte Geológico Regional 13
Figura 6. Mapa hidrogeológico del acuífero Morroa..... 14
Figura 7. Corte ilustrativo de la configuración monoclinal del acuífero Morroa. .. 15
Figura 8. Corte geológico con los niveles del acuífero Morroa 16
Figura 9. Cálculo de la recarga puntual del acuífero Morroa, utilizando Hydrus 1D 19
Figura 10. Mapa de localización de piezómetros red de monitoreo 20
Figura 11. Redes de flujo del acuífero Morroa: a) En el año 2003 y b) En el año 2011 21
Figura 12. Variación temporal de los niveles del agua en el acuífero Morroa: a) Piezómetro 01-A; b) Piezómetro 14; c) Piezómetro 22 y d) Piezómetro 02. 22
Figura 13. Variación de la concentración de NaCl en el piezómetro 44-IV-D-PZ-22 con marcado de toda la columna. 24
Figura 14. Variación de la concentración de NaCl en el piezómetro 44-IV-D-PZ-22 con inyección puntual. 25
Figura 15. Diagrama de Piper de las aguas subterráneas de la zona..... 26
Figura 16. Composición isotópica de las aguas subterráneas del acuífero Morroa. 27
Figura 17. Relacion $^{14}C/^{13}C$. 27
Figura 18. Diagrama de stiff de las aguas subterráneas del acuífero Morroa, lluvias y Arroyo Grande. 29
Figura 19. Diagrama de Piper nivel A acuífero Morroa. 31

Figura 20. (A) Modelo hidrogeológico conceptual. (B) Geometría del acuífero Morroa. 32
Figura 21. Esquema para el manejo sostenible del acuífero Morroa 35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo de la demanda de agua de los municipios que se surten del acuífero Morroa. 9
Tabla 2. Recarga anual por sectores del acuífero Morroa 18
Tabla 3. Resultados fisicoquímicos del acuífero de Morroa nivel A. 30

1 INTRODUCCIÓN

Desde el año 2001, la Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE, viene desarrollando el Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas, PPIAS, en el área de su jurisdicción, con el fin de contribuir a la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo. Este proyecto ha tenido el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, la asesoría del Servicio Geológico Colombiano, SGC, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM, e Instituciones de Investigación como la Universidad de Sucre, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Antioquia.

Los dos principales problemas que tiene el acuífero Morroa: la sobreexplotación y el peligro de contaminación por actividades antrópicas. Lo primero se determinó por la concentración de pozos en un área determinada, el bombeo continuo de los pozos y por el descenso continuo del nivel del agua dentro de ellos. Lo que pone en serio peligro la sostenibilidad del recurso. Según estudios realizados en el sector del campo de pozos de Corozal por varias entidades públicas y privadas (INGEOMINAS, 1992; FINAGUAS, 2000 y CARSUCRE, 2003), la recarga está entre 45 y 75 l/seg, mientras que la extracción actual en el mismo sector, está entre 1000 y 1200 l/seg. Esto indica que se está haciendo una extracción minera del acuífero.

En cuanto al peligro de contaminación por actividades antrópicas, tenemos que varios sectores del área de recarga, sobre todo el campo de pozos de Corozal, el de Sampués y el de Ovejas son atravesadas por el arroyo Grande de Corozal, el Arroyo El Canoa y el arroyo Mancomoján, en donde se vierten las aguas residuales sin tratar de los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa en el caso del primero, Sampués en el segundo y Ovejas en el tercero; además numerosos pozos de absorción y pozos sépticos en la zona de recarga; también se ha detectado actividades agrícolas que utilizan agroquímicos sobre la zona de recarga del acuífero y actividades ganaderas, igualmente cementerios en tierra, estaciones de servicios, basureros a cielo abierto, pozos abandonados y mal sellados, entre otras fuentes posibles de contaminación. La vulnerabilidad del acuífero según estudios realizados por la Universidad de Sucre es media a alta, media en aquellos sectores como el campo de pozos de corozal, en donde la zona vadosa es de más de 50 metros y alta donde la zona vadosa es de 10 y 20 metros.

En este documentos de presentan los aspectos técnicos más importantes del acuífero Morroa.

2 GENERALIDADES.

2.1 LOCALIZACIÓN.

El Departamento de Sucre se encuentra localizado en la parte nor-occidental de Colombia, en la región de la Costa Caribe. El acuífero Morroa está localizado en la parte central del Departamento de Sucre (Figura 1) y su área de recarga se encuentra parcialmente en la jurisdicción de los Municipios de Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sincelejo y Sampués; tiene un área total de 1120 km^2, ubicada dentro de las coordenadas geográficas:

Punto 1: 9°35'11.6"N y 75°08'28.2"W **Punto 2**: 9°08'20.9"N y 75°22'59.1"W

Punto 3: 9°15'01.8"N y 75°28'38.5"W **Punto 4:** 9°03'20.3"N y 75°04'34.3"W

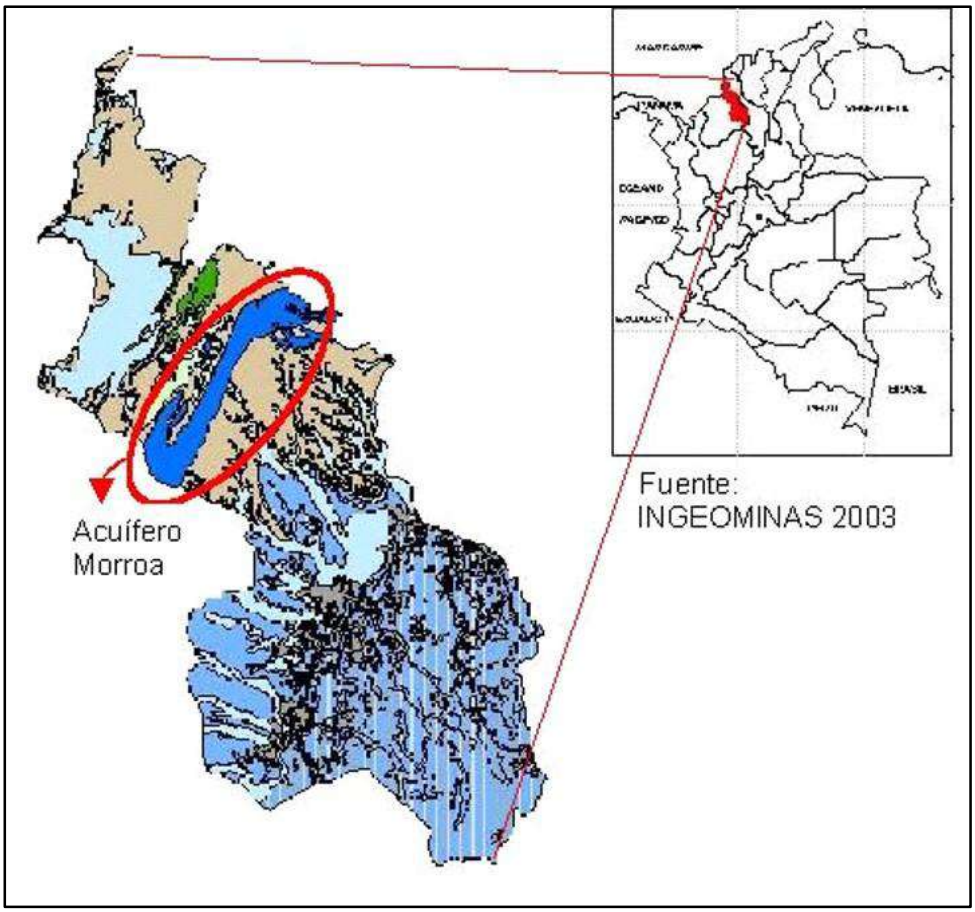

Figura 1. Localización del acuífero Morroa.

2.2 HIDROLOGÍA

2.2.1 Hidrografía.

La red hidrográfica del área está conformada por un sistema de corrientes superficiales temporales (solo llevan agua en las épocas de lluvia). Las corrientes que tienen agua perenne, es porque llevan aguas residuales domésticas, como el Arroyo Grande de Corozal, el cual recibe las aguas negras de Los Municipios de Sincelejo, Corozal y Morroa; el Arroyo Caracolí, sobre el cual se vierten las aguas residuales del Municipio de Los Palmitos; el Arroyo Canoas, donde se vierten las aguas negras del Municipio de Sampués; y el Arroyo Mancomoján que lleva las aguas residuales del Municipio de Ovejas.

Todos estos arroyos, atraviesan la zona de recarga del Acuífero Morroa y están vertiendo a la cuenca hidrográfica Cauca Magdalena. Otros arroyos importantes son los afluentes del arroyo Pechelín como el arroyo Cambimba, el arroyo Cocuelo, arroyo Arena y arroyo El Coco.

2.2.2 Información hidroclimática.

El clima es típico de una formación alternativamente húmeda y seca, con alternancia de bosques secundarios, pocos relictus de bosque primario, matorrales y dominantes áreas de pastizales. La temperatura promedio en la zona es de 28°C y la precipitación anual es de 1000-1200 mm. Según Holdridge, citado por De La Ossa (1998), se cataloga como bosque seco Tropical (bs-T), perteneciente al sistema Bioma Azonal de Tierras Bajas (Pedobioma de Sabanas), con formaciones climáticas de piso Isomegatérmico. (Cárdenas & Garrido, 1997)

2.2.3 Precipitación.

La zona presenta una precipitación media anual de 1135 mm (IDEAM, 2014), la cual se distribuye en forma irregular durante todos los meses del año (Figura 2), distinguiéndose claramente dos períodos climáticos en el año así: un periodo seco que vas desde el mes de diciembre hasta el mes de marzo; y un período lluvioso que va desde el mes de mayo y se extiende hasta el mes octubre, con un pequeño veranillo en junio y julio.

El mes de abril se considera de transición entre el periodo seco y el período lluvioso, mientras que el mes de noviembre se considera de transición entre el período lluvioso a la período seco.

2.3 DEMANDA DE AGUA

Para determinar la demanda de agua de la población que se abastece del acuífero Morroa, se tomó como referencia la población urbana y rural proyectada a 2016 del Censo Dane 2005 (DANE, 2015). Con base a las proyecciones se determinó la demanda según lo exige "El Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico" (RAS, 2000).

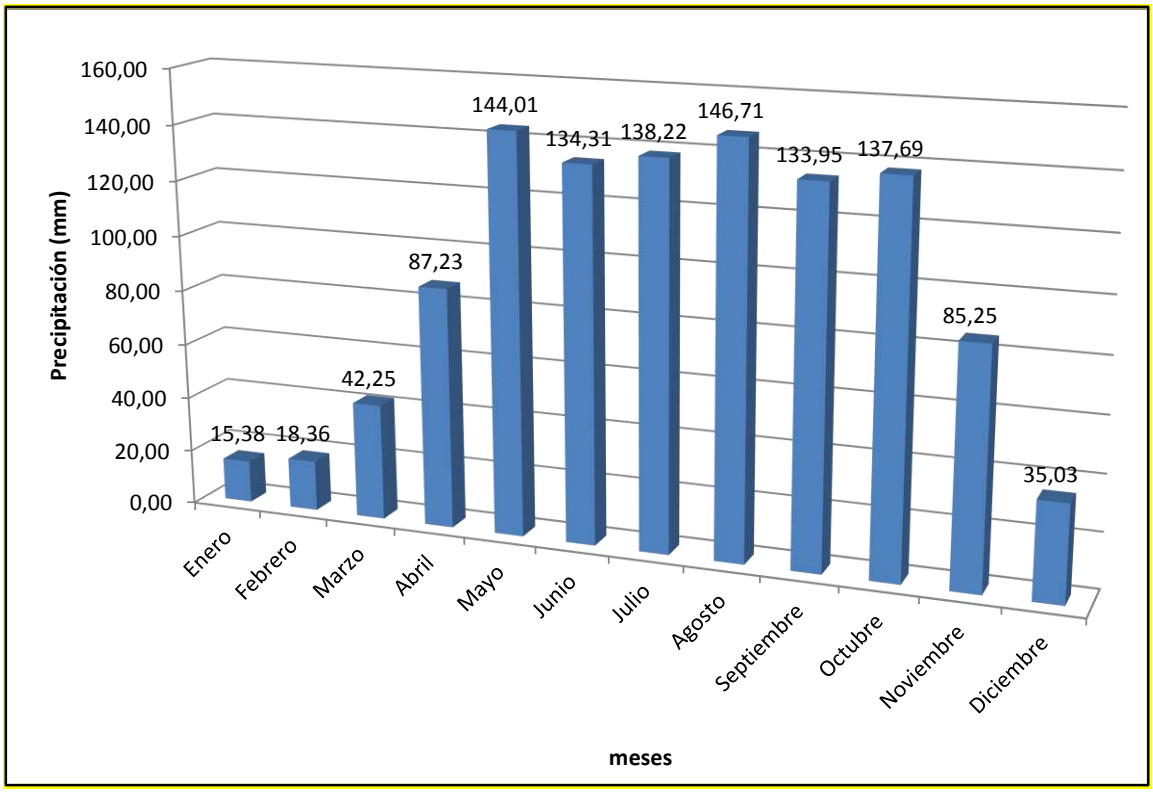

Figura 2. Precipitación media mensual multianual, Estación, Aeropuerto Las Brujas (Corozal) 1984 - 2014

En la tabla 1 se presenta los resultados de los cálculos de demanda realizados en los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa, Los Palmitos, Ovejas, San Juan de Betulia y Sampués.

