

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE MORROA
POR INFILTRACIÓN DE AGUAS NEGRAS EN LOS MUNICIPIOS DE
SAMPUÉS, SINCELEJO, COROZAL, MORROA, OVEJAS Y LOS PALMITOS**

**JAIDER JAVIER SEVERICHE LÓPEZ
NASSIR DE JESÚS VITOLA CHADID**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SINCELEJO
2006**

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO DE MORROA
POR INFILTRACIÓN DE AGUAS NEGRAS EN LOS MUNICIPIOS DE
SAMPUES, SINCELEJO, COROZAL, MORROA, OVEJAS Y LOS PALMITOS**

JAIDER JAVIER SEVERICHE LÓPEZ

NASSIR DE JESÚS VITOLA CHADID

Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Agrícola e Ingeniero Civil.

DIRECTOR

GUILLERMO GUTIÉRREZ RIBÓN

Ingeniero Civil

CODIRECTOR

HÉCTOR MARIO HERRERA

Ingeniero Geólogo

UNIVERSIDAD DE SUCRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

SINCELEJO

2006

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Sincelejo, 00 de febrero de 2006.

AGRADECIMIENTOS

“Únicamente los autores son responsables de las ideas
expuestas en el presente trabajo”

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS.

LISTA DE ANEXOS

RESUMEN

Debido a la creciente expansión de los centros urbanos colombianos y a la necesidad de proteger el entorno natural en el cual se desarrollan, se han establecido programa, planes y proyectos encaminados a un desarrollo sostenible. dentro de este contexto se enmarca el siguiente proyecto, en el cual se establece el grado de vulnerabilidad del medio acuífero y el peligro potencial que representan las aguas residuales domesticas (ARD) derivadas del acelerado desarrollo urbano que presentan los municipios de Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sampués y Sincelejo y a la identificación de posibles fuentes de contaminación dentro de los mismos que afecten la sostenibilidad del recurso hídrico.

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea. El Mapa de Vulnerabilidad del acuífero de Morroa se construyó utilizando la metodología DRASTIC, un sistema paramétrico que incluye siete características del acuífero.

Para la realización del estudio se confeccionaron mapas temáticos (topografía, freatigrafía, suelos, geología), se definió la geometría del sistema y se ajustó un modelo numérico de flujo subterráneo.

El Índice General de Vulnerabilidad se obtuvo así para cada punto del área. Su entorno numérico fue de 77 a 113 (entre 23 a 226 de valores extremos posibles), dividido en dos rangos, el 95% pertenece a áreas de índice de vulnerabilidad insignificante, y el 5% a áreas de muy bajo índice.

La Carta de Vulnerabilidad General del Sistema Acuífero de Morroa constituye una base de gestión para uno de los principales recursos hídricos del Departamento de Sucre y una importante herramienta para el Ordenamiento Territorial y la protección del Medio Ambiente.

.PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad, contaminación, Riesgo, acuífero.

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

En general, los aspectos relacionados con el manejo de la calidad del agua han recibido mucha menor atención que aquellos referentes a la cantidad del agua. Independientemente de las afirmaciones de la mayoría de los organismos internacionales, investigaciones muestran que menos del 10% de las aguas residuales generadas en América Latina son tratadas y dispuestas en forma adecuada. Cuerpos de aguas superficiales y subterráneos se usan en muchas ocasiones como la mejor forma para desechar los efluentes domésticos, industriales y agrícolas, lo que finalmente afecta las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos receptores. En muchos lugares, los mismos cuerpos de agua que reciben las aguas residuales, y que son simultáneamente las fuentes de consumo para los usos humanos, han sobrepasado sus capacidades de asimilación para actuar como "depósitos" naturales de desechos. Lo anterior ha dado como resultado que se requieran de prácticas de manejo del agua más complejas, incluyendo prácticas de tratamiento más costosas. Igualmente, el resultado ha sido que muchos cuerpos de agua dentro de, o en las cercanías de, centros urbanos de muchos países en desarrollo, asemejen drenajes abiertos, con aguas inadecuadas para los usos humanos, así como para la sobrevivencia de ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, la degradación de la calidad de las aguas subterráneas es un problema grave que ha atraído atención creciente, y que puede ser el resultado del tratamiento inadecuado de aguas residuales, contaminación humana o intrusión salina en zonas costeras.

La conservación de la calidad de estas debe regirse por el principio de prevención, evitando que se produzca su contaminación, estableciendo los medios y normativas que limiten el vertido incontrolado, la instalación de actividades peligrosas sin las debidas medidas de seguridad, y la aplicación indiscriminado de productos agroquímicos.

Las primeras actuaciones que se plantean para controlar la calidad de las aguas subterráneas consisten en determinar la existencia de los procesos de contaminación, su intensidad y extensión, tipos de compuestos, posibles causantes en el entorno y vulnerabilidad de los acuíferos sobre los que se asientan o van a instalarse las actividades potencialmente contaminantes.

Este planteamiento merece gran atención para el caso del acuífero Morroa, sistema que se encuentra situado en la parte central del departamento de Sucre y comprende los municipios de Ovejas, Sampués, Sincelejo, Corozal, Morroa y Los Palmitos. Abastece explotaciones industriales, agrícolas y ganaderas que a la vez vierten efluentes - con y sin tratamiento- sobre la capa freática, por lo que se ve sujeto, como todo acuífero, al posible deterioro de la calidad de sus aguas como consecuencia de actividades potencialmente contaminantes.

El propósito perseguido al estudiar la vulnerabilidad de este sistema es permitir la planificación a efectos de atender solicitudes para la radicación de nuevos emprendimientos industriales u otros, manteniendo las condiciones naturales del reservorio subterráneo y asegurando la permanencia de una de las principales fuentes de agua potable en el Departamento.

Existen diversas metodologías para caracterizar la vulnerabilidad de un acuífero, siendo el modo de evaluación de esta característica más o menos cuantitativo en unas y otras.

Para obtener el Mapa de Vulnerabilidad del acuífero Morroa, se escogió la metodología DRASTIC, desarrollada por la E.P.A. (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos de América, por ser ésta quien considera más factores físicos y variables características de los medios subterráneos y permitir una cuantificación consistente.

DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales a las que asigna valores numéricos entre 1 y 10 de acuerdo a la importancia relativa de cada una en el proceso de existencia y expresión del agua subterránea, que se escoge de acuerdo al acuífero particular de que se trate, y un multiplicador entre 1 y 5 (peso según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo. Como resultado de esta evaluación se obtiene un mapa, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación.

La dinámica de los sistemas acuíferos hace que los Mapas de Vulnerabilidad no sean información estática. Variaciones en las condiciones de acceso, presencia y movimiento del agua, originan cambios en las variables de estado de los sistemas. El seguimiento de estos cambios y la importancia de los mismos pueden conducir a la revisión de tales mapas, y a su modificación y corrección temporal.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la ausencia de una fuente superficial de agua, permanente y de buena calidad, el acuífero de Morroa, se ha convertido en la principal reserva de abastecimiento de las poblaciones asentadas en esta región como lo son Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sampués y Sincelejo.

Sin embargo, en estos últimos años se ha venido presentando para la zona de recarga un incremento de focos contaminantes originadas por la misma población, la cual no ha medido las consecuencias que puede traer este problema para el recurso hídrico de dicho acuífero; Entre las principales fuentes contaminantes encontramos: descargas de aguas servidas en terreno y arroyos, saneamiento y fugas en alcantarillado, laguna de oxidación de aguas servidas, lixiviación en rellenos sanitarios o basureros, descargas industriales, prácticas agrícolas, como vertimientos de herbicidas, pesticidas, etc. en algunas fincas aledañas a la zona de recarga, pozos abandonados inactivos, entre otros. Todas estas fuentes y en particular las ARD (aguas residuales domésticas), originadas principalmente en los cascos urbanos, son agentes potenciales de contaminación para el acuífero y podrían poner en riesgo calidad del agua, lo cual generaría problemas de muchísima importancia para la región antes mencionada. Debido a lo anterior es importante determinar la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del acuífero de morroa por infiltración de aguas residuales domesticas en estos municipios, y de esta manera tomar consecuentemente las medidas correctivas para este problema.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El acuífero de morroa ha representado para esta región un elemento de subsistencia, es decir, su uso es vital para esta zona en todos sus aspectos iniciando con lo humano hasta llegar a lo económico. Las poblaciones posicionadas en el área del acuífero Morroa, se han abastecido los últimos 50 años de una explotación intensiva de las aguas del mismo, dado que las condiciones hidroclimatológicas del área no son favorables a un régimen superficial que permita suplir las necesidades de la creciente población. Esto permite que se haga importante la realización de este trabajo.

Es fundamental determinar la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del acuífero, ya que es indispensable evaluar las zonas que tienen alto riesgo a ser contaminadas y las fuentes que allí se encuentran, y así poder tomar las medidas preventivas pertinentes. En caso de no hacerse, se tendría la posibilidad latente de que las aguas del acuífero se contaminaran y se hicieran no aptas para el consumo humano.

Por otra parte, en los últimos años se ha notado un incremento de la población en la zona de recarga, un mal manejo de los desechos sólidos y líquidos, contaminación de los arroyos del área, lo cual genera un aumento del riesgo de contaminación.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la vulnerabilidad del acuífero de Morroa por infiltración de aguas negras durante el proceso de transporte y/o almacenamiento de las mismas en el área del presente trabajo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer en el área del acuífero las zonas en riesgo de contaminación.
- Establecer las fuentes de contaminación y su respectivo grado de influencia.
- Caracterizar los tipos de suelos predominantes en el área de estudio en relación con sus características hidráulicas.
- Evaluar el grado de penetración del contaminante en el área del acuífero.
- Clasificar los tipos de vulnerabilidad existentes en el área de estudio.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 MARCO CONCEPTUAL.

4.1.1 GENERALIDADES

4.1.1.1 MACRO LOCALIZACIÓN.

El departamento de Sucre se encuentra ubicado en la parte intermedia de la región de la llanura del caribe su localización se extiende en latitud norte entre los $10^{\circ} 08' 03''$ en las intermeditaciones del sitio Pueblo Nuevo y el Caño Sangre de Toro (municipio de San Onofre) correspondiente al punto norte mas extremo, y los $08^{\circ} 16' 46''$ en el sitio de concurrencia con los departamentos de Córdoba y Bolívar correspondiente la punto sur mas extremo. En longitud oeste, se extiende entre los $74^{\circ} 32' 35''$, a orillas del río Cauca y cerca de la cabecera municipal de Guaranda, y los $75^{\circ} 42' 25''$, en la punta de San Bernardo al occidente (municipio de San Onofre). (Fuente: IGAC, 2003).

