

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR INTRUSIÓN MARINA
MEDIANTE EL MÉTODO GALDIT EN EL ACUÍFERO MORROSQUILLO, ZONA
LITORAL DE SANTIAGO DE TOLÚ, SUCRE – COLOMBIA**

**OSCAR DAVID MADERA OZUNA
MARÍA PAULA VALDERRAMA DE LEÓN**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SINCELEJO, SUCRE
2014**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR INTRUSIÓN MARINA
MEDIANTE EL MÉTODO GALDIT EN EL ACUÍFERO MORROSQUILLO, ZONA
LITORAL DE SANTIAGO DE TOLÚ, SUCRE – COLOMBIA**

**OSCAR DAVID MADERA OZUNA
MARÍA PAULA VALDERRAMA DE LEÓN**

**Trabajo de grado modalidad trabajo investigativo como requisito parcial para
optar por el título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR
ING. GUILLERMO ENRIQUE GUTIÉRREZ RIBÓN**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
SINCELEJO, SUCRE
2014**

Nota de aceptación:

Primer Jurado

Segundo Jurado

Tercer Jurado

Sincelejo, 1 de diciembre de 2014

“Cada partícula de esta tierra es sagrada para mi pueblo. Cada brillante aguja de pino, cada grano de arena de las playas, cada gota de rocío de los sombríos bosques, cada calvero, el zumbido de cada insecto, son sagrados en memoria y experiencia de mi pueblo. La savia que asciende por los árboles lleva consigo el recuerdo de los pieles rojas.

“Pues aunque somos salvajes sabemos una cosa: nuestro Dios es vuestro Dios. Esta tierra es sagrada. Incluso el hombre blanco no puede eludir el destino común. Quizás incluso seamos hermanos. ¡Quién sabe!”

Jefe Seattle

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y fuerza para salir adelante, darme lo necesario para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, Dilsa María Ozuna Vásquez y Hugo Nicolás Madera Montes por ser mis ejemplos de vida, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor y esfuerzo por darme la oportunidad de tener una educación. A mi hermano Mario Fernando Madera Ozuna por ser el ejemplo de un hermano mayor y del cual he aprendido mucho, tanto en lo personal como en lo profesional. A mi hermana Lina María Madera Ozuna por ser una hermana menor que me ha enseñado que las pequeñas cosas pueden hacer grandes cambios y a todos aquellos que ayudaron directa o indirectamente a la culminación de este documento.

A mis profesores, por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios, por haberme transmitido sus conocimientos y haberme llevado paso a paso en el aprendizaje.

Oscar David Madera Ozuna

DEDICATORIA

A Dios mi Padre Celestial, Rey soberano de todo lo creado, por darme la oportunidad de adquirir conocimientos, iluminándome con el preciado don de la sabiduría en cada aspecto de mi vida.

A mi Madre Santísima Virgen María, quien ha intercedido por mí en todo momento, llevando mis peticiones ante su Hijo JESÚS.

A mi madre Luisa Esther De León Rodríguez, mi ejemplo a seguir, mujer luchadora, guerrera, trabajadora, mi bendición. Este trabajo es para ti madre querida con mucho amor como recompensa por tantos esfuerzos que has hecho por mí. Te amo madre.

A mis abuelos, Lucho y Mayo, a mis tíos, primos y padrinos, por su constante apoyo y por darme ánimo en cada etapa de la preparación del presente trabajo.

Al doctor José Luis González Mendoza y doña Rebe, su esposa, de quienes he recibido todo el amor, el respaldo y afecto.

Al Ing. Octavio Víctor Otero Ramos, de quien he recibido el amor de padre, consejos, afecto y mucho apoyo.

A mis amigos y compañeros de estudio, quienes me apoyaron y motivaron a cada momento.

A mis mascotas Blaky y Ángel, por su compañía en todo momento.

A mis Profesores de Preescolar, Primaria, Secundaria y Universidad, por sus valiosos aportes en mi formación académica y personal.

María Paula Valderrama De León

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Dios, Rey Altísimo, por permitirnos realizar este Trabajo de Investigación, con entusiasmo, responsabilidad y entrega, llenándonos de muchas satisfacciones profesionales y personales.

Sólo en ti Señor, hemos hallado completa paz; gracias Padre por ser la fuente de nuestra inspiración. A ti Dios, la gloria, la honra y el poder.

La Universidad de Sucre, por ser nuestra Alma Máter que nos vio nacer como Ingenieros Civiles.

Guillermo Gutiérrez Ribón, Ingeniero Civil, Magíster Ambiental con énfasis en Sanitaria. Docente de la Universidad de Sucre. Director de este Proyecto, por ser ese ángel que Dios puso en nuestro camino, para guiarnos con sus sabios conocimientos y consejos como un padre. Gracias ingeniero, por compartirnos sus experiencias en el tema, por haber depositado su confianza en nosotros y por haber dado lo mejor en la realización de éste trabajo. Dios lo bendiga siempre.

Gastón Ballut Dajud, Jaime Gómez Muleth y demás profesores del Programa de Ingeniería Civil, que nos brindaron con mucho amor y dedicación su apoyo en la realización de éste Trabajo.

Empresa de Acueducto Aguas del Morrosquillo E.S E.S.P, por suministrar información valiosa para el desarrollo del proyecto.

Corporación Autónoma Regional de Sucre CARSUCRE, por haber facilitado el recurso humano y material para hacer posible esta investigación.

Héctor Mario Herrera Parra, Ingeniero Geólogo, Profesional Especializado S.G.A. Oficina de Aguas de CARSUCRE, por su apoyo en el préstamo de equipos para la realización de ensayos y suministro de información valiosa para el Proyecto.

Jorge Martínez Sierra, Ingeniero Agrícola, Profesional Especializado S.G.A Oficina de Aguas de CARSUCRE, por su apoyo y suministro de valiosa información para el desarrollo de la investigación.

Omar Pérez, Técnico de la Oficina de Aguas de CARSUCRE, por los conocimientos impartidos en campo y por sus servicios prestados con mucho cariño y entrega en el desarrollo del proyecto.

César Salcedo Monterrosa, Ingeniero Civil. Por darnos su apoyo incondicional, cariño y ánimo en cada etapa de éste proyecto.

Todo el personal de Biblioteca, de la Universidad de Sucre, por la constante motivación y apoyo que nos brindaron en el desarrollo de este proyecto.

Oswaldo Suárez, Jefe de la División de Biblioteca, por su apoyo y conocimientos impartidos para la organización del documento escrito.

Distinguidos Ingenieros y profesores, jurados evaluadores: Pablo Caro, Marco de León y Luis Serpa, por sus recomendaciones y enseñanzas impartidas en el desarrollo del presente trabajo.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT	15
GLOSARIO	17
INTRODUCCIÓN	23
1. OBJETIVOS	26
1.1. OBJETIVO GENERAL	26
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	26
2. ESCENARIO DE REFERENCIA	27
2.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	27
2.1.1. Ubicación geográfica.....	27
2.1.2. Demografía	30
2.1.3. Actividades Antrópicas.....	32
2.1.4. Clima.....	33
2.1.5. Geología	34
2.2. GOLFO DE MORROSQUILLO	43
2.2.1. Geomorfología	43
2.2.2. Fisiografía	46
2.2.3. Hidrografía	48
2.2.4. Mar Caribe	49
2.2.5. Flora y Fauna.....	51
2.3. ACUÍFERO COSTERO MORROSQUILLO	53
3. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	58
4. MARCO JURÍDICO	60
5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	62
6. MARCO METODOLÓGICO	73
6.1. ACTIVIDADES DE OFICINA – CONSULTORÍA INVESTIGATIVA.....	74
7. RESULTADOS	75

7.1. DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA DEL ACUÍFERO, EN RELACIÓN A LA INTRUSIÓN MARINA, EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	75
7.2. DE LA VULNERABILIDAD DETERMINADA DEL ACUÍFERO MORROQUILLO, DEBIDO A LAS ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN Y POR EL IMPACTO DE LA INTRUSIÓN MARINA, A TRAVÉS DEL MÉTODO GALDIT.....	79
7.3. RESULTADOS DE VULNERABILIDAD EMPLEANDO EL MÉTODO GALDIT.....	84
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	88
8.1. HIDROGEOQUÍMICA.....	88
8.2. VULNERABILIDAD.....	89
9. RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	95

TABLAS

pág.

Tabla 1.	Variables de evaluación del Método GALDIT	71
Tabla 2.	Clasificación de la Vulnerabilidad – Método GALDIT	72
Tabla 3.	Clasificación química de las muestras de aguas subterráneas del acuífero Morrosquillo	76
Tabla 4.	Datos de campo del ensayo de Slug 44-I-D-PZ-02	79
Tabla 5.	Datos de campo del ensayo de Slug 44-I-D-PZ-03	81
Tabla 6.	Valores y características de los pozos muestreados para el cálculo de cada variable de GALDIT	84
Tabla 7.	Puntuación de cada parámetro de GALDIT y Nivel de Vulnerabilidad	85
Tabla 8.	Variación de los niveles estáticos y la Conductividad Hidráulica en diferentes períodos de tiempo	90

FIGURAS

pág.

Figura 1.	Localización de la zona de estudio	28
Figura 2.	Subregiones del Golfo de Morrosquillo	29
Figura 3.	Área urbana del Municipio de Santiago de Tolú	31
Figura 4.	Turismo y Pesca en el Municipio de Santiago de Tolú	32
Figura 5.	Épocas climáticas	33
Figura 6.	Mapa Geológico de la zona del Morrosquillo, Sucre - Colombia	36
Figura 7.	Mapa Geológico detallado del Golfo de Morrosquillo	37
Figura 8.	Localización de las rocas sedimentarias en Colombia	38
Figura 9.	Techo y base de los depósitos cuaternarios del área de estudio	39
Figura 10.	Columna Estratigráfica General de las Cuencas de Sinú (NW) y San Jacinto (NE) modificada de Barreto et. al	40
Figura 11.	Cortes Geológicos Geofísicos 11, 17 y 22 en el Golfo de Morrosquillo	41
Figura 12.	Corte Geoeléctrico Vertical 13 y 14 en el Golfo de Morrosquillo	41
Figura 13.	Corte Geoeléctrico Vertical 15 en el Golfo de Morrosquillo	42
Figura 14.	Corte Geoeléctrico Vertical 16 en el Golfo de Morrosquillo	42
Figura 15.	Geomorfología de la zona del Golfo de Morrosquillo	44
Figura 16.	Unidades Geomorfológicas de la Línea de Costa del Golfo de Morrosquillo	45
Figura 17.	Hidrografía del Golfo de Morrosquillo	50
Figura 18.	Mar Caribe	51
Figura 19.	Mapa Hidrogeológico de Sucre con delimitación del acuífero de Morrosquillo	53
Figura 20.	Mapa de localización de Pozos	57
Figura 21.	Representación de un Up – Coning	63
Figura 22.	Ensayo Slug	70
Figura 23.	Diagrama de Piper correspondiente a aguas subterráneas del acuífero Morrosquillo	75
Figura 24.	Porcentajes de acopio de los tipos de agua	77
Figura 25.	Mapa de clasificación de agua, según Diagrama de Piper	78
Figura 26.	Gráfica de ensayo Slug para el pozo 44-I-D-PZ-02	82
Figura 27.	Gráfica de ensayo Slug para el pozo 44-I-D-PZ-03	82
Figura 28.	Mapa de Isocloruros	86
Figura 29.	Mapa de Vulnerabilidad del acuífero costero Morrosquillo. Zona Litoral de Santiago de Tolú	87

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación realizado en el Municipio de Santiago de Tolú, se escogió como objeto de estudio el acuífero Morrosquillo, del cual se abastecen los Municipios de: Santiago de Tolú, San Onofre, Coveñas y San Antonio de Palmito, con el fin de evaluar su Vulnerabilidad al fenómeno de Intrusión Marina, a través del método GALDIT¹.

Para hacer efectivo éste método, se escogió como zona de investigación el área del campo de pozos del Acueducto de Santiago de Tolú y se partió de información importante suministrada por CARSUCRE y la Universidad de Sucre, acerca del campo de pozos en cuestión, destacando la Litología, Hidroquímica e Hidrogeología.

De igual modo, se realizaron ensayos de campo, aplicando el procedimiento de Slug para determinar propiedades hidráulicas de los pozos piezométricos 44-I-D-PZ-02 y 44-I-D-PZ-03, con lo cual se pudo establecer su Nivel Estático y la Conductividad Hidráulica correspondiente, pudiendo de esta manera, hacer un contraste con los resultados obtenidos en ensayos de Slug efectuados en el año 2009 con la supervisión de CARSUCRE.

Posteriormente, se realizó un arduo trabajo de oficina, en el que se analizó toda la información recopilada y los datos registrados en campo, identificando un total de 13 Pozos con caracterización completa, con lo cual se pudo calcular cada uno de los parámetros que demanda el método GALDIT, es así como se determinaron: G, con el dato del tipo de acuífero del cual capta cada pozo; A, con el valor de la Conductividad Hidráulica (m/día) arrojada por ensayos en cada pozo; L, con el valor de la diferencia entre el Nivel Estático y el Nivel del Mar, considerando a éste

¹ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Grupo de Recurso Hídrico. Bogotá D.C. 2010. p.28.

último como 0 msnm; D, con el valor de la distancia perpendicular de cada pozo a la línea de Costa; I, con el valor de la relación de Cloruros - Bicarbonatos, muy importante para determinar Intrusión Marina y T, con el valor del espesor de acuífero del cual capta cada pozo.

Se aplicaron las ecuaciones que expone el Método con cada uno de los parámetros calculados, pudiendo determinar un valor de GALDIT para cada pozo, los cuales posteriormente, se ubicaron en unos rangos ya establecidos, discriminando el grado de Vulnerabilidad en: Muy Bajo, Moderado o Alto.

Con el presente proyecto, se pudo determinar que en los pozos ubicados al Norte del Municipio, la Vulnerabilidad del acuífero a Intrusión Marina generalmente, es Muy Baja y en los pozos ubicados al Sur del Municipio de Santiago de Tolú, la Vulnerabilidad del acuífero a Intrusión Marina es Moderada, además que se observan valores de Cloruros y Bicarbonatos considerables, con lo cual se puede afirmar la existencia de Intrusión Marina al acuífero Morrosquillo en zonas específicas.

Además, se realizó la caracterización Hidroquímica a través del Diagrama de Piper para cada pozo, determinando así los tipos de aguas presentes y su porcentaje de distribución.

Por lo tanto, sí es posible evaluar la Vulnerabilidad del acuífero costero Morrosquillo a Intrusión Marina por el Método GALDIT, determinando zonas bien localizadas que se pueden representar en mapas para mayor comprensión.

ABSTRACT

In the present research work in the Municipality of Santiago de Tolú, was chosen the Morrosquillo aquifer as an object of study, which supplies to the towns: Santiago de Tolú, San Onofre, Coveñas and San Antonio de Palmito, to assess their vulnerability to intrusion Marina phenomenon, through GALDIT method.

To implement this method, was chosen as research area wellfield Aqueduct Santiago de Tolú and broke important information provided by CARSUCRE and the University of Sucre, about wellfield in question, highlighting the Lithology, Hydrochemistry and Hydrogeology.

Similarly, field trials were conducted by applying the method for determining Slug hydraulic properties of piezometric wells 44-I-D-PZ-02 and 44-I-D-PZ-03, which could establish their Static Level, and corresponding Hydraulic Conductivity and could make a contrast with the results of Slug tests carried out in 2009 under the supervision of CARSUCRE.

Subsequently, an arduous office work was performed, in which all information gathered and recorded data field are analyzed, identifying a total of 13 Wells with complete characterization, which could be calculated each parameters required by the GALDIT method, and determined: G, with the data type of aquifer which captures each well; A, with the value of the hydraulic conductivity (m / day) dropped by trials in each well; L, with the value of the difference between the Static Level and Sea Level, considering the latter as 0 msnm; D, with the value of the perpendicular distance from each well to the shore line; I, with the value of the relation of chlorides - Bicarbonates very important to determine Intrusion Marina and T, with the value of the thickness of the aquifer which captures each well.

Were applied the equations that exposes the method with each of the calculated parameters, can determine a value of GALDIT for each well, which then stood at some ranges established by discriminating the degree of vulnerability in: Very Low, Moderate or High.

With this project, it was determined that wells located north of the municipality, the vulnerability of the aquifer to Intrusion Marina is generally Very Low and wells located south of the Municipality of Santiago de Tolú, the vulnerability of the aquifer to Intrusion Marina is Moderate, also values chlorides and bicarbonates are observed considerable, which can assert the existence of intrusion Marina into the aquifer Morrosquillo in specific areas.

Further to this, we realized a Hydrochemistry characterization was performed through the Piper diagram for each well, determining the types of water present and their percentage distribution.

In this way, it is possible to assess the vulnerability of coastal aquifer Morrosquillo to Intrusion Marina by GALDIT method, determining well localized areas that can be represented in maps for greater understanding.

GLOSARIO

ABATIMIENTO: diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico o de bombeo en el pozo de explotación de un acuífero.

ACUIFERO: formación geológica o grupo de formaciones que contienen agua y que permiten su movimiento a través de sus poros bajo la acción de la aceleración de la gravedad o de diferencias de presión.

ACUÍFERO COSTERO: puede ser libre, confinado o semiconfinado. Se caracteriza por la presencia de fluidos con dos densidades diferentes: agua dulce, con una densidad menor, con relación al agua salada del mar o del océano. Esta diferencia de densidad hace que en la zona de la costa, el agua dulce se encuentre sobrepuesta al agua salada.

ACUICIERRE – ACUICLUDO: (del latín *Claudere*=cerrar), es una formación geológica impermeable que contiene agua, pero no la transmite, haciendo de este modo imposible su explotación. En este caso están las arcillas, que a pesar de contener enormes cantidades de agua (en muchos casos, más de 50% de su volumen), no la drenan por gravedad ni la dejan pasar; por consiguiente, no son aptas para la construcción en ellas de captaciones de agua subterránea.

ACUIFUGO: (del latín *fugere*=huir), es aquella formación geológica impermeable que no contiene agua ni la puede transmitir, por ejemplo, los macizos rocosos no alterados.

ACUITARDO: (del latín *tardare*=retardar), es una formación geológica semipermeable que, conteniendo agua en gran cantidad, la transmite muy lentamente, por lo que en esta formación tampoco resulta adecuado emplazar captaciones. Las arcillas limosas y arenosas, son formaciones que pueden comportarse como Acuitardos.

AGUA CAPILAR: fracción de agua que ocupa los microporos y se mantiene en el suelo gracias a las fuerzas derivadas de la Tensión Superficial.

AGUA DULCE: agua que se encuentra naturalmente en la superficie de la tierra, en capas de hielo, glaciares, icebergs, pantanos, lagunas, lagos, ríos y arroyos y bajo la superficie, como agua subterránea en acuíferos y corrientes de agua subterránea.

AGUA SALADA: es una solución hecha o basada en agua que compone los océanos y mares de la tierra, caracterizada por la alta concentración de sales minerales disueltas, las cuales le confieren valores de Conductividad Eléctrica mayores a 3000 uS/cm. Su densidad es mayor que la del agua dulce.

AGUA SALOBRE: es aquella que tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar, por lo tanto, no es apta para consumo humano. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro, expresados más frecuentemente como de 0,5 a 30 partes por mil. El valor de la Conductividad Eléctrica oscila entre 1000 uS/cm y 3000 uS/cm.

AGUA POTABLE: agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos es apta y aceptable para el consumo humano y cumple con las normas de calidad de agua.

AGUA SUBTERRÁNEA: es agua que se filtra a través de grietas y poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo, las cuales se saturan como una esponja.

ALCALINIDAD: capacidad del agua para neutralizar ácidos. En las aguas naturales, ésta propiedad se debe principalmente a la presencia de ciertas sales de ácidos débiles, aunque también puede contribuir la presencia de bases débiles y fuertes.

ANIÓN: ión con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado electrones.

ANTROPOGÉNICO: se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas, a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana. Normalmente, se usa para describir contaminaciones ambientales en forma de desechos químicos o biológicos.

APROVECHAMIENTO RACIONAL: utilización de los recursos naturales mediante técnicas y prácticas que no superen la capacidad de autorregulación de un ecosistema.

CALIDAD DEL AGUA: se refiere a la concentración de determinados parámetros para un uso determinado y de acuerdo a una norma; en Colombia, el Decreto 1594 de 1984, el Decreto 475 de 1988 y la Resolución 2115 de 2007, reglamentan la calidad y el uso del agua.

CAPA FREÁTICA: agua bajo una presión mayor que la presión atmosférica que está presente en la zona saturada del suelo.

CAPACIDAD DE ACUÍFERO: volumen de agua que puede producir un acuífero.

CATIÓN: ión con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.

CICLO HIDROLÓGICO: proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera, en el que intervienen una serie de reacciones químicas haciendo que el agua se traslade de unos lugares a otros o cambie de estado físico.

CONCIENCIA AMBIENTAL: convicción de una persona, organización, grupo o una sociedad entera, de que el Medio Ambiente debe protegerse y usarse racionalmente en beneficio del presente y el futuro de la humanidad.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: caudal que pasa por un área unitaria bajo un gradiente unitario y que mide la capacidad de un acuífero para transportar agua. Tiene dimensiones de velocidad (LT^{-1}). Por otro lado, representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él, por unidad de área.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA: medida de la capacidad de una disolución para dejar pasar libremente la corriente eléctrica. Esta conductividad es proporcional a la concentración de iones en la disolución.

CONTAMINACIÓN: introducción de sustancias en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso. En otros términos, es la alteración hecha por el hombre o inducida por el hombre a la integridad física, biológica y radiológica del Medio Ambiente.

DESARROLLO SOSTENIBLE: desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones.

DUREZA DEL AGUA: cantidad de sales de elementos alcalino-térreos (berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario y radio) presentes en el agua y que normalmente se asocia a la formación de incrustaciones calcáreas. En la práctica, la dureza de un agua se corresponde únicamente con la cantidad de calcio y magnesio existentes.

ELECTRÓN: es una partícula elemental estable cargada negativamente que constituye uno de los componentes fundamentales del átomo. Forma parte del grupo de los leptones. Comúnmente se representa por el símbolo e^- .

FACIES: en Hidroquímica, éste concepto se aplica para distinguir tipos de agua entre sí en una misma región o acuífero, con base en los valores de parámetros y variables físico-químicas específicas y sus relaciones, según el método de clasificación.

FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA: depósito o curso de agua superficial o subterráneo, natural o artificial, utilizado en un sistema de suministro de agua.