De esta manera se obtiene que la demanda de agua total en todo el acuífero Morroa es 1621 lps, mientras que la demanda de agua en el área crítica, conformada por el

campo de pozos de Sincelejo, Corozal, Morra y San Juan de Betulia, es 1122 lps equivalentes a un 69% de la demanda total.

De todos los municipios que se abastecen del acuífero Morroa, Sincelejo es el que tiene una demanda más alta (835 lps), mientras que el municipio de Morroa es el que tiene una demanda más baja (21 lps).

Tabla 1. Cálculo de la demanda de agua de los municipios que se surten del acuífero Morroa.

Municipios	Zona	Población (hab.) *	Nivel Comple-jidad	Dotación Neta (l/hab-día)	Institucional, industrial (l/hab-día) 5-10%D.N.	Correción tempera-tura (l/hab-día) 15%D.N.	Dotación Neta corregida (l/hab/día)	Dotación Bruta (l/hab-día) 20%PT	Demanda (l/s)	Demanda (m3/dia)
Sincelejo	Cabecera	261.510	Alto	180	18	27	225	270	834,6	72.109,99
	rural	17.521	Bajo	130	6,5	19,5	156	187,2	55,9	4.831,32
Corozal	Cabecera	51.616	Alto	160	16	24	200	240	164,7	14.232,84
	Rural	11.214	Bajo	130	6,5	19,5	156	187,2	35,8	3.092,20
Morroa	Cabecera	6.710	Bajo	150	15	22,5	187,5	225	21,4	1.850,25
	Rural	7873	Bajo	120	6	18	144	172,8	25,1	2.170,94
Los Palmitos	Total	19.245	Medio Alto	150	15	22,5	187,5	225	61,4	5.306,71
Ovejas	Total	21.030	Medio Alto	150	15	22,5	187,5	225	67,1	5.798,91
Sampués	Total	38.067	Medio Alto	150	15	22,5	187,5	225	121,5	10.496,77
San Juan de Betulia	Total	12.557	Medio Alto	150	15	22,5	187,5	225	40,1	3.462,53
El Carmen de Bolivar	Cabecera	60.708	Alto	160	16	24	200	240	193,7	16.739,91
TOTAL		508.051							1.621	140.092,36

* Población proyectada a 2016 del Censo Dane 2005. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

2.4 OFERTA HIDRICA

El sector más crítico del acuífero Morroa se encuentra en la zona del campo de pozos de los acueductos de los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa y Betulia; Esta zona tiene un ancho promedio de 7 km. y se extiende desde el sur de los Palmitos hasta el norte el corregimiento de Don Alonso a lo largo de 19 km., ocupando una superficie de 131 km^2 aproximadamente.

Para calcular la oferta hídrica en este sector del acuífero Morroa se calcularon las reservas elásticas y de almacenamiento de cada una de los niveles acuíferos, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 3):

Tanto los niveles acuíferos como el buzamiento que presentan cada uno son continuos y constates; debido a que los resultados isotópicos, de infiltración y permeabilidad y balances hídricos, indican una recarga muy baja (7 a 34 mm/año), se consideró una recarga nula; se toma como referencia el coeficiente de almacenamiento para cada capa, el calculado en los pozos, que característicamente captan cada una estas; el espesor promedio de las capas permeables y la porosidad se tomó de los informes anteriores (FINAGUAS, 2001); no se tuvo en cuenta el posible goteo a partir de las capas semipermeables que separan los niveles acuíferos y el goteo desde la Formación Betulia suprayacente. Y se asumió una franja lateral de 3,5 km. hacia el oriente desde el afloramiento del nivel A; no obstante, por obvias razones toda esta cantidad de agua almacenada no se puede extraer, por lo que se estima que el máximo nivel dinámico que se pueda alcanzar no debe sobrepasar los 200 metros para que la explotación del acuífero sea técnica, económica y ambientalmente posible. De esta manera se calcularon para esta zona, unas reservas totales de 3.286 Hm^3 y unas reservas disponibles de 719 Hm^3. (Herrera, Pacheco, & Villegas, Caracterización hidráulica del acuífero Morroa a través de pruebas de bombeo., 2003)

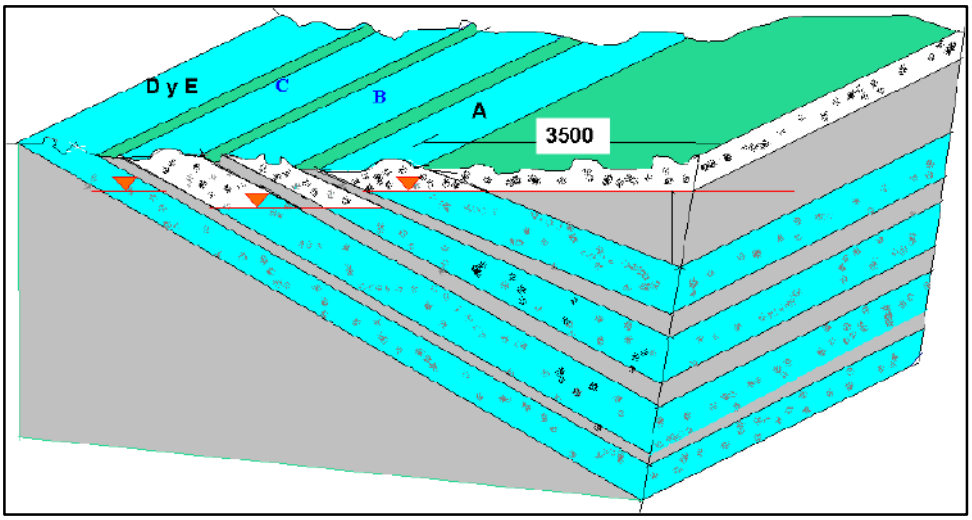

Figura 3. Niveles acuíferos de Morroa

3 GEOLOGÍA

Geológica y estructuralmente el acuífero Morroa se encuentra ubicado en el Cinturón Plegado de San Jacinto, el cual tiene un rumbo aproximado suroeste-noreste (Reyes, 2001) y está constituido por rocas de origen marino, transicional y continental de edad desde el Cretáceo Superior.

3.1 GEOMORFOLOGÍA.

La zona donde aflora el acuífero Morroa se compone geomorfológicamente de dos paisajes dominantes: El paisaje de Montaña y el Paisaje de Lomerío.

3.1.1 Paisaje de Montaña:

Se presenta en toda la franja occidental del acuífero, entre los corregimientos de Brisas del Mar, Las Flores, Cambimba y Naranjal; es una porción de tierras elevadas, escabrosas y profundamente disectada, que tiene una altura relativamente importante en relación con otros paisajes que la circundan; tienen disección interna que genera relieves de gran energía entre las áreas montañosas y los valles intercalados. Está afectada por escurrimiento difuso normal, intenso y concentrado (Figura 4).

3.1.2 Paisaje de Lomerío:

El paisaje lomerío ocupa la mayor parte del territorio del área de recarga del acuífero Morroa, corresponde a una repetición de colinas alargadas separadas por una red hidrográfica moderadamente densa; el ambiente morfogenético es erosional. Las zonas poco erosionadas comprenden relieves ligeramente ondulados sobre materiales arcillosos y a veces, materiales con arena, cascajo y gravilla (Figura 4).

Figura 4. Geomorfología del acuífero Morroa. Paisaje de Lomerío y montañoso

3.2 ESTRATIGRAFÍA

Estratigráficamente el acuífero Morroa corresponde al miembro superior de la Formación Sincelejo, y se encuentra suprayaciendo al miembro inferior de esta misma Formación e infrayaciendo al Formación Betulia.

3.2.1 Formación Sincelejo

Aflora en la zona central y occidental del área de estudio, conformando un sistema de colinas alargadas en dirección noreste, de topografía abrupta, con pendientes muy fuertes y vertientes cortas; son comunes los caballetes. Esta formación se compone de dos conjuntos principales que son:

Formación Sincelejo Inferior (Tpsi). En la parte occidental y norte se encuentra conformando los flancos de un pliegue anticlinal y en la parte central el núcleo del anticlinal de Sincelejo. "Litológicamente consta de un conjunto de areniscas arcillosas "sucias" con cemento arcilloso-calcáreo, capas conglomeráticas y un conjunto arcilloso" (INSFOPAL, 1981).

Formación Sincelejo Superior (Tpss). Está conformada "por una serie de areniscas micáceas de grano fino a medio, poco cementadas con cemento arcilloso, alternando con areniscas conglomeráticas compuestas por cantos de liditas y cuarzo, mejor cementados, donde el cemento calcáreo es dominante" (INSFOPAL, 1981).

Estructuralmente esta formación se encuentra suprayaciendo la Formación Sincelejo Inferior e infrayaciendo la Formación Morroa; conformando los flancos de los pliegues anticlinales y sinclinales que afectan a formaciones de origen marino más antiguas (Formaciones Toluviejo, Tet, y El Carmen, Tmc). Es muy característico el gran control estructural que presenta por lineamientos y fracturas. Al igual que la Formación Sincelejo Inferior es muy pobre en cuanto a producción de agua, la cual generalmente es de regular calidad físico-química.

Recientemente, Barrera y Clavijo (INGEOMINAS, 2002), proponen dividir la Formación Sincelejo en un Miembro Inferior que incluye el Sincelejo Inferior y Superior de Kassem y un Miembro Superior que incluye la Formación Morroa.

A la Formación Sincelejo se le ha asignado con base en fauna una edad Mioceno Superior (De Porta, 1963) y Plioceno Superior (Duque-Caro, 1975).

Miembro Superior de Sincelejo (Tpm). Corresponde con el acuífero Morroa, aflora formando una franja amplia y alargada que se extiende en dirección N 10º E, con un promedio de 3 km de ancho. Es sobre este miembro que se encuentran localizada las cabeceras municipales de Corozal, Morroa, Los Palmitos Ovejas y Sampués. Se caracteriza por presentar una topografía ondulada formada por un sistema de colinas bajas alargadas, de pendientes suaves a moderadas y vertientes

cortas, alternando con valles pequeños poco profundos. Litológicamente está constituido principalmente por “capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales” (INGEOMINAS, 1993). Estructuralmente se encuentra conformando un gran monoclinal con rumbo N 25º E y buzamientos variables desde 5º a 20º al SE. El buzamiento aumenta hacia la base, a medida que se acerca al contacto con la Formación Sincelejo Superior, a la cual suprayace aparentemente en forma discordante (Figura 5).

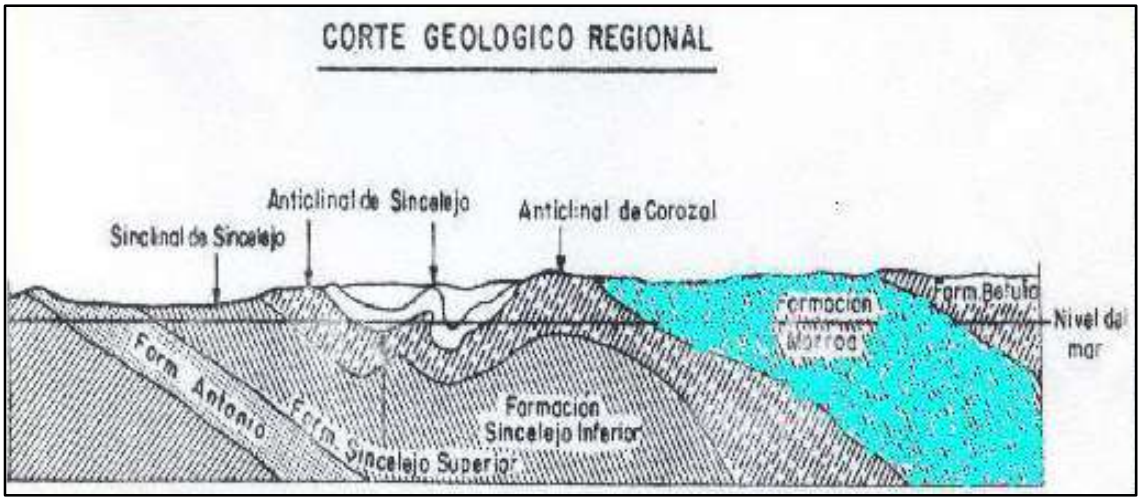

Figura 5. Corte Geológico Regional

Formacion Betulia (Qpb). Aflora en la parte oriental del acuífero, y se encuentra suprayaciendo en aparente concordancia a la Formación Morroa. Se caracteriza por presentar colinas muy suaves de poca altura con topografía plana a ligeramente ondulada que descienden ligeramente hacia el sureste, morfología típica de las Sabanas Sucre. Litológicamente está constituida por una secuencia monótona de arcillas abigarradas con intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas con gravas y delgadas capas y lentes de arenas arcillosas. Se ha propuesto subdividir la unidad en un conjunto arcilloso hacia la base y un conjunto arenoso hacia la parte superior (INGEOMINAS, 1993).