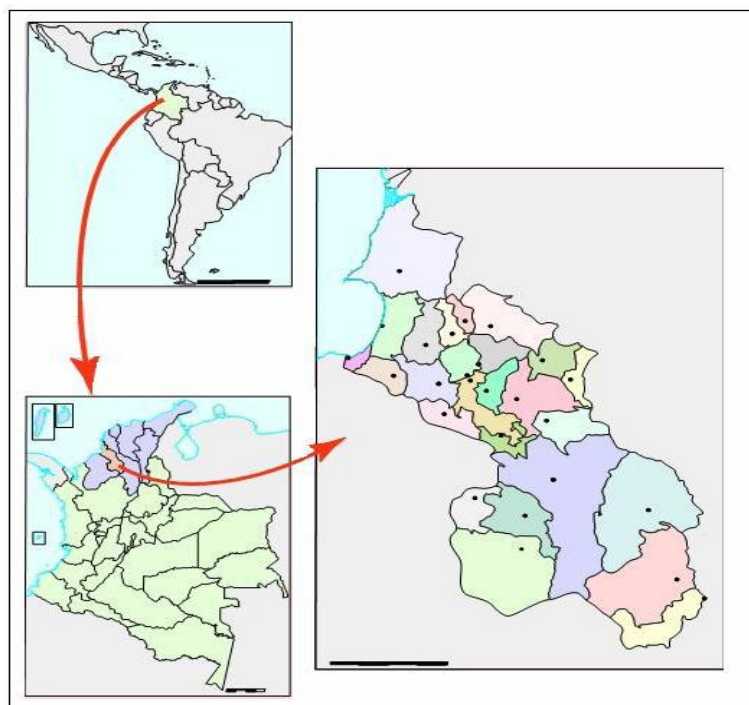


Fig. 1 Macro localización área de estudio (IGAC, 2003)

4.1.1.2 MICRO LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra localizada en la parte central del departamento y comprende los municipios de Ovejas, Sampués, Sincelejo, Corozal, Morroa y Los Palmitos.

El acuífero limita al Norte con la Serranía de San Jacinto, al Oriente con el Río San Jorge y el departamento de Bolívar, al Sur con los municipios de Sahagún y Chinú y al Occidente con el Anticlinal de Tolú Viejo. Rodríguez (1993).

Se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas $X_1=1'500.000$, $X_2=1'540.000$, $Y_1=846.000$, $Y_2=880.000$, de las planchas topográficas 44-IV-B.

4.1.1.3 CLIMATOLOGÍA

La posición latitudinal del Departamento y la total ausencia de montañas altas o muy altas coloca a todo el territorio sucreño dentro de lo que comúnmente se denomina "tierra caliente". Pero esta forma de clasificación climática es a todas luces deficiente porque se basa únicamente en la temperatura y excluye casi de manera total la humedad y las precipitaciones como elementos del clima. Al combinar adecuadamente las condiciones térmicas con las de las precipitaciones, vientos, etc., se puede obtener como resultado general, o como expresión de tales condiciones, la forma en que se presenta la vegetación natural o silvestre. Es cierto que este tipo de vegetación ha sido casi por completo eliminado de este sector de Colombia; mas lo que queda como relictos o restos permite llegar a una mejor tipificación de los climas sucreños.

En Sucre cabe hacer una distribución entre tres tipos climáticos:

1) Clima de sabana xerófila o de plantas adaptadas a la aridez; se encuentra a lo largo del litoral tanto del Golfo de Morrosquillo como más al norte hacia San Onofre. Al este penetra hasta los Montes de María.

2) Clima de sabana tropical alternativamente húmeda y seca; en él alternan bosques de vegetación secundaria, pequeños restos de vegetación primaria, matorrales y hiérbales; también aparecen formaciones vegetales acuáticas hacia las llanuras de inundación de los ríos Cauca y San Jorge. Este tipo de

clima es el dominante en los Montes de María, las Sabanas y la Depresión del Cauca y el San Jorge.

3) Clima de bosque tropical con lluvias de tipo monzónico. Aquí no se trata de lluvias monzónicas de verano como en Asia, por ejemplo, sino de un tipo intermedio entre el clima de sabana tropical ya citado y el de selva lluviosa.

Las áreas involucradas en el presente trabajo solo comprenden Los Montes de María y Sabanas.

Subregión Sabanas

El clima dominante en la subregión es característico de la zona de vida bosque seco tropical (bs-T), existen pocos relictos de vegetación secundaria; se dan rastrojos y extensas áreas de pastizales. Por la fuerte intervención humana en este sistema ambiental, se le conoce como sabanas antrópicas, con predominio del paisaje de lomerío.

De las cinco subregiones del Departamento, es la que padece con mayor rigor la prolongada estación seca, lo que conduce a la práctica de la trashumancia de ganado vacuno y equinos a las subregiones Mojana y San Jorge.

La temperatura promedio anual bordea los 27,5°C; la precipitación promedio anual fluctúa entre los 1.000 y 1.200 mm y la humedad relativa tiene un promedio del 80%. En esta Subregión los factores fisiográficos, edáficos, vientos y acciones antrópicas degenerativas del medio natural (eliminación de la cobertura arbórea y degradación del suelo), producen condiciones de aridez, con predominio de la sequía estacional y de árboles caducifolios.

Subregión Montes de María

La subregión Montes de María corresponde a la zona de vida bosque seco tropical (bs-T). La acción de los vientos alisios durante la estación seca influye en la regulación de la temperatura, humedad relativa y precipitación. Su paisaje característico es de montaña.

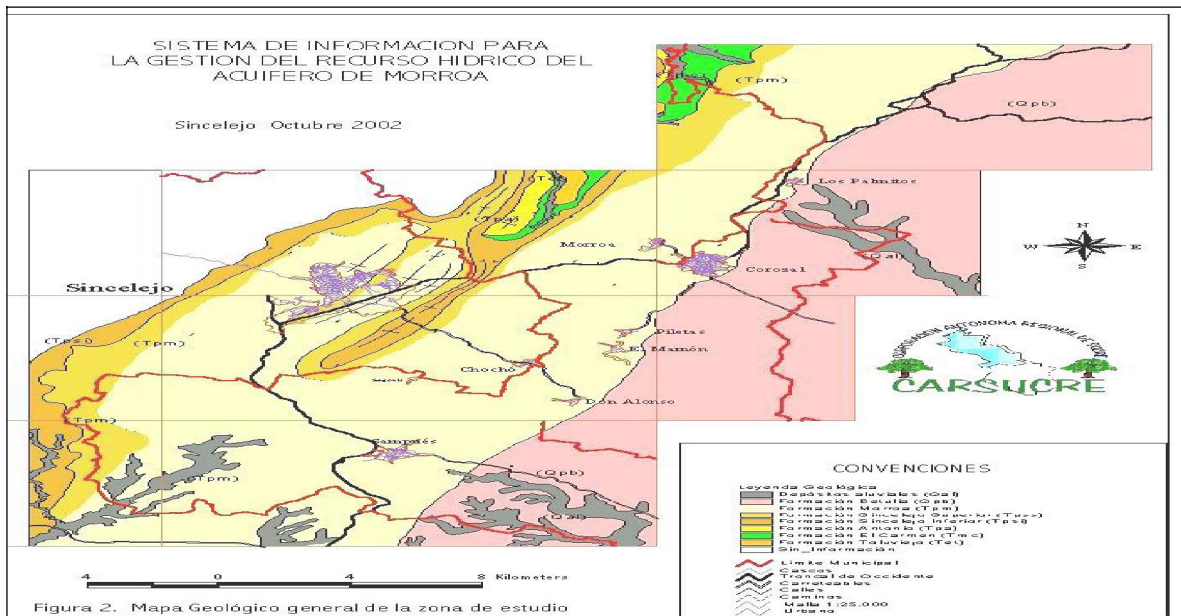
La temperatura promedio anual es de 27,5°C; la precipitación varía entre los 1.000 y 1.300 mm al año; la humedad relativa es del 77%; el fenómeno de

niebla es de común concurrencia en los bosques de ladera durante las primeras horas de la mañana y al atardecer. El régimen de lluvia es bimodal, al corto período de lluvias del primer semestre, le sigue un breve período seco en los meses de junio y julio, conocido en la región con el nombre de "Veranillo de San Juan". En el segundo semestre del año se presenta la mayor cantidad de precipitación pluvial. (Abreu, Y.; Díaz, M. 2004)

4.1.1.4 GEOLOGÍA

Es importante anotar, que la geología del área es bastante compleja y estratigráficamente se encuentra aun sin definir claramente la mayoría de las unidades que afloran al centro y este del área de estudio, como es el caso de las unidades Fm. Betulia, Fm Sincelejo y Fm. Morroa, en las cuales aun no se ha definido por completo su espesor y edad. Esta situación, sumada a que las empresas exploradoras de hidrocarburos no respetan la nomenclatura oficial, sino que por el contrario adoptan su propia nomenclatura estratigráfica, genera un caos aún mayor al existente, dificultando la correlación litológica y Cronoestratigráfica (edades geológicas) de las formaciones aflorantes. A continuación se describirán las unidades presentes en el área de estudio, tal cual aparecen en las memorias de las planchas 44 y 52 publicadas por el INGEOMINAS.

Geológicamente en la región estudiada aparecen las siguientes unidades lito - estratigráficas (Fig. 2)



Formación El Carmen (Oligoceno- Mioceno, Tmc). Esta Formación se encuentra distribuida según rumbo NE –SW; en la zona asociada a zonas bajas (sinclinales); en la parte norte se encuentra debajo de la Formación Sincelejo Inferior. Consta principalmente de arcillas con intercalaciones de areniscas con abundantes láminas de yeso selenítico. Es una formación típicamente marina de aguas profundas¹.

Formación Antonio (Plioceno, Tpa). “litológicamente la formación consta de areniscas compactadas y arcillolitas con intercalaciones de nódulos de areniscas calcáreas, hacia el techo la información es conglomerática”²

Formación Sincelejo. Esta formación se compone de dos conjuntos que son:

Formación Sincelejo Inferior (Plioceno, Tpsi). Se caracteriza por la gran variabilidad en potencia, y cambios laterales y verticales de facies.

¹ Estudio Hidrogeológico del Flanco Nororiental de la Serranía de San Jacinto y de la Zona Litoral del Golfo de Morrosquillo. Tomo I: Generalidades Geología. Convenio Colombo – Holandés. Bogotá, 1991, Pág. 10.

² Ibid, Pág. 11

Litológicamente consta de un conjunto de areniscas arcillosas “sucias” con cemento arcilloso-calcáreo, capas conglomeráticas y un conjunto arcilloso con turbas hacia el sur, hacia el norte la compone una arenisca y una pequeña intercalación arcillosa sin turbas³.

Formación Sincelejo Superior (Plioceno, Tps). Se caracteriza por presentar la mayor homogeneidad tanto en su potencia (+ / - 200 mts) como en los cambios de facie. Litológicamente esta 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 cementado donde el cemento calcáreo es dominante⁴

Formación Morroa (Plioceno, Tpm). Aflora en toda la zona de estudio, formando una franja amplia y alargada que se extiende en dirección N 10° E. Es sobre esta formación que se encuentra localizadas las cabeceras municipales de Sincelejo, Corozal, Morroa, Los Palmitos 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 pocos profundos. (CARSUCRE, 2001, 53)

Litológicamente ésta formación “consta de un conjunto de areniscas friables poco cementadas, con intercalación de conglomerados también mal cementados formados por pequeños cantos de cuarzo, lutita, areniscas y delgadas capas de arcilla”⁵.