INTERCAMBIO IÓNICO: intercambio de iones entre dos electrolitos o entre una disolución de electrolitos y un complejo.

LINEA DE INTERFASE: superficie de separación con un espesor determinado entre el agua dulce y el agua salada en acuíferos costeros.

INTRUSIÓN MARINA: intensificación del flujo de agua salada hacia el interior de un acuífero, lo cual se produce como consecuencia del aumento de la explotación

del acuífero y/o por disminución de su recarga natural. Se delata por la rápida elevación de la concentración del ión cloruro y/o de la Conductividad Eléctrica, generando alteraciones en la composición del agua dulce natural con aumento del contenido de sales.

IÓN: partícula cargada eléctricamente, constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro.

IÓN CLORURO: es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual, caracterizado por ser un soluto no reactivo. Se emplea como un trazador o parámetro de la Intrusión Marina.

KARST: (nombre alemán de la región eslovena de Carso), forma de relieve originada por meteorización química de determinadas rocas, como la Caliza, Dolomía, Yeso, entre otras, compuestas por minerales solubles en agua.

LINEA DE ENERGÍA: línea o elevación obtenida como la suma de la cabeza de presión, la cabeza de velocidad y la diferencia de altura topográfica respecto a un datum o nivel de referencia.

LINEA PIEZOMÉTRICA: línea o elevación obtenida de la suma de la cabeza de presión y la diferencia de altura topográfica, respecto a un datum o nivel de referencia.

MEDIDAS DE MITIGACIÓN: acciones de reducción, atenuación y control de los impactos ambientales negativos que pudieran tener algunas intervenciones antrópicas.

MEDIO AMBIENTE: conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales, capaces de causar efectos directos o indirectos, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las actividades humanas. (Definición de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente en Estocolmo, 1972)

MUESTREO: toma de muestras de volumen predeterminado y con la técnica de preservación correspondiente para el parámetro que se va a analizar.

NIVEL DINÁMICO: nivel freático en el pozo de un acuífero, cuando a través de éste se extrae el agua. También es denominado "Nivel de Bombeo".

NIVEL FREÁTICO: nivel del agua subterránea en un acuífero.

NIVEL ESTÁTICO: nivel freático en un acuífero cuando no hay extracción de agua.

PERFIL DEL SUELO: consiste de una sucesión de estratos más o menos diferenciados. Estos estratos pueden deberse a la forma de deposición o sedimentación (suelos eólicos o aluviales, en agua) o a procesos internos (pedogénesis).

PERMEABILIDAD: velocidad a la que un fluido fluye a través de un medio poroso bajo la presión existente dentro del medio. Normalmente, cuanto mayor sea la porosidad, mayor es la permeabilidad.

PH: es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas disoluciones.

POBLACIÓN FLOTANTE: población de alguna localidad que no reside permanentemente en ella y que la habita por un espacio de tiempo corto por razones de trabajo, turismo o alguna otra actividad temporal.

POROSIDAD: relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de una muestra de suelo. La porosidad de los suelos finos, por ejemplo, arcilla, es baja, mientras que la de los suelos llenos de grava de superior tamaño es mayor.

POZO PIEZOMÉTRICO: pozo a través del cual es posible conocer el nivel freático en un acuífero.

PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN: uso de procesos, prácticas, materiales o productos que evitan, reducen o controlan la contaminación, los cuales pueden incluir labores de: reciclado, tratamientos, modificaciones en los procesos, mecanismos de control, uso eficiente de recursos y sustitución de materiales.

PRUEBA DE BOMBEO: ensayo que se realiza para evaluar un acuífero, estimulándolo por medio de bombeo, y observando su respuesta (descenso de nivel) en pozo(s) de observación. Una prueba de Bombeo es una herramienta común utilizada en Hidrogeología para caracterizar un sistema de acuíferos.

RENDIMIENTO DEL POZO: volumen de agua producido por el pozo en la unidad de tiempo. Se da en litros por segundos o metros cúbicos por segundos.

SUELO: es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella.

TIEMPO DE RECUPERACIÓN: tiempo que tarda un acuífero en volver a tener el nivel freático anterior a una extracción.

TRANSMISIVIDAD HIDRÁULICA: es el producto de la Conductividad Hidráulica por el espesor total de un acuífero. Representa el caudal que pasa a través de todo el espesor de un acuífero, en un ancho unitario, bajo un gradiente unitario.

U.S. EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY): Agencia del Gobierno Federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el Medio Ambiente: aire, agua y suelo.

VULNERABILIDAD: conjunto de características propias de un acuífero que determinan su sensibilidad a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o fenómenos naturales.

ZONA LITORAL: es el área de una costa que queda bajo el agua durante la marea alta y sobre el agua durante la marea baja o bajamar. Por otro lado, se define como la orilla de un lago que alcanza una profundidad de cerca de 10 metros.

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son renovables pero limitados y como el agua es un elemento fundamental para la vida del hombre y los animales, así como para el desarrollo de la Agricultura y la Industria, esa limitación se está haciendo sentir más intensamente cada día, aun en aquellos países que cuentan con abundancia de precipitaciones anuales que son la fuente cíclica de renovación de los mencionados recursos. Esta situación se debe, fundamentalmente, al crecimiento de la población y al desarrollo científico-técnico del mundo moderno y se agudiza más en las regiones áridas y en los países del mundo subdesarrollado, que todavía no han alcanzado su independencia política y económica².

Desde el pasado siglo XX hasta el presente siglo XXI, la problemática por la disponibilidad y calidad del preciado recurso hídrico ha alcanzado altos umbrales, lo cual se ha visto reflejado en la tendencia creciente del estudio del aprovechamiento de éste recurso, con énfasis en los problemas relativos al Agua Subterránea, enmarcados en la Hidrología Subterránea.

En los inicios, para dar respuesta a los interrogantes concernientes a la gestión del agua, se emplearían algunos métodos muy sencillos para dictaminar de manera muy aproximada y sin una base científica rigurosa, las posibles causas de las limitaciones existentes del recurso hídrico y resolver cuestiones de explotación de los acuíferos o depósitos de agua subterránea; pero cada vez, los problemas que giran en torno al mundo del agua son mayores y con ello, la preocupación, lo cual ha conllevado a generar nuevos métodos en sintonía con los avances de la Tecnología que sean demostrables y sobretodo, que tengan una validez. Esto, con el fin de llegar al fondo del escenario actual y eventualmente, presentar algunas

² PÉREZ FRANCO, Diosdado. La Explotación del Agua Subterránea. Un nuevo enfoque. La Habana, Cuba. 1995. Prólogo.

medidas de mitigación o prevención que atenúen la huella dejada por el hombre con su intervención.

De acuerdo al TCP (Tasa de Crecimiento de la Población) promulgado por el Banco Mundial, entre 1980 y 2000 la población mundial total creció de 4400 millones a 6000 millones y en el año 2015, se agregarán por lo menos otros 1000 millones de personas. En Colombia, de acuerdo con cifras arrojadas por el DANE, la población pasó de un total de 8'701.816 habitantes en 1938 a 30'062.200 en 1985; a partir de censos y proyecciones efectuadas y ajustadas, se permitió estimar la población total del país en 54'280.617 habitantes para el año 2025³. Específicamente, en el Departamento de Sucre, se maneja una Tasa Media Anual de Crecimiento de 0,98%, la cual es alta en comparación con la de otros Departamentos. Con todas estas cifras y porcentajes, se afirma la teoría de Malthus, en la cual se hace explícito que la población crece de forma geométrica, mientras que la producción de alimentos aumenta de forma aritmética, es decir, la población crece más deprisa⁴ y por lo tanto, se requerirán más recursos hídricos para satisfacer Necesidades Básicas.

En vista del escenario actual, en el que la población crece a un ritmo acelerado, surgen diversas discusiones y se genera estupor al saber que el agua, la cual se constituye en un recurso esencial para todas las formas de vida del Planeta, fundamental para los procesos productivos de la humanidad y que geopolíticamente es el único recurso natural que le puede dar sustentabilidad a todos los procesos ambientales y económicos de un país, es cada vez más limitada, más que todo en Zonas Costeras, en las que la población le da un uso indiscriminado, sin conciencia ambiental poniendo en riesgo la calidad y cantidad del recurso hídrico, el cual en gran parte se obtiene a partir de la explotación de

³ BANGUERO, Harold y CASTELLAR, Carlos. La Transición Demográfica en Colombia 1938 – 2025. Bogotá D.C. 1991. p. 1-24

⁴ MALTHUS, Thomas. Teoría Malthusiana de la población. 1798. (en Línea). <http://cgge.aag.org/PopulationandNaturalResources1e/CF_PopNatRes_Jan10ESP/CF_PopNatRes_Jan10ESP8.html> (Citado en 4 de agosto de 2014).

acuíferos costeros. Este riesgo aumenta su peligrosidad en época de verano, en la cual, los sitios turísticos albergan gran cantidad de población flotante, trayendo consigo una mayor demanda de agua.

Esta actividad de explotación indiscriminada de acuíferos costeros por medio de campos de pozos, ha generado susceptibilidad en las Aguas Subterráneas, dando paso a un fuerte proceso de contaminación por Intrusión Marina, proceso dinámico en el que el frente de agua salada avanza tierra adentro durante los períodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga aumenta, tal como se presenta actualmente en el acuífero Morrosquillo, ubicado en el Departamento de Sucre, Colombia y del cual se abastecen los Municipios de: Santiago de Tolú, Coveñas, San Onofre y San Antonio de Palmito.

En vista de la importancia que tiene esta fuente de abastecimiento en el Departamento de Sucre, desde la Universidad de Sucre, se ha tomado la iniciativa de realizar el presente Trabajo de Investigación denominado “Evaluación de la Vulnerabilidad a Intrusión Marina por el Método GALDIT en el acuífero Morrosquillo, Zona Litoral de Santiago de Tolú, Sucre- Colombia”, como primera etapa de un conjunto de actividades específicas del Grupo GIMAGUAS del programa de Ingeniería Civil, que permitirán alcanzar los objetivos requeridos y delineados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos⁵. Inicialmente, con éste trabajo se logrará el establecimiento de las zonas de Vulnerabilidad en el campo de pozos del Acuífero Morrosquillo, jurisdicción del Municipio de Santiago de Tolú, para lo cual, se trazarán alternativas que posibiliten frenar la salinización de las aguas dulces de esta importante fuente de abastecimiento de agua para la comunidad costera de Sucre y de suma importancia para el país, de tal modo, que se pueda garantizar un recurso hídrico disponible en cantidad y calidad.

⁵ VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de acuíferos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Medellín. 2010

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la Vulnerabilidad por Intrusión Marina mediante el Método GALDIT en el acuífero Morrosquillo, Zona Litoral de Santiago de Tolú.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar la caracterización fisicoquímica del agua del acuífero, en relación a la Intrusión Marina, en el área de estudio.
- Analizar la relación agua dulce – agua salada concerniente al proceso de Salinización en el área de estudio.
- Determinar la Vulnerabilidad del acuífero Morrosquillo, debido a las actividades de explotación mediante las estructuras del campo de pozos del Acueducto Municipal.
- Determinar el grado de Vulnerabilidad eventual por el impacto de la Intrusión Marina en el sector del acuífero objeto de estudio, a través del Método GALDIT.

2. ESCENARIO DE REFERENCIA

Se hace una descripción detallada del contexto en el cual se enmarca el tema de la Investigación, resaltando las principales características de la Zona Golfo de Morrosquillo, haciendo especial énfasis en la Zona Litoral Santiago de Tolú.

2.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

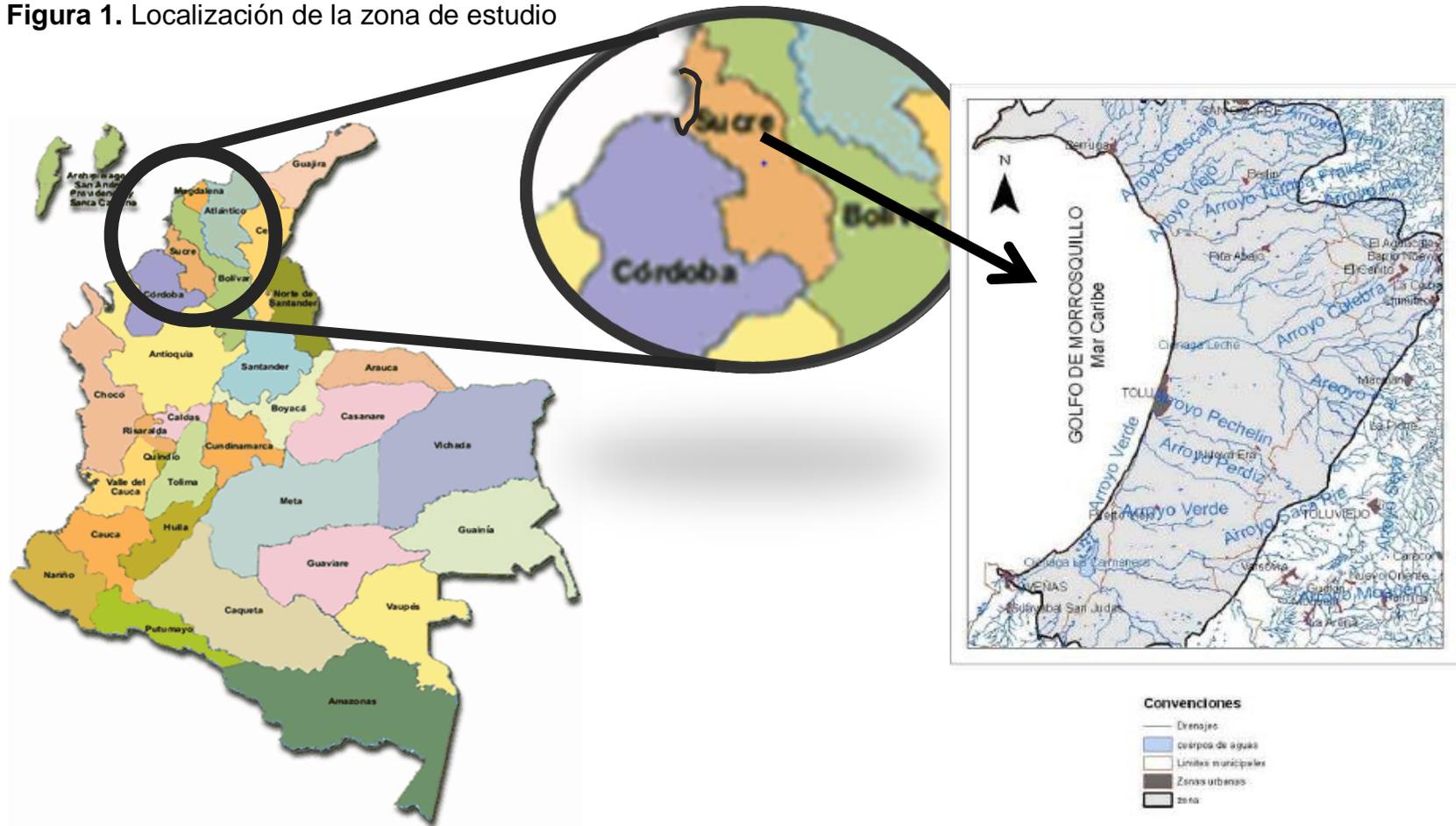
2.1.1 Ubicación geográfica. El Municipio de Santiago de Tolú, conocido comúnmente como Tolú o explícitamente como: La Villa Tres Veces Coronada de Santiago de Tolú, está ubicado al Noreste del Departamento de Sucre y se localiza entre las siguientes coordenadas: 09°21'00" a 09°40'00" Latitud Norte y 75°26'00" a 75°44'10" Longitud Oeste, a una altitud de 3 msnm frente al Golfo de Morrosquillo⁶. Tiene una extensión de 35.750 hectáreas, de las cuales 30 km son de Costas, correspondiendo al núcleo densamente poblado un área aproximada de 700 hectáreas, lo que sería un 1,95% del área total del Municipio y unas 35.050 hectáreas que corresponden a un 98,05% de áreas del sector rural, como lo son: áreas de vocación agropecuaria, de reserva ecológica, forestal y asentamientos poblacionales menores⁷.

Santiago de Tolú, es uno de los Municipios integrantes de la Subregión Morrosquillo, junto con: Coveñas, San Antonio de Palmito, Tolú Viejo y San Onofre, los cuales ocupan un área de 1.886 km² (18.2% del total departamental).

⁶ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Plan de Desarrollo Municipal 2012 - 2015. La oportunidad para todos. p. 27

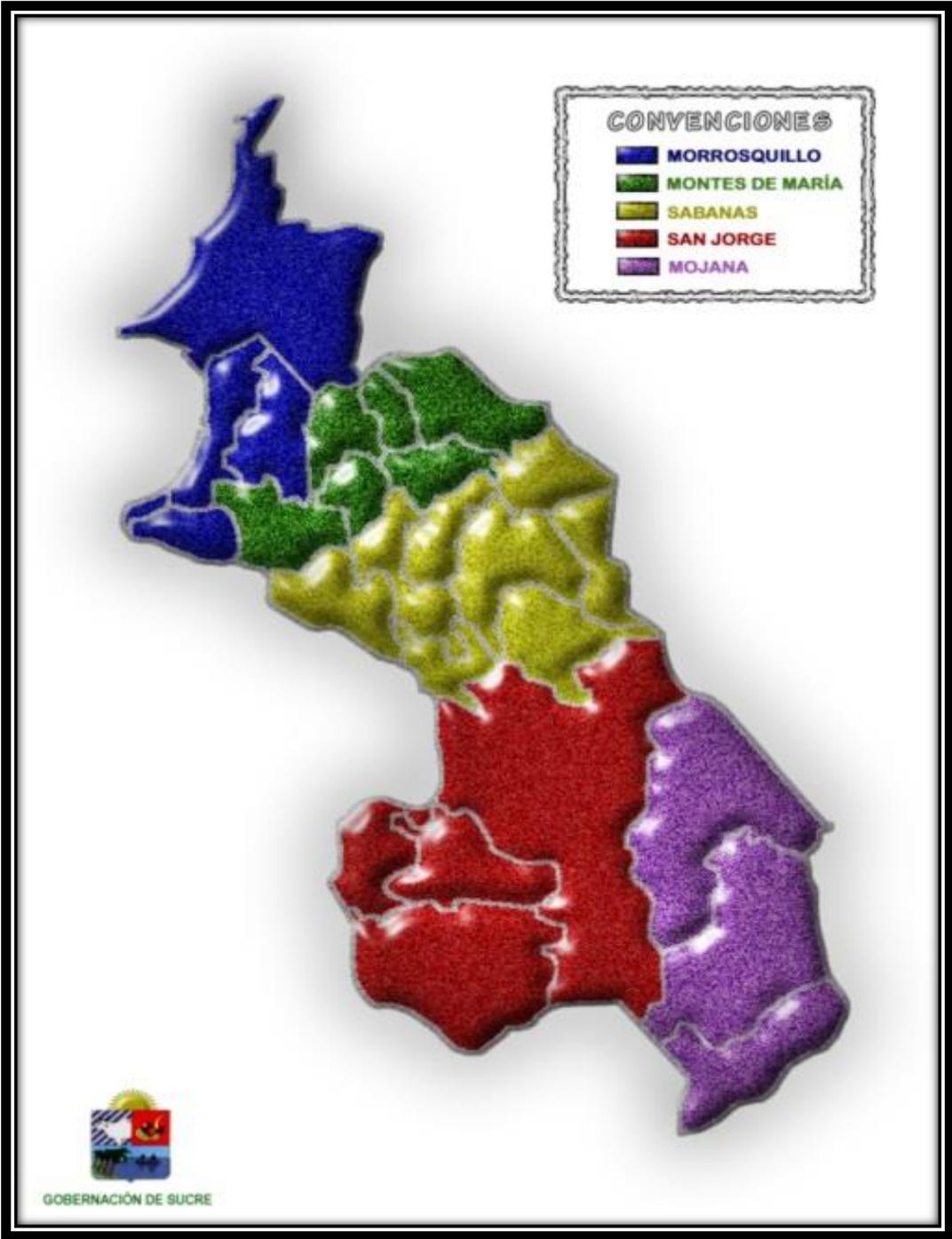
⁷ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. (en Línea) <http://www.santiagodetolu-sucre.gov.co/informacion_general.shtml> (citado en 15 de agosto de 2014)

Figura 1. Localización de la zona de estudio



Fuente. SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. (en Línea) <<http://www.santiagodetolusucro.gov.co/index.shtml#4>> (citado en 15 de agosto de 2014)

Figura 2. Subregiones del Departamento de Sucre



Fuente. SUCRE. GOBERNACIÓN. <<http://www.sucres.gov.co/infogen.shtml>> (citado en 10 de Agosto de 2014)

2.1.2 Demografía. La población del Municipio de Santiago de Tolú, presenta las mismas características étnicas de todas las zonas que pertenecen al complejo cultural de la región Caribe; entre la población del Municipio predomina el Mulato, pero en la actualidad el desplazamiento de la población de otras zonas del país, atraídos por el negocio del turismo, han configurado un grupo étnico que se alejó un poco del patrón normal de la zona. El conocimiento del tamaño de la población en el territorio para la zona urbana y rural del Municipio, se obtiene especialmente de los censos de población, los cuales se realizan justamente para establecer el volumen total de población residente en el territorio nacional y cada una de sus unidades administrativas.

El Municipio de Santiago de Tolú, de acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2005 por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE, arrojó una población de 28.108 habitantes. Según las proyecciones realizadas por el DANE, para el año 2011 la población ascendería a 31.109 habitantes, constituyéndose este Municipio como el área urbana más densamente poblada de la unidad geográfica del Golfo de Morrosquillo⁸.

En la figura 3, se observa que, el área urbana del Municipio de Santiago de Tolú está comprendida entre el Arroyo Pichilín (Sureste) y el Arroyo Guainí (Noreste) del Golfo de Morrosquillo.

⁸ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Op. cit. p. 28 y p. 29

2.1.3 Actividades Antrópicas. Las principales actividades económicas que se desarrollan en el Municipio de Santiago de Tolú, son: el turismo de sol y playa, la producción ganadera, la agricultura, la producción agroindustrial, el comercio, la acuicultura y la pesca, siendo más incidente la actividad turística.

La acuicultura y la pesca se desarrollan de manera artesanal, con excepción de algunas cooperativas de pescadores y empresas de nivel industrial como la Camaronera Agrosoledad en la Bahía de Cispatá y la Empresa de Pesca Semi-industrial Pestolú en el Municipio de Tolú.