Depósitos Aluviales (Qal). Se localizan a lado y lado de los principales arroyos de la zona; en general son de poco espesor y están formados por arenas sueltas, gravas, arcillas y limos, producto de la sedimentación detrítica de estas corrientes. El principal depósito aluvial es el de los Arroyo Corozal, Canoas (al sur) y Mancomoján (al norte), que atraviesa una parte de la zona de recarga del acuífero.

Se caracterizan por una serie de arenas mal gradadas, con intercalaciones de arcillas con espesores hasta de 15 metros.

4 HIDROGEOLOGÍA

El acuífero Morroa, es un acuífero complejo, continuo y de extensión regional, constituido por capas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con lentes y capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales (Figura 6).

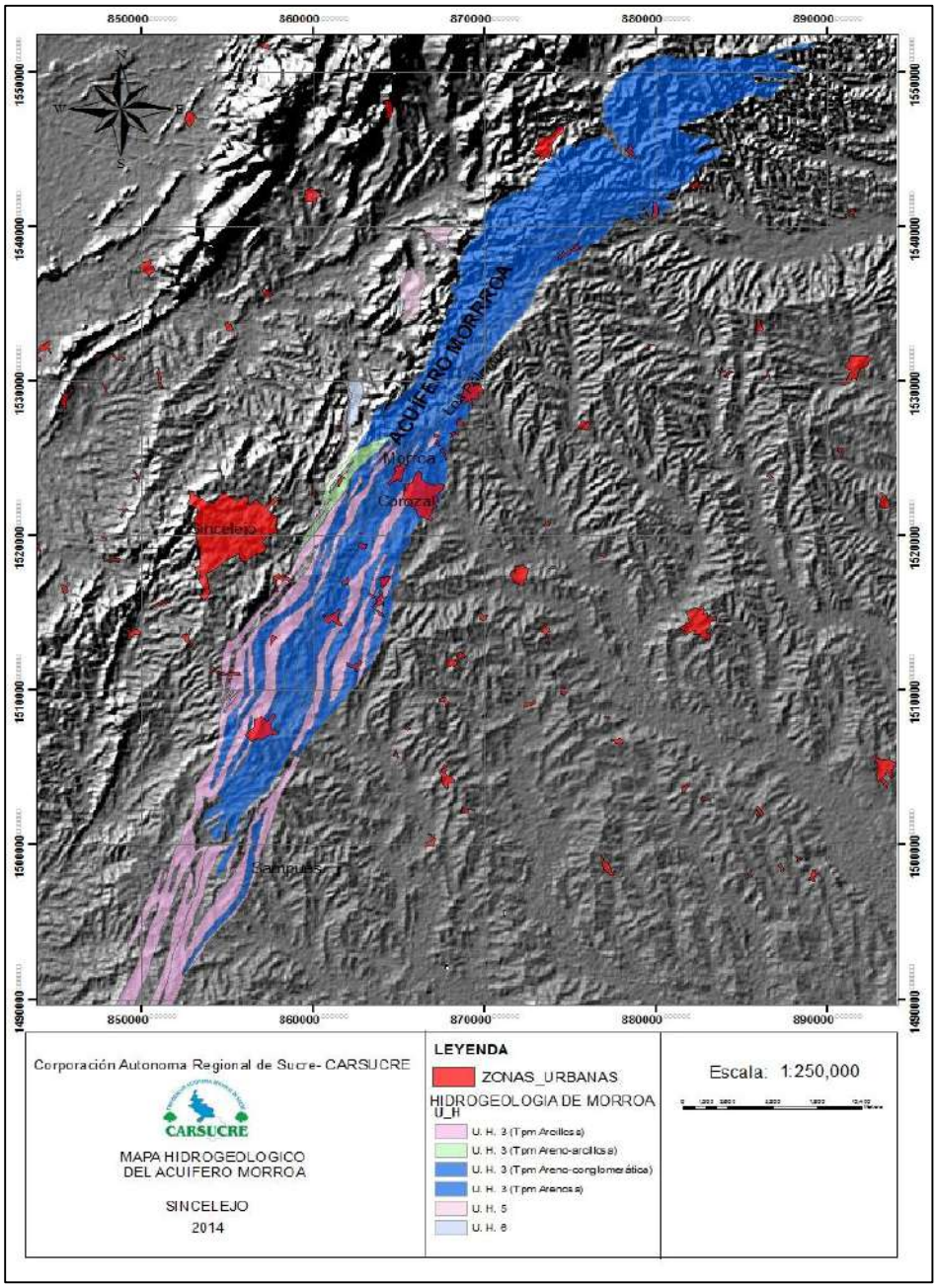

Figura 6. Mapa hidrogeológico del acuífero Morroa

Estructuralmente este acuífero se encuentra dispuesto en forma monoclinal (Figura 7) con dirección general N 25° E y buzamientos entre 5° y 20° hacia el oriente. Las capas permeables tienen un espesor hasta de 500 m y se han calculado transmisividades entre 7.5 y 603 m²/día, conductividades hidráulicas entre 4 y 12 m/día y coeficientes de almacenamiento del orden de 1.1×10^{-3} y 1.44×10^{-4}

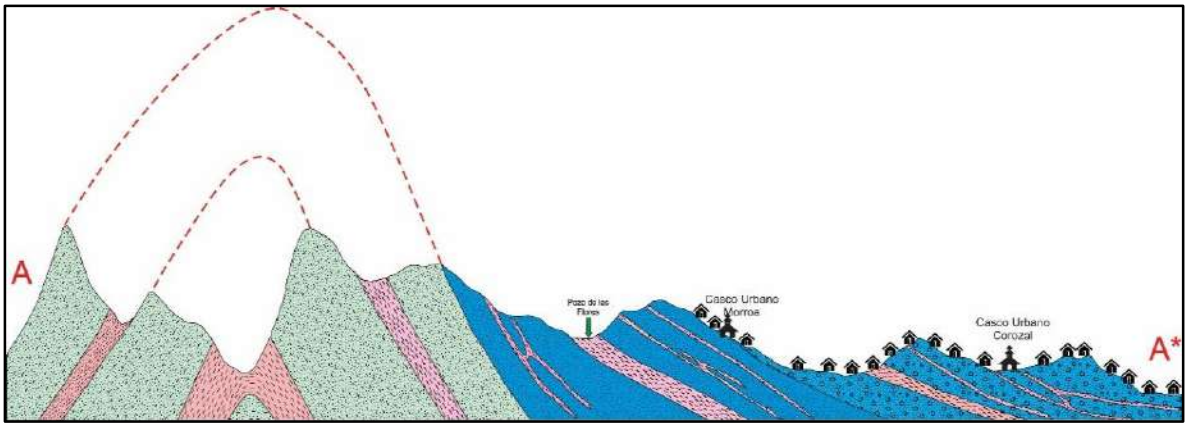

Figura 7. Corte ilustrativo de la configuración monoclinal del acuífero Morroa.

El agua de este acuífero es considerada apta para el consumo humano, de acuerdo a las normas establecidas por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la Resolución 2115 de 2007 y se han clasificado como aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas (Herrera, Romero, Vargas, & Taupin, 2009).

Según los resultados de los estudios y monitoreos realizados por CARSUCRE desde año 2001, la explotación del acuífero de Morroa es muy intensa comparada con la recarga natural tan baja que tiene y se ha concentrado en una zona específica (campo de pozos de Corozal, Sincelejo y Los Palmitos). Actualmente en el acuífero Morroa, existen 113 pozos profundos activos, 13 inactivos y 36 abandonados con profundidades entre 41 y 854 m, los cuales, extraen caudales entre 1 y 120 lit/seg., para un caudal total de extracción de 1363 lit/seg, con un régimen de bombeo de 18 horas por día. Los niveles estáticos en el campo de pozos de Sincelejo, Corozal y Morroa se encuentran entre 66 y 119 m de profundidad y los niveles de bombeo entre 87 y 160 m. El descenso promedio de los niveles estáticos medidos dentro de los pozos está entre 1 m/año y 3 m/año.

Teniendo en cuenta la descripción hidrogeológica de la Formación Morroa, realizada por INSFOPAL en la década del 70, el estudio hidrogeológico realizado por el INGEOMINAS en el 1992, las tesis de grado desarrolladas por estudiantes de la Universidad de Sucre, los estudios hidrogeológicos realizados por consultores particulares, FINAGUAS y la información de las perforaciones de los pozos, se subdividió el Acuífero de Morroa en cuatro grupos principales: Morroa Areno-conglomerática: la conforman los niveles acuíferos A y B; Morroa Arenosa: corresponde con los niveles acuíferos C y D; Morroa Areno-arcillosa: Constituida

por los niveles E y F; Morroa Arcillosa: La conforman las capas y lentes de arcilla que separan los niveles acuíferos de la formación.

4.1 NIVELES DEL ACUÍFERO MORROA (Figura 8).

4.1.1 Nivel Acuífero A.

Este nivel se encuentra hacia el techo de la Formación Morroa, en contacto con la Formación Betulia y se correlaciona con los niveles A y B definidos en el estudio del Convenio Colombo-Holandés (INSFOPAL, 1981). El casco urbano de los Municipios Corozal y de Los Palmitos se encuentra sobre este nivel acuífero y las comunidades de El Piñal, Sabanas de Cali, el Rincón, El Coley, Pileta, El Mamón, Canta Gallo y Don Alonso. Litológicamente está compuesto por areniscas líticas de grano fino hasta grueso de color gris claro y pardo, con lentes conglomeráticos y algunas capas y lentes de arcillas. El espesor de las capas permeables varía entre 30 a 226 m., con buzamientos hacia el oriente entre 5 y 10º. Presentan una permeabilidad primaria alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Con pruebas de bombeo se han calculado conductividades hidráulicas de 2.8 m/día. Desde el sector de Piletas hasta Don Alonso se subdividen en tres niveles acuífero A1, A2 y A3, que luego se unen para conformar un solo nivel en el área de Sampués y subdividiéndose hacia el sur (Chinú) en dos niveles (CARSUCRE, 2005).

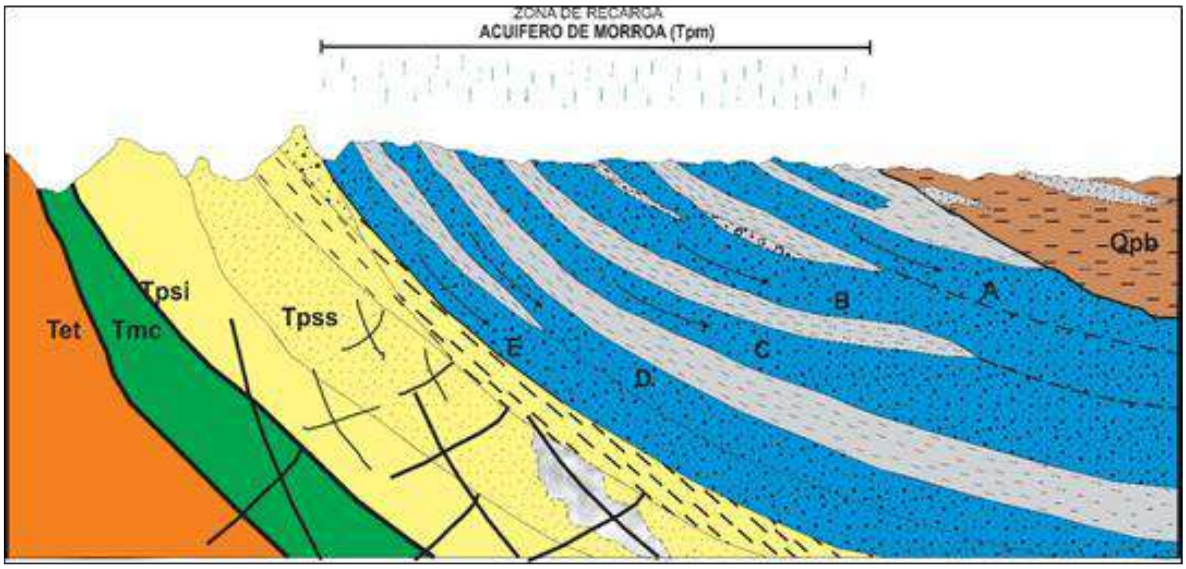

Figura 8. Corte geológico con los niveles del acuífero Morroa

4.1.2 Nivel Acuífero B.

Este nivel se encuentra debajo del nivel A, separado de éste por un lente de arcilla y se correlaciona con los niveles C y D definidos en el estudio del Convenio Colombo-Holandés (INSFOPAL, 1981). El casco urbano de los Municipios de

Morroa y Sampués, la vereda Los Hatos y los corregimientos de Las Palmas; Las Tinas y Chochó se encuentra sobre este nivel acuífero. Litológicamente está compuesto por areniscas muy friables de grano fino a medio de color amarillo a ocre, con lentes y capas de gravas sueltas hacia el techo y delgadas capas de arcilla finamente estratificadas. El espesor de las capas permeables varía entre 38 y 164 m., con buzamientos hacia el oriente entre 10º y 15º. Presentan una permeabilidad primaria moderada a alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Con pruebas de bombeo se han calculado conductividades hidráulicas de 0.5 m/día. Hacia el sur en el área de Sampués se subdivide en los niveles acuífero B1 y B2. Este nivel acuífero es el que presenta una mayor explotación (CARSUCRE, 2005).