Dentro de la Formación Morroa, la descripción de Morroa realizada por FINAGUAS – CARSUCRE, está delimitada en dos zonas:

Formación Morroa Arenosa (Tpm₁). Conformada por areniscas de color gris muy friables con estratificación cruzada, localmente numerosos nódulos de arenisca calcárea, intercalaciones de conglomerado y arcillolitas.

³ Ibid. Pág. 12.

⁴ Ibid. Pág. 12.

⁵ Ibid. Pág. 12

Formación Morroa Arcillosa (Tpm₂). Esta constituida por un conjunto de arcillolitas de diferentes colores Interestratificada con arenisca conglomerática de color amarillo y lentes de conglomerado.

Formación Betulia (Pleistoceno, Qpb). Aflora en la parte oriental del área de estudio, caracterizándose por presentar colinas muy suaves de poca altura con topografía plana a ligeramente ondulada que desciende ligeramente hacia el sureste, morfología típica de las Sabanas de 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. (CARSUCRE - FINAGUAS, 2001, Pág. 54 – 55).

4.1.1.5 HIDROGEOLOGÍA

Según el estudio más reciente de CARSUCRE (SIGAS 2001), realizado por FINAGUAS, los materiales geológicos que se encuentran en la zona de estudio se pueden clasificar en base a su facilidad para almacenar y transmitir el agua en:

Acuíferos de permeabilidad primaria: Como las rocas que conforman la formación Toluviejo.

Acuitardos: Los rendimientos de la formación Betulia y la formación El Carmen.

Teniendo en cuenta ésta primera subdivisión además de las características topográficas, geológicas (composición litológica y disposición estructural), hidráulicas (permeabilidad conductividad hidráulica y almacenamiento) y químicos de los materiales del área de estudio se diferenciaron 6 unidades hidrogeológicas (mapa 3).

4.1.1.5.1 Unidad Hidrogeológica 1 (U. H. 1). La conforman los depósitos aluviales de los principales arroyos que hay en la zona, presenta una

permeabilidad primaria moderada y aunque una estructura favorable para la recarga, por su escaso espesor tiene poco almacenamiento. Los espesores de ésta unidad no sobrepasan los 15 metros.

Litológicamente, está constituida por arenas, gravas, limos y arcillas. El carácter permeable de alguno de sus componentes y su poco espesor hace que esta unidad se considere de alta vulnerabilidad a la contaminación y más si se le tiene en cuenta su relación con las aguas superficiales sobre las cuales se hacen los vertimientos líquidos que genera la población. La recarga de ésta unidad es principalmente por aguas lluvias.

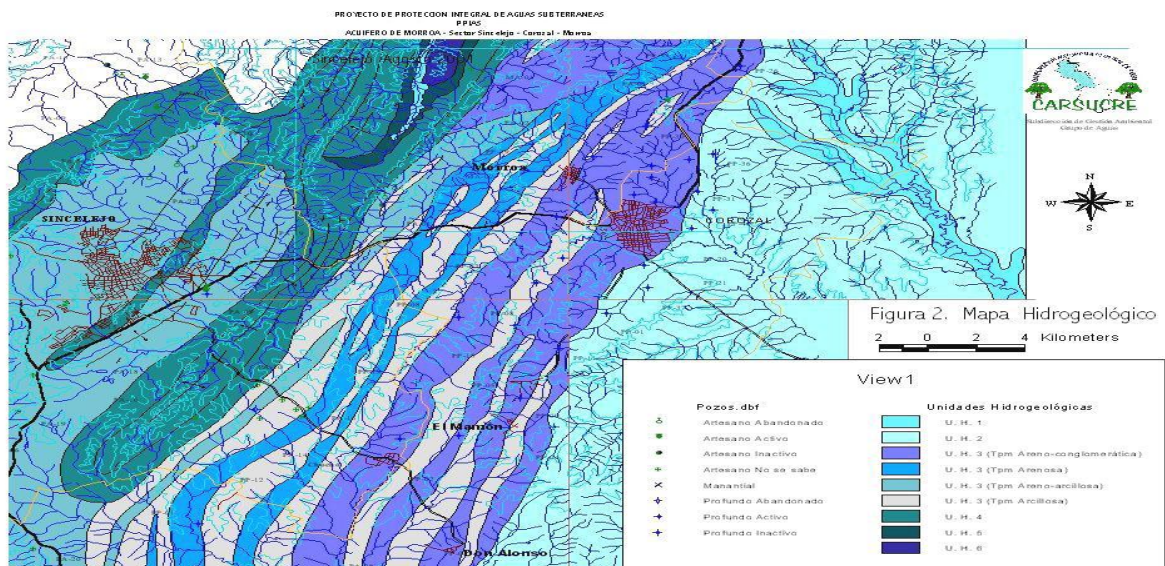


Fig. 3 Mapa Hidrogeológico del área de estudio.

4.1.1.5.2 Unidad Hidrogeológica 2 (U. H. 2). En general se considera ésta unidad hidrogeológica como un Acuitardo, debido su caré arcilloso. Sin embargo las capas permeables de ésta unidad, se encuentran confinadas, son de espesor variable y no tienen recarga directa por aguas lluvias. Se presume una recarga por goteo de los sedimentos arcillosos que la confinan. Su espesor aumenta hacia el oriente.

4.1.1.5.3 Unidad Hidrogeológica 3 (U. H. 3). Es la de mayor importancia en la zona de estudio del presente trabajo. Corresponde con los sedimentos de la formación Morroa. Se encuentra en la parte del área estudiada, conformando una franja ancha y alargada de dirección SW – NE y es la unidad hidrogeológica más explotada de la zona.

4.1.1.5.3.1 Características Hidrogeológicas. El Acuífero Morroa es un Acuífero complejo, constituido por capas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales. (Herrera 1997, referenciado por SIGAS – 2001).

Estructuralmente éste Acuífero se encuentra dispuesto en forma monoclinial, en su mayor parte presenta dirección N 25° E y una inclinación hacia el este, variable, entre 25° en la base y de 5° a 6° en el techo. Descansa con un ángulo cerca de 20° de inclinación sobre el Sincelajo Superior, que presenta cerca del tope una inclinación de 45°, lo cual indica una posible discordancia entre las dos formaciones.

Tiene un espesor variable de hasta 500 metros. (Rodríguez, 1993, 46). “Teniendo en cuenta estudios anteriores se subdividió el Acuífero Morroa en cuatro grupos principales”⁶.

Formación Morroa areno – conglomerática: La conforman los niveles acuíferos A y B

Formación Morroa arenosa: Corresponde con los niveles acuíferos C y D.

Formación Morroa areno – arcillosa: Constituida por los niveles E y F.

Formación Morroa arcillosa: La conforman las capas y lentes de arcilla que separan los niveles acuíferos de la formación... véase la figura 4.

4.1.1.5.3.2 Niveles Acuíferos de la Formación Morroa.

⁶ CARSUCRE – FINAGUAS. Sistema de información para la gestión del recurso hídrico en el Acuífero de Morroa (SIGAS). Sincelajo, 2001. Pág. 86.

Nivel acuífero A. Éste 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 INSFOPAL. El casco urbano de los municipios Corozal y de Los Palmitos se encuentra sobre este nivel acuífero y las comunidades de Pileta, El Mamón 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 10°.

Presentan una permeabilidad primaria alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

Desde el sector de Piletas hasta Don Alonso se subdividen en tres niveles acuíferos A₁, A₂, A₃, que luego se unen para conformar un solo nivel en el área de Sampués y subdividiéndose hacia el sur (Chinú) en dos niveles.

Nivel Acuífero B. Éste nivel se encuentra debajo del nivel A, separado de esta por un lente de arcilla y se correlaciona con los niveles C y D, definidos en el estudio del INSFOPAL. El casco urbano del municipio de Morroa y el corregimiento de Chochó se encuentran sobre éste 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 10° y 15°.

Presentan una permeabilidad primaria moderada a alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y almacenamiento de agua subterránea. Hacia el sur en el área de Sampués se subdivide en los niveles acuíferos B₁ Y B₂.

Los niveles acuíferos A y B, de la formación Morroa son los que presentan una intensa explotación en el área de estudio.

Nivel Acuífero C. Éste nivel debajo del nivel B, separado de ésta por una capa de arcilla y se correlaciona con lo niveles E y F definidos en el estudio del INSFOPAL.

Litológicamente está constituido por areniscas líticas finas de color gris, areniscas líticas medias ferruginosas, lentes y capas de grava 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 buzamiento hacia el oriente 15°.

Presenta una permeabilidad primaria alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Este nivel también se explota sobre todo en la zona norte, por medio de canteras para la extracción de materiales de construcción.

Niveles acuíferos D y E. Están separados del nivel acuífero C, por una capa de arcilla y entre si por un lente arcilloso. Se correlacionan con el nivel G, definido en el estudio del INSFOPAL.

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 15°.

Presentan una permeabilidad primaria baja a moderada (nivel D) y moderada a alta (nivel E) y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

Nivel Acuífero F. Se encuentra ubicado hacia la base de la formación Morroa, aflorando desde el noroccidente del casco urbano de Morroa hasta el sur del corregimiento de Bremen. Está separado del nivel E por una capa de arcilla y entre sí por lentes arcillosos. Se correlaciona con el nivel H definido en el estudio del INSFOPAL.

Litológicamente está constituido por areniscas líticas finas a medias algo consolidadas, areniscas finas arcillosas dentro de las cuales son comunes las concreciones endurecidas de areniscas calcáreas, algunos lentes conglomeraticos consolidados y lentes arcillosos, con buzamientos hacia el oriente entre 15° y 25°.

Por sus características litológicas se presume una permeabilidad primaria baja y una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

4.1.1.5.4 Unidad Hidrogeológica 4 (U. H. 4). La conforman las formaciones Sincelejo superior e inferior y formación Antonio y se encuentra debajo de la unidad hidrogeológica 3. Tienen una permeabilidad primaria baja y una permeabilidad secundaria moderada a baja, por su grado de consolidación y por la calidad química del agua que contiene las capas permeables (generalmente de regular calidad físico – química), no es explotada internamente en la zona.

4.1.1.5.5 Unidad Hidrogeológica 5 (U. H. 5). Corresponde con las rocas de la formación El Carmen y se encuentra en la parte norte conformando los flancos de un pliegue anticlinal. Tienen una permeabilidad primaria baja.

4.1.1.5.6 Unidad Hidrogeológica 6 (U. H. 6). Corresponde con las rocas calcáreas de la formación Toluviejo. Se encuentra al norte de la zona de estudio conformando el núcleo de un pliegue anticlinal.

Hidrogeológicamente no se reconoce el comportamiento acuífero de ésta unidad. Sin embargo, por su composición litológica se presume la existencia de acuíferos de permeabilidad secundaria muy alta, tipo Karst (formación de cavernas por disolución de calizas), con aguas duras de buena calidad.