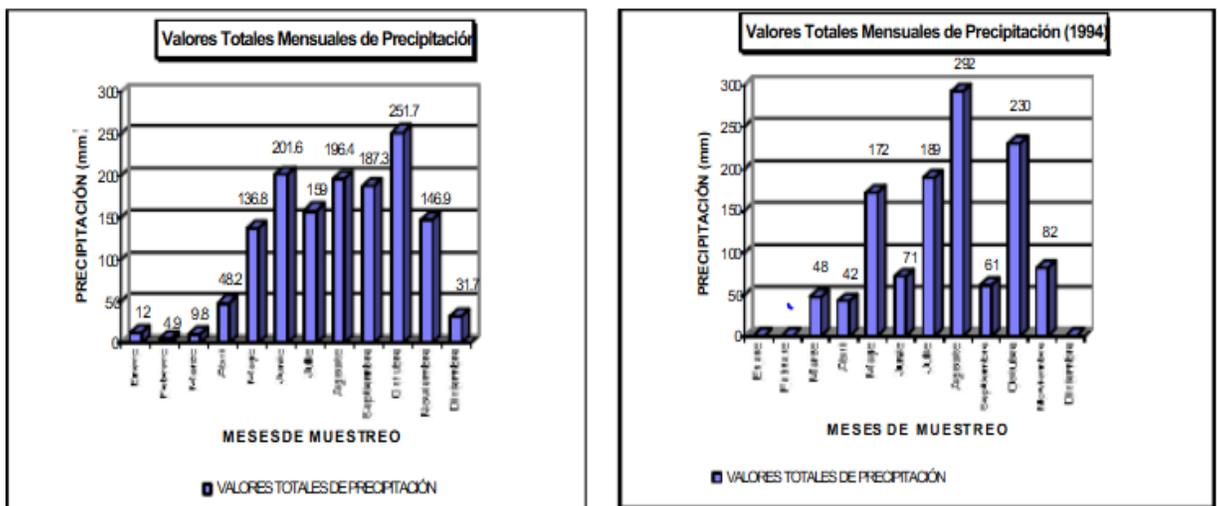
Figura 4. Turismo y Pesca en el Municipio de Santiago de Tolú



Fuente. SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Op. cit. p.31

2.1.4 Clima. Está definido por diversos factores, entre ellos: su ubicación en la franja de bajas presiones ecuatoriales, la influencia de las corrientes marinas, la presencia de vientos persistentes desde el Norte hacia el Nororiente y la ausencia de sistemas montañosos que generan un ambiente árido; por lo que cabe decir que, predomina un ambiente típicamente de Sabana Tropical Árida con influencia de los vientos alisios del Noreste. Este clima, es resultado de la ubicación sobre la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). Las precipitaciones se presentan desde abril hasta diciembre y el período seco está comprendido desde diciembre hasta los comienzos de abril. La temperatura promedio de la Zona del Golfo de Morrosquillo es de 27.5° C, con una humedad relativa promedio del 80%. La zona se define como de sabana Xerófila-Semiseca⁹.

Figura 5. Épocas Climáticas



Fuente. IDEAM. Valores históricos de precipitación mensual promedio desde 1958 hasta 1995; valores de precipitación mensual durante el año de 1994; Estación 1309007 Tolú. 1999.

⁹ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Op. cit. p. 48

2.1.5 Geología. El área de estudio forma parte de la región noroccidental de Colombia, la cual ha tenido una gran complejidad estructural y sedimentaria producto de la estrecha interrelación y evolución tectono-sedimentaria de la esquina noroccidental de Sudamérica¹⁰.

Estructuralmente, la zona está conformada por el Cinturón Fragmentado de San Jacinto que se caracteriza por ser una faja replegada, donde predominan fallas inversas y de cabalgamientos longitudinales y paralelos a la actitud estructural, asociadas a pliegues apretados. Las unidades de roca que afloran al Oriente del área corresponden a rocas sedimentarias del Paleógeno (Formaciones: San Cayetano, Tolú Viejo y El Carmen). Sobre las rocas anteriores, se encuentra discordantemente una cobertura de sedimentos de origen marino, fluvial y marino-aluvial.

El Municipio de Santiago de Tolú hace parte de la Subregión de la Llanura Costera Aluvial de Morrosquillo, a la vez que, se encuentra en la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental PLOCO¹¹

La zona está conformada por una Planicie Marina y Llanura Aluvial, en la cual existen materiales que corresponden al período geológico del Cuaternario, depositados por acción marina, fluvio-marina, fluvio-lacustre y coluvial.

El Sinclinario de San Onofre indica que dio origen a la Planicie Marina y al Abanico de Macaján. En la Planicie, predominan materiales de origen marino y fluvio marino, constituidos de arenas y arcillas. Los sedimentos arcillosos, son en su mayoría de tipo montmorillonítico.

¹⁰ GUTIÉRREZ RIBÓN, Guillermo Enrique. Diagnóstico Ambiental del Acuífero Costero Golfo de Morrosquillo, Zona Litoral Tolú – Coveñas. 2004. Bogotá D.C. 288 h. Trabajo de grado (Maestría Ambiental con énfasis en Sanitaria). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. p.51-52

¹¹ INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Atlas Geológico de Colombia. Plancha 5-03. 2010

La Llanura Aluvial propiamente dicha, está constituida por valles aluviales y coluviales, terrazas antiguas y una zona de abanico de piedemonte. Los materiales geológicos de los valles y de algunas terrazas bajas, pertenecen al Cuaternario reciente (Holoceno).

Uno de los estudios previos presentes en la Litología de la zona, es el realizado por Herrera Parra en Unisucre en el año de 1997, citado en la investigación llevada a cabo por el ing. Gutiérrez en el año 2004; donde se muestra la descripción detallada de columnas litológicas generadas a partir de diseños de construcción de algunos pozos en los alrededores de Tolú. De manera resumida, los autores resaltan tres conjuntos litológicos predominantes. El primero de ellos, es el superior, el cual va hasta los 20 metros de profundidad y está constituido por capas de arcillas limosas de color amarillo de hasta nueve metros de espesor intercalado con capas de arenas gruesas y gravas finas con Clastos de Chert, Jaspe, Cuarzo y conchas de hasta siete metros de espesor.

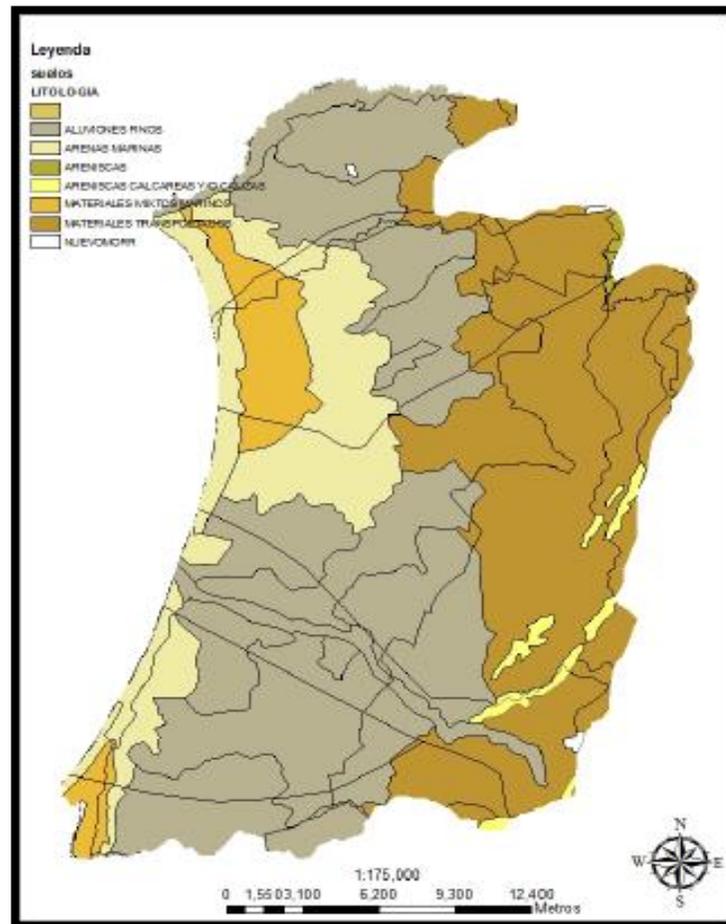
El conjunto litológico medio, subyace al conjunto superior, va hasta una profundidad máxima de 88 metros y está constituido por capas de limo de color café y arcillas grises de hasta 20 metros de espesor, intercalados con capas y lentes de arenas gruesas y gravas finas con clastos subredondeados de Cuarzo, Chert y Jaspe, de hasta 11 metros de espesor.

El conjunto litológico inferior está constituido principalmente por arcillolitas de color gris verdoso, correlacionados con la Formación Carmen; lo conforman una secuencia de Lodolitas gris oscuras, con intercalaciones ocasionales de capas finas a muy finas de Areniscas y Limolitas.

En conjunto, se trata de materiales cuaternarios recientes, depositados por la acción fluvial, de las corrientes de agua presentes en la zona, las cuales ayudaron a diferenciar ambientes sedimentarios. Además, la zona costera está regida por procesos no sólo de tipo fluvial, sino también por ambientes marinos costeros (playa y manglar).

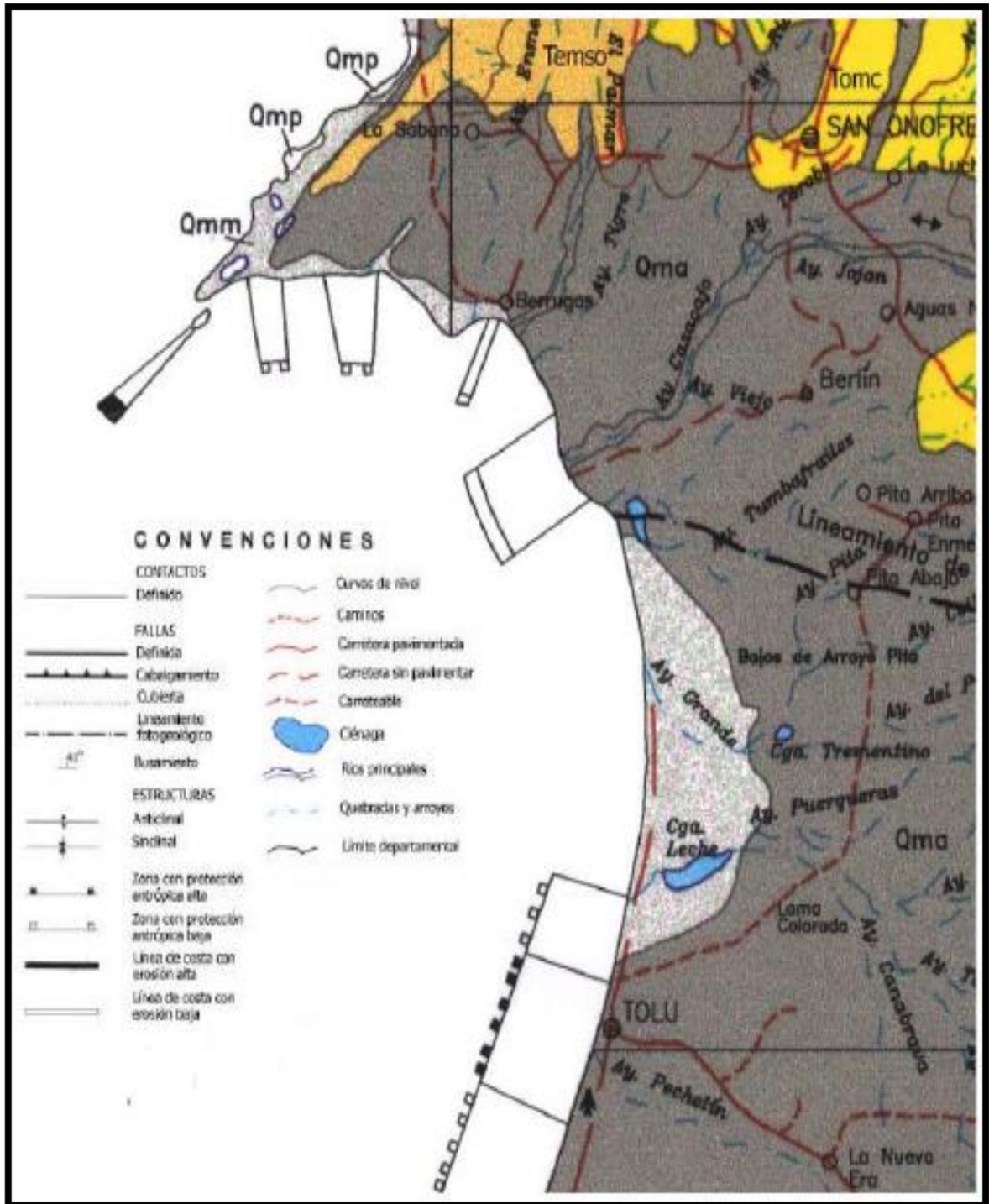
A continuación, se presenta con mayor detalle, la Geología local de la zona de estudio, representando la Litología presente.

Figura 6. Mapa geológico de la zona del Morrosquillo, Sucre-Colombia



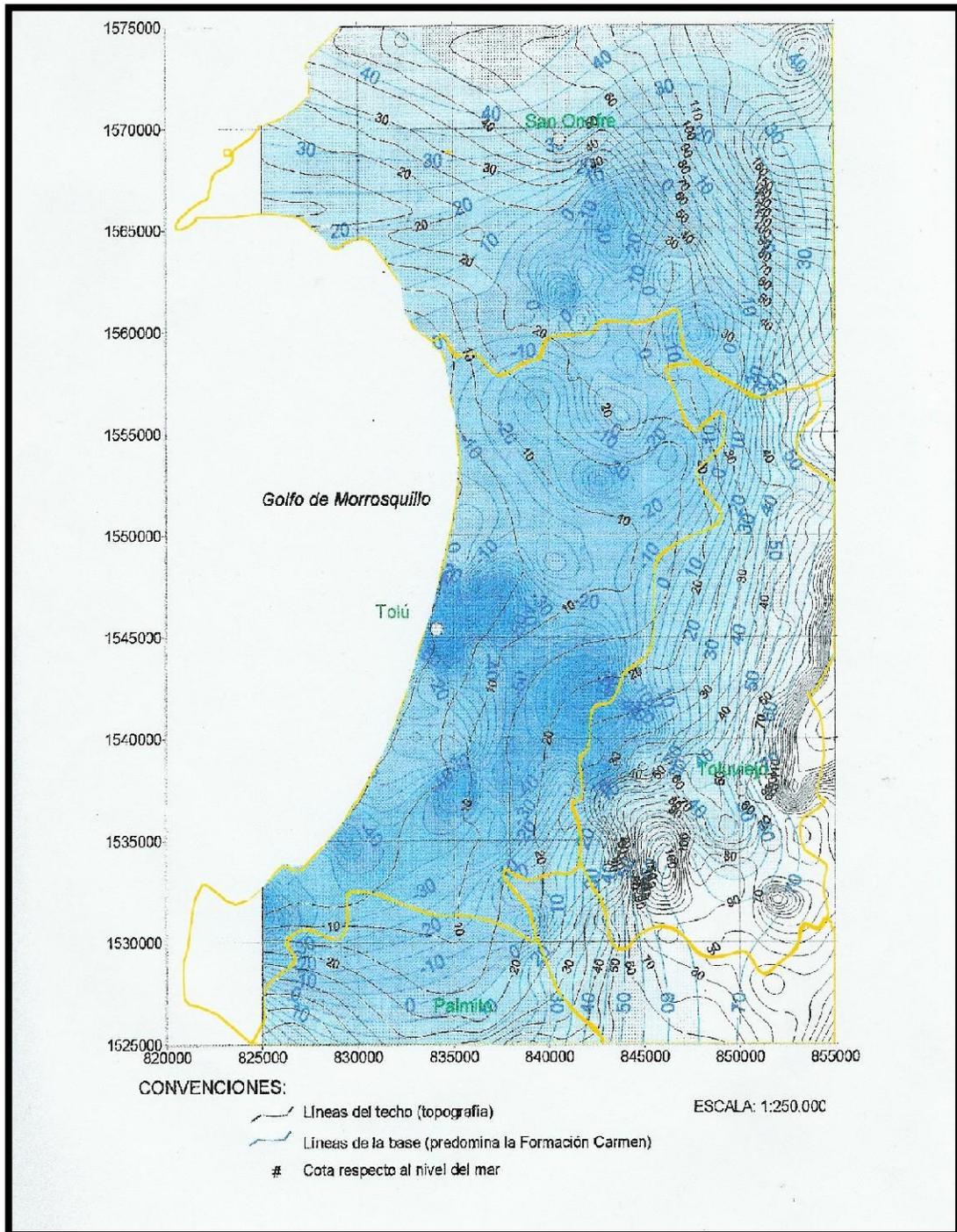
Fuente. CARSUCRE. Mapa geológico de la zona del Golfo de Morrosquillo, Sucre – Colombia (Modificado). 2011

Figura 7. Mapa Geológico detallado del Golfo de Morrosquillo



Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Mapa Geológico detallado del Golfo de Morrosquillo. 1997

Figura 9. Techo y base de los depósitos cuaternarios del área de estudio



Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Mapa de techo y base de los depósitos cuaternarios del Golfo de Morrosquillo. 1999

Figura 10. Columna Estratigráfica General de las Cuencas de Sinú (NW) y San Jacinto (NE) modificada de Barreto et. al

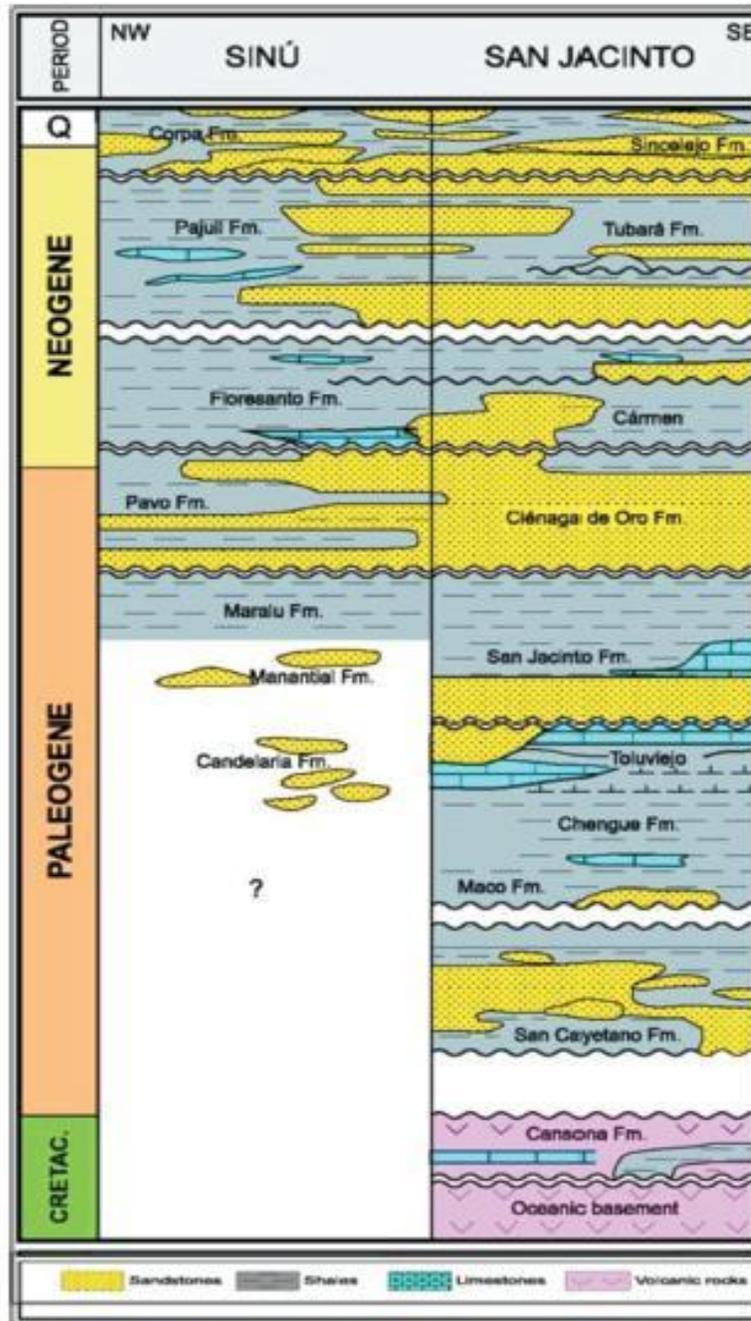
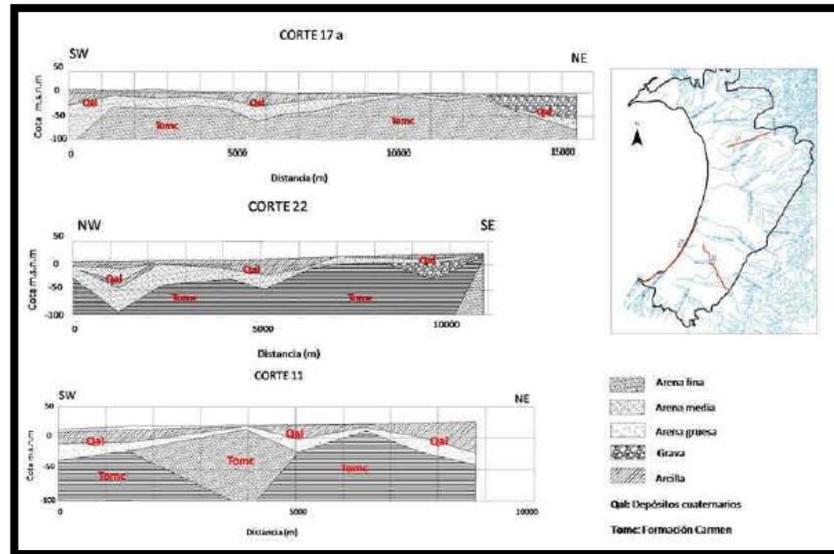


Figura 3. Columna Estratigráfica General de las cuencas de Sinú (NW) y San Jacinto (NE) modificada de Barrero et al. (2007)
Figure 3. General Stratigraphic Column Sinú (NW) and San Jacinto (NE) Basins modified from Barrero et al. (2007).