4.1.3 Nivel Acuífero C.

Este nivel se encuentra debajo del nivel B, separado de ésta por una capa de arcilla y se correlaciona con los niveles E y F definidos en el estudio del Convenio Colombo-Holandés (INSFOPAL, 1981). Litológicamente está constituido por areniscas líticas finas de color gris, areniscas líticas medias ferruginosas, lentes y capas de gravas de color gris amarillento, areniscas arcillosas muy friables y algunos lentes de arcillolitas. El espesor de las capas permeables varía entre 40 y 60 m., con buzamientos hacia el oriente de 15º. Presentan una permeabilidad primaria alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Este nivel es captado parcialmente por el pozo de Las Flores y del Casco Urbano del Municipio de Morroa (CARSUCRE, 2005).

4.1.4 Niveles Acuíferos D Y E.

Están separados del nivel acuífero C por una capa de arcilla y entre sí por un lente arcilloso. Se correlacionan con el nivel G definido en el estudio del Convenio Colombo-Holandés (INSFOPAL, 1981). Litológicamente está constituido por areniscas líticas medias de color amarillo grisáceo algo consolidadas, areniscas finas arcillosas, algunos lentes conglomeráticos y lentes arcillosos. El espesor de las capas permeables varía entre 40 y 50 m. para el nivel D y de 40 a 60 m. para el nivel E, con buzamientos hacia el oriente de 15º. Presentan una permeabilidad primaria baja a moderada (nivel D) y moderada a alta (nivel E) y tienen una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. El Pozo de Las Flores capta la parte media superior del nivel D; y el pozo del casco urbano de Morroa capta todo el nivel D. Estos niveles acuíferos en superficie se unen con el nivel C prolongándose en forma de franja delgada, 3 km al norte de Los Palmitos, de donde vuelven a ampliarse, haciéndose difícil su diferenciación (CARSUCRE, 2005).

4.2 BALANCE HIDRICO DEL ACUÍFERO MORROA (Figura 8).

En el acuífero Morroa se han realizado varios balances hidrológicos sencillos, teniendo en cuenta la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración. De todos estos parámetros la precipitación es el que tiene más datos y de mayor confiabilidad. Aunque no se tienen mediciones directas de la escorrentía, se han hecho buenas aproximaciones teniendo en cuenta la topografía y el tipo de suelos. La evapotranspiración es el parámetro más difícil de calcular y en los balances presentados se ha determinado a partir de los datos de evaporación, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, de la estación del Aeropuerto de Corozal y aplicando diferentes fórmulas, como la de García López, Tornethwaite y Turc, etc.,

En el estudio del Convenio Colombo-Holandés (INSFOPAL, 1981), reporta para la cuenca del Arroyo Corozal en un área de 702 km^2, una infiltración eficaz de 34 mm. El balance hídrico para varios tramos del acuífero (INGEOMINAS, 1993), dieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Recarga anual por sectores del acuífero Morroa

Zona del Acuífero Morroa	Recarga anual (mm)
Corozal - Los Palmitos - El Bongo	**115,2**
Ovejas	**179**
Chinú - Sampués – Sincelejo	**92,9**
Chochó – Morroa – Corozal	**59,3**

La recarga calculada a partir de un balance hidrológico sencillo es de 39.8 mm/año (FINAGUAS, 2001).

Como resultado del trabajo realizado en el Taller sobre Recarga de Acuíferos, realizado en Cali en abril del 2003, se hizo una modelación para determinar la recarga del acuífero, utilizando el software HYDRUS-1D Versión 2.0. Para esta simulación se introdujeron datos diarios de precipitación y evaporación de 10 años, datos de la textura de los materiales encontrados en un apique y completados con los datos de la perforación de un piezómetro. Los resultados obtenidos indican que la recarga en el punto considerado durante los 10 años fue de 70 mm/año Figura 9 (CARSUCRE, 2005).

En once (11) puntos sobre la zona de recarga del Acuífero de Morroa se calcularon infiltraciones lentas a moderadamente rápidas (Rodríguez, 2004) Generalmente los

20 primeros cm del suelo están muy compactos por mal manejo de la tierra con prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas.

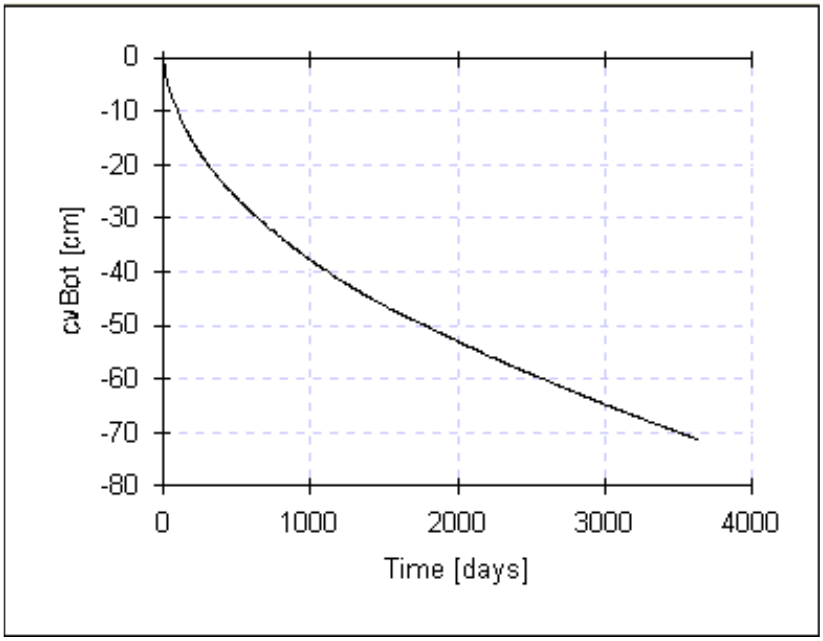

Figura 9. Cálculo de la recarga puntual del acuífero Morroa, utilizando Hydrus 1D

Cuando se compara la cantidad de agua que se extrae actualmente en el acuífero con los datos de recarga calculados en la zona de Sincelejo, Corozal y Morroa, se evidencia claramente la intensa explotación a que está actualmente sometido el acuífero, lo que explica los descensos continuos en los pozos.

4.3 RED DE MONITOREO

Con la asesoría del INGEOMINAS y del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, se diseñó la red de monitoreo para el acuífero de Morroa, con el fin de hacer seguimiento a los niveles del agua del acuífero y a la calidad del mismo.

Con esta red de monitoreo se tiene una serie histórica de datos de niveles y de calidad del agua, que permitan conocer las variaciones temporales y espaciales de la calidad del agua y del flujo del agua dentro del acuífero, lo que ha permitido definir las acciones que se deben implementar a corto, mediano y largo plazo, para evitar el deterioro del recurso, tanto en calidad como en cantidad.

Esta red de monitoreo está compuesta por 95 puntos, de los cuales 24 son piezómetros (Figura 10) y 71 son pozos de producción debidamente instrumentados.

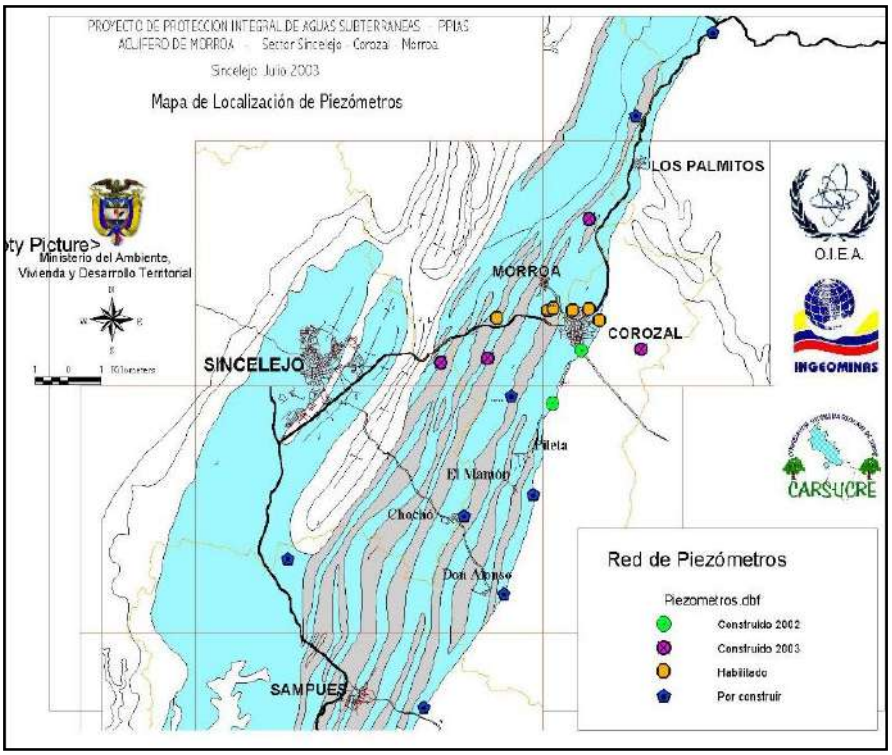

Figura 10. Mapa de localización de piezómetros red de monitoreo

Los piezómetros se han localizado de forma estratégica, de tal manera que sirvan para monitorear el acuífero tanto en sentido E-W como N-S y determinar relación aguas superficiales–aguas subterráneas, comprobar la existencia de aporte de aguas residuales del arroyo Grande de Corozal al acuífero Morroa; determinar si hay aporte de lixiviados que se generan en el antiguo basurero de Corozal, el cual se encuentra sobre la zona más permeable del acuífero Morroa. Tanto a los pozos como a los piezómetros se les ha tomado muestras para análisis físico–químicos, de metales y de isótopos como oxigeno 18, deuterio, tritio y algunos de carbono 14; También hacen parte de esta red de monitoreo dos estaciones pluviométricas, una ubicada en ovejas y otra en el predio El Tesoro, en el corregimiento de Sabanas de Cali, jurisdicción del Municipio de Morroa , a las cuales se les hizo análisis de oxigeno 18 y deuterio cada mes durante un año, con el fin de elaborar la línea meteórica local. Es importante anotar que esta estación fue incluida por el la OIEA en la Red Global de Isótopos en Precipitación (GNIP por sus siglas en inglés), para el monitoreo isotópico del agua lluvia. A principios de cada año se envían al Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA en Viena, Austria, las muestras compuestas mensuales del año inmediatamente anterior.

4.3.1 **Variación espacial de los niveles.**

La dirección regional del flujo del agua del acuífero Morroa es NW-SE, resultante del componente topográfico (disminuye hacia el sur) y del buzamiento de las capas (hacia el oriente).

Los mapas de redes de flujo del acuífero Morroa del año 2003 y el año 2011 respectivamente, muestran las variaciones espaciales de los niveles piezométricos del acuífero en cada uno de estos años (Figura 11). En la zona norte del acuífero, área menos explotada, la dirección del flujo regional del acuífero es de NW-SE (Figura 11-a) con algunas modificaciones en la zona central donde hay más explotación. Para el año 2011, se presenta una marcada variación de la dirección del flujo regional en la zona norte cambiando a NE-SW, esto posiblemente se deba a la intensa explotación de la zona central y la entrada en operación de pozos más profundos (hasta 800 m) con caudales más grandes de hasta 120 lit/seg (Figura 11-b).