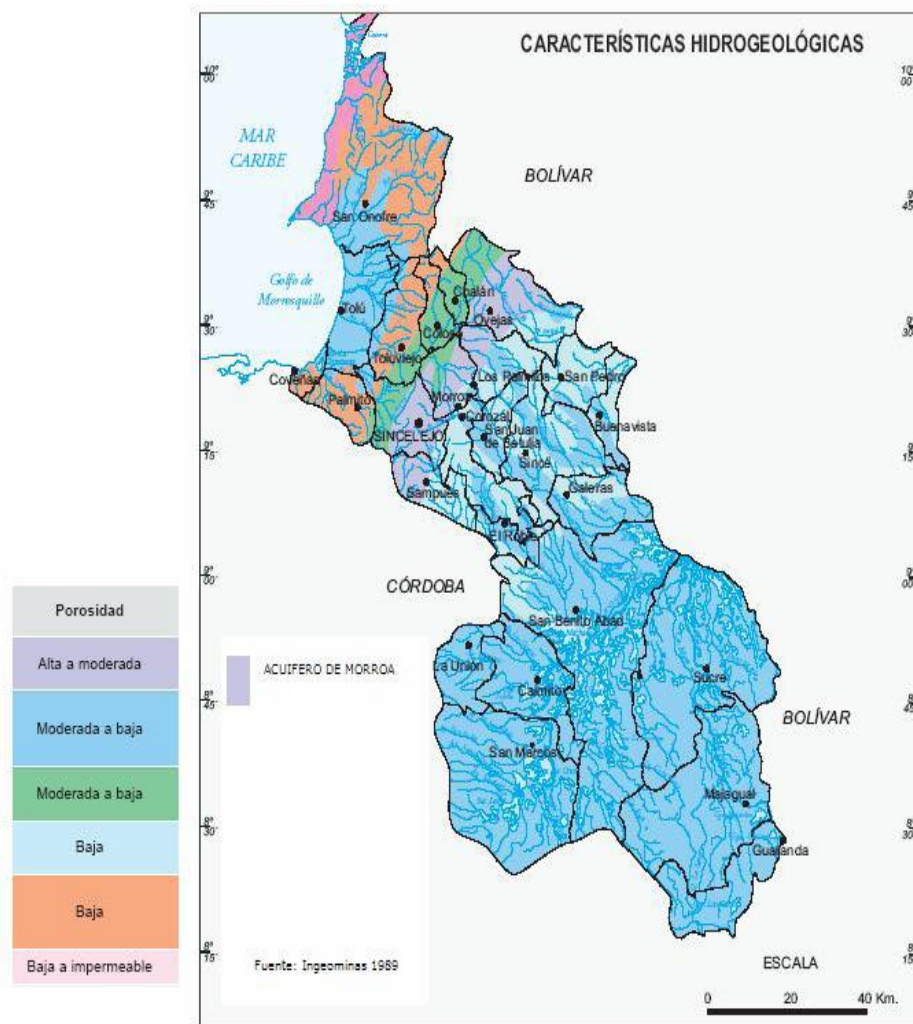


Fig. 4 Mapa hidrogeológico de Sucre (IGAC 2004)

4.1.1.6 RELIEVE

En el departamento de Sucre existen diferentes tipos de sistemas o unidades de relieve como son sistema costero, sistema de serranías, Sistema de lomerío o piedemonte, Sistema de llanuras y ciénagas, Sistema de litoral y Sistema de sabanas. Nuestra zona de estudio se encuentra ubicada dentro del sistema de lomerío o piedemonte, del cual hablaremos a continuación:

Sistema de lomerío o piedemonte. Esta unidad se localiza en el sector contiguo a la serranía de San Jacinto, conformado por superficies inclinadas y lomas altas alargadas separadas por una red hidrográfica moderadamente densa. Se presenta en menor amplitud en el sector occidental de la serranía en las zonas de San Onofre, Palmito, Tolviejo y Colosó, mientras en el sector oriental constituye una zona de gran amplitud abarcando gran parte de los municipios de Morroa, Sincelejo, Corozal, Sampués, San Juan de Betulia, San Pedro y Buenavista. Se caracteriza por presentar un paisaje de lomerío con alturas que varían entre 50 y 200 metros sobre el nivel del mar, constituyendo cerca del 25% del área del departamento. La pendiente varía entre 0,4% y 0,6%. (IGAC 2004).

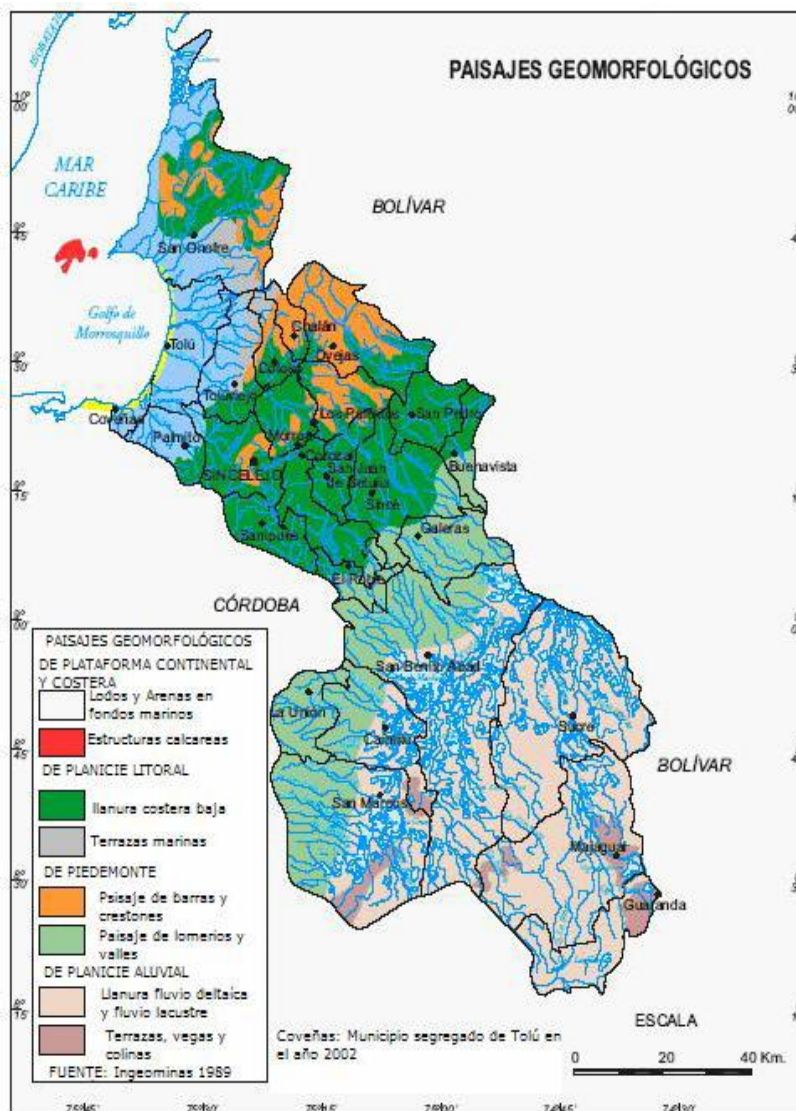


Fig. 4 Mapa Geomorfológico de Sucre (IGAC 2004).

4.1.2 IMPORTANCIA DE LA VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO

No existen datos completos y exactos acerca de la proporción de los abastecimientos de agua municipal y doméstica que proviene del recurso hídrico subterráneo, ni existe información confiable sobre la proporción de todos los abastecimientos de agua para cualquier propósito, derivados de este mismo origen. Así, para ilustrar el rol clave que juegan las aguas subterráneas en el abastecimiento de agua potable en América Latina y en el Caribe se presentan varios ejemplos específicos acerca de la vulnerabilidad que puede tener un determinado acuífero.

En algunos países latinoamericanos las aguas subterráneas representan una importante fuente de suministro de agua potable para las diversas localidades tanto urbanas como rurales. En efecto, en Chile, aproximadamente el 77% del agua utilizada por los servicios de agua potable rural proviene de esta fuente, mientras que para el caso del abastecimiento urbano esta cifra alcanza un 40% a nivel nacional. De igual forma, en Costa Rica más del 50% del agua potable con que se abastece el área metropolitana proviene de las formaciones acuíferas del valle central. Lo anterior muestra la importancia de preservar las fuentes de abastecimiento subterráneo y tomar conciencia del potencial de contaminación de cada una de ellas.

Generalmente el riesgo potencial de contaminación de un acuífero se estima en un proceso secuencial que abarca la caracterización de los sistemas acuíferos relevantes, seguido por un análisis de vulnerabilidad de éstos, lo que finalmente se utiliza para evaluar el riesgo asociado al desarrollo de actividades de distinto tipo a nivel de la zona superficial. (Espinoza 2002.)

El CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Medio Ambiente, a través de su programa regional de prevención y control de la contaminación de aguas subterráneas, diseñó un plan a mediano plazo, para

que desde el año de 1990, varios países de la región, hubiesen iniciado programas nacionales de control de contaminación de las aguas subterráneas, respaldados por procedimientos adecuados para la identificación del riesgo de contaminación y con políticas apropiadas para el control selectivo de la disposición de efluentes y las practicas de uso del suelo.

En Colombia, a partir del año 1998, se dio inicio al Plan De Protección Integral De Las Aguas Subterráneas (PPIAS), coordinado por INGEOMINAS con el auspicio de la OIEA, el Ministerio y el IDEAM y en vía de implementación por las Corporaciones Regionales del Medio Ambiente.

En vista de la importancia de los abastecimientos de agua subterránea se podría pensar que la protección de acuíferos para prevenir el deterioro de la calidad de agua debería haber recibido ya una atención detallada, particularmente, dentro y alrededor de las áreas urbanas socio-económicamente significativas en cada región y/o sub.-región. Por esta razón uno de los elementos claves del PPIAS es la identificación de las cargas contaminantes que llegan a las aguas subterráneas afectando su potabilidad. (Gutiérrez G.; Arroyo J. 2004).

4.1.3 PRINCIPALES ACTIVIDADES QUE CAUSAN CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

4.1.3.1 Conceptos generales

Se presenta una lista general de actividades potencialmente contaminantes con sus características clasificadas. Algunas de las actividades que generan riesgo serio de contaminación en países en desarrollo son comparables a aquellas que ocurren en países altamente industrializados, pero las que presentan la amenaza más seria en las naciones en desarrollo difieren significativamente, tanto individual como colectivamente, de sus similares en otros lugares.

La diferencia entre contaminación de fuentes puntuales a identificables y contaminación difusa es de importancia fundamental, especialmente en la consideración de las medidas de control.

4.1.3.2 Saneamiento sin alcantarillado

El saneamiento (in situ), sin alcantarillado, puede brindar niveles adecuados de servicio para la disposición de excretas en comunidades, pueblos pequeños, a incluso en grandes áreas urbanas, a un costo mucho mas bajo que el de los sistemas de alcantarillado con tuberías principales de recolección. Se pueden usar varios tipos de instalaciones, incluyendo tanques sépticos, fosas sépticas y letrinas secas o con descarga manual. Como aún se necesitan amplia y urgentemente mejoras en el saneamiento, es probable que se continúen produciendo grandes aumentos en la disposición de excretas al suelo.