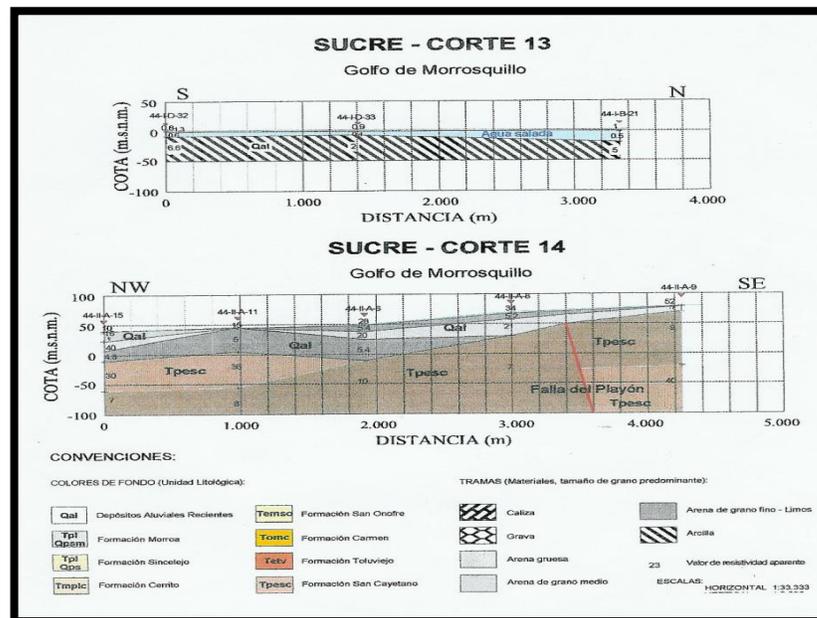
Fuente. Clavijo y Barrera. Universidad de Caldas (2009)

Figura 11. Cortes Geoelectricos 11, 17 y 22 en el Golfo de Morrosquillo



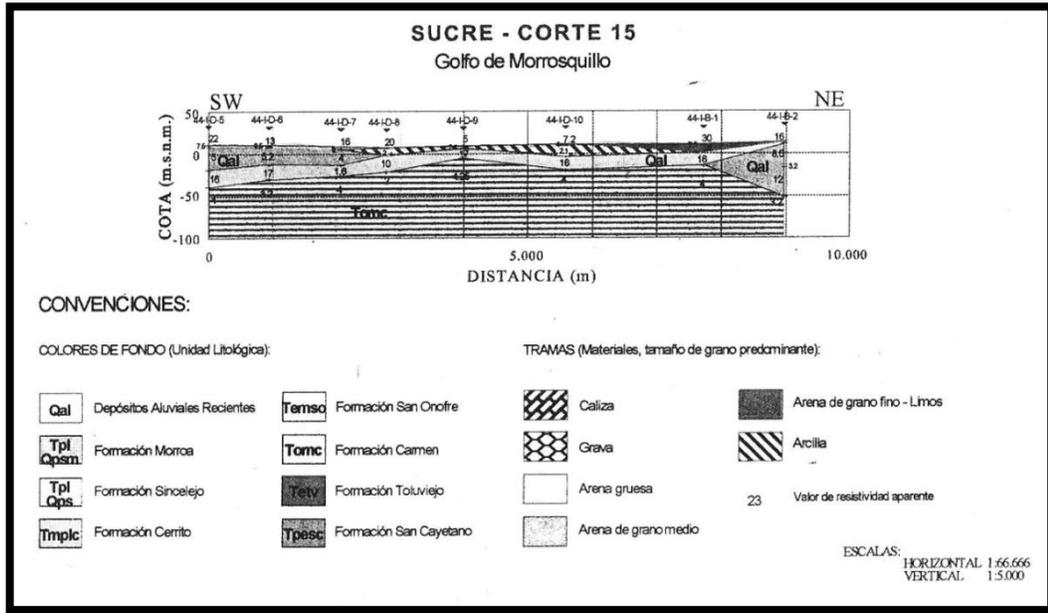
Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Cortes Geoelectricos en el Golfo de Morrosquillo. 1999

Figura 12. Corte Geoelectrico Vertical 13 y 14 en el Golfo de Morrosquillo



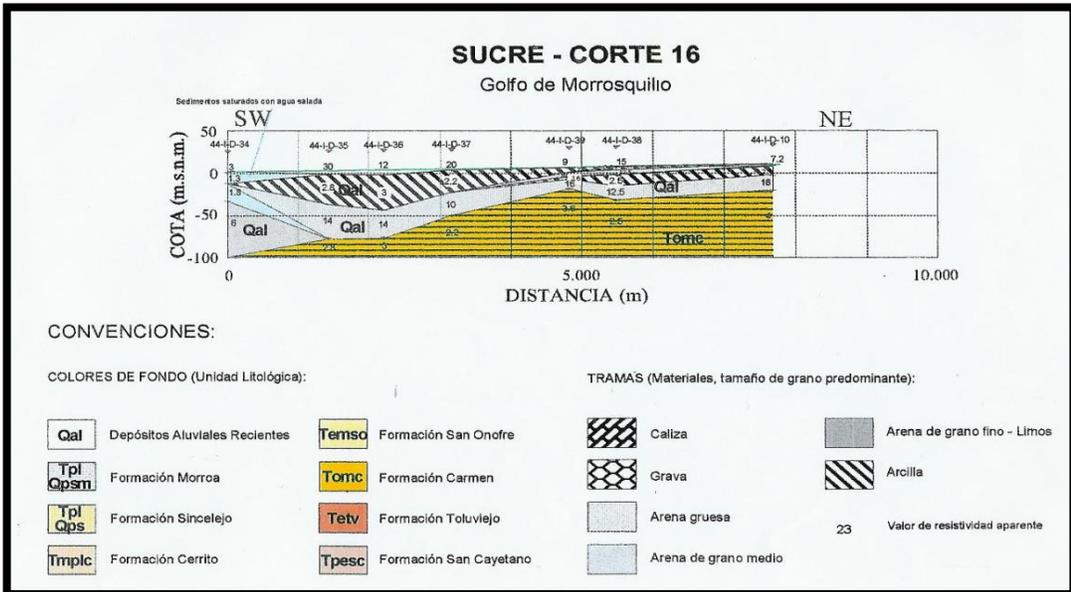
Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Cortes Geoelectricos en el Golfo de Morrosquillo. 1999

Figura 13. Corte Geoeléctrico Vertical 15 en el Golfo de Morrosquillo



Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Cortes Geoeléctricos en el Golfo de Morrosquillo. 1999

Figura 14. Corte Geoeléctrico Vertical 16 en el Golfo de Morrosquillo



Fuente. INGEOMINAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Cortes Geoeléctricos en el Golfo de Morrosquillo. 1999

2.2 GOLFO DE MORROSQUILLO

Se encuentra situado al sur del Mar Caribe, en la Costa Norte de Colombia, perteneciente a los departamentos de Sucre y Córdoba. Tiene de Oeste a Este, aproximadamente 80 kilómetros, desde la Punta Mestizos, la Bahía de Cispatá y la Boca de Tinajones, desembocadura del río Sinú en Córdoba, hasta la Punta San Bernardo, en Sucre.

2.2.1 Geomorfología. La unidad geomorfológica predominante es la Planicie Aluvial Costera, la cual es una superficie plana levemente inclinada y/u ondulada, con una extensión que llega a ser superior a los 10 km² cortada por drenajes poco profundos, la mayoría de los cuales son estacionales. No se observan procesos erosivos. Separándola de la Costa se encuentran franjas angostas de manglar, algunas lagunas costeras, complejos de cordones litorales y antiguas barras litorales¹².

Hace aproximadamente 18.000 años, cuando se presentó la última regresión del mar, la mayor parte de lo que en la actualidad es Plataforma Continental, se encontraba descubierta y el río Sinú y su Valle terminaban en el borde de la plataforma.

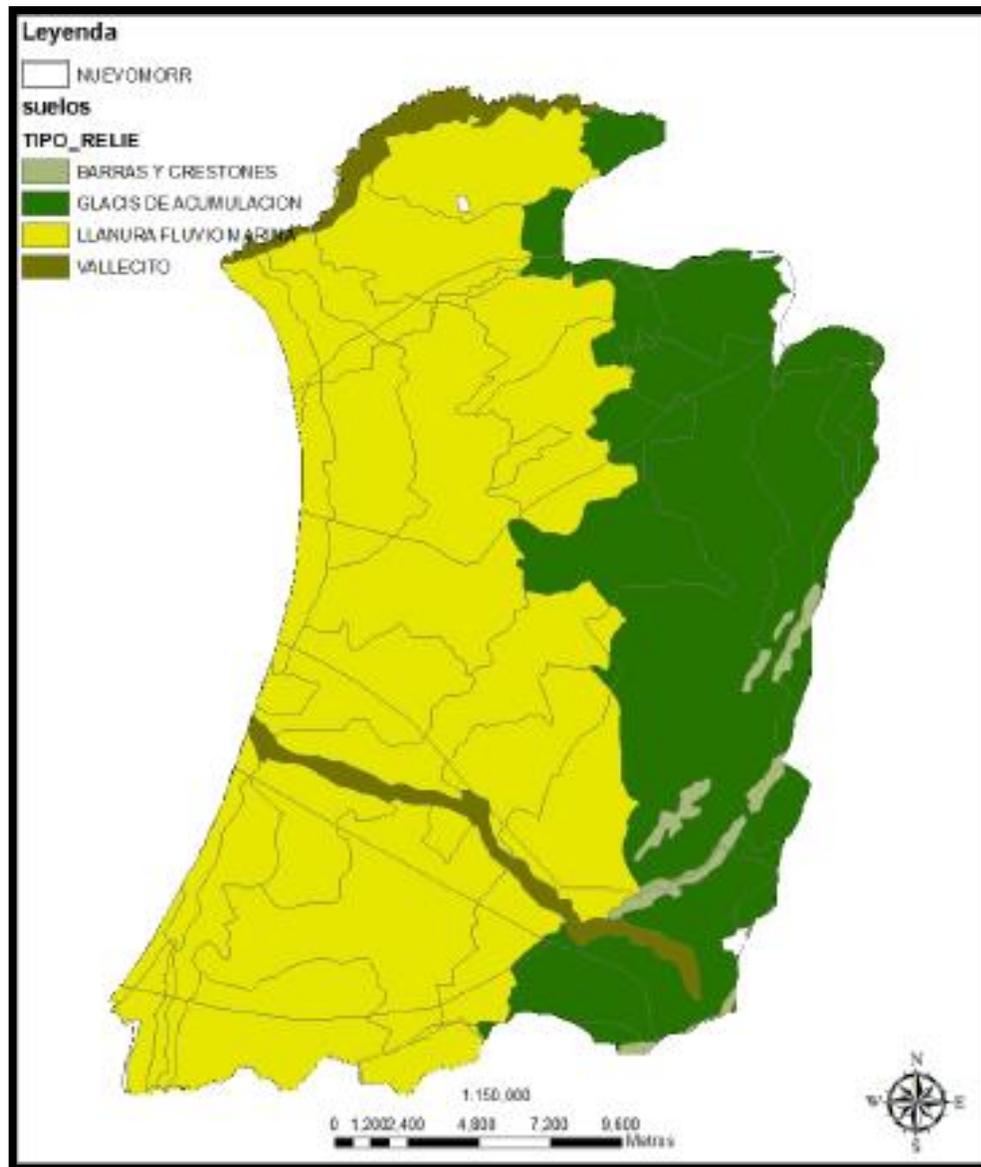
La Geomorfología del Litoral del Golfo indica que ésta es una zona deltaica que ha recibido todos sus sedimentos del río Sinú.

La llanura donde se encuentra el Golfo está compuesta por depósitos fluviales pleistocénicos de la formación Magdalena y por sedimentación aluvial reciente.

¹² GUTIÉRREZ RIBÓN, Guillermo Enrique. Op. cit. p.57

Según el mapa Geomorfológico de CARSUCRE¹³ , también se presentan algunas barras y crestones, donde aflora la Formación Geológica de Tolú Viejo.

Figura 15. Geomorfología de la zona del Golfo de Morrosquillo



Fuente. CARSUCRE. Mapa de la Geomorfología de la zona del Golfo de Morrosquillo. 2011

¹³ CARSUCRE. Mapa de la Geomorfología de la zona del Golfo de Morrosquillo. 2011

2.2.2 Fisiografía. Está compuesta por una zona plana, que abarca la Planicie de Tolú, las Terrazas Antiguas, los Valles Aluviales y Coluviales y el Abanico.

La Zona Plana, constituida por la Planicie de Tolú, correspondiente al Sinclinario de San Onofre, se extiende desde los límites de Bolívar, región de San Antonio en la zona pantanosa del Canal del Dique, hasta el Departamento de Córdoba, al sur; al Oriente, se extiende desde las estribaciones de las colinas de Tolú Viejo, Abanico de Macaján, hasta el Municipio de San Antonio de Palmito en límite con el departamento de Córdoba¹⁴. En esta planicie, se han distinguido las siguientes unidades fisiográficas:

- ❖ Playas y Barras Marinas: constituidas de materiales heterogéneos acumulados en forma paralela a la orilla del mar. En la sedimentación han influido las cargas de materiales transportados por las corrientes fluviales hacia el mar, y luego, las corrientes, las olas y los movimientos de flujos y reflujos marinos, que vuelcan los materiales a la costa, por lo que cabe decir, que estos suelos no se han desarrollado en forma normal.
- ❖ Playones: constituidos por diferentes materiales con predominio de arenas y limos, altos contenidos de sales y drenaje natural generalmente pobre. Se localizan a continuación de las playas y barras.
- ❖ Terraza Marina: es una de las unidades más extensas comprendida por terrenos planos, con drenaje natural que varía de bien a pobremente drenado.

¹⁴ MOSQUERA LÓPEZ, Libardo. Estudio general de Suelos de la Región Noroccidental del Departamento de Sucre. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica. Bogotá D.C. 1990. p.8-10

- ❖ Manglares y Pantanos: los Manglares son unidades mal drenadas con encharcamiento e inundaciones Fluvio-Marinas permanentes, constituidas por asociaciones de plantas resistentes a la humedad y a la salinidad. Los Pantanos, son formaciones debidas a la acumulación de sedimentos finos de arcilla y limo, que por estar cerca a las playas marinas, presentan estratos profundos de material arenoso coralino.
- ❖ Planicie Fluvio-Marina: constituida por superficies planas y ligeramente planas; en su mayor parte presentan microrelieve ligeramente ondulado, con materiales del Plio-Pleistoceno en las terrazas antiguas y del Cuaternario en los valles. Se aprecia la influencia tanto fluvial como marina, en la Pedogénesis.
- ❖ Planicie Fluvio-Lacustre: en esta unidad, se incluyen terrazas antiguas y valles aluviales y coluviales. En algunos sitios, existen suelos poco desarrollados debido al deterioro natural y al material parental de areniscas.
- ❖ Abanico de Piedemonte: se ubica entre la Serranía y la Terraza Marina. Son terrenos ligeramente planos a ligeramente ondulados, con declive hacia la parte occidental de la Serranía, comprendida entre Tolú Viejo y Macaján.

2.2.3 Hidrografía. Está representada por Aguas Subterráneas, Aguas Marinas y Aguas Superficiales conformadas principalmente por Arroyos, Caños y Ciénagas, que forman distintas Microcuencas.

Dentro del sistema hidrográfico del Golfo de Morrosquillo, se destacan los arroyos cuyo flujo se da por la escorrentía en invierno, los cuales se secan durante el verano formando barras de arena en sus bocas por efecto del transporte sedimentario a lo largo de la costa, favoreciendo la formación de pantanos salinos e hipersalinizados; dentro de éstos, sobresalen los arroyos: La Perdiz, la Angarilla y Arroyo Verde, ubicados al sur del arroyo Pichilín y los arroyos de: Guainí, La Leche, Alegría, Pita, Tigre y Tumba Frayles, todos ellos ubicados desde el centro hacia el Norte del Municipio de Santiago de Tolú.

Al Golfo de Morrosquillo y al Mar Caribe van las aguas de los arroyos Pichilín, Tumba Frayles, Mata Tigre, El Puerto, Macaján, Tomás, El bobo y San Antonio; éste último, contribuye a la formación de la Ciénaga La Caimanera.

Las principales Microcuencas del Golfo y que hacen la composición hidrográfica de los Municipios de Santiago de Tolú y de Coveñas son¹⁵:

- ❖ Microcuenca del Arroyo Pichilín: comprende un área de aproximadamente 600 km²; nace en los Montes de María y desemboca en la zona sur del casco urbano de Santiago de Tolú.
- ❖ Microcuenca de la Ciénaga de Trementino: comprende una extensión de 200 km², tiene como afluentes a los arroyos El Puerto, Guayabo, Ceiba y como principal el Arroyo de Pita que desemboca en la Ciénaga.

¹⁵ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Op. cit. p. 52-53

- ❖ Microcuenca de la Ciénaga de La Leche: comprende un área aproximada de 200 km²; recibe aportes de los arroyos de Caña Brava, Puerquera, Arroyo Grande, Corocito, Palenquillo y Culebrita.
- ❖ Microcuenca del Arroyo Tumba Frayles: está ubicada al norte del Municipio en límites con el Municipio de San Onofre y vierte sus aguas a la Ciénaga del Pantano.
- ❖ Microcuencas Menores: conformadas por los arroyos La Perdiz, Arroyo Verde y Angarilla.

El principal cuerpo de agua es el arroyo Pichilín, el cual no se seca completamente durante la época de verano, desemboca en el Golfo de Morrosquillo al sur de la zona urbana de Santiago de Tolú, conformando en su boca un conjunto con predominancia de las características estuarias en las cuales se desarrolla la vegetación de Manglar de parte baja asociada a la presencia de helechos como Matandria, que en cierto modo, son evidencia de aportes permanentes de agua dulce al sistema¹⁶.

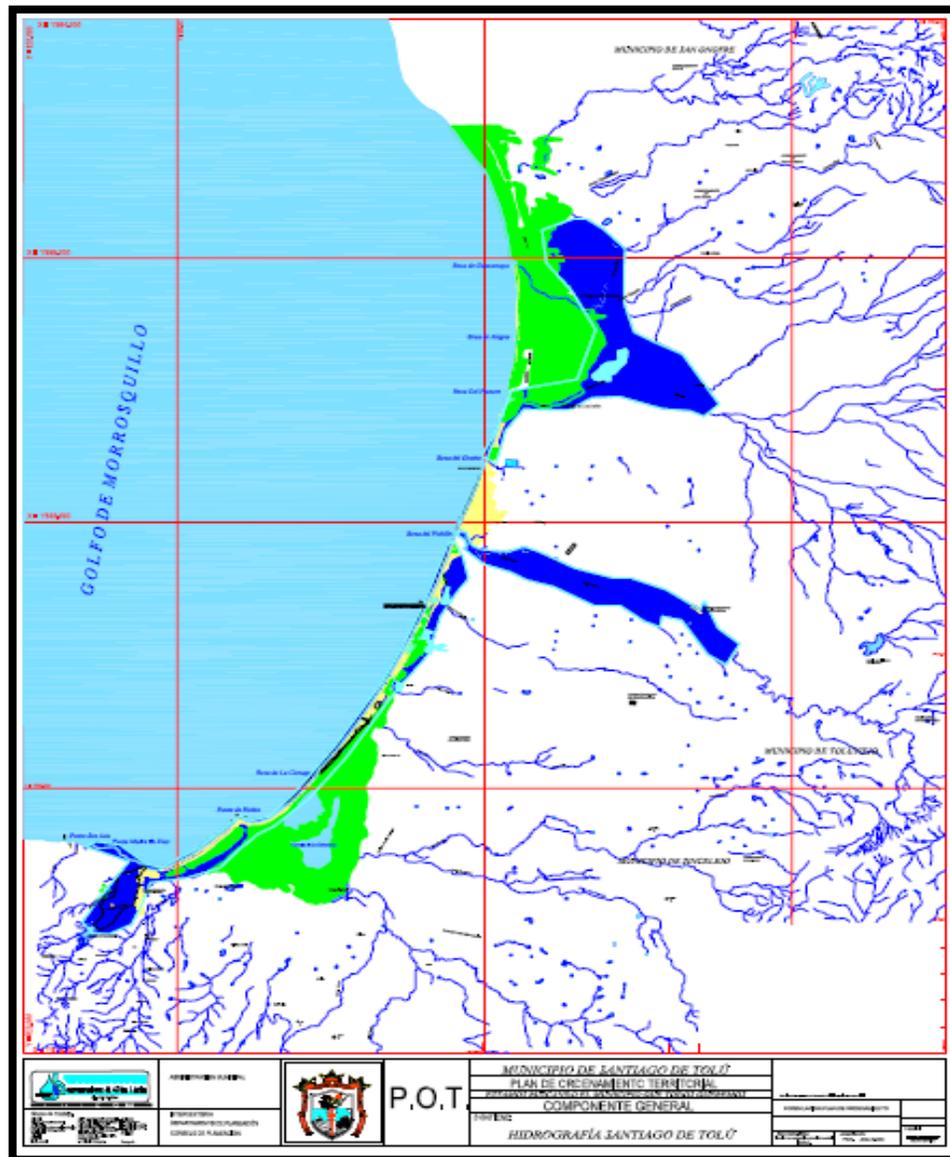
La Hidrografía Marítima está determinada por la parte de Mar Caribe que comprende el Golfo de Morrosquillo.

2.2.4 Mar Caribe. Mar abierto tropical del Océano Atlántico, situado al este de América Central y al norte de América del Sur, cubriendo la superficie de la Placa del Caribe. También es llamado Mar de las Antillas por estar ubicado al Sur y al Oeste del Arco Antillano.

¹⁶ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. *Ibíd.*, p. 54

Para efectos de la presente investigación, se considera al Mar Caribe como el elemento contaminante en el escenario de la Intrusión Marina, ya que en períodos de menor recarga del acuífero Morrosquillo el Mar avanza tierra adentro y cuando la recarga es mayor, el Mar retrocede a su lugar.

Figura 17. Hidrografía del Golfo de Morrosquillo



Fuente. SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. P.O.T 2000

Figura 18. Mar Caribe



Fuente. SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Mar Caribe. 2000

2.2.5 Flora y Fauna. Tiene representación terrestre o continental e insular, presentando una gran diversidad dependiendo de los sistemas de vientos, flujo y reflujo de las aguas marinas y continentales, encontrando una gran diversidad de bosques, como: Bosque Seco, Bosque Seco Tropical y Bosque Muy Seco Tropical¹⁷.

En todos estos bosques, se encuentra gran cantidad de especies tanto de Flora como de Fauna, como es el caso de los manglares, que habitan en Ciénagas y zonas costeras y en cuyo interior, se encuentran nichos constituidos por variedad de animales como: reptiles, aves, peces y langostinos.