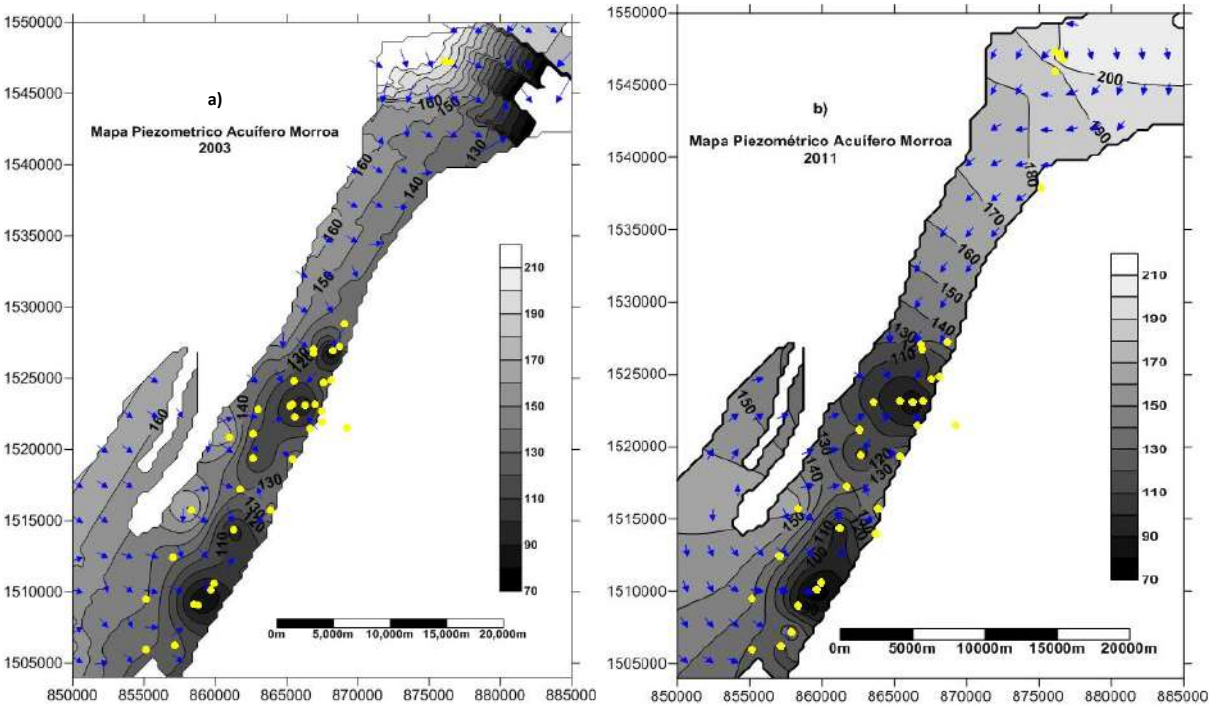

Figura 11. Redes de flujo del acuífero Morroa: a) En el año 2003 y b) En el año 2011

Estos resultados deben tenerse en cuenta en las revisiones de los planes de ordenamiento territorial de los municipios que se abastecen del acuífero Morroa y servirán como soporte técnico para que CARSUCRE, prohíba el desarrollo de actividades potencialmente contaminantes. Y emprenda acciones para evitar que las fuentes potenciales de contaminación actualmente presentes en esta zona (aguas residuales, basureros, estaciones de gasolina, actividades agrícolas, etc.) lleguen a contaminar el acuífero.

4.3.2 Variación temporal de los niveles

En la Figura 12 se presentan las variaciones temporales de los niveles del acuífero Morroa, medidas en algunos piezómetros representativos de la red de monitoreo.

Aquí claramente puede observarse que el acuífero tiene un comportamiento muy particular y parecido en la variación de los niveles registrados en los piezómetros; puede asegurarse, que la forma gráfica que presentan los niveles en el acuífero, son como la huella dactilar del acuífero, que nos muestra la respuesta hidrodinámica del sistema a la explotación intensiva a la que ha estado sometido este recurso hídrico y a la recarga directa que ha tenido.

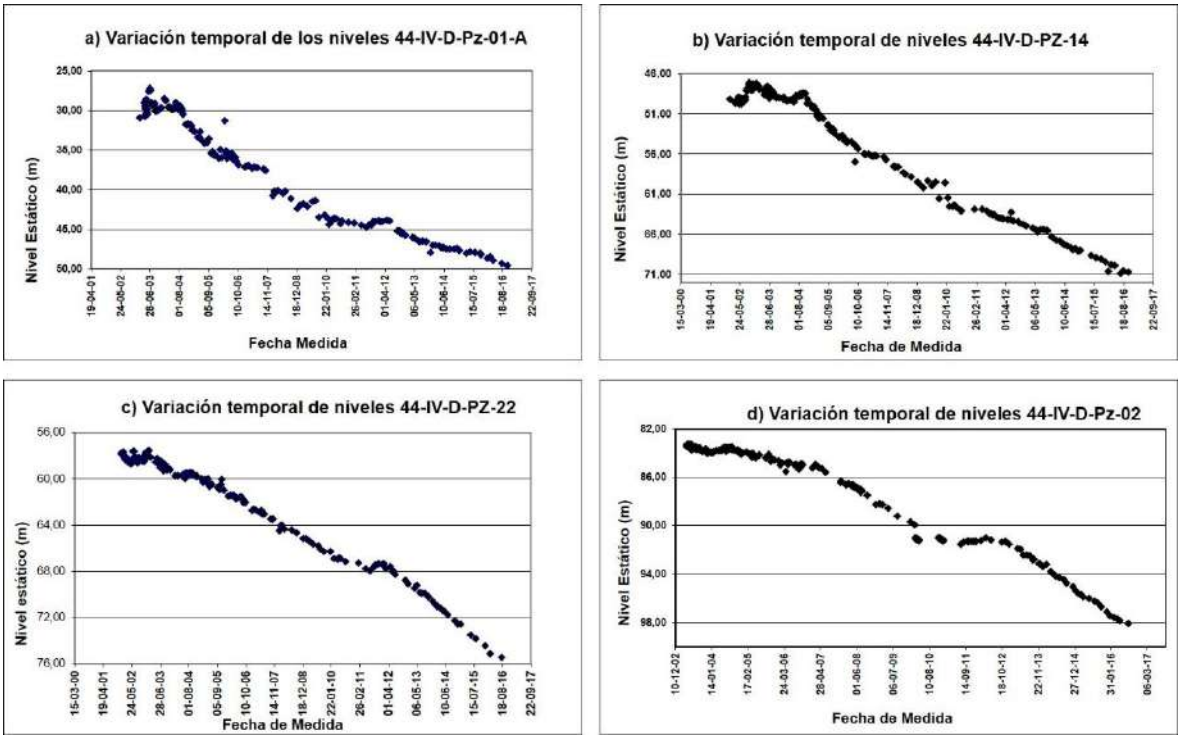

Figura 12. Variación temporal de los niveles del agua en el acuífero Morroa: a) Piezómetro 01-A; b) Piezómetro 14; c) Piezómetro 22 y d) Piezómetro 02.

En general el año 2001 fue de grandes descensos, debido al bombeo continuo de los pozos (24 horas por día) y a la ilegalidad de los aprovechamientos y la falta de control de la explotación del recurso. Es apenas en este año cuando CARSUCRE, inicia dentro del Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas el monitoreo del acuífero y la legalización de los pozos. En el año 2002, se presenta un ascenso generalizado de niveles en el acuífero, debido al control ejercido por la entidad ambiental en cuanto a caudales y régimen de bombeo de los pozos. En este año se inicia de la restructuración de la empresa de acueducto y por la falta de inversión en el mantenimiento de los pozos, algunos de ellos salen de servicio.

En el año 2003, se presenta de nuevo un descenso acelerado de los niveles en el acuífero, debido al aumento de la explotación por parte de la nueva empresa de acueducto “Aguas de la Sabana E.S.P. S.A., empresa privada que se propone en este año explotar al máximo los pozos del acueducto, sin tener en cuenta, los

regímenes de bombeo y los caudales de explotación estipulados en las resoluciones de concesión de aguas expedidas por CARSUCRE.

En el año 2004, se registra recuperación de los niveles en el acuífero, debido principalmente a que ADESA, legaliza la totalidad de los pozos y empieza a cumplir con los requerimientos de la entidad ambiental. No obstante desde año 2005, y hasta el año 2010, se produce un descenso continuo y muy marcado de los niveles en el acuífero, debido a la entrada en operación de nuevos pozos, al aumento del régimen de bombeo y del caudal de explotación en la mayoría los pozos existentes. Durante este tiempo la empresa de acueducto es presionada por el Gobierno Nacional, los entes territoriales y la comunidad en general, para que muestre resultados positivos en la mejoría de la prestación del servicio. Durante el año 2007 hay una aparente estabilización de niveles, debido a la salida de servicio de algunos pozos de gran producción. Desde el año 2008, con el restablecimiento de la operación de estos pozos, los niveles del acuífero continúan bajando.

A finales del año 2010 y durante el año 2011, se nota una estabilización y leve recuperación de los niveles del acuífero, debido principalmente, a la recarga directa por los excesos de precipitación que se presentaron durante el fenómeno de “La Niña”. Sin embargo, a partir del año 2012, las ratas de descenso aumentaron considerablemente, por el aumento de los caudales y régimen de bombeo en el campo de pozos de Sincelejo, Corozal, Morroa y Los Palmitos. Estos últimos resultados, comprueban la intensa explotación a la que está sometido el acuífero Morroa y confirman que la extracción es muy alta con respecto a la recarga natural, inclusive a las excepcionales altas recargas por fenómenos de la Niña. Dicho en otras palabras se comprueba que en el acuífero Morroa se está realizando una “explotación minera” del recurso hídrico.

4.3.3 Parámetros hidrodinámicos del acuífero Morroa

Carsucre realizó en el piezómetro 44-IV-D-PP-22 un ensayo de dilución con marcado de toda la columna y un ensayo de dilución puntual, utilizando como trazador NaCl (Figura 13).

El flujo horizontal tiene magnitud de hasta 1.63 m/día, lo que indica la alta conductividad hidráulica de la franja de acuífero que lo alimenta. La presencia de flujos verticales se debe a los diferentes niveles acuíferos que alimentan al pozo, además indica que estos tienen diferente confinamiento.

En presencia de flujo vertical en un pozo, la velocidad de ascenso o descenso se ve afectada por los diferentes tramos de filtros que tenga el pozo, entre más tramos tenga este el valor calculado de velocidad va a ser menor debido a la perdida de trazador que se da en cada tramo. En caso de entrada de un agente contaminante al acuífero se podrá estimar el desplazamiento de este utilizando las velocidades halladas en estos ensayos.

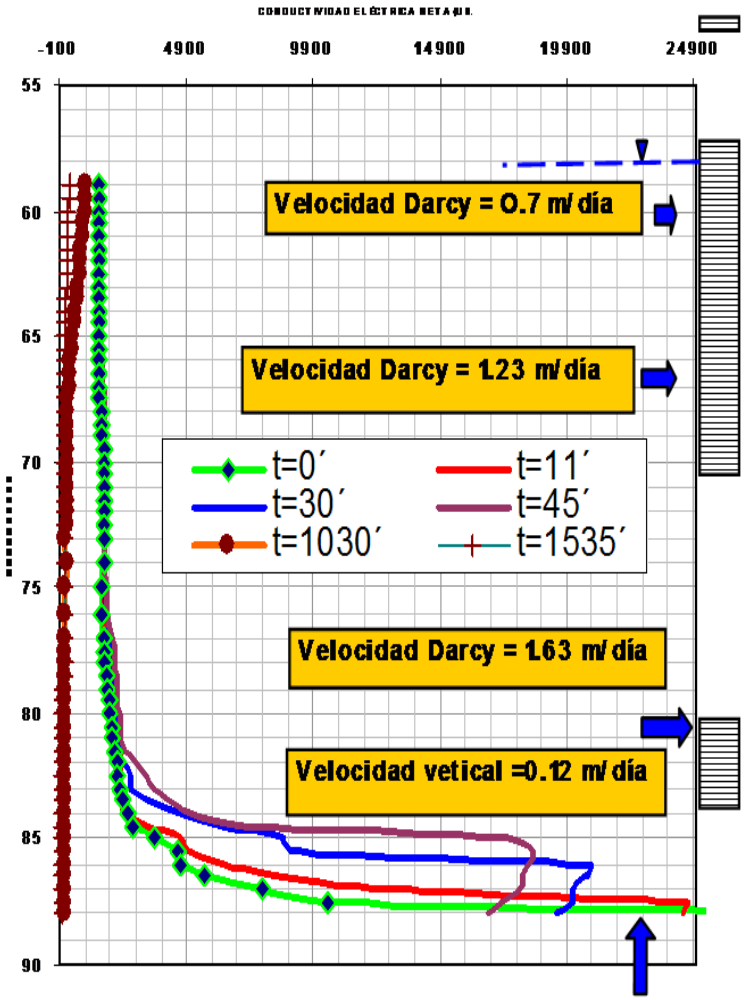

Figura 13. Variación de la concentración de NaCl en el piezómetro 44-IV-D-PZ-22 con marcado de toda la columna.