Bajo algunas condiciones hidrogeológicas, ciertas unidades de saneamiento in situ presentan el riesgo de una migración directa de bacterias y virus patógenos hacia acuíferos subyacentes y fuentes vecinas de aguas subterráneas. La contaminación de los suministros de aguas subterráneas debido a un saneamiento sin alcantarillado ha constituido una de las causas comprobadas de transmisión de agentes patógenos en numerosos brotes de epidemias. Con frecuencia, éste es el resultado de la falta de espacio en los asentamientos densamente poblados, pero también puede ocurrir en urbanizaciones más

prósperas y mejor organizadas que emplean un saneamiento in-situ y que construyen pozos excavados o tubulares particulares para reemplazar, o aumentar, las fuentes comunales de agua.

Los compuestos de nitrógeno en las excretas no representan un peligro tan inmediato para las aguas subterráneas, pero pueden causar problemas mucho más amplios y persistentes. Una indicación de la contaminación potencial de aguas subterráneas por nitratos proveniente de las unidades de disposición de excretas in situ proviene de las siguientes consideraciones: una población de 20 personas/ha representa una descarga de hasta 100 Kg/ha/a al suelo, la que, si fuera oxidada y lixiviada con 100 mm/a de infiltración, podría resultar en una recarga local de aguas subterráneas con una concentración de 100 mg NO₃ - N/1. En la práctica se desconoce la proporción de nitrógeno depositado que será lixiviado, y, como consecuencia de varios procesos, se producirá dilución y reducción. Sin embargo, se puede esperar que los sistemas de saneamiento sin alcantarillado causen frecuentemente incrementos en la concentración de nitratos de las aguas subterráneas, incluso en climas relativamente húmedos. Es probable que provoquen mayores problemas en zonas áridas que no tienen un significativo flujo regional en el acuífero. En los sistemas anaeróbicos de aguas subterráneas con nivel freático poco profundo, la migración de amonio (en vez de nitratos) puede causar problemas locales.

4.1.3.3 Otras actividades urbanas a industriales

Un creciente número de industrias y actividades (tales como textilerías, talleres de metales y de vehículos, imprentas, curtiembres, estaciones de combustible, etc.) con frecuencia tiende a localizarse en forma dispersa en estas áreas. La mayoría de estas industrias genera efluentes líquidos, tales como aceites y solventes. Ante la falta de control, estos efluentes son descargados directamente al suelo, debido al costo prohibitivo de alternativas tales como tratamiento in-situ, o almacenamiento y transporte hasta lugares seguros de disposición. Las plantas industriales más grandes, que utilizan considerables volúmenes de agua para sus procesos también dispondrán frecuentemente de lagunas para el tratamiento o la concentración de efluentes líquidos. Tales instalaciones, así como los tanques de almacenamiento subterráneos y las

líneas de alcantarillado industrial, son teóricamente seguras, pero en la práctica frecuentemente tienen fugas y pueden representar una amenaza a la calidad de las aguas subterráneas. El riesgo más serio es asociado con basurales no controlados (y no tanto con rellenos sanitarios controlados) y donde los desechos industriales peligrosos, que incluyen barriles de efluentes líquidos, se desechan en lugares inadecuados. En muchos casos no se lleva un registro de la naturaleza y de la cantidad de los desechos volcados en un lugar determinado y los basurales y rellenos abandonados pueden representar, por décadas, un peligro potencial para el agua subterránea.

4.1.3.4 Accidentes ambientales

Así como se conocen las fuentes más obvias de contaminación, se sabe que pueden ocurrir muchos de los llamados "accidentes ambientales" que pueden resultar en una carga contaminante discontinua al subsuelo de derivados del petróleo y/o sustancias químicas peligrosas. Tales accidentes ambientales incluyen incidentes durante su transporte, fugas debido a fallas operacionales o corrosión de las tuberías y de los tanques.

4.1.3.5 Prácticas agrícolas de cultivo

El impacto de las prácticas agrícolas modernas sobre la calidad de las aguas subterráneas se hizo totalmente evidente en algunos países Industrializados durante la década del 70. En particular, según Cepis, 1987, se demostró la existencia de altas tasas de lixiviación de nitratos y otros comunes móviles de muchos suelos sometidos a continuas siembras, sostenidas por aplicaciones de grandes cantidades de fertilizantes inorgánicos. El incremento de las concentraciones de nitratos, cloruros y, posiblemente, trazas de otros elementos y de compuestos orgánicos en las aguas subterráneas, son posibles consecuencias de las excesivas aplicaciones de efluentes, lodos o desperdicios animales sobre las tierras cultivadas. Por otro lado, las tierras de pastoreo no pierden mucho nitrato por lixiviación, a menos que están excesivamente abonadas a intensivamente pasteadas por animales.

4.1.4 PREVENCIÓN Y CONTROL DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aguas subterráneas cumplen un rol importante, y en numerosos casos vital, para el suministro de agua potable de muchas áreas urbanas y rurales de la Región de América Latina y el Caribe. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ha prestado poca atención a la prevención de la contaminación de las mismas fuentes de aguas subterráneas, y aún menos, a la protección de los acuíferos en su conjunto.

En algunas áreas, principalmente dentro de los grandes centros urbanos o en las áreas circundantes, ya se ha producido la contaminación de las aguas subterráneas, creando riesgos potenciales para la salud pública y causando el abandono de las fuentes de suministro de agua existentes, con la consiguiente pérdida de inversión financiera y de recursos naturales. En lo que se refiere a aguas subterráneas, la contaminación tiende a aparecer lentamente, pero es muy persistente y, en muchos casos, la purificación es técnicamente problemática, excesivamente costosa y con frecuencia poco práctica.

La contaminación más común de las aguas subterráneas está asociada con el saneamiento de áreas que no cuentan con alcantarillado, la disposición final de efluentes líquidos industriales, y las actuales prácticas de cultivo agrícola. El creciente incremento de las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas y los frecuentes episodios de penetración en la subsuperficie de hidrocarburos halogenados volátiles, plantean un serio peligro para la calidad del agua potable en relación con las actuales guías para la potabilidad del agua establecidas por la OMS. (CEPIS 2005)

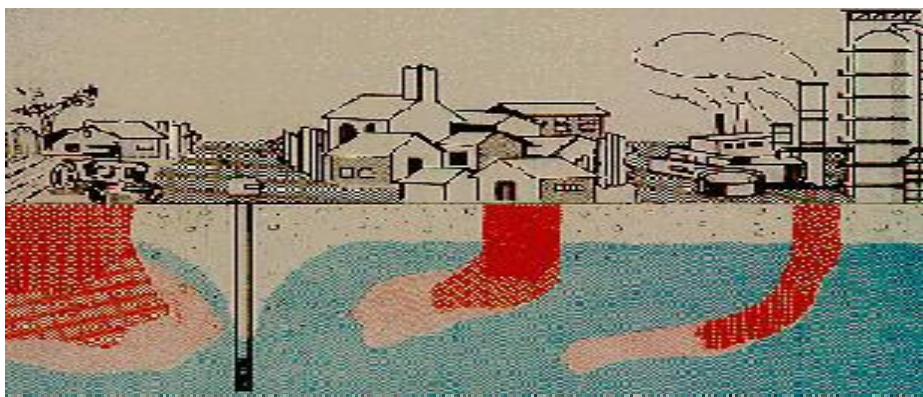


Fig. 6 Ejemplificación de la contaminación de aguas subterráneas

4.1.5. METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN.

4.1.5.1 GENERALIDADES

La literatura técnica (Ground Water Vulnerability Assesment, 2000) indica que la vulnerabilidad se puede definir como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, después de su introducción en alguna posición sobre la zona no saturada. La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación tiene por objeto establecer su grado de defensa natural ante la alteración potencial de la calidad del agua subterránea, basándose en la determinación de las propiedades físicas del medio no saturado, que lo convierten en una herramienta de protección del recurso. La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se establece por la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada. (Foster 1987), sugiere que la definición más confiable de la "vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos" debe ser la medida de: "El grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero y el grado de atenuación a la contaminación que posean los estratos de la zona no saturada, como resultado de retención y/o reacción físico - química".

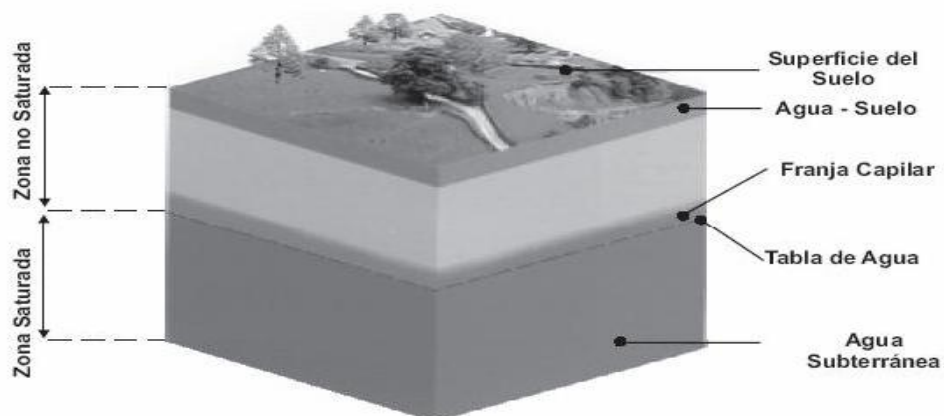


Fig. 7 Terminología hidrogeológica

Para la evaluación de las fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas se debe tener como mapa base el de uso actual del suelo, el cual debe estar a la misma escala del mapa de vulnerabilidad. Se debe hacer un inventario de las fuentes potenciales de contaminación, clasificarlas y categorizarlas según la metodología que se defina para tal fin Ingeominas propone emplear la desarrollada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, CEPIS (1982). Las principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas son las de origen doméstico, industrial y agrícola. La contaminación doméstica hace referencia a las actividades de origen doméstico que pueden ocasionar una alteración de la calidad natural de las aguas subterráneas son los vertimientos de residuos sólidos y de aguas residuales domésticas al suelo o a las corrientes hídricas. El mapeo de la densidad de población, los sistemas y cobertura de los sistemas de recolección de basuras y del alcantarillado, permite evaluar el peligro potencial de estas actividades. (Minambiente 2002)