Entre los representantes de la Fauna, figuran:

¹⁷ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. *Ibíd.*, p. 56

- ❖ Aves: La Tijereta, El Pelicano, La Gaviota, Gavilán Garrapatero, Garza Ganadera, entre otras.
- ❖ Reptiles: Caimán, Iguana, Babilla, Culebras, Hicoteas, Salamandras, Camaleones, Tortugas de Mar, entre otras.
- ❖ Peces: Mojarra, Róbalo, Jurel, Sierra Cojinúa, Juancho, Pargo Chino, entre otras

En lo relacionado con la Flora, existe una diferencia marcada entre la Flora del Litoral y la Flora Continental. En las cercanías a las playas, se encuentran especies como: El Almendro, El Uvero, El Mangle, El Clemón y Los Cocoteros¹⁸.

En la zona continental se divisan: Robles, Vara de Humo, Indio Encuero, Camajón, Caracolí, Ceiba Tolúa, Ceiba de Leche y especies frutales como el Mango, Níspero, Guayaba y Tamarindo.

Con respecto a la cobertura vegetal de carácter antrópico, se pueden distinguir tipos de cultivos (permanentes y transitorios) y pastos manejados usados para alimento del ganado. También se presentan vías y redes de drenaje artificial, así como estanques para cultivo de Camarón. Entre los principales cultivos, se pueden encontrar: arroz, maíz, sorgo, coco, cítricos, yuca y mango¹⁹.

¹⁸ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Sistema de Gestión Ambiental Municipal – Plan Ambiental Municipal. 2012 – 2015. p.44

¹⁹ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. *Ibíd.* p. 44

El acuífero en mención, corresponde a la zona de la llanura aluvial que se encuentra desde la orilla del mar hasta las estibaciones de la Serranía de San Jacinto; está constituido por un relleno litoral y fluvial en paleocauces, conformado por: arenas cuarzosas finas, gravas y guijarros con intercalaciones de arcillas, depositadas discordantemente sobre las Formaciones Terciarias de carácter impermeable: El Carmen y San Cayetano.

⌘ **Formación El Carmen (Tomc):**

Ocupa zonas topográficamente bajas suavemente onduladas, situadas al norte de San Onofre y al Occidente y Oriente del anticlinal de Tolú Viejo respectivamente. Litológicamente, se compone de arcillolitas grises e intercalaciones locales de limolitas y areniscas en capas muy delgadas.

Se encuentra delimitada en la base por la Formación Tolú Viejo y en el techo por la Formación El Cerrito. Duque, Caro y otros, (1996) indican, para el área del Carmen de Bolívar al norte del Departamento de Sucre, un ambiente de depositación en una zona batial media superior a batial media inferior (500 m a 2.000 m de profundidad), durante el Oligoceno inferior y el Mioceno inferior. (Memoria Mapa Hidrogeológico del Departamento de Sucre)²⁰.

⌘ **Formación San Cayetano (Tpsc)**

Aflora en el sector noroccidental del Departamento, al oriente de las localidades de Macaján, Chinulito y Aguacate y un poco más al sur constituye el núcleo del Anticlinal de Toluviejo. En general, se trata de una sucesión rítmica de areniscas de grano grueso a fino, con concreciones de areniscas calcáreas, limolitas y arcillolitas con intercalaciones de Chert, calizas y conglomerados hacia la parte media superior²¹.

²⁰ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Memoria Técnica del Mapa de Aguas Subterráneas del Departamento de Sucre. Exploración y evaluación de Aguas Subterráneas RS1_02. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Ingeniería y Minería. Bogotá D.C. 2002. p.18

²¹ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Ibíd. p.18

El espesor es incierto debido a la complejidad estructural que afecta a las secciones más representativas, variando entre 120m y 250 m. Según Duque- Caro (1967), se depositó en el Paleoceno Inferior – Eoceno Medio. Se desconoce la naturaleza del contacto inferior con la Formación Cansona, mientras que el contacto superior es discordante, en algunas áreas con la Formación Maco (arroyo Palenquillo, arroyo Macaján) y en otras con la Formación Tolú viejo (Cerro Mena, Anticlinal de Tolú viejo).

⌘ **Formación Tolú Viejo (Tetv)**

Aflora en las colinas de la parte noroccidental del Departamento, conformando una franja con rumbo N45°E, de 16 kilómetros de longitud y amplitud variable de sur a norte, entre las poblaciones de Palmito y Chalán respectivamente.

Está compuesta principalmente por una sucesión de calizas con un conglomerado cuarzoso hacia la base e intercalaciones de areniscas hacia la parte media y alta; estas últimas facies aumentan su presencia hacia el sur en las localidades de Varsovia y Palmito²².

El acuífero Morrosquillo, presenta sus mayores profundidades hacia el Centro (60 – 80 metros) y hacia el Sur (80 – 100 metros); los valores de Resistividad para los niveles acuíferos se presentan generalmente entre 8 y 30 Ohm.m. (INGEOMINAS).

Según las memorias del Mapa Hidrogeológico de Sucre, el acuífero de Morrosquillo es de tipo libre a confinado y ocupa un área total de aproximadamente 700 km².

Según la investigación realizada por Herrera Parra en el año 1997, el acuífero Morrosquillo es multicapa y está conformado por tres niveles que se describen a continuación:

²² VARGAS QUINTERO, María Consuelo. *Ibíd.* p.19

NIVEL 1: acuífero libre de extensión local, que tiene una profundidad de 25 m, constituido por las capas de arena fina a gruesa y grava fina, con espesores que no sobrepasan los 6m. Es explotado en su mayoría por pozos artesanos, para aprovechamiento de uso doméstico, turístico y agropecuario. El agua de este acuífero es salobre.

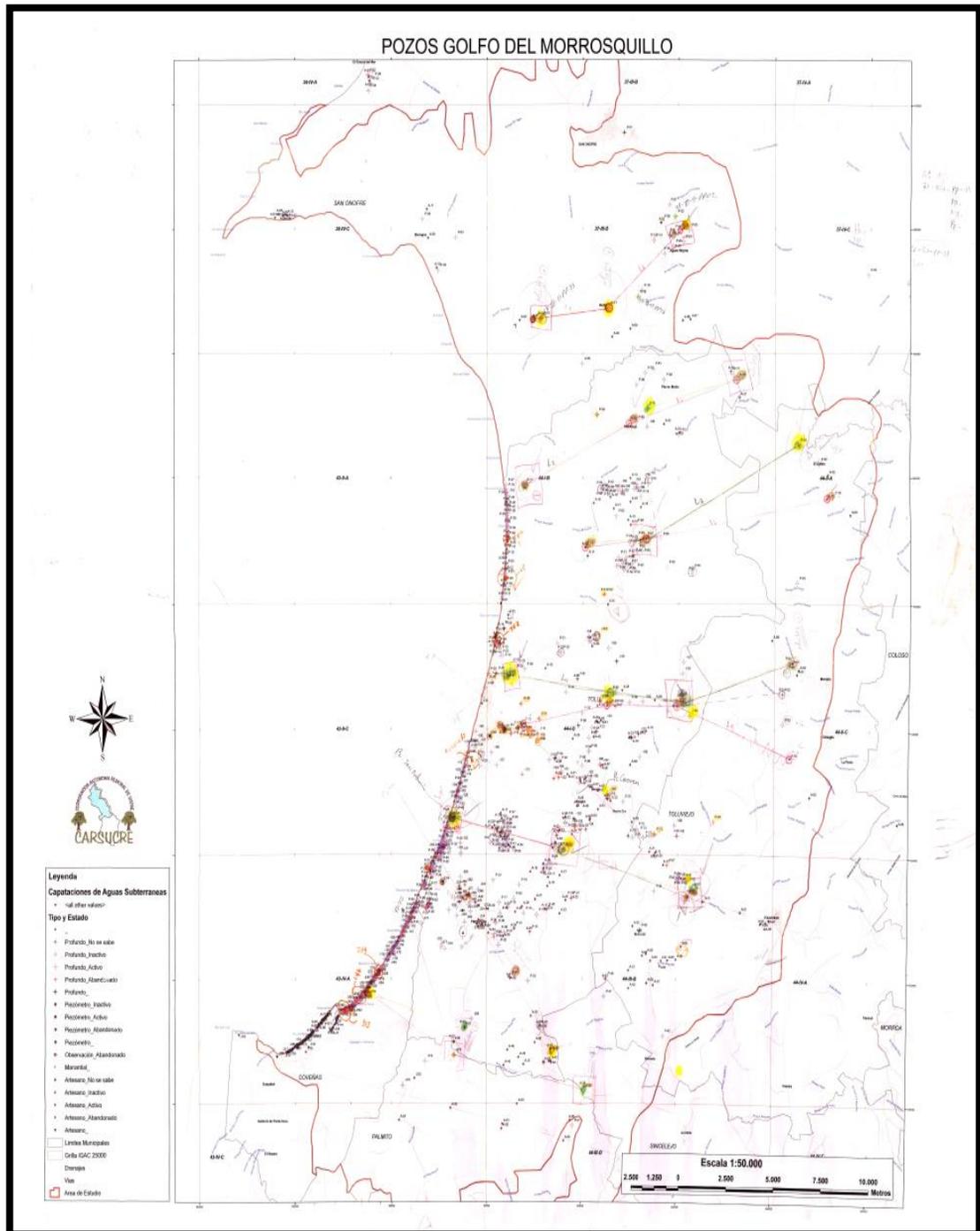
NIVEL 2: acuífero semiconfinado, se encuentra a profundidades entre 26 y 50 metros, a su vez, está constituido por capas y lentes de arenas gruesas y gravas finas. Se encuentran aguas duras con altos contenidos de calcio y valores tolerables de cloruros.

NIVEL 3: es de tipo confinado y se encuentra a profundidades mayores de 50 metros. La calidad del agua tiene características similares a las del acuífero 2.

De abril a diciembre de 2008 se realizaron 8 pruebas de bombeo a caudal constante, en pozos ubicados en fincas, cabañas y condominios²³.

²³ HERRERA MARMOLEJO, Rosana. Determinación de parámetros hidráulicos subterráneos del acuífero Morrosquillo en base a resultados de pruebas de bombeo y monitoreos de niveles. Sincelejo. 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola. p.15

Figura 20. Mapa de localización de Pozos



Fuente. CARSUCRE. Mapa de localización de Pozos en el Golfo de Morrosquillo. 2013

3. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales retos que afronta la humanidad, es el de la buena gestión del recurso hídrico, ya que el suministro de agua dulce en la cantidad y calidad suficientes que permitan satisfacer las necesidades actuales y futuras de consumo doméstico, industrial y agrícola, es cada vez más restringido.

Debido a la gran importancia que tiene el Agua Subterránea, en los recientes años se ha presentado una tendencia creciente de estudios e investigaciones acerca del aprovechamiento de los recursos hídricos, lo cual se engloba en el estudio de la Hidrogeología.

El estudio del agua en la Zona Saturada (ZS) es importante para la realización de obras de Ingeniería e investigaciones geológicas y muy especialmente para el desarrollo de obras de captación del Agua Subterránea con fines de abastecimiento para las distintas necesidades del hombre²⁴.

Aproximadamente, el 30% del agua dulce de la hidrósfera se encuentra almacenada en el subsuelo. En muchos lugares del mundo, donde la disponibilidad de aguas superficiales, en cantidad o calidad es limitada, las poblaciones se abastecen de agua subterránea; por tal razón, este es considerado un recurso estratégico. Debido a los prolongados tiempos de almacenamiento y circulación de las aguas en el subsuelo, una vez estas se contaminan, su descontaminación es una tarea casi imposible, además, según el tiempo y el modo de recarga y la sobreexplotación de los reservorios, puede conducir a su desaparición. Por estas razones, para garantizar la sostenibilidad de los acuíferos es necesaria una adecuada gestión²⁵.

Muchos países, disponen de gran longitud de costas y una buena parte de la

²⁴ PÉREZ FRANCO, Diosdado. Op. cit. p.15

²⁵ CUSTODIO GIMENA, Emilio y LLAMAS, Manuel Ramón. Hidrología Subterránea. Barcelona: Omega, 2014. Tomo II. 1194 h. p.46

población, agricultura e industrias, se sitúa a lo largo de las mismas, ocasionando una importante extracción de agua subterránea de acuíferos costeros. El estudio de estos sistemas involucra además de las dificultades habituales en el estudio del movimiento del agua subterránea, la relación existente entre aguas dulces y saladas (aguas de diferentes densidades), que tiene gran importancia debido al riesgo de contaminación del acuífero con agua de mar, lo cual generalmente, se produce cuando las extracciones superan a la recarga y se rompe el equilibrio en la interfaz agua dulce – agua salada.

El acuífero Morrosquillo, se constituye en la principal fuente de abastecimiento de agua para la población de la zona costera del Departamento de Sucre y para los miles de turistas que frecuentan sus playas en épocas de verano. Actualmente, se han inventariado 1658 pozos por CARSUCRE, detectando amenazas cada vez más crecientes, como lo son: la explotación indiscriminada, la Intrusión Marina, la contaminación por vertimientos domésticos, utilización de plaguicidas y fertilizantes.

¿Se podrá establecer la Vulnerabilidad por Intrusión Marina en el acuífero Morrosquillo en el sector del campo de pozos municipal urbano de Santiago de Tolú, mediante la aplicación del método GALDIT?

4. MARCO JURÍDICO

La Constitución de 1991 de Colombia, marcó una nueva época para la sociedad, al establecer el ambiente sano como un derecho fundamental de las personas, tal como se puede evidenciar en su artículo 79, en el cual textualmente se dice que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano”; por tanto, es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”.

El Estado es el ente encargado de la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución.

Cabe aclarar que, lo establecido en la Constitución se empezó a reglamentar en diciembre de 1993 y en ese marco surgió la Ley 99 de 1993 que creó el Ministerio del Medio Ambiente. Como resultado de la presente Ley, el abastecer de agua potable a una comunidad es una actividad productiva y al realizarse en una franja costera colombiana, esta actividad debe desarrollarse en el marco de unos lineamientos ambientales que estén sujetos a la Política Nacional del Manejo Integral de las Zonas Costeras de Colombia.

Para llevar a cabo lo anterior, el Ministerio del Medio Ambiente coordina con el apoyo de la respectiva autoridad ambiental regional, las Corporaciones Autónomas Regionales CARS, en éste caso CARSUCRE, el proceso de la concertación regional y local de las acciones sujetas a las directrices establecidas en la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia.

Con las políticas del MAVDT, el MIZC es un proceso de planificación dirigido hacia un área compleja y dinámica que se enfoca en las interfaces mar-tierra, la cual considera los siguientes aspectos:

- ❖ Una ética de conservación de los ecosistemas.
- ❖ Metas socioeconómicas.
- ❖ Un estilo de manejo activo participativo y de solución de los problemas.
- ❖ Una fuerte base científica.

El área de estudio del presente trabajo se encuentra en la franja costera del Municipio de Santiago de Tolú. Por lo tanto, el marco legal de las actividades que se recomienda como expresión del alcance de la presente investigación para lograr el reordenamiento del uso del agua subterránea que abastece el acueducto actual de Tolú, está constituido por los decretos específicos de la Ley 99 de 1993, vigilado por CARSUCRE, en su cumplimiento jurisdiccional.

Cabe resaltar, la Resolución 0279 de abril 6 de 2001, por medio de la cual se fijan los parámetros para la legalización de las técnicas de aprovechamiento de las aguas subterráneas, como un principio de establecer su uso sostenible, que es el propósito y meta con el acuífero costero Morrosquillo.

Por otra parte, se tiene el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS, instrumento que se encarga de presentar los requisitos, parámetros y procedimientos técnicos mínimos a seguir para la concepción, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento de Acueductos y potabilización de aguas con tal de garantizar su seguridad, durabilidad y funcionalidad.

5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Un acuífero se entiende como una unidad de roca o sedimento capaz de almacenar y transmitir agua, al tiempo que, se considera como un sistema que involucra las zonas de: recarga, tránsito y descarga, así como sus interacciones con otros acuíferos, aguas superficiales y marinas.

Actualmente, los acuíferos se enfrentan a diversos contaminantes naturales y artificiales, los cuales ponen en riesgo la calidad y cantidad del agua dulce. A partir de estas condiciones, nace el término de “Vulnerabilidad”, el cual se ha convertido en un tema de interés en el marco de la gestión del recurso hídrico, cuya evaluación y análisis tiene como pilares: La protección del agua subterránea, prevención de la contaminación y el mantenimiento de la calidad del agua subterránea no contaminada.

La “Vulnerabilidad” mencionada anteriormente, se hace más crítica en acuíferos costeros, en los cuales se establece un equilibrio entre el flujo de agua dulce y el flujo de agua salada que, en condiciones no influenciadas, sólo se altera a consecuencia de variaciones de la recarga natural²⁶. Estas variaciones son de rango estacional en sistemas de elevada inercia, como puede esperarse en acuíferos notablemente karstificados o detríticos de muy alta transmisividad, pero frecuentemente se producen de manera muy lenta.

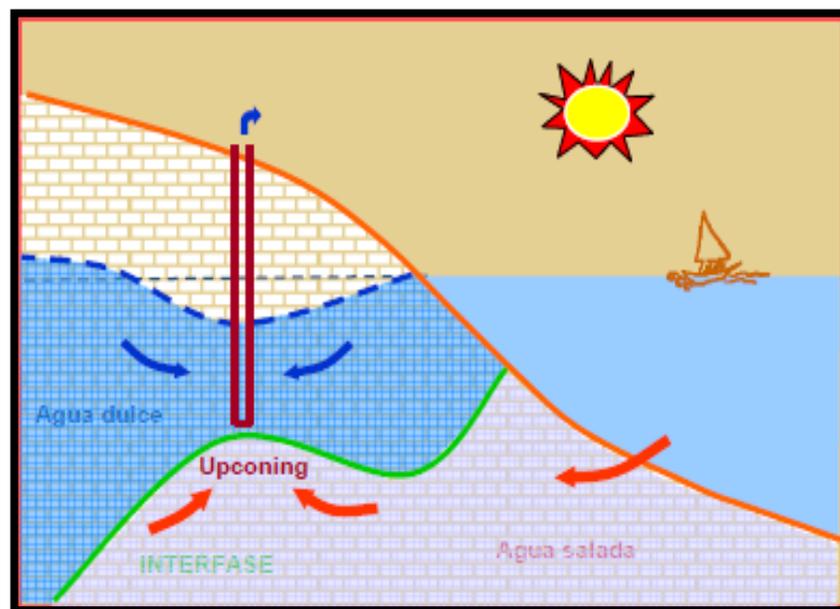
Los acuíferos costeros son susceptibles al fenómeno de Intrusión Marina, entendido éste como la intensificación del flujo de agua salada hacia el interior del acuífero y se produce como consecuencia del aumento de la explotación del acuífero y/o por disminución de la recarga natural. El descenso piezométrico provocado por la explotación altera el equilibrio, favoreciendo el avance del agua

²⁶ INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Propuesta de Indicador de Estado de Intrusión Marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la Provincia de Castellón. Castellón: Volumen I. 2009. p.10

salada y con ello, la formación de Up-Conings²⁷ (Conos salinos localizados), por lo que aumenta notablemente la concentración de Cloruros en las aguas subterráneas.

De acuerdo a estudios realizados por la Dirección General del Agua del Instituto Geológico y Minero de España en el año 2009, el proceso de Intrusión no suele afectar con la misma intensidad a la totalidad del acuífero. Ello, es debido, básicamente a dos circunstancias: la primera es que la Vulnerabilidad Intrínseca y específica a la Intrusión no es homogénea y la segunda, que las presiones que dan lugar a la Intrusión no se reparten de manera regular en el espacio.

Figura 21. Representación de un Up-Coning



Fuente. Instituto Geológico y Minero de España. Propuesta de Indicador de Estado de Intrusión Marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la Provincia de Castellón. Castellón: Volumen I. 2009. p.16. 2009

²⁷ Ibid. p.16

Para estudiar este fenómeno que tanto afecta a acuíferos costeros, se han propuesto índices de Intrusión Marina con diferente complejidad. Todos ellos, se basan en la utilización de algún parámetro físico-químico y en algunos, además, en datos morfológicos y/o piezométricos.

En primera aproximación, de acuerdo al Instituto Geológico y Minero de España, los índices más habituales pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- ❖ Índices Hidrogeoquímicos (Voudouris, 2004)
- ❖ Índices basados en datos morfológicos, piezométricos y de calidad (Navarro y Murillo, 2007)
- ❖ Índices basados en datos de calidad (Navarro y Murillo, 2007)
- ❖ Índices descriptivos (Ballesteros, 2008)
- ❖ Índices basados en mapas de Vulnerabilidad (Modelo GALDIT, Chachadi, 2005; modelo GOD, Ertekin, 2005)
- ❖ Índices basados en modelos matemáticos

Con el transcurrir del tiempo, en Colombia se han elaborado numerosas investigaciones que responden a la preocupación de la calidad y cantidad del recurso hídrico, cuyo tema gira en torno a la Vulnerabilidad de las aguas necesarias para consumo humano, las cuales en zonas costeras provienen de la explotación de acuíferos propios de la región.

La principal fuente de abastecimiento de agua de los habitantes del Departamento de Sucre es el agua subterránea, la cual es captada por medio de pozos profundos, pozos artesanos y manantiales; debido a la importancia del recurso hídrico subterráneo en zonas costeras, la Corporación Autónoma Regional de Sucre “CARSUCRE” ha diseñado un Plan de Manejo del Acuífero Morrosquillo con miras a minimizar la problemática de contaminación y sobreexplotación que atraviesa la única fuente de abastecimiento de agua potable con que cuentan los habitantes de la zona, de igual manera, la Entidad Ambiental en cuestión, busca inculcar la protección del recurso hídrico subterráneo para generar actitudes

encaminadas a la conservación y preservación del acuífero.

La Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”. Núcleo Guanare, Estado Portuguesa, en conjunto con la Corporación Autónoma Regional de Sucre “CARSUCRE”²⁸, Departamento de Sucre, Colombia, realizaron una investigación en la cual tomaron información de lo inquirido por Martínez en el 2009, quien realizó un Estudio Hidrogeoquímico en el Acuífero Morrosquillo, determinando las facies de estas aguas, demostrando que en algunas zonas las facies cloruradas estaban relacionadas al proceso de intrusión salina, pero no fue comprobado si el resultado arrojado estaba vinculado a un proceso de intrusión o a un proceso de mezcla con aguas fósiles. Por eso para efectos de éste estudio, se quiso conocer el tipo de reacción química presente en la interfaz entre el Acuífero de Morrosquillo con el agua de mar y determinar en detalle si se trató de un proceso de contaminación salina por agua de mar. Los resultados obtenidos, mostraron que el inicio del proceso de contaminación por Intrusión Marina está ubicado en la zona centro-sur de Tolú y norte de Coveñas, y que algunos puntos que en el 2009 se asumieron como evidencia de este proceso, estaban relacionados a mezcla con aguas fósiles.