Se realizó en el piezómetro 44-IV-D-PP-22 un ensayo de dilución con marcado de toda la columna (gráfica 15) y un ensayo de dilución puntual, utilizando como trazador NaCl (Figura 15).

4.3.4 Monitoreo de la calidad del agua

CARSUCRE ha realizado varias campañas de monitoreo de la calidad del agua del acuífero Morroa. Los parámetros fisicoquímicos analizados fueron pH, temperatura, conductividad eléctrica, Na, K, Ca, Mg, Fe, HCO_3, Cl, SO4, NO_3, PO_4, CO_3, SiO_2. Los parámetros bacteriológicos determinados fueron coliformes totales y coliformes fecales. Los isótopos analizados fueron ^{2}H, ^{18}O, ^{3}H, ^{13}C y ^{14}C. En el capítulo siguiente se presentan los resultados y análisis de estos monitoreos.

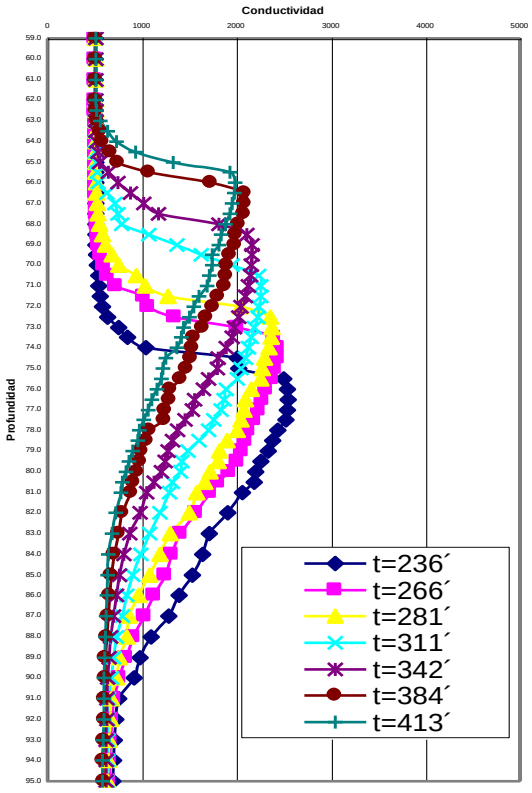

Figura 14. Variación de la concentración de NaCl en el piezómetro 44-IV-D-PZ-22 con inyección puntual.

4.4 CARACTERIZACION HIDROQUIMICA E ISOTOPICA.

4.4.1 Hidroquímica

Los resultados de estas campañas, muestran la existencia de dos grupos principales de agua, una ***bicarbonatada cálcica*** y otra ***bicarbonatada sódica***. El proceso químico dominante en el acuífero es el intercambio iónico de Ca por Na (Figura 15).

Es importante anotar que las aguas de la mayoría de los pozos de la zona de Corozal, Sincelejo y Morroa que captan aguas hasta los 120 m de profundidad son bicarbonatadas cálcicas y la de los pozos más profundos son bicarbonatadas sódicas. Sin embargo, esta relación no se cumple para los pozos de Ovejas (al norte), porque la granulometría es más gruesa con tiempo de residencia menores; ni para el sector de Sampués (al sur), debido probablemente a que se han alcanzado las condiciones de equilibrio.

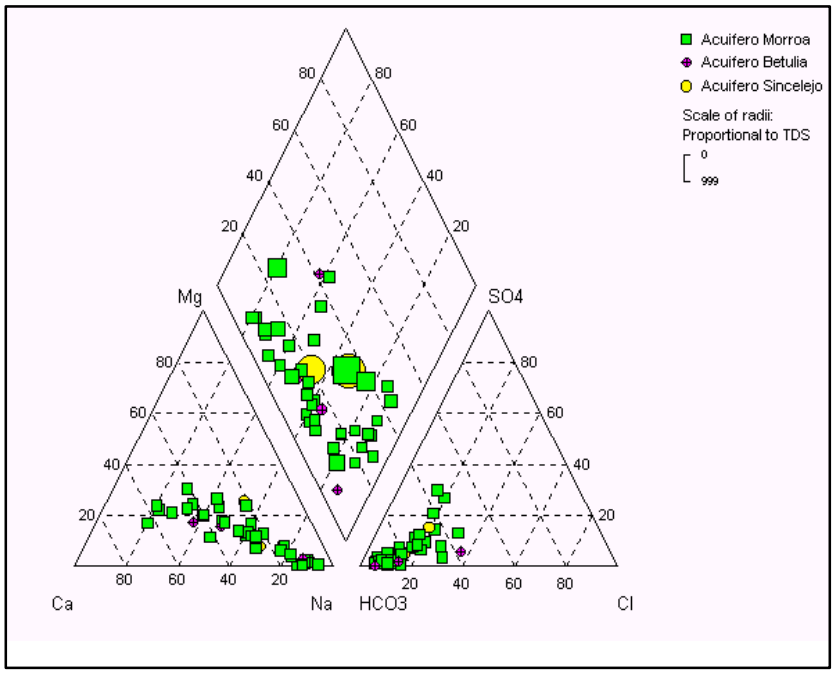

Figura 15. Diagrama de Piper de las aguas subterráneas de la zona

4.4.2 Isótopos (IAEA/WMO, 2015)

La línea meteórica local (LML) está cerca y paralela a la línea meteórica mundial de precipitación (Figura 16). La ecuación de la LML es: $\delta^2H = 8.3*\delta^{18}O + 8.3$. Claramente puede observarse que existen dos grupos de agua, una que se encuentra sobre la línea meteórica local y otra que ha sufrido una ligera evaporación. No se encontró ninguna relación entre ^{18}O y la profundidad o la conductividad, esto se debe a que los pozos muestreados están captando niveles diferentes del acuífero, es decir que hay una mezcla de aguas.

Los valores de tritio entre 0.86 y 1.67 indican que las aguas del acuífero Morroa tienen una edad mayor de 50 años. Los resultados de ^{14}C muestran una actividad entre 51.9 y 87.7 %, utilizando un modelo sencillo sin mezcla de la ley de decrecimiento se determinó una edad entre 836 y 5168 años, esto indica que la recarga actual es casi inexistente, por lo tanto se tiene que cambiar el sistema de explotación actual (bombeo continuo), y se debe implementar acciones que permitan garantizar la sostenibilidad del recurso, como obras de recarga artificial, entre otras. Como los valores de ^{13}C son relativamente negativos (entre –10.5 y –16.4) se supone preliminarmente que no hay influencia de carbonatos de origen primario (Figura 17).

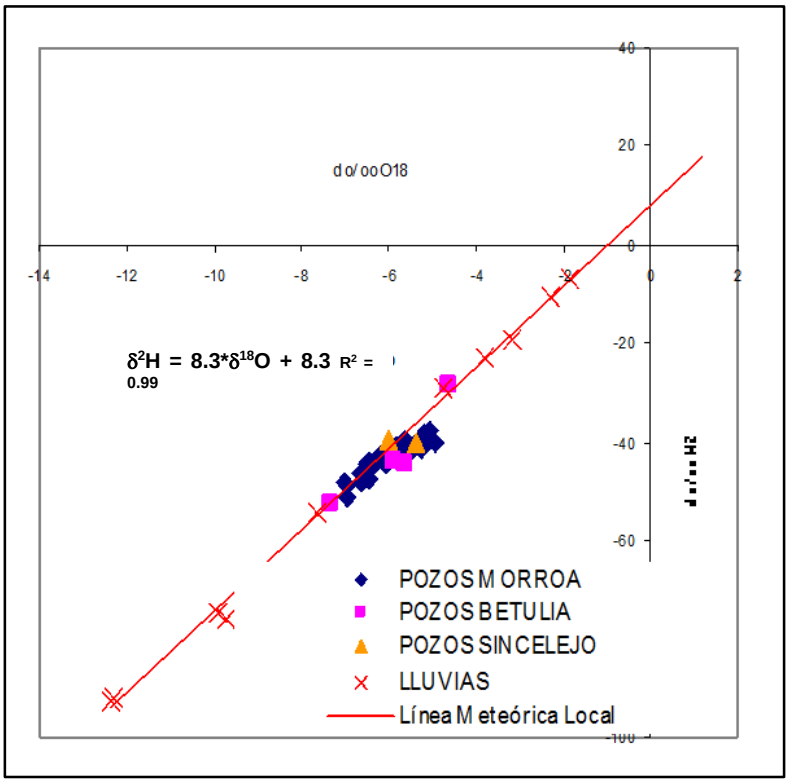

Figura 16. Composición isotópica de las aguas subterráneas del acuífero Morroa.

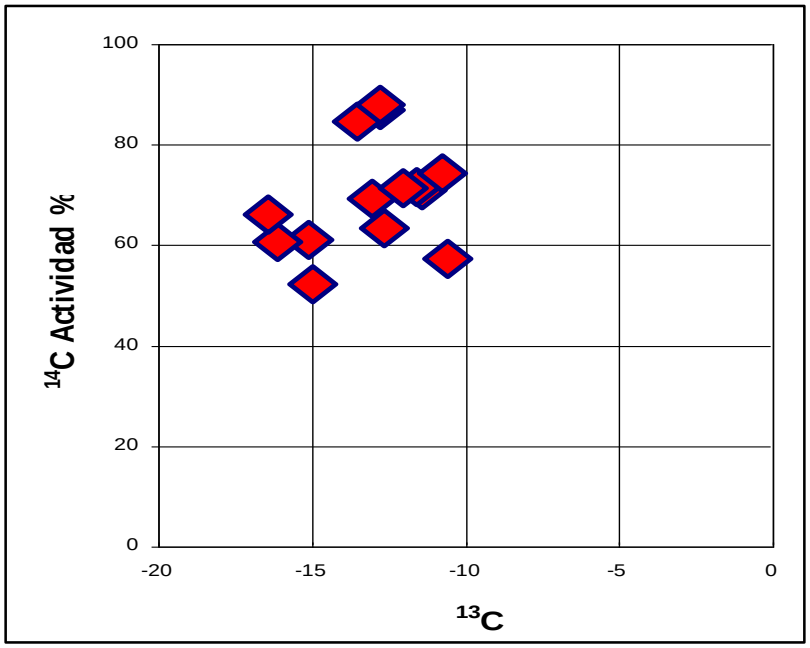

Figura 17. Relacion $^{14}C/^{13}C$.

4.4.3 Hidroquímica e Isotopía del nivel A

Debido a que los pozos muestreados en la primera campaña captan diferentes niveles acuíferos de Morroa, se programó un muestreo de aguas para análisis hidroquímico e isotópico solamente del nivel A (nivel que se encuentra en el techo del acuífero), para mejorar el modelo hidrogeológico del acuífero. Para tal fin se seleccionaron 16 pozos para análisis fisicoquímicos y 11 pozos para análisis isotópicos de ^{2}H, ^{18}O, ^{13}C y ^{14}C.

Química. La selección del muestreo se hizo para determinar las variaciones espaciales tanto en el sentido Norte – Sur, como Oriente - Occidente. Los pozos muestreados captan el acuífero desde 65 m hasta 390 m de profundidad. En el tabla 3 se presentan los resultados de los análisis físico-químicos.

Interpretación de los datos según los diagramas de Stiff. En los diagramas de Stiff (Figura 18) se presentan las aguas muestreadas. Los pozos menos profundos y cercanos a la posible zona de recarga, se caracterizan por ser de tipo bicarbonatada cálcica mientras que los pozos más profundos tienen agua bicarbonatada sódica. Las aguas de los piezómetros 44-IV-D-Pz-14 y 44-IV-D-Pz-17, que son de tipo geoquímico diferente, están asociadas con una posible contaminación local.

Es muy clara la diferencia entre las aguas de los pozos, el arroyo Grande de Corozal y el agua lluvia, así como la de los pozos que tienen indicios de contaminación. El agua de los piezómetros 14 y 17, está contaminada, bacteriológicamente, con coliformes fecales, lo mismo que el agua de los pozos de Pileta y el pozo 44-IV-D-PP-28 de los Palmitos.