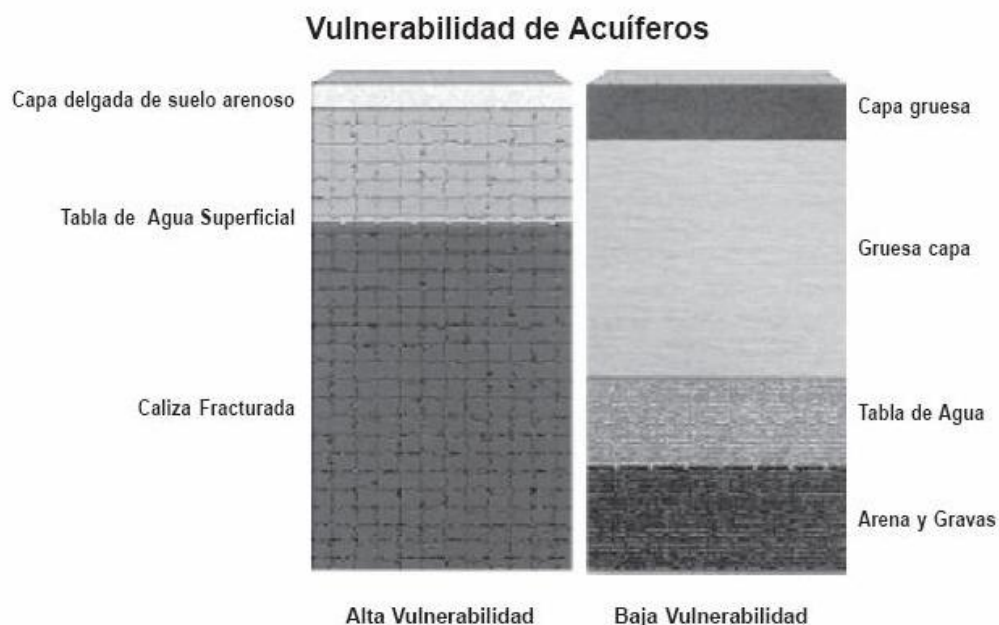


Fig. 8 Representación esquemática de los factores que afectan la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación

El riesgo de contaminación está determinado básicamente por las características del acuífero, las que son relativamente estáticas (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo) y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

Existen diversas metodologías para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos. Dichos métodos difieren en los parámetros utilizados para su determinación, parámetros como por ejemplo: características de la zona no saturada, profundidad del agua subterránea, recarga neta, permeabilidad del subsuelo, etc. Existen métodos que utilizan un número importante de parámetros, mientras que otros están basados en un número muy reducido.

La vulnerabilidad del agua subterránea es el grado de inaccesibilidad de un acuífero a los contaminantes; es función de la atenuación a la contaminación que posean sus estratos suprayacentes, debido a sus características físicas, químicas y biológicas. La vulnerabilidad es el inverso a la asimilación del contaminante, con una protección adicional causada por los substratos. Es una propiedad intrínseca del acuífero y sus estratos suprayacentes. Cada formación acuífera, posee una única vulnerabilidad, y por ende se debe construir un mapa de vulnerabilidad por cada acuífero de una cuenca hidrogeológica.

La Vulnerabilidad puede ser contemplada o estudiada a través de:

Mapas de vulnerabilidad, los cuales son recomendables, la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos, es una de las vías más adecuadas para preservar la calidad de las aguas subterráneas. Ella posibilita diferenciar las características naturales del terreno para proteger al acuífero de la acción de múltiples contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, asociados a la actividad del hombre. El objetivo principal de un mapa de vulnerabilidad, es la subdivisión del área en diferentes unidades homogéneas, a veces llamadas

celdas o polígonos, que tienen diferentes niveles o grados de vulnerabilidad. Sin embargo, esta diferenciación entre las celdas, solo muestra la vulnerabilidad relativa de unas áreas con respecto a otras, no representan valores absolutos.

Una segunda herramienta es por los *métodos analíticos* pero en los perímetros de protección sanitaria de pozos y campo de pozos tampoco se logra tener una buena interpretación de los resultados.

Una tercera herramienta que permite integrar las acciones sobre el sistema acuífero con sus propiedades hidrogeológicas, geométricas y de estado es la *modelación numérica* del mismo (Hernández A.O. et al 2001). Un modelo matemático de un acuífero es una ecuación o serie de ecuaciones que simulan y pronostican respuestas físico-químicas de dicho sistema, sometido a perturbaciones tales como recarga o extracción mediante pozos o la inyección de un agente contaminante.

Los métodos utilizados para la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, pueden ser clasificados en tres grupos (Otalvaro, 1996):

Métodos basados en procedimientos: utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la subsuperficie.

Métodos estadísticos: utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presenten estas áreas.

Métodos de Indexación y superposición: combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Son los más usados son por su mayor flexibilidad, en cuanto al conocimiento básico de la zona, aceptando ciertas estimaciones en

caso de contar con información insuficiente. Los más famosos son: el empleado por la Agencia Ambiental y la Autoridad Nacional de Ríos del Reino Unido (NRA, 1998), el Método DRASTIC (Aller y otros, 1987), utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y el método GOD, propuesto por Foster (1988) en documentos del CEPIS.

4.1.5.2 METODOLOGÍA DRASTIC

Para la determinación de la vulnerabilidad existen varios métodos, cada uno de los cuales analiza diferentes parámetros. En el desarrollo de esta investigación se aplicara la metodología DRASTIC, el cual fue propuesto por un grupo de investigadores de la Asociación Nacional de Pozos (Aller y colaboradores, 1987) de los Estados Unidos, para realizar análisis de la contaminación potencial de acuíferos en ese país.

Este método involucra siete parámetros, determinados en forma de acróstico en su sigla, los cuales son:

D: [Depth]. Profundidad del nivel freático

R: [(Net) Recharge]. Recarga neta que sufre el acuífero por infiltración.

A: [Aquifer Media]. Litología y estructura media del acuífero.

S: [Soil Media]. Tipo de suelo presente en el acuífero.

T: [Topography]. Se refiere principalmente a la pendiente del terreno.

I: [Impact]. Naturaleza de la zona vadosa.

C: [Conductivity]. Es la conductividad hidráulica del acuífero, que se puede determinar con la permeabilidad.

Para calcular el Índice de Vulnerabilidad mediante la metodología DRASTIC, se usa siguiente ecuación:

$$IV = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

Donde los subíndices R y W son el puntaje (rating) y el peso de ponderación (weight) respectivamente. Esta suma expresa la conjunción de las valoraciones de cada propiedad, aportadas por el método, y el conocimiento del acuífero particular del que se trata por parte de quienes lo aplican.

Para evaluar una zona determinada, cada factor se valora en una escala de 0 a 10, que indica la potencial contaminación relativa del factor dado para esa zona. Los valores de peso o ponderación de 1 a 5 expresan la importancia relativa de unos factores con respecto a otros. Las clasificaciones se obtienen a partir de las tablas o gráficos para cada factor, mientras que los pesos de importancia se encuentran en las tablas genéricas del modelo DRASTIC. como se aprecia en la Tabla 2.

El rango posible de valores del índice DRASTIC está comprendido entre 23-226 siendo más frecuentes valores entre 50-200. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación. En el trabajo realizado se han establecido los siguientes grados:

Tabla Nº 1 Grados de Vulnerabilidad

PUNTAJE	GRADO DE VULNERABILIDAD
<100	Vulnerabilidad insignificante
101-119	Vulnerabilidad muy baja
120-139	Vulnerabilidad baja
140-159	Vulnerabilidad moderada
160-179	Vulnerabilidad alta
180-199	Vulnerabilidad muy alta
>200	Vulnerabilidad extrema.

Uno de los estudios más importantes hechos mediante la aplicación de este método es el realizado por el ingeniero civil J. AGÜERO., en el 2000, en el acuífero del valle central de Costa Rica, en donde se obtuvo que un 38.6%

presenta una vulnerabilidad baja, un 60.3% media, un 1% media-alta y un 0.12% alta; estos resultados concluyen que las áreas de mayor vulnerabilidad a la contaminación son pequeñas y se concentran en las cercanías de los cauces de los ríos virilla y tibas y al suroeste de Santo Domingo en el poblado de Santa Rosa. Este método también fue aplicado en Venezuela en el Valle Alto, donde se ha determinado áreas con alta vulnerabilidad, correspondiente al abanico de Punata y la zona sur del abanico Tarata, mediana vulnerabilidad, correspondiente a la parte sur del abanico de Punata y la zona norte del abanico de Tarata y baja vulnerabilidad toda la planicie fluvio - lacustrina del valle alto.

(D) PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO		(R) RECARGA NETA	
RANGO (m)	VALOR	RANGO(mm)	VALOR
< 1,5	10	0-50	1
1,5-5	9	50-100	3
5-10	7	100-180	6
10-20	5	180-255	8
20-30	2	> 255	9
>30	1		

(A) NATURALEZA DEL ACUÍFERO			(S) NATURALEZA DEL SUELO	
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR	TIPO DE SUELO	VALOR
A-Arcillas, margas, limos	1-3	2	Arcilla no expansiva y agregada	1
B-Ígneas/metamórficas	2-5	3	Suelo orgánico	2
C-Ígneas/metamórficas alteradas	3-5	4	Marga arcillosa	3
D-Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6	Marga limosa	4
E-Areniscas masivas	4-9	6	Marga	5
F-Calizas masivas	4-9	6	Marga arenosa	6
G-Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8	Arcilla expansiva y/o agregada	7
H-Volcánicas	2-10	9	Turba	8
I-Calizas carstificadas	9-10	10	Arena	9
			Grava	10
			Delgado o ausente	10

(T) TOPOGRAFÍA		(C) PERMEABILIDAD	
RANGO %	VALOR	RANGO (m/día)	VALOR
0- 2	10	<4	1
2- 6	9	4-12	2
6-12	5	12-28	4
12-18	3	28-40	6
> 18	1	40-80	8
		>80	10

(I) IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA		
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR
A-Arcilla, limo, margas	1-2	1
B-Esquistos, pizarras	2-5	3
C-Calizas	2-7	6
D-Areniscas	4-8	6
E-Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	4-8	6
F-Arenas y gravas con contenido en arcilla	4-8	6
G-Metamórficas, ígneas	2-8	4
H-Arenas y gravas	6-9	8
I-Volcánicas	2-10	9
J-Calizas carstificadas	8-10	10

Tabla 1. Rangos y valores de los parámetros (modificado de Aller et Al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994).

PARÁMETROS	ÍNDICE DE PONDERACIÓN (w)
D - Profundidad del nivel de agua	5
R - Recarga	4
A - Naturaleza del acuífero	3
S - Tipo de suelo	2
T - Topografía	1
I - Impacto de la zona no saturada	5
C - Permeabilidad	3

4.2 MARCO JURÍDICO

Colombia es país miembro de la Organización Meteorología Mundial -OMM, desde hace 35 años, con la creación en su momento del Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología, funciones que posteriormente fueron asumidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras HIMAT, y que actualmente realiza el IDEAM, de acuerdo con la ley 99 de 1993, en la cual le traslada, entre otras, las funciones que en materia de hidrología tenía asignadas HIMAT y toda la información, archivos, laboratorios, centros de procesamiento de información y elementos relacionados con sus actividades hidrológicas. Es por ello que las prácticas y procedimientos hidrológicos aplicados por el IDEAM, están orientados hacia el cumplimiento de las pautas expedidas por el Reglamento Técnico de la OMM, el cual se complementa con guías en las que se describen con más detalles las prácticas y procedimientos, las cuales son periódicamente actualizadas con los aportes de los estados miembros.