Se han elaborado, de igual manera, guías metodológicas como la de María Consuelo Vargas Quintero, enfocándose en el estudio de la Vulnerabilidad que sufren los acuíferos por la acción de diversos contaminantes, a la vez que expone los métodos más eficaces para el estudio de éstos, como lo son: DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK y GALDIT, denominados por la autora como “Métodos de Índice”²⁹.

De los métodos anteriormente citados, se aplicará en la presente Investigación: el

²⁸ CARRILLO, Jhessenia; VELAZCO, Claudia y HERRERA, Héctor. Determinación de reacciones químicas en interfaz de un acuífero costero. Caso: Golfo de Morrosquillo. Sucre-Colombia. 2013

²⁹ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C: 2010. p.13

Método GALDIT ya que en éste se tiene en cuenta la variable “Impacto existente de la Intrusión Marina” (I), considerando el movimiento de las masas de agua salada tierra adentro como flujo principalmente horizontal. Vargas Quintero a partir de su publicación elabora conclusiones, como: “La Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación se define como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente por una carga contaminante, entendiendo que la carga contaminante es una amenaza, que la Vulnerabilidad Intrínseca es independiente de la intensidad y aplicación de esta carga y que el bien a proteger es el agua subterránea”.

De igual modo, explica: “El mayor problema en la aplicación de cualquiera de las metodologías expuestas en la guía, es la “incertidumbre” de la valoración de la contribución real de cada uno de los factores o parámetros; incertidumbre que se debe a la validez de las metodologías debido principalmente, a la escasa experiencia en la validación y verificación a nivel mundial”. Adicionalmente explica que: “No existe una única metodología recomendable para la evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la contaminación, debido a que se pueden obtener diferentes resultados para un mismo acuífero, con un mismo nivel de información, requiriéndose por lo tanto la evaluación, modificación y validación de los resultados obtenidos con base en el conocimiento de la zona y en los parámetros químicos indicadores de contaminación”³⁰.

En cuanto a estudios realizados específicamente en el Acuífero Morrosquillo, se resalta la investigación elaborada por el Ing. Guillermo Gutiérrez Ribón a partir de la cual elaboró un Diagnóstico Ambiental del Acuífero Costero Golfo de Morrosquillo, Zona Litoral Tolú - Coveñas, teniendo en cuenta aspectos Geológicos, Hidrogeológicos y Geofísicos e Hidroquímicos con los que determinó las variaciones de las aguas apoyado en una localización estratégica de Cortes Geoeléctricos y Sondeos Eléctricos Verticales. De igual modo, determinó: el Balance Hídrico y la relación de extracciones vs recarga, la caracterización

³⁰ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. *Ibíd.* p.27

fisicoquímica y clasificación de las aguas en relación con el proceso de Salinización mediante ensayos en laboratorios (Unicórdoba, Dasssalud, Unisucre), el análisis del impacto ambiental por salinización de aguas dulces, la relación acuífero – mar en el proceso de Salinización y las propiedades del suelo³¹.

En la elaboración del Diagnóstico en cuestión, el Ing. Gutiérrez hizo explícita la localización de las estaciones hidrometeorológicas IDEAM en el Golfo de Morrosquillo, aplicando el Método de Thiessen. En cuanto a la relación Acuífero – Mar, se especificaron: la correlación de niveles entre acuífero y mar, niveles estático y de bombeo, perfil topográfico y gradiente hidráulico.

En la predicción y análisis del impacto ambiental por salinización de aguas dulces, el Ing. Gutiérrez empleó el Decreto 1180 de 2003 MAVDT y la Metodología de ETA Canter 1998 (Esquema de las etapas del planteamiento conceptual). Como información adicional, se tuvo en cuenta el inventario de pozos en el área urbana y en el campo de abastecimiento de Santiago de Tolú de 1997 a 2002.

De la elaboración del mencionado Diagnóstico, el Ing. Gutiérrez predijo a partir de observaciones, que: “Respecto a la cantidad de agua subterránea los elementos identificados, son: aumento de extracciones para el abastecimiento de agua potable a Santiago de Tolú, aumento de la población flotante de índole turismo y recreación en el área urbana densamente poblada y a lo largo de la zona costera, con énfasis en Coveñas y Coveñitas, aumento de la precipitación en la cuenca costera y comportamiento constante en la temperatura media multianual tanto mensual como anual. Respecto a la calidad del agua subterránea los impactos identificados, son: La salinización de las aguas subterráneas por la Intrusión Marina en la época de verano (al menos), la cual viene alterando la calidad natural del agua dulce como fuente de abastecimiento público y la salinización de los suelos de la zona no saturada, dado el depósito de las aguas utilizadas para el

³¹ GUTIÉRREZ RIBÓN, Guillermo Enrique. Diagnóstico Ambiental del Acuífero Costero Golfo de Morrosquillo, Zona Litoral Tolú – Coveñas. 2004. Bogotá D.C. 288 h. Trabajo de grado (Maestría Ambiental con énfasis en Sanitaria). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

riego agrícola”.

De acuerdo al diagnóstico mencionado, las características hidráulicas del acuífero y específicamente de los puntos de captación principales del Municipio de Santiago de Tolú establecen conjuntamente con los aspectos geológicos que el acuífero es multicapa, de baja permeabilidad, de baja conductividad hidráulica y transmisividad igual, de muy bajo coeficiente de almacenamiento y con un bajo tamaño del espesor saturado. El descenso de los niveles estáticos ostensiblemente por debajo del nivel del mar hidráulicamente propicia la generación del gradiente salino y facilita una mejor tasa de infiltración a la zona no saturada (ZNS). La calidad de las aguas subterráneas en estudio oscila entre dulce y salobre, la cual aun permaneciendo como agua dulce evidentemente ha arrojado un aumento en últimos años de los valores de la Conductividad Eléctrica, Residuo Seco, Alcalinidad y Dureza Total.

Cabe resaltar, la investigación realizada por Lucellys Sierra Márquez (2009)³² en el desarrollo de su Pasantía en CARSUCRE, acerca de la Caracterización Hidroquímica del Acuífero Morrosquillo, con la cual logró determinar que las aguas de este acuífero son predominantemente bicarbonatadas cálcicas, cloruradas cálcicas y cloruradas sódicas y que el mayor deterioro de la calidad del agua subterránea se presenta a lo largo de la zona costera, entre Tolú – El Francés y en la zona de Punta e Piedra (Coveñas), ya que son cloruradas sódicas, debido posiblemente a fenómenos de Intrusión de la Cuña Marina.

De igual modo, se destaca a Rosana Herrera Marmolejo (2009)³³, quien también en el desarrollo de su Pasantía en CARSUCRE realizó una investigación sobre la determinación de parámetros hidráulicos subterráneos del Acuífero Morrosquillo con base en resultados de pruebas de bombeo y monitoreos de niveles, con lo

³² SIERRA MARQUEZ, Lucellys Irina. Caracterización Hidroquímica del acuífero Morrosquillo. Sincelejo. 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola. p.15

³³ HERRERA MARMOLEJO, Rosana. Op. cit. p.15

cual pudo determinar que “la Conductividad Hidráulica del Acuífero Morrosquillo varía entre 100 m/día en el pozo 44-I-D-PP-01, ubicado en la zona sur-oriental (sector de Tolú Viejo) y 0.421 m/día en el pozo 43-IV-A-PP-55 en la zona sur-occidental, sector de Coveñas y los datos hidráulicos en términos de transmisividad varían desde 3 m²/día hasta 602 m²/día en los pozos 43-IV-A-PP-206 en la zona sur-occidental y 44-I-D-PP-01 en la zona sur-oriental. Sin embargo, recomendó continuar con la realización de estudios hidráulicos más detallados particularmente en los Municipios de Santiago de Tolú y San José de Tolú Viejo que a pesar de contar con captaciones subterráneas, el mayor porcentaje de estas no tienen características hidráulicas definidas en cuanto a capacidad de transmitir y conducir agua a través del acuífero.

Cabe resaltar que, Herrera Marmolejo para el cálculo de la Conductividad Hidráulica empleó la prueba de Slug, aplicando las ecuaciones del método Gilg – Gavard, nivel variable, por el cual se introduce un volumen de agua en el instante inicial y posteriormente, se mide la evolución de la recuperación. En éste caso, se utiliza la expresión:

$$K = \frac{1,308 * d^2}{A * h_m} * \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

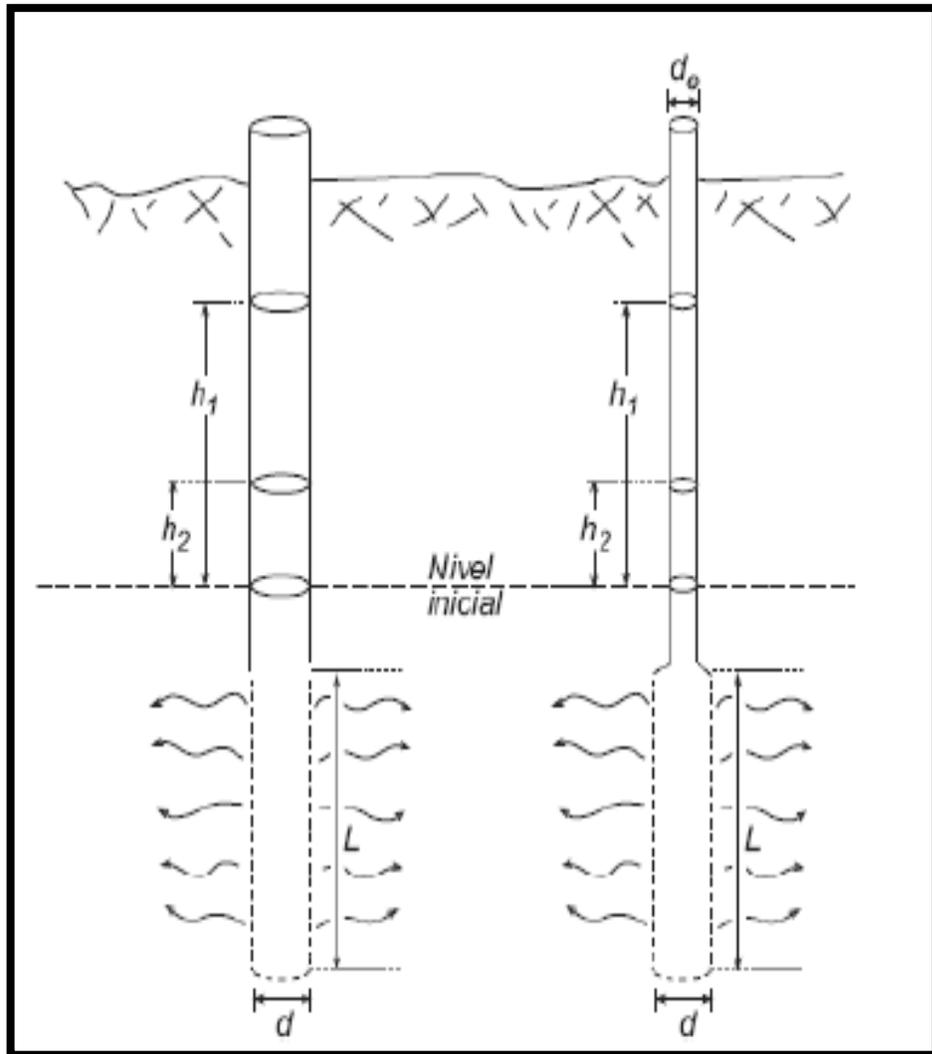
Donde:

- K= Permeabilidad (cm/seg)
- Δh = Bajada del nivel (metros) en un tiempo Δt
- Δt = Intérvalo de tiempo (minutos) en el que hemos medido el descenso
- d= Diámetro del Piezómetro (metros)
- A= factor de forma, según Custodio, 1983

$$A = (1,032 * L + 30 * d) \quad \text{si } L > 6m$$

$$A = (1,032 * L + 30 * d) * (-0,014 * L^2 + 0,178 * L + 0,481) \quad \text{si } L < 6m$$

Figura 22. Ensayo Slug



Fuente. HERRERA MARMOLEJO, Rosana. Determinación de parámetros hidráulicos subterráneos del acuífero Morrosquillo en base a resultados de pruebas de bombeo y monitoreos de niveles. Sincelejo. 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola. p.21

Como se dijo anteriormente, en el presente Trabajo se empleará el método de Índice GALDIT para evaluar el avance de la cuña marina o la Vulnerabilidad del acuífero costero Morrosquillo a la Intrusión Marina; para esto, se tendrán en cuenta los parámetros descritos en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de evaluación del Método GALDIT

Variable	Puntuación					Peso
	1	3	5	7	9	
G: Tipo de acuífero		Confinado	Ligeramente confinado	No confinado (libre)		1
A: Conductividad Hidráulica del acuífero (m/día)	<3	3 – 8	8 - 15	15 - 30	>30	2
L: Nivel del agua subterránea sobre el mar (m)	>10	10 – 0	0 - (-5)	(-5) - (-10)	<- 10	5
D: Distancia tierra dentro perpendicular a la línea de costa	>20	20 – 12	12 - 7,7	7 - 3	<3	3
I: Impacto existente de la intrusión marina [Cl/HCO ₃](meq/l)	<0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5	>1,5	6
T: Espesor del acuífero (m)	>25	25 – 15	15 - 10	10 - 5	<5	3

Fuente. VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la contaminación³⁴.

³⁴VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la Contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C. 2010. p.28

El Índice GALDIT, se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$iVGALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i \times R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i}$$

Los resultados de esta evaluación permiten, por tanto, clasificar la Vulnerabilidad de los acuíferos costeros en tres grupos de rangos, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de la Vulnerabilidad – Método GALDIT.

RANGO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	CLASIFICACION DE LA VULNERABILIDAD
≥7,5	Alta
5 - 7,5	Moderada
< 5	Muy baja

Fuente. VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la contaminación³⁵.

³⁵ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos a la Contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C. 2010. p.29

6. MARCO METODOLÓGICO

Las características fisicoquímicas que se tuvieron en cuenta en esta investigación fueron: pH, t, CE, OD y salinidad, las cuales fueron determinadas in situ, también se contó con pruebas de laboratorio como: pH, CE, alcalinidad (TAC), dureza total (TSD), Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4 y HCO_3 , además de los valores de la relación química $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$, que se constituyen en un índice fundamental de Intrusión Marina. Cabe resaltar que la información de éstas características fue suministrada por CARSUCRE.

Los parámetros fisicoquímicos, se establecieron mediante el muestreo estandarizado de aguas de pozos profundos y piezómetros del campo municipal de Tolú, georreferenciados por CARSUCRE, utilizando los equipos tipo WTW 350 i y Hach.

Las propiedades hidráulicas e hidrogeológicas del área en estudio del acuífero se determinaron mediante pruebas de bombeo y pruebas tipo Slug en pozos profundos y pozos piezómetros, respectivamente; estos ensayos fueron realizados y/o analizados por el grupo investigador.

De igual modo, se emplearon los equipos indicados en los procedimientos estandarizados, entre ellos: Sonda Eléctrica para medir niveles marca SEBA Hydrometrye de 100 m; Sonda eléctrica SOLINST de 100m; GPS marca 76 CSX GARMIN, recipientes plásticos de volumen unitario 20 L, cronómetro, flexómetros, formatos para consignar datos de campo y herramientas de fontanería; todo esto, para medir la Conductividad Hidráulica, aplicando el método Slug.

Los equipos relacionados anteriormente, son de propiedad de la Corporación Autónoma Regional de Sucre CARSUCRE y fueron operados por personal técnico calificado, con el acompañamiento del grupo de investigadores GIMAGUAS del

programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Sucre, institución que aportó recursos económicos y en especie para apoyar la investigación presente.

6.1 ACTIVIDADES DE OFICINA – CONSULTORÍA INVESTIGATIVA

Estas actividades consistieron en:

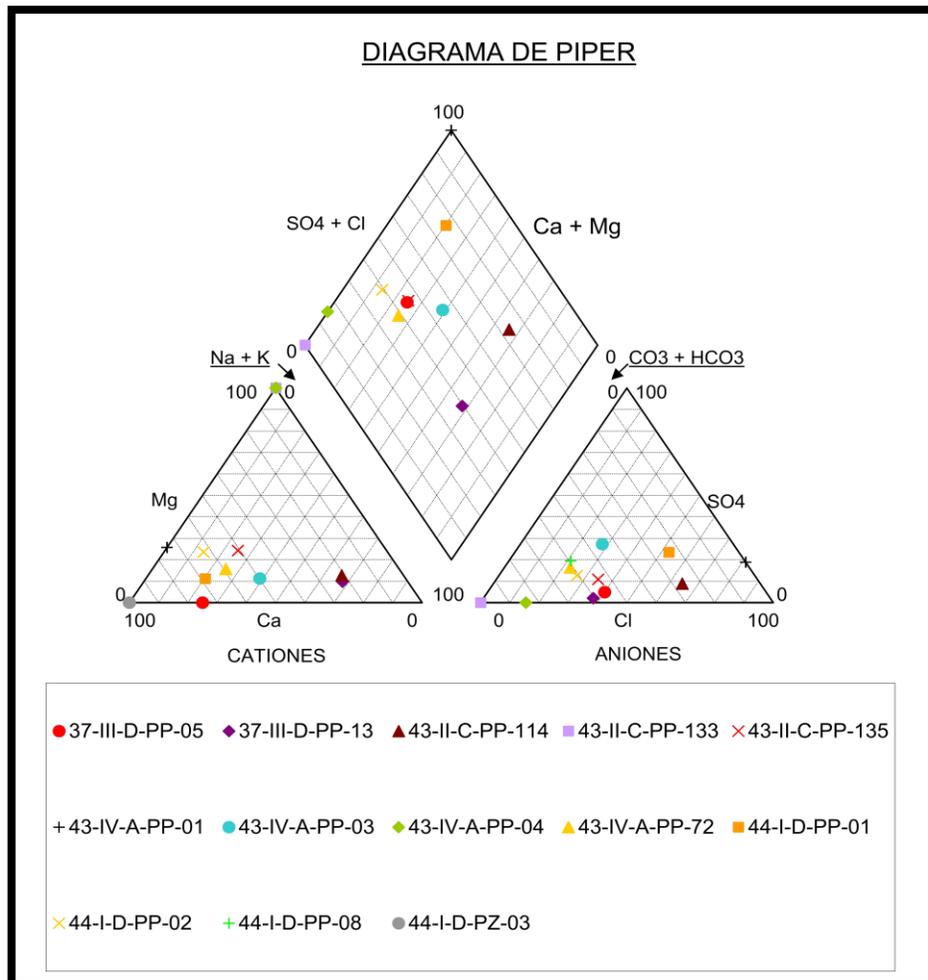
1. Una revisión exhaustiva de los antecedentes y fundamentos científicos de la temática del marco conceptual, técnico y legal inherentes a la contaminación de acuíferos costeros por Intrusión Marina.
2. Redacción del Estado del arte.
3. Diseño del marco metodológico pertinente a los equipos, manual de procedimientos, normatividad, cálculos y utilización de los software para determinar los parámetros hidroquímicos y las características hidrogeológicas en el acuífero.
4. Tabulación de datos y cálculo de las Vulnerabilidades para cada uno de los pozos estudiados mediante la utilización del software matemático y estadístico Microsoft Excel.
5. Elaboración de mapas de isocloruros, zonificación de impactos, clasificación de aguas y Vulnerabilidad, mediante aplicativos de informática como Surfer versión 10 o ArcGis versión 9.
6. Elaboración de documentos, artículos, ponencias y posters para la promulgación de los resultados de la investigación.

7. RESULTADOS

Los resultados se expresan a continuación, siguiendo el orden de los objetivos específicos logrados

7.1 DE LA CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL AGUA DEL ACUÍFERO, EN RELACIÓN A LA INTRUSIÓN MARINA, EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Figura 23. Diagrama de Piper correspondiente a aguas subterráneas del acuífero Morrosquillo



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Diagrama de Piper. 2014

En la figura 23, se representa claramente un Diagrama de Piper que para acuíferos costeros es de gran utilidad, ya que permite conocer la evolución geoquímica en el proceso de mezclas de aguas de diferente naturaleza³⁶.

Es así como, para cada pozo se pudo establecer el tipo de agua presente, en relación con la cantidad de Calcio, Bicarbonato, Magnesio o Sulfatos, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación química de las muestras de aguas subterráneas del acuífero Morrosquillo.

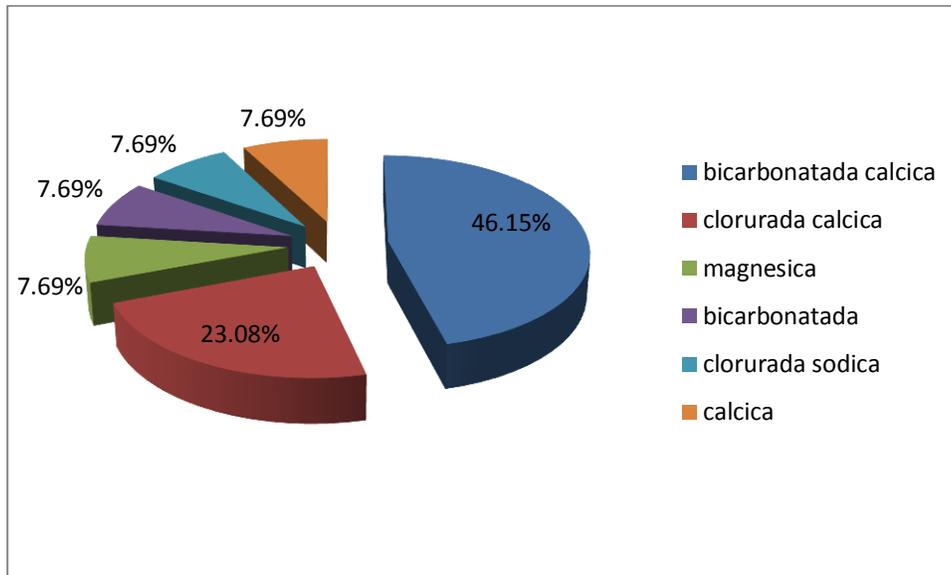
Pozo	Clasificación del Agua
37-III-D-PP-05	bicarbonatada cálcica
37-III-D-PP-13	bicarbonatada cálcica
43-II-C-PP-114	clorurada sódica
43-II-C-PP-133	bicarbonatada cálcica
43-II-C-PP-135	bicarbonatada cálcica
43-IV-A-PP-01	clorurada cálcica
43-IV-A-PP-03	clorurada cálcica
43-IV-A-PP-04	Magnésica
43-IV-A-PP-72	bicarbonatada cálcica
44-I-D-PP-01	clorurada cálcica
44-I-D-PP-02	bicarbonatada cálcica
44-I-D-PP-08	Bicarbonatada
44-I-D-PZ-03	Cálcica

Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Clasificación química de las muestras de agua subterránea del acuífero Morrosquillo. 2014

³⁶CASTILLO PÉREZ, Emilio y MORELL EVANGELISTA, Ignacio. La Hidroquímica en los estudios de Intrusión Marina en los acuíferos españoles. Monografía. 1990. Investigaciones Geológicas y Mineras, S.A, Colegio Universitario de Castellón. p.26.