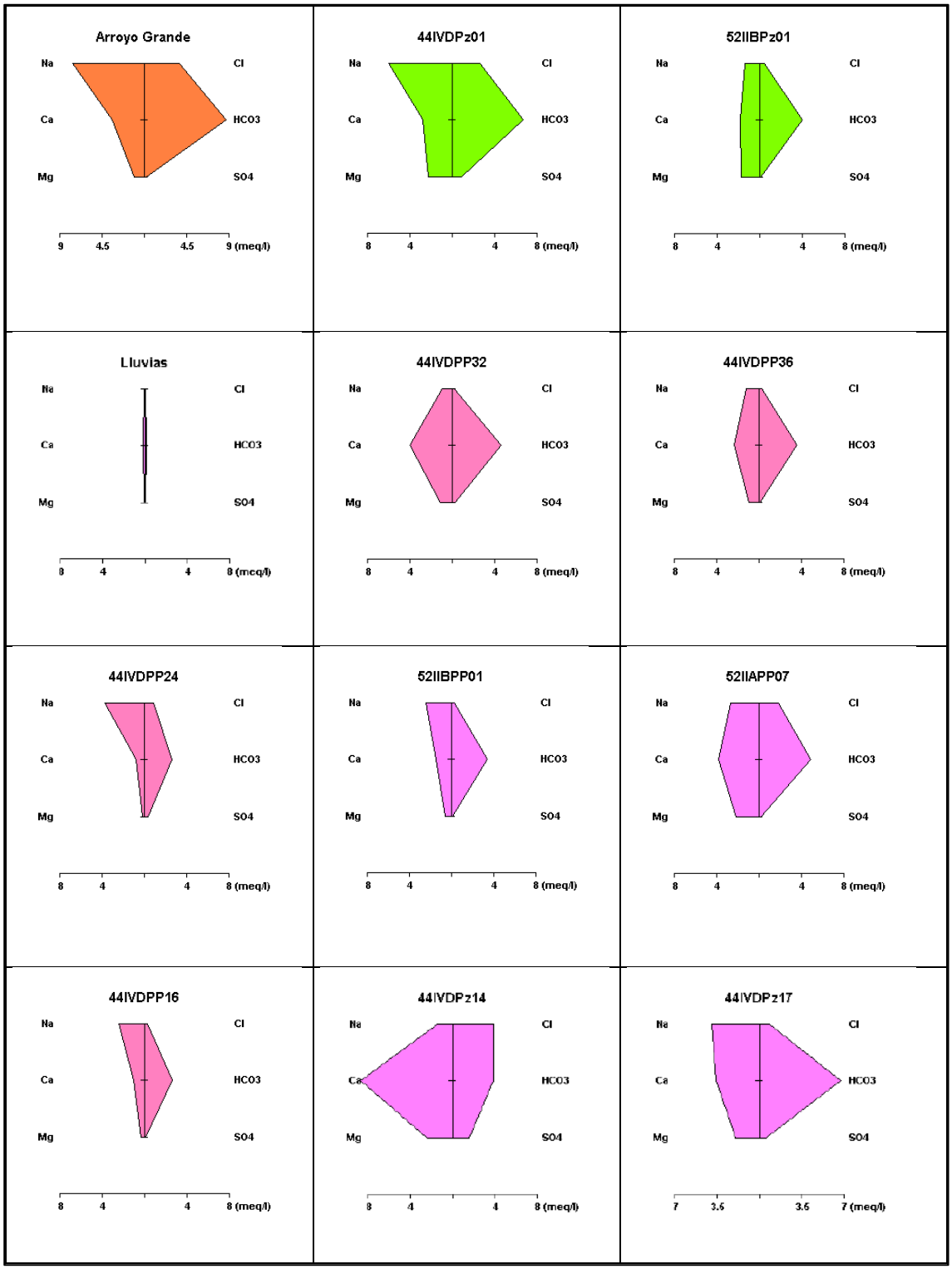

Figura 18. Diagrama de stiff de las aguas subterráneas del acuífero Morroa, lluvias y Arroyo Grande.

Tabla 3. Resultados fisicoquímicos del acuífero de Morroa nivel A.

CODIGO	LOCALIZACION	SENTIDO	X	Y	Pro. Muestreo	Distancia Zona Recarga	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	PO4 (mg/l)	CO3 (mg/l)	pH	TWA	Cond (umhos/cm)
52-II-B-Pz-01	Antiguo Basurero	N-S	854000	1513000	62	351.3	32	10.0	36	21.4	0.2	246	17.2	4.7	0.9	0.01	0	7.5	30.3	496
44-IV-D-Pz-17	Pz Finca La Rosita	E-O	867450	1522700	72	316.7	90	14.0	71	24.0	0.2	410	29.6	25.5	2.3	0.01	0	7.15	31	842
44-IV-D-PP-32	Quembor	N-S	868710	1527840	86	334	22	1.6	80	13.9	0.2	285	7.9	13.4	1.0	0.06	0	6.78	30.1	515
44-IV-D-Pz-14	Troncal en Corozal	E-O	866990	1523160	100	431.9	34	4.5	175	29.7	0.2	233	138	77.4	88.1	0.02	0	7.06	31.5	1252
52-II-A-PP-10	Pileta	N-S	863980	1516680	106	501	34	4.2	79	18.8	0.2	290	25.2	10.5	13.5	0.01	0	7.26	31.1	640
52-II-A-PP-09	Mamón	N-S	864700	1515720	108.6	383	30	10.0	40	17.6	0.2	223	13.8	7.3	0.5	0.01	0	7.55	28.5	457
44-IV-D-PP-16	Liceo	E-O	866800	1524100	141.5	691.1	56	2.5	20	4.2	0.2	163	10.6	3.6	0.6	0.01	0	7.94	30.1	326
44-IV-D-PP-34	Cartagena de Indias	N-S	866640	1521160	170	662.3	65	2.5	24	6.0	0.2	195	19.2	6.6	1.0	0.01	0	7.88	31.1	429
44-IV-D-PP-36	Carabineros	N-S	868120	1524880	229	1030.8	27	5.5	47	11.4	0.2	220	9.2	3.7	0.7	0.07	0	7.48	30.5	406
44-IV-D-PP-24	Corazón de Jesús	E-O	867670	1522400	231	869.6	85	2.5	16	1.9	0.2	163	31.6	17.8	0.5	0.02	0	8.2	30.8	452
44-IV-D-PP-28	Los Palmitos	N-S	869090	1528810	72		38	10.0	109	28.0	0.2	275	62.6	30.6	66.5	0.01	0	7.17	30.1	873
44-IV-D-PP-19	Corozal	N-S			105		42	10.0	48	16.0	0.2	282	9.4	5.0	0.5	0.01	0	7.07	30.7	525
52-II-B-PP-01	Finca La Cruz	N-S	860820	1506420	350		56	3.0	30	7.0	0.2	208	11.4	6.4	0.6	0.03	0	7.7	30.2	405
52-II-A-PP-07	Don Alonso	N-S	862970	1511030	85		62	12.0	76	26.0	0.2	297	66.9	8.9	27.4	0.01	0	7.44	29.6	827
44-IV-D-Pz-01	Cartagena de Indias	N-S	866640	1521160	65		137	13.5	55	27.5	0.2	411	92.3	40.7	4.0	0.01	0	7.37	29.4	1042
44-IV-C-Pz-01A	Bremen A				15		170	1.3	8.5	0.3	0.2	155	102	53.9	0.5	0.30	33.4	8.85	29	802
44-IV-C-Pz-01B	Bremen B				65		200	1.5	20	2.4	0.2	375	59.2	9.8	0.5	0.12	22.9	8.04	29.5	899
Arroyo Grande	Ay. Bremen						175	44.5	69	13.3	0.2	532	133	9.6	1.5	12.5	0	7.64	29.2	1505
Arroyo Grande	Salida Corozal-Betulia						165	41.0	61	14.1	0.2	528	135	12.0	1.9	10.2	0	7.77	31.6	1438
Lluvias	Agua lluvia Corozal Sep		867591	1524693			0.9	1.6	2.8	0.4	0.2	5.1	2.1	0.7	3.0	0.19	0	6.98		19.1

Interpretación de datos según diagrama de Piper.

En el diagrama de Piper (Figura 19) se observa que el proceso dominante es también el intercambio catiónico de Ca por Na, como es el comportamiento general de todo el acuífero. Pero las muestras que difieren de este comportamiento están afectadas por actividades antrópicas.

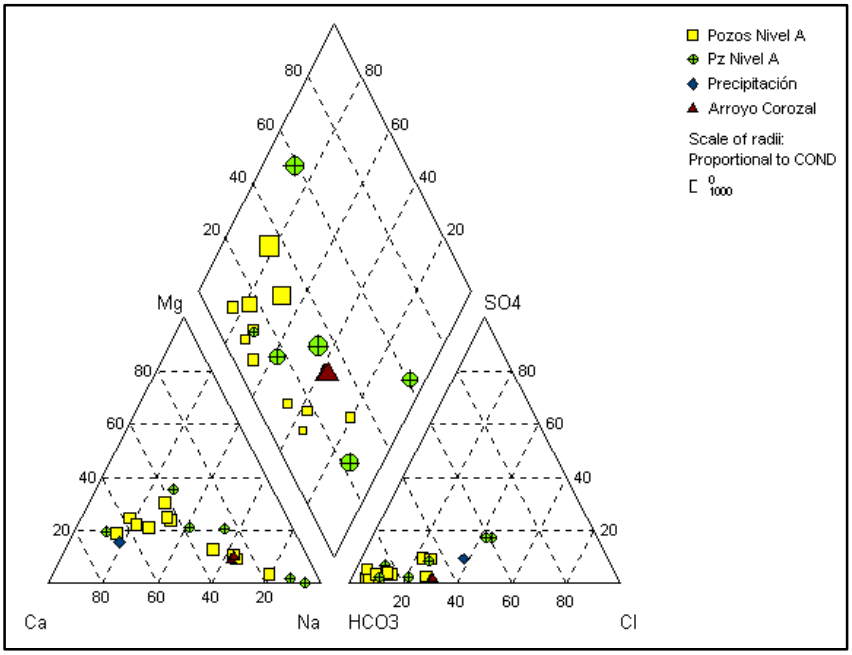

Figura 19. Diagrama de Piper nivel A acuífero Morroa.

4.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y MODELO SÍSMICO REGIONAL

Con toda la información geológica, geofísica, hidrogeoquímica e isotópica, hidrodinámica e hidrogeológica obtenida de todos los estudios que se han elaborado en el acuífero Morroa por las entidades locales, regionales, nacionales e internacionales, se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Morroa (Figura 20A).

En términos generales, podemos afirmar que la evapotranspiración es mucho más alta que la precipitación y que la recarga directa, y ésta mucho menor que la escorrentía y que la extracción actual. Se supone entradas adicionales al acuífero, de aguas residuales a través de los cauces de los arroyos que atraviesan las capas permeables que afloran en la zona de recarga y por los pozos abandonados sin sellar o mal sellados. También se infiere una recarga por goteo desde las capas arcillosas y limosas del acuífero Morroa y de la Formación Betulia suprayacente.

Es muy probable que por la explotación intensiva del acuífero, se esté induciendo flujos o recargas desde los niveles inferiores del acuífero, lo que explicaría las edades más antiguas encontradas (5000 años).

Con el apoyo de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH, el INGEOMINAS, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, se determinó la geometría del acuífero Morroa (Figura 20B). En esta figura, claramente puede observarse, que el acuífero Morroa es un monoclinal que buza hacia el oriente, donde se va pinchando y profundizando por debajo de los 3000 m de profundidad. Este acuífero no tiene descarga natural, pues está suprayacido por sedimentos arcillosos. Aunque las reservas del acuífero son grandes, la mayoría de estas se encuentran por debajo de los 1000 m de profundidad, donde, actualmente su explotación no es viable económicamente. A los niveles inferiores del acuífero Morroa que se encuentran por debajo de los 600 m de profundidad, no se les conoce las características hidráulicas, ni la calidad del agua que contienen. Sin embargo, se supone que la permeabilidad disminuye con la profundidad por efecto de compactación y que el agua debe contener una mayor cantidad de iones en solución, así mismo, se espera que la temperatura del agua sea mucho mayor.