Por otro lado, la legislación ha intentado generar todo un marco jurídico en torno a lo que es la protección de los recursos naturales en la parte continental (Código de los Recursos Naturales Decreto 2811/74), mientras que en lo marino se han realizado esfuerzos para disminuir los derrames de hidrocarburos y las emisiones de los puertos (Ley 9/79-Decreto 1594/84; Ley 12/81; Ley 12/92; Decreto 2190/95). También se han dictado disposiciones que pretenden reglamentar el aprovechamiento de los recursos marinos (Decreto 1877 de 1977), así como otras disposiciones que se derivan de la proclamación de la Constitución Política de Colombia de 1991. Por su parte, el Decreto 1594 de 1984, que reglamenta el uso del agua y vertimientos líquidos, aborda el tema de la descarga de sustancias de interés sanitario según los usos del recurso hídrico. Además, se estableció una reglamentación, la cual se le conoce como decreto 475 de 1998, que regula la calidad de agua, esta es la responsable que en Colombia se mantenga una buena calidad para dicho recurso el cual resulta fundamental para la vida de la población. Al igual esta sirve para calificar la calidad de las aguas subterráneas después de ser explotada y también define los rangos para los cuales un agua es potable.

Un decreto muy importante es el 1594 del 84, mediante este se hace una regulación del recurso hídrico, aquí se dan especificaciones puntuales acerca de la forma como debe manejarse, consumirse y protegerse dicho recurso. Además, hace un enfoque al vertimiento de residuos líquidos, específicamente en los artículos 60, 61, 62 y 63, en donde se enfatiza principalmente a la prohibición de ciertas prácticas que afectan la calidad del agua de los acuíferos.

Otro decreto de interés para este trabajo investigativo es el 1729 DE 2002 – Sobre Cuencas hidrográficas. entiéndase por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar; En base a esto se puede afirmar con toda veracidad que el acuífero de morroa esta incluido dentro de este concepto, por lo tanto esta normatividad recae de forma directa sobre él. la finalidad de este decreto es la de brindarle una planeación del uso y manejo sostenible de los recursos renovables en una cuenca, para que exista de esta forma un equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos.

El estudio de vulnerabilidad se convierte en un punto de gran importancia para cumplir con los objetivos expuestos anteriormente, en especial en la ordenación de la cuenca. La ordenación así forjada establece el marco para proyectar el uso sostenible de la cuenca y la ejecución de programas y proyectos específicos dirigidos a conservar, preservar, proteger o prevenir el deterioro y/o restaurar la misma. Existen ocho principios a tener en cuenta para la ordenación de una cuenca, dentro de los cuales uno de los mas importantes para la realización de esta investigación es el de:” Considerar las condiciones de amenazas, vulnerabilidad y riesgos ambientales que puedan afectar el ordenamiento de la cuenca”.

Por otro lado, existen problemas asociados a la calidad del agua, derivados de las descargas producidas por actividades económicas e industriales y de los alcantarillados municipales, sin tratamientos previos adecuados, que unidas a

la sedimentación producida por procesos naturales y actividades antrópicas, genera dificultades para el suministro de agua de buena calidad, afectando con ello la disponibilidad efectiva del recurso hídrico. (MINAMBIENTE 2004)

De mantenerse las tendencias actuales y de no mejorarse la capacidad de planificación y administración del recurso hídrico por parte de las autoridades competentes, esta situación se agravará toda vez que la oferta hídrica disponible se verá restringida por efectos de la contaminación, del aumento de la demanda asociado al crecimiento poblacional y económico, y a la reducción de la capacidad de regulación de las cuencas hidrográficas. (MINAMBIENTE 2004) Se espera que por la ocurrencia de los fenómenos anteriormente descritos, y de no tomarse medidas adecuadas de manejo y conservación de las cuencas hidrográficas, para el año 2025, el 69% de la población enfrentara riesgos de desabastecimiento de agua. (IBIDEM 2004).

En el 2002 fue expedida una guía con el fin de generar planes de protección para las aguas subterráneas, esta tiene gran importancia dada la tendencia a la sobreexplotación y contaminación derivadas de las actividades humanas asociadas a las prácticas agrícolas, la urbanización, los procesos industriales, y la eliminación no controlada de los residuos. Esta guía hace referencia importante al tema de vulnerabilidad de acuíferos, el cual es el eje de esta investigación.

Atendiendo a lo anterior, el estado en representación de CARSUCRE ha venido desarrollando un plan para la protección del recurso hídrico perteneciente al acuífero de Morroa, cuyo plan se conoce con el nombre de PPIAS (Plan de Protección Integral de Aguas Subterráneas). El objetivo de este plan es el contribuir a la sostenibilidad de la oferta del agua subterránea en calidad y cantidad del acuífero de morroa, para el abastecimiento de toda la población de la zona; dentro de este objetivo cabe destacar la palabra CALIDAD la cual nos expresa una de las características que se debe propender en las aguas del acuífero, las cuales deben estar protegidas de toda contaminación inminente o potencial que se pueda presentar en zonas donde se pueda presentar, mas específicamente en la zona de recarga del acuífero. Es por ello que CARSUCRE en conjunto con la Universidad de Sucre están suscitando el

desarrollo de estudios importantes para la conservación del recurso hídrico del acuífero de morroa.

CARSUCRE ha expedido resoluciones referentes al acuífero de morroa, cuyo objetivo es el de brindar una protección legal a su recurso hídrico. Una de ellas es la resolución 0279 DE 2001, por medio de la cuál se fijan los parámetros para la legalización de los aprovechamientos de las aguas subterráneas, y de esta manera evitar lo máximo posible la explotación desmedida del acuífero.

A nivel municipal existen los planes de ordenamiento territorial POT. En el cual es importante destacar como se busca por medio de el, la preservación de la zona de recarga del acuífero de la sobreexplotación y del mal manejo de los residuos domésticos, en los diferentes entes territoriales.

5. METODOLOGÍA

5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA GENERAL

La presente investigación se realizó en las instalaciones de los campos de pozos profundos del acuífero de Morroa, en operación para la extracción de agua subterránea, que se encuentran ubicados en la zona de recarga comprendida en los municipios de Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sincelejo y Sampués.

La investigación se realizó mediante una debida revisión bibliográfica y documental, primeramente una recolección de la información existente necesaria para la investigación, los cuales están contenidos en estudios realizados en años anteriores por INSFOPAL, INGEOMINAS, CARSUCRE, FINAGUAS; y otras investigaciones y trabajos hechos sobre el acuífero de Morroa por medio de proyectos de grado por medio de estudiantes de Ingeniería agrícola e Ingeniería Civil de la Universidad de Sucre.

5.2 INVENTARIO Y CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN POR AGUAS NEGRAS PARA EL ACUÍFERO DE MORROA.

Se estableció mediante información suministrada por tesis referentes y por CARSUCRE las fuentes que son potencialmente contaminantes para el

acuífero Morroa, haciendo énfasis en aquellas que se refieren al transporte de *aguas residuales domesticas* (ARD), conocidas mas específicamente como arroyos de aguas negras, los cuales serán en esta investigación puntos de gran importancia debido a que son los encargados de conducir las aguas residuales domesticas a puntos finales de vertimiento, y durante este proceso se produce infiltración de las mismas en los estratos acuiferos. Por ello se hace determinante conocer las zonas que son altamente vulnerables a dicha contaminación, porque esto representaría un riesgo muy grande para la vida del acuífero.

El inventario de arroyos que se encuentran en la zona de estudio es el siguiente:.

REGIÓN	ARROYO
Sampués	Masinga
	Pachamui
	Payorró
	La Maria
	El buho
Sincelejo	Chochó
	Loarazo
	El Hato
	La Ceja
	Caimán
	Grande
	Santa Rosa
	El Peñón
	Las Tinas
Corozal	Grande
Morroa	Morroa
Los Palmitos	Caracolí
	El Reparó
	El Pulpito
	Cambinda
Ovejas	El Hatillo
	El Piñal
	La Falsa

	La Europa
	Vilú
	El Floral
	El Membrillo

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO.

La aplicación de este método a una obra lineal se realizó de la siguiente manera:

- Representación detallada de la obra a la escala apropiada, en este caso 1: 200000.
- Análisis de la información disponible para caracterizar hidrogeológicamente el medio por el que discurre el trazado y establecer tramos.
- Valoración de los parámetros, utilizando información existente, geológica e hidrogeológica, bases de datos, puntos acuíferos.
- Reconocimiento de campo (inventario de puntos de agua, observaciones litológicas).
- Cálculo del índice de vulnerabilidad aplicando los índices de ponderación.

5.4 ERIGIR LOS MAPAS DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN Y LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Luego de haber localizado y caracterizado cartográficamente todos los parámetros como son:

D: [Depth]. Profundidad del nivel freático

R: [(Net) Recharge]. Recarga neta que sufre el acuífero por infiltración.

A: [Aquifer Media]. Litología y estructura media del acuífero.

S: [Soil Media]. Tipo de suelo presente en el acuífero.

T: [Topography]. Se refiere principalmente a la pendiente del terreno.

I: [Impact]. Naturaleza de la zona vadosa.

C: [Conductivity]. Es la conductividad hidráulica del acuífero.

Se superponen todos los mapas, para que así queden establecidos todas las características o valores de cada mapa en uno solo, y quede en conclusión el mapa de vulnerabilidad.

A este mapa es necesario superponerle el mapa de las fuentes contaminantes para así establecer con exactitud, cual es el riesgo y donde se tiene, para con esto establecer medidas de mitigación que vayan dirigidas a la preservación y protección del acuífero, siempre y cuando sean necesarias.

6. RESULTADOS

La evaluación de la vulnerabilidad realizada en esta investigación se hizo por medio del método Drastic, el cual maneja siete parámetros y su respectiva valoración. El resultado final se logro superponiendo cada uno de los mapas de

los parámetros, luego se sumaron los valores representados en cada mapa y al final se obtuvo el mapa de la vulnerabilidad del acuífero

FACTOR D

A partir de la información suministrada por CARSUCRE, se digitalizó el mapa de curvas de nivel freático, luego se realizó una interpolación que permitiera conocer la profundidad aproximada del nivel estático en cada punto. Posteriormente se asignó a distintas zonas el puntaje correspondiente a cada rango de DRASTIC (Tabla N°), donde, a menor profundidad, mayor es el peligro de contaminación que existe.

Tabla N° : Puntajes utilizados para la Profundidad

RANGO DE PROFUNDIDADES (m)	PUNTAJE
10 – 20	5
20 – 30	2
>30	1

FACTOR R

Considerando las mediciones realizadas por el INGEOMINAS en 1992, se obtuvo el mapa temático correspondiente a la recarga hidráulica en su forma final para toda el área de estudio. La Tabla N° muestra los puntajes DRASTIC de la variable.

Tabla N° : Puntajes utilizados para la recarga neta.