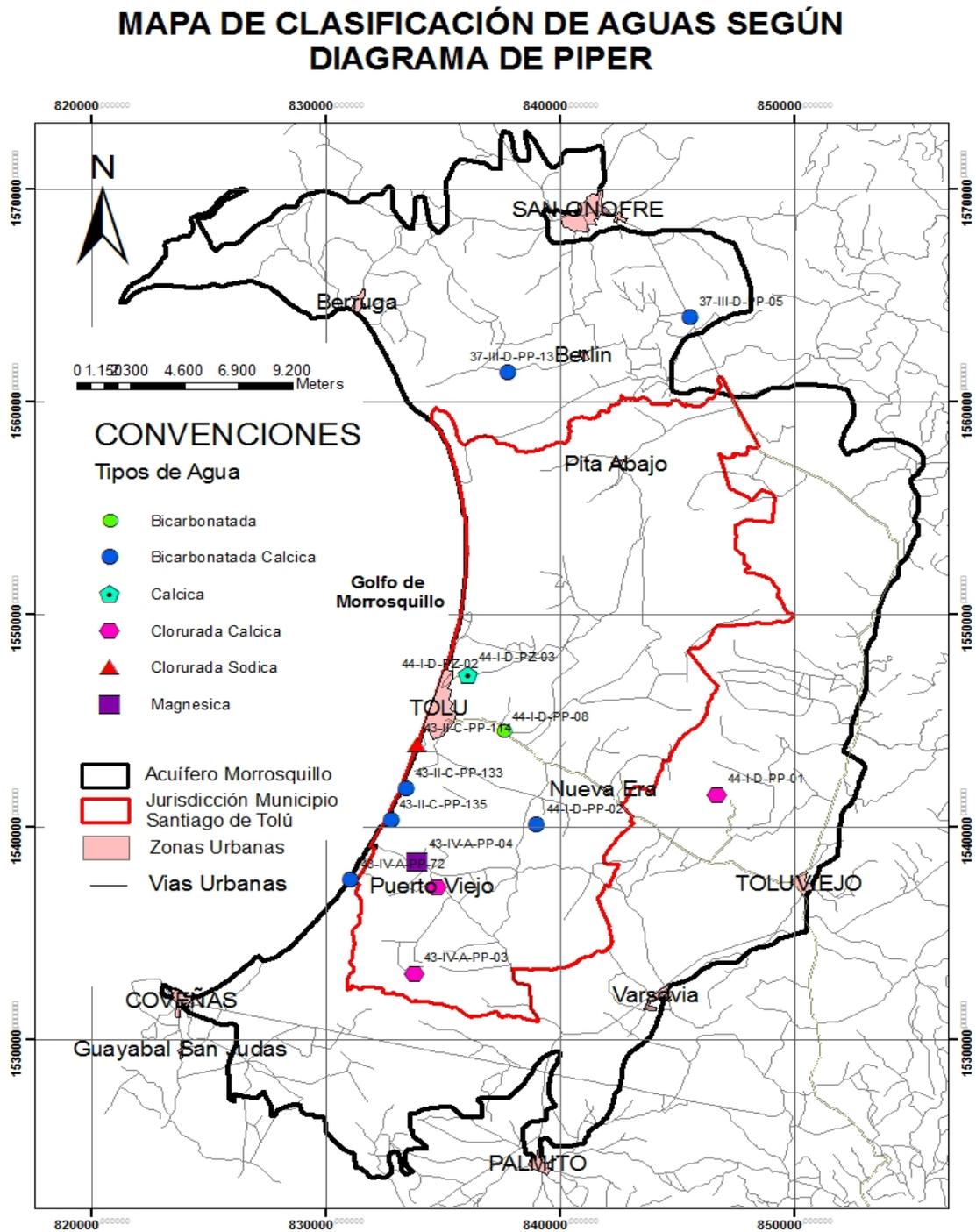
De manera estadística, empleando el software Excel, se pudo establecer la distribución en porcentaje de estas aguas, como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Porcentajes de acopio de los tipos de agua



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Porcentaje de distribución de las aguas subterráneas del acuífero Morrosquillo, jurisdicción de Santiago de Tolú. 2014

Figura 25. Mapa de Clasificación de agua, según Diagrama de Piper



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Mapa de clasificación de aguas según Diagrama de Piper. ArcGis versión 9.0. 2014

7.2 DE LA VULNERABILIDAD DETERMINADA DEL ACUÍFERO MORROSQUILLO, DEBIDO A LAS ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN Y POR EL IMPACTO DE LA INTRUSIÓN MARINA, A TRAVÉS DEL MÉTODO GALDIT

Primero, se procedió a realizar el cálculo de la Conductividad Hidráulica a partir del Ensayo de Slug, empleando la ecuación expuesta en el Marco Teórico, de acuerdo a los datos registrados en campo, con el fin de hacer comparativos con la información suministrada de ensayos realizados en 2009.

Estos datos se organizaron en una tabla, teniendo en cuenta la variable tiempo y el nivel del agua.

Tabla 4. Datos de campo del ensayo de Slug 44-I-D-PZ-02

Tiempo (min)	Tiempo Real (min)	Nivel agua (m)
0	10:55	0
0,5		1,52
1	10:56	2,04
1,5		2,36
2	10:57	2,59
2,5		2,745
3	10:58	2,86
3,5		2,945
4	10:59	3,005
4,5		3,05
5	11:00	3,08
5,5		3,105
6	11:01	3,13
6,5		3,145
7	11:02	3,158
7,5		3,166
8	11:03	3,175
8,5		3,183

9	11:04	3,19
9,5		3,195
10	11:05	3,2
11	11:06	3,21
12	11:07	3,218
13	11:08	3,222
14	11:09	3,229
15	11:10	3,231
16	11:11	3,235
17	11:12	3,236
18	11:13	3,239
19	11:14	3,2401
20	11:15	3,244
22	11:17	3,249
24	11:19	3,253
26	11:21	3,255
28	11:23	3,255
30	11:25	3,257
35	11:30	3,265
40	11:35	3,266
45	11:40	3,268
50	11:45	3,273
60	11:55	3,271
70	12:05	3,273
80	12:15	3,272
90	12:25	3,273
110	12:45	3,274

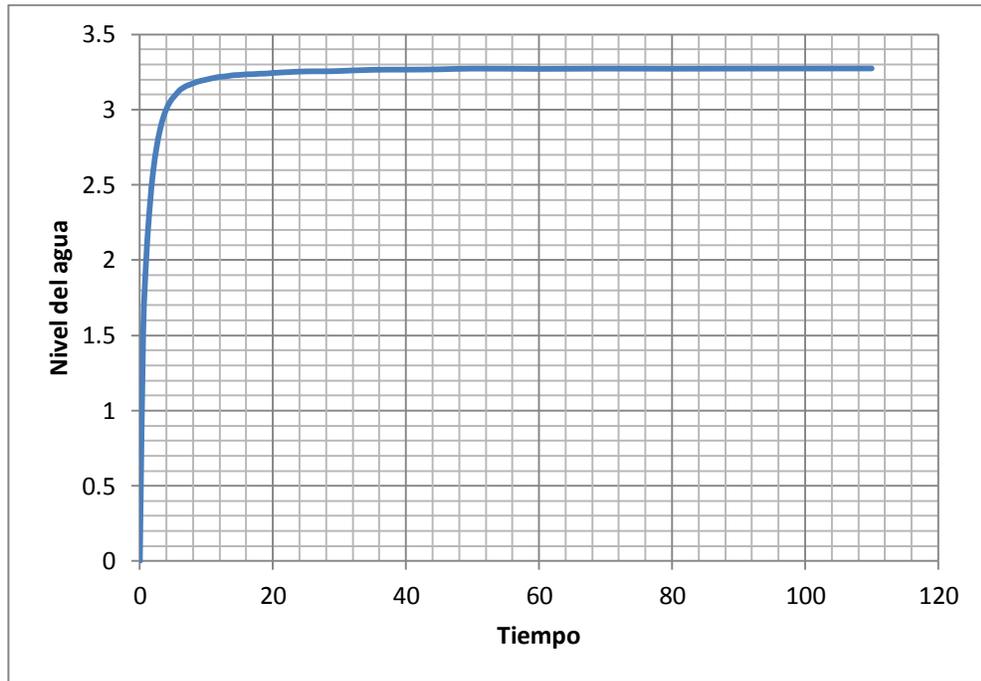
Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Datos de campo del ensayo Slug en el Pozo Piezométrico 44-I-D-PZ-02

Tabla 5. Datos de campo del ensayo de Slug 44-I-D-PZ-03

Tiempo (min)	Tiempo Real (min)	Nivel agua (m)
0	10:55	0
0,5		1,06
1	10:56	1,85
1,5		2,345
2	10:57	2,612
2,5		2,765
3	10:58	2,842
3,5		2,88
4	10:59	2,915
4,5		2,928
5	11:00	2,945
5,5		2,954
6	11:01	2,957
6,5		2,955
7	11:02	2,958
7,5		2,961
8	11:03	2,961
8,5		2,962
9	11:04	2,962
9,5		2,962
10	11:05	2,963
11	11:06	2,963
12	11:07	2,963

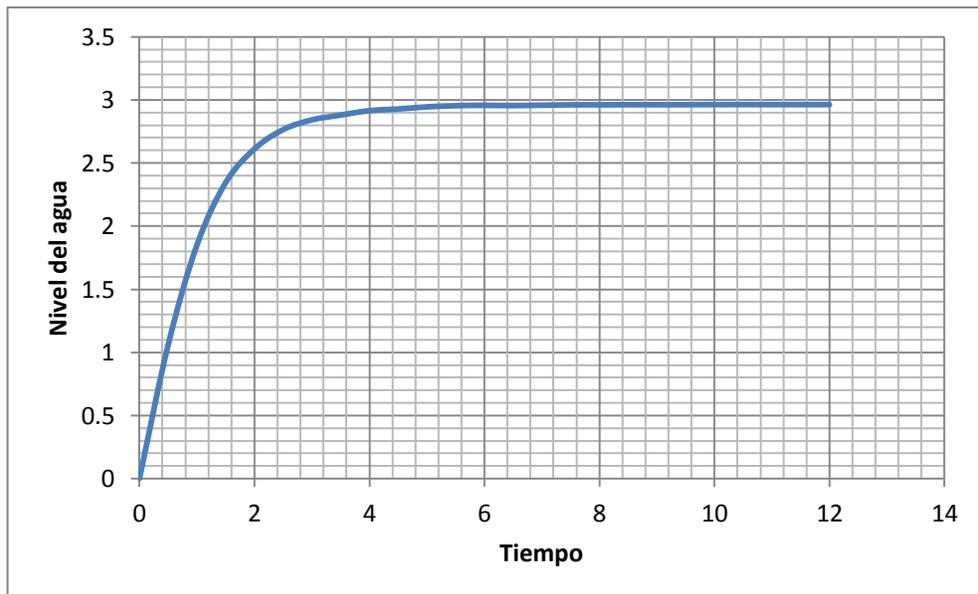
Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Datos de campo del ensayo Slug en el Pozo Piezométrico 44-I-D-PZ-03

Figura 26. Gráfica de ensayo Slug del Pozo 44-I-D-PZ-02



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. 2014

Figura 27. Grafica de ensayo Slug del Pozo 44-I-D-PZ-03



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. 2014

Con todos los datos de cada pozo, ya reunidos y concertados, se procedió a hacer el cálculo de los parámetros que demanda el Método GALDIT por pozo, arrojando los valores que se muestran en la tabla 6 y luego se hizo la respectiva clasificación de Vulnerabilidad en: Muy Bajo, Moderado o Alto.

7.3 RESULTADOS DE VULNERABILIDAD EMPLEANDO EL MÉTODO GALDIT

Tabla 6. Valores y características de los pozos muestreados para el cálculo de cada variable de GALDIT

Parámetro Pozos	G	A (m/día)	L (m)	D (km)	I (Mg/l)			T (m)
					Cl (Mg/l)	HCO ₃ (Mg/l)	CL/HCO ₃ (meq/l)	
37-III-D-PP-05	CONFINADO	21,60	1,76	11,67	57,93	317,95	0,31	4,00
37-III-D-PP-13	CONFINADO	4,72	8,58	6,84	192,31	533,50	0,62	2,83
43-II-C-PP-114	CONFINADO	12,10	-1,79	0,06	436,72	309,62	2,42	14,00
43-II-C-PP-133	CONFINADO	2,40	0,00	0,26	36,76	166,60	0,38	16,00
43-II-C-PP-135	CONFINADO	21,80	-0,42	0,23	1831,22	488,02	6,45	17,00
43-IV-A-PP-01	CONFINADO	26,90	4,40	3,03	93,70	461,30	0,35	20,00
43-IV-A-PP-03	CONFINADO	9,08	0,90	4,49	75,40	207,00	0,63	22,00
43-IV-A-PP-04	CONFINADO	1,00	0,90	1,70	34,00	318,00	0,18	33,00
43-IV-A-PP-72	CONFINADO	2,21	0,00	0,10	74,54	349,06	0,37	17,00
44-I-D-PP-01	CONFINADO	100,00	0,95	13,06	567,35	444,78	2,19	5,83
44-I-D-PP-02	CONFINADO	2,96	8,63	5,63	90,00	457,50	0,34	18,00
44-I-D-PP-08	CONFINADO	1,08	3,43	2,89	134,58	378,87	0,61	27,00
44-I-D-PZ-02	CONFINADO	0,05	0,38	0,61	1469,00	462,00	5,46	2,00
44-I-D-PZ-03	CONFINADO	0,33	0,51	0,61	493,00	838,00	1,01	2,00

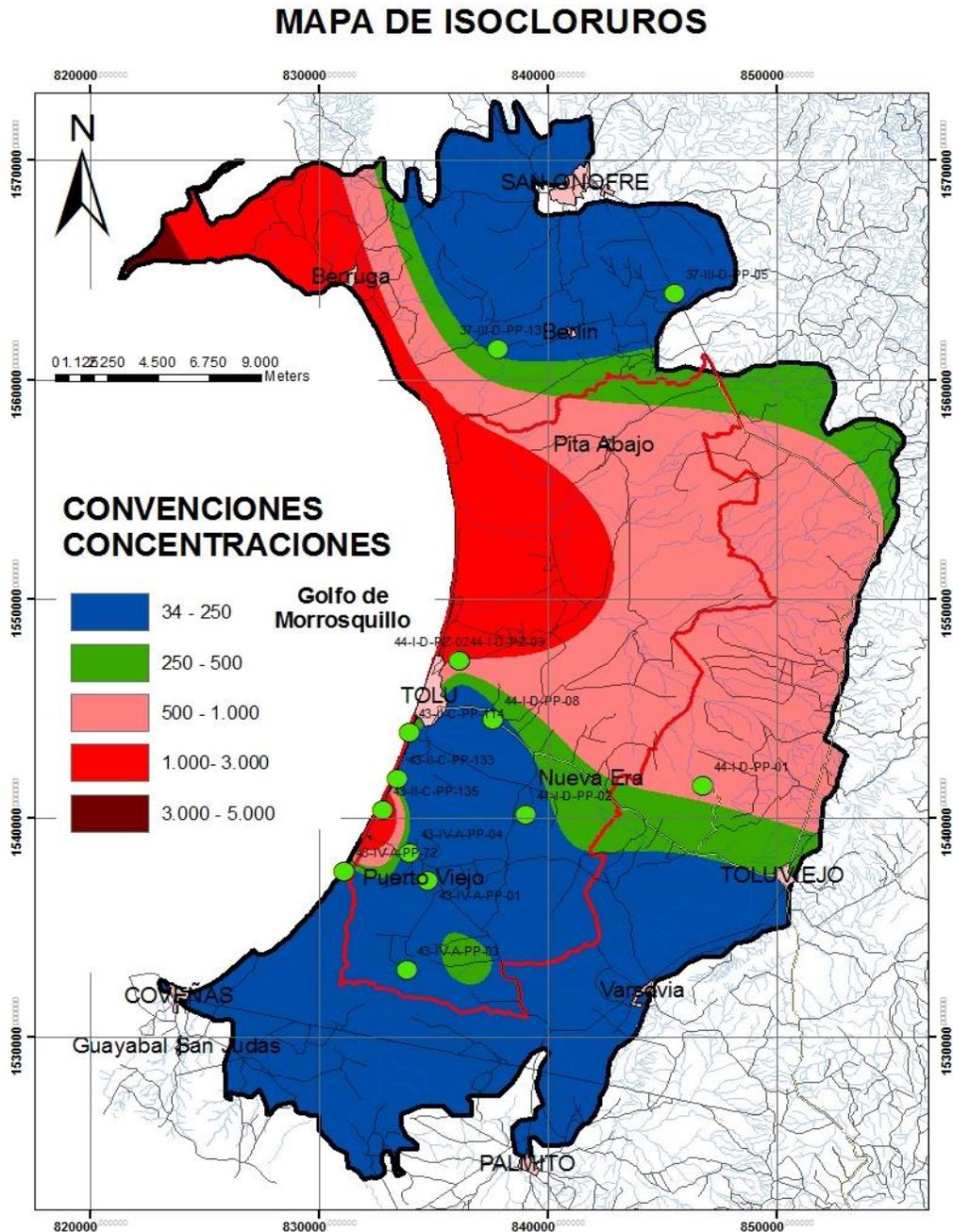
Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Valores de GALDIT para cada pozo muestreado. 2014

Tabla 7. Puntuación de cada parámetro de GALDIT y Nivel de Vulnerabilidad

Parámetro Pozos	PUNTUACION						Índice GALDIT	VULNERABILIDAD
	G	A	L	D	I	T		
37-III-D-PP-05	3,00	7,00	3,00	5,00	3,00	9,00	4,60	MUY BAJA
37-III-D-PP-13	3,00	3,00	3,00	7,00	5,00	9,00	5,10	MODERADA
43-II-C-PP-114	3,00	5,00	5,00	9,00	9,00	5,00	6,70	MODERADA
43-II-C-PP-133	3,00	1,00	5,00	9,00	3,00	3,00	4,20	MUY BAJA
43-II-C-PP-135	3,00	7,00	5,00	9,00	9,00	3,00	6,60	MODERADA
43-IV-A-PP-01	3,00	7,00	3,00	7,00	3,00	3,00	4,00	MUY BAJA
43-IV-A-PP-03	3,00	5,00	3,00	7,00	5,00	3,00	4,40	MUY BAJA
43-IV-A-PP-04	3,00	1,00	3,00	9,00	1,00	1,00	2,80	MUY BAJA
43-IV-A-PP-72	3,00	1,00	5,00	9,00	3,00	3,00	4,20	MUY BAJA
44-I-D-PP-01	3,00	9,00	3,00	3,00	9,00	7,00	6,00	MODERADA
44-I-D-PP-02	3,00	1,00	3,00	7,00	3,00	3,00	3,40	MUY BAJA
44-I-D-PP-08	3,00	1,00	3,00	9,00	5,00	1,00	4,00	MUY BAJA
44-I-D-PZ-02	3,00	1,00	3,00	9,00	9,00	9,00	6,40	MODERADA
44-I-D-PZ-03	3,00	1,00	3,00	9,00	7,00	9,00	5,80	MODERADA

Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Nivel de Vulnerabilidad para cada pozo muestreado. 2014

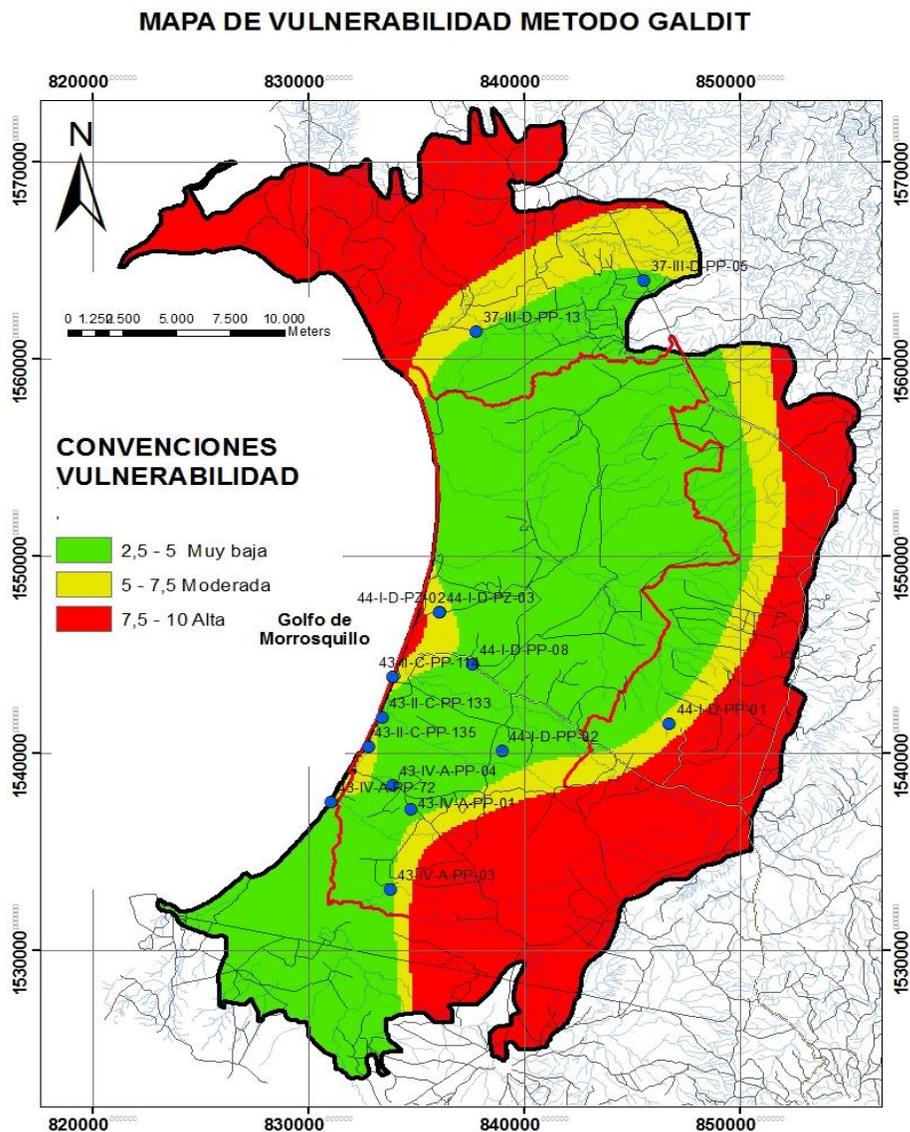
Figura 28. Mapa de Isocloruros



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Mapa de Isocloruros. ArcGis versión 9.0. 2014

Se elaboró un mapa en el cual se representaron con código de colores las zonas de Vulnerabilidades arrojadas por el Método GALDIT, como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Mapa de Vulnerabilidad acuífero Costero Morrosquillo. Zona Litoral Santiago de Tolú



Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. Mapa de Vulnerabilidad según el Método GALDIT. ArcGis versión 9.0. 2014

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

8.1 HIDROGEOQUÍMICA

En lo referente a la caracterización química de las aguas subterráneas de este estudio, predominan con un 46,15% las aguas bicarbonatadas cálcicas y en un 23,08% las aguas cloruradas cálcicas. En menor relación, con un porcentaje igual al 7,69%, se encuentran las aguas magnésicas, bicarbonatadas, cloruradas sódicas y cálcicas; las cuales se constituyen en una representación de la Hidroquímica de las aguas del acuífero Morrosquillo.