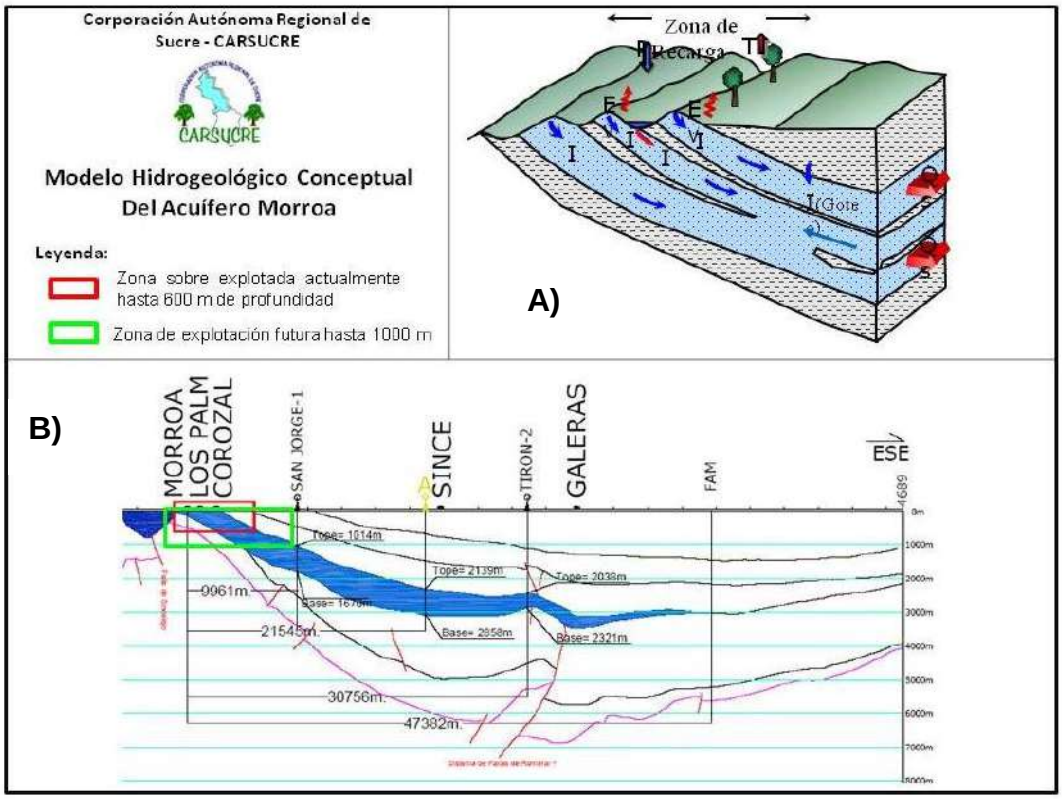

Figura 20. (A) Modelo hidrogeológico conceptual. (B) Geometría del acuífero Morroa.

5 MANEJO SOSTENIBLE DEL ACUIFERO MORROA

El acuífero Morroa no puede ser explotado como si fuera un yacimiento de petróleo o gas, o como si fuera un yacimiento de caliza o carbón es decir como si fuera un recurso no renovable, al que se le calculan sus reservas y se extrae el agua hasta que se agote.

El acuífero Morroa es uno de los principales recursos hídricos que tiene el Departamento de Sucre y como tal, su aprovechamiento debe ser planificado y sostenible. Actualmente está siendo sometido a una explotación intensiva por parte de las empresas de acueducto de la región, las cuales solo la empresa ADESA extrae alrededor de 900 lit/seg.

Con base en el modelo hidrogeológico conceptual, CARSUCRE, en forma concertada con los actores claves del Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas, PPIAS, formuló el "Plan de Manejo Manejo del Acuífero Morroa", el cual viene implementándose, para que estos recursos hídricos subterráneos, puedan seguir utilizándose para los usos requeridos de la población, por mucho más tiempo. Se debe tener en cuenta que para lograr esto, no ha sido suficiente, con que la entidad ambiental, en este caso CARSUCRE ejecutora del proyecto, asuma responsablemente su rol, sino que también se ha necesitado de la participación activa de todos los actores involucrados en el proyecto, como: los entes territoriales (Gobernación de Sucre y Municipios), las empresas prestadoras de servicios públicos, los propietarios de pozos (particulares, sector turístico, agropecuario e industrial), los perforadores de pozos, las instituciones educativas (Universidades, colegios, etc), ONG´s, los consultores, los contratistas, las organizaciones sociales y comunitarias, las entidades nacionales, como el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Ministerio de Minas y Energía (MME), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Con el apoyo económico del DNP, el Fondo de Compensación Ambiental del MADS, algunos recursos propios de CARSUCRE y la colaboración del OIEA, así como la voluntad política de los directivos y del Consejo Directivo de CARSUCRE, sumado a los equipos de monitoreo, los programas especializados para interpretación de datos y el grupo de profesionales y técnicos que conforman el Grupo de Aguas de CARSUCRE, se ha logrado avances significativos en los objetivos del PPIAS.

No obstante, se ha llegado a la conclusión, que para lograr un uso sostenido del acuífero Morroa, debe implementarse todas las acciones contempladas en el plan de manejo del acuífero y resumidas en la Figura 21. Como la recarga natural es muy baja con respecto a la descarga actual (por extracción de los

pozos), es necesario implementar acciones como el tratamiento de aguas residuales para su posterior reutilización en algunos usos que bajen la demanda; utilización de otras fuentes alternativas de abastecimiento como las aguas lluvias y las aguas superficiales de ríos como el Magdalena, el San Jorge o el Sinú y aguas almacenadas en embalses; la construcción de obras de recarga artificial; y por supuesto la implementación de programas de uso eficiente y ahorro del agua, para disminuir las altas pérdidas que tienen actualmente los sistemas de acueducto municipales. La idea es que en las épocas lluviosas, se esté utilizando para el abastecimiento las fuentes superficiales y el agua almacenada en embalses, y al mismo tiempo se esté recargando el acuífero. Y en las épocas secas, cuando bajen considerablemente los niveles de los embalses y se reduzcan drásticamente los caudales de las fuentes superficiales, se utilice el agua almacenada en el acuífero.

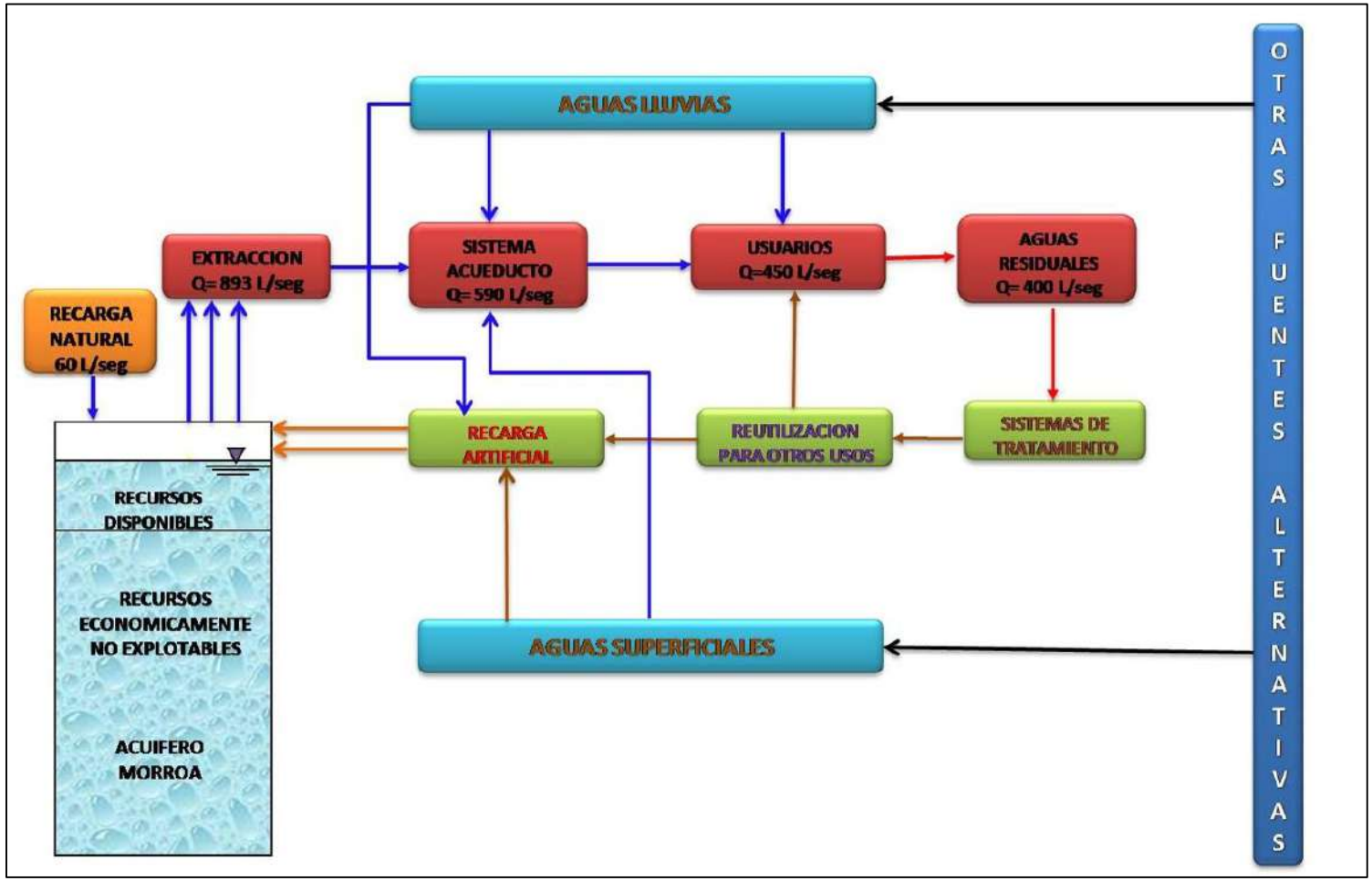

Figura 21. Esquema para el manejo sostenible del acuífero Morroa

6 REFERENCIAS

(s.f.). *V Foro Institucional sobre el agua subterránea.* ACOAGUA.

Alcaldía de Morroa. (2012). Plan de desarrollo municipal 2012-2016.

Alcaldía de Morroa. (09 de 2016). *Sitio web del Municipio de Morroa - Sucre*. Obtenido de http://www.morroa-sucre.gov.co/informacion_general.shtml

Cárdenas, E., & Garrido, A. (1997). Determinación del riesgo de contaminación del acuífero Morroa en el área de Sincelejo, Corozal y Morroa. *Tesis de Pregrado para optar el Título de Ing. Agrícola*. Sincelejo, Sucre, Colombia.

CARSUCRE. (2005). *Revista PPIAS*, 23-47.

CARSUCRE. (2016). *Sistema de Información para la Gestión de Aguas Subterráneas, SIGAS.* Sincelejo.

DANE. (2015). Estadística sobre demografía y proyección de población. Bogotá, Colombia. Obtenido de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

De Porta, J. y. (1963). Nuevas aportaciones al Holoceno de Tierra Bomba. *Boletín de Geología 12:*, 35-44.

Duque-Caro, H. (1975). Los foraminíferos plantónicos y el Terciario de Colombia. *Revista Española Micropaleont 7 (3):*, 403-427.

FCIHS. (s.f.). PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS Y DE LAS CAPTACIONES.

FINAGUAS. (2001). Sistema de Información para la gestión del acuífero Morroa . Sincelejo, Sucre, Colombia.

Google Earth. (2016). Morroa, Colombia.

Herrera, H. M. (1994). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Morroa. *V Foro Institucional sobre el agua subterránea. ACOAGUA*.

Herrera, H. M., Pacheco, D., & Villegas, P. P. (2003). *Caracterización hidráulica del acuífero Morroa a través de pruebas de bombeo.* Sincelejo, Sucre, Colombia.

Herrera, H., Romero, L., Vargas, M., & Taupin, J. (2009). Estudio Hidrogeológico con énfasis en hidrogeoquímica del acuífero Morroa (Colombia). En OIEA,

Estudios de Hidrología Isotópica en America Latina 2006 (págs. 29 - 46). Viena: IAEA – TEC DOC 1611.

IAEA/WMO. (2015). *Global Network of Isotopes in Precipitation, The GNIP Database.* Obtenido de http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/GNIP/IHS_GNIP.html.

IDEAM. (2014). Datos Meteorológicos de la Estacion Aeropuerto Las Brujas de Corozal. *Base de datos*. Bogotá, Colombia.

INGEOMINAS. (1993). *Evaluación hidrogeológica del acuífero Morroa.* Bogotá.

INGEOMINAS. (2002). *Geología de las Planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún .* Bogotá.

INSFOPAL. (1981). Tomo I: Generalidades Geología. . En C. Colombo-Holandes, *Estudio Hidrogeológico del Flanco Nororiental de la Serranía de San Jacinto y de la zona Litoral del Golfo de Morrosquillo.* (pág. 11 y 12). Bogotá.

INSFOPAL. (1981). Tomo III: Hidrogeología. En C. Colombo-Holandes, *Estudio Hidrogeológico del flanco Nororiental de la Serranía de San Jacinto y de la zonal litoral dle Golfo de Morrosquillo.* (págs. 45-90). Bogotá.

Instituto Geográfico Agustin Codazzi. (2016). *Geoportal IGAC*. Obtenido de http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapaId=7&title=Mapa%20Base

MADS. (2013). Decreto N°0953 de mayo 17 de 2013. *Por medio del acual se reglamenta el artículo 11 de la Ley 99 de 1993*. Bogotá.

National Rivers Authority. (1995). *Guide to groundwater protection zones in England and Wales.* London: HMSO.

RAS. (2000). Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá.

Reyes, G. G. (2001). *Geología de las Planchas 23 Cartagena y 29 - 30 Arjona, escala 1:100.000. Memoria explicativa.* Bogotá: INGEOMINAS.

Rodríguez, I. J. (2004). Diagnóstico de la permeabilidad de los suelos en la zona de recarga del acuífero Morroa. *Tesisi de Grado, Universidad de Sucre*, 50.