REGIÓN	RECARGA NETA (mm)	PUNTAJE
Corozal- Los Palmitos- El Bongo	115.2	6
Ovejas	179	6
Chinú- Sampués- Sincelejo	92.9	3
Chochó- Morroa- Corozal	59.3	3

FACTOR A

De acuerdo a los estudios geológicos realizados por el INGEOMINAS. El acuífero morroa está constituido por la Formación Sincelejo y Formación Morroa, este es un sistema complejo, continuo, y de extensión regional, constituido en su mayor parte por Arenisca masiva, por lo tanto se le adjudico un puntaje de 6. así como se muestra en la Tabla N°

Tabla N° : Puntajes utilizados para los materiales componentes del acuífero

ACUÍFERO	TIPO	PUNTAJE
Morroa	Arenisca Masiva	6

FACTOR S

A partir de la carta de suelos suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 1998). Dentro de la zona de estudio se encuentran 5 tipos de suelo, los cuales se clasifican a continuación con su respectiva valoración.

Tabla N° : Puntajes utilizados para los tipos de suelo

REGIÓN	TIPO DE SUELO	PUNTAJE
Ovejas-Los Palmitos-Corozal- Sincelejo-	Arcilla no contraída	1

Sampués		
Ovejas- Los Palmitos -Corozal- Morroa- Sincelejo	Marga Arcillosa	3
Ovejas- Morroa- Sincelejo	Marga Arenosa	6
Ovejas- Los Palmitos -Corozal- Morroa- Sincelejo- Sampués	Arena	9
Morroa	Grava	10

FACTOR T

A partir de la información suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 1998), se pudo establecer por medio de un plano las pendientes existentes en la zona de estudio. las cuales se muestran en la Tabla N° con sus respectivos valores establecidos por DRASTIC.

Tabla N° : Rangos y puntajes para la topografía

PENDIENTES (%)	PUNTAJE
0 – 3	10
3 – 7	9
7 – 12	5
12 – 25	3
25 – 50	1
50 – 75	1

FACTOR I

De acuerdo a los estudios geológicos realizados por el INGEOMINAS y por recomendaciones hechas por CARSUCRE, Para este acuífero el material constituyente de la zona vadosa o no saturada está compuesto por el mismo material de la zona acuífera, es decir, que esta zona esta constituida en su mayoría por Arenisca masiva y por lo tanto se le adjudico un puntaje de 6. así como se muestra en la Tabla N°

Tabla N° : Puntajes utilizados para el impacto de la zona vadosa

ZONA VADOSA	PUNTAJE
Arenisca Masiva	6

FACTOR C

A partir de la información suministrada por CARSUCRE, se digitalizo el mapa de curvas de Conductividad, luego se realizó una interpolación que permitiera conocer este parámetro en cada punto. Posteriormente se asignó a distintas zonas el puntaje correspondiente a cada rango de DRASTIC (Tabla N°), donde se muestra que la conductividad Hidráulica de esta capa acuífera es en general menor de 4m/día, partiendo de los registros realizados a los diferentes pozos que captan agua de este acuífero, por lo tanto el valor asignado es de 1 punto.

Tabla N° : Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m/día)	
RANGO	PUNTAJE
0 – 4	1

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la conjunción de los mapas correspondientes a cada propiedad se obtuvo el Índice General de Vulnerabilidad para cada punto, Interpretando estos índices y en comparación con la tabla Grado de Vulnerabilidad (Tabla N°1), se tiene que:

Los Índices máximo y mínimo de Vulnerabilidad Intrínseca para el acuífero Morroa en el nivel A son 113 y 77, respectivamente. por lo tanto, se clasifica como un acuífero de vulnerabilidad insignificante a vulnerabilidad muy baja..

El área que abarca la zona de estudio es 1120 km², de los cuales 1064 km² corresponden a áreas de vulnerabilidad insignificante (95%), y 56 km² a áreas de muy baja vulnerabilidad (5%).

La mayor parte del área tiene valores insignificantes de índice de vulnerabilidad, destacándose índices mayores en las zonas del Norte y centro del acuífero, y menores en el Sur del mismo. Los sectores con muy baja vulnerabilidad aparecen dispersos, concentrándose en su mayor parte en el Sur, en cercanías a las zonas de discontinuidad del acuífero y en el Norte en la zona de mayor nivel topográfico. La Figura 8 muestra el resultado final del trabajo.

Estos resultados se obtuvieron por la valoración de varios factores dentro de los cuales es importante destacar la *Profundidad del nivel freático*, la cual es

muy determinante dentro de la metodología DRASTIC, ya que posee un valor de ponderación muy alto lo que hace que incida mucho en el resultado final.

Para el caso del acuífero Morroa, estos niveles han decrecido mucho en los últimos años debido a la intensa sobreexplotación que ha sufrido este sistema principalmente en el sector de Sincelejo, Corozal y Morroa. Según estudios hechos por CARSUCRE en el año 2000 y tesis de grados realizadas por estudiantes de la Universidad de sucre, el descenso promedio de los niveles estáticos medidos dentro de los pozos esta entre 4 m/año y 15 m/año. Lo que conlleva a encontrar actualmente niveles superiores a cuarenta metros (40 m), los cuales DRASTIC les da una valoración mínima, uno (1), lo que representa un peligro de contaminación muy bajo.

Sin embargo, se puede decir que si este estudio se hubiera realizado algunos años atrás, cuando los niveles eran menores los resultados hubieran sido muy diferentes, ya que la disminución de los NE ha conllevado a que se cree más protección para el sistema acuífero, debido a que existe mas dificultad para que los contaminantes lleguen a la zona saturada.

Es trascendental poder hacer la aclaración, de que estos resultados no son de carácter absoluto, según estudios realizados por CARSUCRE, similares a estos pero utilizando la metodología GOD`S, se encontró que el acuífero de Morroa presenta una vulnerabilidad de moderada a alta, considerando critica la zona de Corozal y Morroa, producto del vertimiento de aguas residuales domesticas en los arroyos que atraviesa la zona de recarga del acuífero (arroyo grande de corozal y arroyo morroa).

Por otro lado, es muy probable que en un futuro, por dar cumplimiento al Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas – PPIAS – en lo concerniente a contrarrestar la degradación del recurso por sobreexplotación, mediante el plan de manejo controlado, disminuyendo el período de bombeo de los pozos con el fin de garantizar la sostenibilidad de la oferta de agua en cantidad, se puede afectar dicha sostenibilidad en lo que se refiere a calidad, ya que el nivel freático del sistema acuífero ascendería hasta tal punto que incrementarían los rangos de vulnerabilidad a la contaminación y pondría en riesgo la optimización del recurso.

8. CONCLUSIONES

Como conclusiones de carácter general se plantean las siguientes:

De la metodología utilizada para la determinación de la vulnerabilidad

- La metodología DRASTIC maneja siete parámetros a los cuales les suministra valores dependiendo de las características presentes en la zona de estudio para así obtener un valor final que posteriormente clasifica la vulnerabilidad, pero dicha metodología solo puede dar un valor de acuerdo a las condiciones presentes en la actualidad, las cuales pueden ser cambiantes, por lo que se pueden generar modificaciones en el valor global del grado de vulnerabilidad, lo que conlleva a generar errores de interpretación, ya que estos no son absolutos.
- La aplicación de la metodología DRASTIC para la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero no debe tomarse como única y suficiente, a pesar de que ésta es quien considera más factores físicos y variables características de los medios subterráneos y permite una cuantificación consistente. Para poder tomar una conclusión final, se deben recurrir a otros métodos para conocer también los resultados que se pueden llegar a obtener y de allí poder extraer un resultado más confiable. Al incluir el uso de otros métodos estamos incluyendo el uso de otras variables que el DRASTIC no tiene en cuenta y que si pueden influir decisivamente en la vulnerabilidad. Para el acuífero Morroa también existe un estudio hecho por CARSUCRE siguiendo la metodología GOD'S, el cual da resultados algo diferentes a los obtenidos por DRASTIC y que tienen alguna concordancia con lo encontrado en el campo.

De los resultados de vulnerabilidad en el área de estudio.

- Según los resultados obtenidos por la metodología el 95% de acuífero esta comprendido dentro de la clasificación de vulnerabilidad insignificante y tan solo el 5% esta en la categoría de vulnerabilidad muy baja, esto se debe en gran parte al factor que hace referencia al nivel freático, el cual en los últimos años ha descendido, y en su mayoría superan los 30 m quienes para la clasificación de DRASTIC tiene un valor de 1. La disminución del nivel freático ha contribuido a que se cree mas protección sobre el acuífero, creando una mayor dificultad para que lleguen hasta la zona saturada agentes contaminantes.
- El conocimiento del sistema acuífero, aun hoy, está en una etapa media, y los modelos numéricos deben someterse a correcciones parciales en geometría. Parte del área involucrada carece de datos geométricos e hidráulicos rigurosamente confiables. Sin embargo, con los datos existentes analizados y depurados, la metodología aquí expuesta y la información obtenida y procesada de cada variable en juego, la Corporación Autónoma Regional de Sucre – CARSUCRE – y las jurisdicciones gubernamentales comprendidas en la zona de estudio, disponen a través de este estudio de Vulnerabilidad del Acuífero Morroa de una valiosa herramienta de planificación básica, con la que se podrá seguir la evolución del sistema a través de los años, y permitirá acceder a evaluaciones de riesgo a la acción de contaminantes definidos.

9. RECOMENDACIONES

A las Alcaldías de Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Corozal, Sincelejo y Sampués se les recomienda:

- Como entes ordenadores del uso de los suelos del área urbana, a través de las Secretarías de Planeación, la utilización del Mapa de Vulnerabilidad del Acuífero de Morroa en la zona urbana, como

herramienta de apoyo en la formulación y desarrollo de planes urbanísticos que contribuyan al manejo sostenible del recurso hídrico subterráneo.

- Elaborar planes de ampliación de cobertura del servicio de alcantarillado direccionados prioritariamente hacia la disminución de los arroyos de aguas residuales domésticas en los cascos urbanos, con el fin de disminuir agentes potenciales de contaminación para el acuífero en un futuro.

Conjuntamente con la Corporación Autónoma Regional de Sucre

– CARSUCRE --:

- Seleccionar puntos para la instalación de piezómetros con el fin de evaluar periódicamente la calidad físico-química y microbiológica del agua para detectar posibles contaminantes y tomar las respectivas medidas del caso.
- Ejecutar campañas de concientización y adiestramiento sobre el manejo sanitario y ambiental de las aguas residuales domésticas urbanas y demás fuentes de contaminación de las aguas del acuífero de morroa.
- Realizar planes de monitoreo y seguimiento de las actividades implantadas en el Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas – PPIAS--, con el fin de garantizar la sostenibilidad de la oferta de agua tanto en cantidad como en calidad.
- La dinámica de los sistemas acuíferos hace que los Mapas de Vulnerabilidad no sean información estática. Variaciones en las condiciones de acceso, presencia y movimiento del agua, originan cambios en las variables de estado de los sistemas. El seguimiento de estos cambios y la importancia de los mismos pueden conducir a la

revisión de tales mapas, y a su modificación y corrección temporal. por lo que se recomienda periódicamente realizar este estudio.

- Realizar el estudio de la carga contaminante en la zona de recarga del acuífero de Morroa.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anexos