Las muestras de agua de los pozos 43-II-C-PP-135, 43-IV-A-PP-01, 43-IV-A-PP-03, 43-IV-A-PP-72, 44-I-D-PP-02, 44-I-D-PP-01 y 44-I-D-PZ-02 presentan valores altos de calcio; las muestras de los pozos 43-IV-A-PP-03, 37-III-D-PP-05, 43-II-C-PP-114, 43-IV-A-PP-04, 44-I-D-PP-08, 43-IV-A-PP-72, 43-II-C-PP-135, 44-I-D-PP-01, 44-I-D-PP-02, 37-III-D-PP-13, 43-II-C-PP-133 presentan valores altos de alcalinidad; Las muestras de los pozos 43-II-C-PP-114 y 44-I-D-PP-01 presentan valores altos de cloruros; las muestras de los pozos 43-IV-A-PP-01 y 43-IV-A-PP-04 presentan valores altos de dureza y la muestra del pozo 44-I-D-PP-01 presenta valores altos de sulfatos; lo que quiere decir que, la totalidad de las muestras no está cumpliendo por lo menos con un parámetro de control referente a aguas para el consumo humano (Decreto 2115 de 2007).

Aproximadamente, el 15% de las muestras corresponden a aguas duras que presentan alto contenido de cloruros, por lo cual, se puede inferir una pequeña contaminación por intrusión marina.

De acuerdo a la Propuesta de Estado de Intrusión Marina elaborada por el Instituto Geológico de España³⁷, la relación iónica mayoritaria Cl/HCO₃ en el agua de mar varía entre 20 y 50 meq/L mientras que en las aguas dulces continentales tiene

³⁷ INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Op. cit. p.22

normalmente un valor entre 0,1 y 5 meq/L, por tanto, se puede decir que las aguas muestreadas de los pozos 43-II-C-PP-135 y 44-I-D-PZ-02, las cuales tienen valores de esta relación de 6.45 meq/L y 5,48 meq/L respectivamente, presentan contaminación salina por agua de Mar, ya que han perdido las características fisicoquímicas que naturalmente tiene una masa de agua dulce continental, caracterizándolas, en consecuencia, como agua salobre en el presente estado (año 2014).

De acuerdo al Instituto Geológico de España³⁸, normalmente el fondo geoquímico de Cloruros en los acuíferos costeros es muy bajo, aproximadamente 50 mg/L, si éste valor lo comparamos con la concentración de los iones cloruros arrojados de las muestras seleccionadas e investigadas, se obtiene una información del estado de salinización presente bastante significativa e indicador de contaminación del acuífero.

Por lo anterior, se puede decir que todas las muestras de los pozos seleccionados presentan altos contenidos de Cloruros, lo cual indica un grado de Salinidad considerable a excepción de los pozos 43-II-C-PP-133 y 43-IV-A-PP-04, los cuales arrojan valores de Cloruros de 36,76 mg/L y 34,00 mg/L respectivamente, que son inferiores al valor de referencia (50 mg/L, según el Instituto Geológico de España).

8.2 VULNERABILIDAD

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método GALDIT, la Vulnerabilidad del acuífero a Intrusión Marina en la zona Norte del Municipio es generalmente, Muy Baja, mientras que en los pozos ubicados en la zona Sur del Municipio de Santiago de Tolú, la Vulnerabilidad del acuífero a

³⁸ INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Propuesta de Indicador de Estado de Intrusión Marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la Provincia de Castellón. Castellón: Volumen I. 2009. p. 20

Intrusión Marina es Moderada; además, se observan valores de Cloruros y Bicarbonatos significativos, lo cual permite afirmar la existencia de Intrusión Marina al acuífero Morrosquillo en zonas específicas.

Se hizo un seguimiento a los niveles del agua subterránea de los piezómetros 44-I-D-PZ-02 Y 44-I-D-PZ-03, puntos de recurrente utilización por CARSUCRE, de lo cual se obtuvo la siguiente información:

Tabla 8. Variación de los niveles estáticos y la Conductividad Hidráulica en diferentes periodos de tiempo

Fecha	Pozos	NE(m)	K(m/día)	Tiempo de Recuperación
2009	44-I-D-PZ-02	1,38	0,162	36 min
2014	44-I-D-PZ-02	0,24	0,052	120 min
2009	44-I-D-PZ-03	1,38	1,29	3 min
2014	44-I-D-PZ-03	0,51	0,334	12 min

Fuente. MADERA, Oscar y VALDERRAMA, María. 2014

En la Tabla anterior, se observa que el Nivel Estático ha disminuido después de 5 años, en los Piezómetros mencionados, lo cual obedece a una explotación excesiva del recurso hídrico y/o a una deficitaria recarga del acuífero.

De igual modo, se observa una notable disminución de la Conductividad Hidráulica y un aumento en los tiempos de recuperación, lo cual obedece a un hecho: la ausencia de mantenimiento preventivo y correctivo de los filtros del pozo o rejillas del pozo piezómetro y a la existencia de solutos, como ya se indicó antes, los cuales obstruyen el flujo normal del agua, información que fue avalada y confirmada por CARSUCRE, es decir, a los Piezómetros localizados en el área de la presente investigación no se les ha aplicado mantenimiento desde el año 2009.

9. RECOMENDACIONES

- Esta tesis recomienda a la Universidad de Sucre y a CARSUCRE que mediante técnicas de exploración geoelectrica describan la Intrusion Marina con el fin de incentivar la realizacion de nuevas investigaciones que nutran la informacion sobre el acuífero Morrosquillo.
- Hacer el debido mantenimiento a los Piezómetros, para que los ensayos no arrojen resultados equívocos que conlleven a malas interpretaciones.
- Determinar el Perímetro de Protección del campo de pozos del Acueducto Municipal de Santiago de Tolú, para evaluar de éste modo la Vulnerabilidad Ambiental del acuífero Morrosquillo.
- Hacer un Plan de Manejo Ambiental que incluya la Bioremediacion, teniendo en cuenta la salud de la poblacion.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ BANGUERO, Harold y CASTELLAR, Carlos. La Transición Demográfica en Colombia 1938 – 2025. Bogotá D.C. 1991.
- ❖ CARRILLO, Jhessenia; VELAZCO, Claudia y HERRERA, Héctor. Determinación de reacciones químicas en interfaz de un acuífero costero. Caso: Golfo de Morrosquillo. Sucre-Colombia. 2013.
- ❖ CASTILLO PÉREZ, Emilio y MORELL EVANGELISTA, Ignacio. La Hidroquímica en los estudios de Intrusión Marina en los acuíferos españoles. Monografía. 1990. Investigaciones Geológicas y Mineras, S.A, Colegio Universitario de Castellón.
- ❖ CUSTODIO GIMENA, Emilio y LLAMAS, Manuel Ramón. Hidrología Subterránea. Barcelona: Omega, 2014. Tomo II. 1194 h.
- ❖ GUTIÉRREZ RIBÓN, Guillermo Enrique. Diagnóstico Ambiental del Acuífero Costero Golfo de Morrosquillo, Zona Litoral Tolú – Coveñas. 2004. Bogotá D.C. 288 h. Trabajo de grado (Maestría Ambiental con énfasis en Sanitaria). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- ❖ HERRERA MARMOLEJO, Rosana. Determinación de parámetros hidráulicos subterráneos del acuífero Morrosquillo en base a resultados de pruebas de bombeo y monitoreos de niveles. Sincelejo. 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola.

- ❖ INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Propuesta de Indicador de Estado de Intrusión Marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la Provincia de Castellón. Castellón: Volumen I. 2009.
- ❖ MOSQUERA LÓPEZ, Libardo. Estudio general de Suelos de la Región Noroccidental del Departamento de Sucre. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica. Bogotá D.C. 1990.
- ❖ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. (en Línea) <http://www.santiagodetolu-sucre.gov.co/informacion_general.shtml>
- ❖ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Plan de Desarrollo Municipal 2012 - 2015. La Oportunidad para Todos.
- ❖ SANTIAGO DE TOLÚ. ALCALDÍA MUNICIPAL. Sistema de Gestión Ambiental Municipal. Plan de Manejo Ambiental. 2012 – 2015.
- ❖ SIERRA MARQUEZ, Lucellys Irina. Caracterización Hidroquímica del acuífero Morrosquillo. Sincelejo. 2009. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola.
- ❖ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Memoria Técnica del Mapa de Aguas Subterráneas del Departamento de Sucre. Exploración y evaluación de Aguas Subterráneas. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Ingeniería y Minería. Bogotá D.C. 2002.
- ❖ VARGAS QUINTERO, María Consuelo. Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá D.C. 2010.

- ❖ VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de acuíferos. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Medellín. 2010

ANEXOS

A. Información y características de los Pozos

Código de Pozo	Municipio	Ubicación	Propietario de Pozo	Nombre de Predio
37-III-D-PP-05	San Onofre	La Comandancia	INSERGRUP S.A. E.S.P. y/o Mcpio. de San Onofre	Girasol
37-III-D-PP-13	San Onofre	A 30 mt de la mayoría	Edith Pérez	Finca la Mojanera
43-II-C-PP-114	Santiago de Tolú	La Perdiz	Ponal	Centro Vacacional el Ponal
43-II-C-PP-133	Santiago de Tolú	Sector Palo Blanco	Sociedad Portuaria Golfo Morrosquillo	Muelle Soc. Portuaria Golfo Morrosquillo
43-II-C-PP-135	Santiago de Tolú	Sector Palo Blanco	Fondo de Empleados del BBVA	Manglar de las Garzas
43-IV-A-PP-01	Santiago de Tolú	Margen derecha salida de Puerto Viejo a Palmito	Municipio de San Antonio de Palmito	Puerto Viejo
43-IV-A-PP-03	Santiago de Tolú	Finca Costa Rica	Aguas del Golfo S.A. E.S.P.	Finca Costa Rica
43-IV-A-PP-04	Santiago de Tolú	Corregimiento de puerto Viejo	Aguas del Golfo S.A. E.S.P.	Finca Don Pacho
43-IV-A-PP-72	Coveñas	Sector La Marta	Propiedad Privada Horizonte (Varios)	Condominio Victoria Real
44-I-D-PP-01	San José de Tol	A 500 metros al oeste de la mayoría	Fauzi Feris Hard	Hacienda Los Charcos
44-I-D-PP-02	Santiago de Tolú	Vereda Santa Lucía	Francisco Barragán	Villa Lucy
44-I-D-PP-08	Santiago de Tolú	Km 2 vía tolú - Tolviejo	Bernardo Guerra Serna	Finca La Pradera
44-I-D-PZ-02	Santiago de Tolú	Vía Tolú - Pita	CARSUCRE	Antiguo Basurero de Tolú
44-I-D-PZ-03	Santiago de Tolú	Vía Tolú - Pita	CARSUCRE	Antiguo Basurero de Tolú

A. Continuación

Código de Pozo	X	Y	Cota	Latitud	Longitud	Tipo de Captación	Año de Construcción del pozo	Profundidad
37-III-D-PP-05	845549	1563957	27	9°41'43.90408 N	75°29'17.37074 W	Profundo	1997	42
37-III-D-PP-13	837801	1561392	16	9°40'19.37815 N	75°33'31.08867 W	Profundo	2003	129
43-II-C-PP-114	833952	1543876		9°30'48.92102 N	75°35'34.77157 W	Profundo	1978	30
43-II-C-PP-133	833442	1541795	2	9°29'41.14002 N	75°35'51.18849 W	Profundo	1994	73
43-II-C-PP-135	832794	1540335	1	9°28'53.54452 N	75°36'12.21568 W	Profundo		45
43-IV-A-PP-01	834770	1537124		9°27'9.34876 N	75°35'7.00394 W	Profundo		118
43-IV-A-PP-03	833829	1533051	6	9°24'56.69432 N	75°35'37.26178 W	Profundo		100
43-IV-A-PP-04	833944	1538372	5	9°27'49.83833 N	75°35'34.24866 W	Profundo	2005	96,5
43-IV-A-PP-72	831092	1537521		9°27'21.74379 N	75°37'7.58545 W	Profundo	1999	68
44-I-D-PP-01	846760	1541480	30	9°29'22.70 N	75°28'22.39 W	Profundo	2001	18,23
44-I-D-PP-02	839022	1540115	17	9°28'47.25701 N	75°32'48.08071 W	Profundo	2002	100
44-I-D-PP-08	837630	1544500	28	9°31'9.74049 N	75°33'34.31199 W	Profundo	2008	
44-I-D-PZ-02	836102	1547152	3	9°32'35.81493 N	75°34'24.76854 W	Piezómetro	2007	40
44-I-D-PZ-03	836102	1547157	9	9°32'35.97762 N	75°34'24.76925 W	Piezómetro	2007	17

A. Continuación

Código de Pozo	Diámetro de Revestimiento	Estado Actual	Usos del Agua	Formación Geológica	Símbolo Geológico
37-III-D-PP-05	8 PVC	Activo	Consumo humano y domestico	Depósitos marino aluviales	Qma
37-III-D-PP-13	6	Activo	No se sabe	Depósitos Marino Aluviales	Qma
43-II-C-PP-114		Activo	Recreativo	Depósitos Marinos Aluviales	Qma
43-II-C-PP-133	8	Activo	Agrícola		
43-II-C-PP-135	6 PVC	Activo	Recreativo	Depósitos Marinos Aluviales	Qma
43-IV-A-PP-01	8	Activo	No se sabe	Depósitos Marino Aluviales	Qma
43-IV-A-PP-03	10 en acero	Activo	Consumo humano y domestico	Depósitos Marino Aluviales	Qma
43-IV-A-PP-04	17 1/2	Activo	Consumo humano y domestico	Depósitos marinos aluviales	Qma
43-IV-A-PP-72	6	Activo	Recreativo	Depósitos Marinos Aluviales	Qma
44-I-D-PP-01	8 P.V.C	Activo	Consumo humano y domestico	Depósitos Aluviales	Qal
44-I-D-PP-02	6 en PVC- RD 21	Activo	Consumo humano y domestico	Depósitos marinos aluviales	Qma
44-I-D-PP-08	6 PVC	Activo	Agrícola	Depósitos Marino Aluviales	Qma
44-I-D-PZ-02	4 PVC	Monitoreo	No se sabe	Depósitos Marino Aluviales	Qma
44-I-D-PZ-03	3 PVC	Monitoreo	No se sabe	Depósitos Marino Aluviales	Qma

B. Hidroquímica

Pozo	Cond (µS/cm)	pH	TAC	TSD	HCO3	SO4	Cl	NO3	Na	K	Ca	Mg
37-III-D-PP-05	0	7,66	209,84	300	209,84	14,5	88,63	0	23	0,78	60	0
37-III-D-PP-13	0	0	533,5	0	533,5	14,04	192,31	0	176,75	6,69	50,5	13,4
43-II-C-PP-114	783	7,54	309,62	0	309,6	80,9	436,7	0	213	118	59	21,5
43-II-C-PP-133	711	7,09	328,7	0	328,7	0	0	0	0	0	0	17,5
43-II-C-PP-135	1024	7,01	390,4	0	390,4	60,95	145,35	0	60,95	3,12	108	31,2
43-IV-A-PP-01	860	7,6	0	374	0	29,3	93,7	0,01	0	0	111,2	23,3
43-IV-A-PP-03	1103	6,51	207	0	207	99,2	75,4	2,3	101,4	1,7	113	15,4
43-IV-A-PP-04	669,23	7,54	318	380	318	0	34	0	0	0	0	17
43-IV-A-PP-72	803	7,78	349,06	0	349,1	73,5	74,5	0	66,85	7,76	137	22
44-I-D-PP-01	1917	7,17	444,78	0	444,78	340,75	567,35	0,78	121,6	2,25	357	35
44-I-D-PP-02	1121	8	457,5	0	457,5	74,88	116,99	0	34,65	2,23	140	31,6
44-I-D-PP-08	900	7,37	330	200	330	85	68	0,4	0	0	0	0
44-I-D-PZ-02												
44-I-D-PZ-03	3680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cond = Conductividad

TAC= alcalinidad

TSD= Dureza Total

HCO3= Bicarbonatos

SO4= Sulfatos

Cl= Cloruros

NO3= Nitratos

Na= Sodio

K= Potasio

Ca= Calcio

Mg= Magnesio

C. Datos Niveles estáticos

COD POZO	X	Y	PROF(m)	K(m/día)	T(m2/día)	NE	CT
37-III-D-PP-05	845549	1564957	42	21,6	194	1,76	27,821
37-III-D-PP-13	837804	1561443	129	4,72	134	5,54	
43-II-C-PP-114	833971	1543827	30	12,1	109	-1,79	0,53
43-II-C-PP-133	833442	1541795	73	2,4	38,5	0	1,6
43-II-C-PP-135	832794	1540335		21,8	109	-0,42	0,63
43-IV-A-PP-04	833944	1538944	100	1	202	0,9	
43-IV-A-PP-72	831088	1537525		2,21	59,8	0	0,29
44-I-D-PP-01	846809	1541310	18,23	100	602	0,95	
44-I-D-PP-02	839028	1540157	100	2,96	600	8,63	16,64

NE= Nivel estático

CT= Cota de terreno

D. Litología

Código de Pozo	Número de la Capa	Profundidad del Techo	Profundidad de la Base	Espesor	Descripción
37-III-D-PP-13	1	1	3	2	Arcillas Amarillas
37-III-D-PP-13	2	3	15	12	Arenas finas arcillosas
37-III-D-PP-13	3	15	20	5	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	4	20	24	4	Arena amarillas
37-III-D-PP-13	5	24	39	15	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	6	39	42	3	Arenas finas intercaladas con gravas finas
37-III-D-PP-13	7	42	63	21	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	8	63	69	6	Arenas medias
37-III-D-PP-13	9	69	80	11	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	10	80	90	10	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	11	80	115	35	Arenas con gravas y algo de arcilla
37-III-D-PP-13	12	115	118	3	Arcillas amarillas
37-III-D-PP-13	13	118	126	8	Arenas con gravas finas
37-III-D-PP-13	14	126	133	7	Arcillas amarillas
43-II-C-PP-133	1	0	4	4	Arena de grano medio
43-II-C-PP-133	1	0	4	4	Arena de grano medio
43-II-C-PP-133	2	4	12	8	Arcilla arenosa gris
43-II-C-PP-133	3	12	15	3	Arena de grano medio
43-II-C-PP-133	4	15	20	5	Arcilla arenosa gris
43-II-C-PP-133	5	20	48	28	Arcilla arenosa amarilla

43-II-C-PP-133	6	55	58	3	Arcilla plástica amarilla
43-II-C-PP-133	7	55	58	3	Arcilla plástica amarilla
43-II-C-PP-133	8	58	63	5	Arena de grano grueso
43-II-C-PP-133	9	63	64	1	Arcilla arenosa amarilla
43-II-C-PP-133	10	64	68	4	Arena de grano grueso
43-II-C-PP-133	11	68	73	5	Arcilla plástica amarilla
43-IV-A-PP-04	1	0	3	3	Capa vegetal y suelo limo Arcilloso
43-IV-A-PP-04	2	3	20	17	Arcilla gris verdosa
43-IV-A-PP-04	3	20	24	4	Arena gruesa granos de cuarzo
43-IV-A-PP-04	4	31	34	3	Arena gruesa y grava fina, granos de cuarzo
43-IV-A-PP-04	5	34	46	12	Arcilla gris verdosa
43-IV-A-PP-04	6	46	64	18	Grava fina gruesa bastante homogénea
43-IV-A-PP-04	7	64	68	4	Arcilla gris
43-IV-A-PP-04	8	68	75	7	Grava fina igual composición a la anterior
43-IV-A-PP-04	9	75	83	8	Arcilla gris
43-IV-A-PP-04	10	83	86	3	Grava fina a gruesa bastante homogénea, granos de c
43-IV-A-PP-04	11	86	92	6	Arcilla gris verdosa
43-IV-A-PP-04	12	92	95	3	Grava fina y arena con cuarzo lechoso chert y jasped
43-IV-A-PP-04	13	95	100	5	Arcilla gris verdosa
43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	
43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	

43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	
43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	
43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	
43-IV-A-PP-04	0	0	NULL	0	
43-IV-A-PP-72	1	0	4,5	4,5	Arcillas y arenas
43-IV-A-PP-72	2	4,5	9	4,5	Arcillas Plásticas
43-IV-A-PP-72	3	9	13,5	4,5	Arcillas Plásticas
43-IV-A-PP-72	4	13,5	18,5	5	Arcillas Plásticas
43-IV-A-PP-72	5	18,5	22,5	4	Arcillas Plásticas
43-IV-A-PP-72	6	22,5	27	4,5	Arena y Arcillas
43-IV-A-PP-72	7	27	31,5	4,5	Arcillas
43-IV-A-PP-72	8	31,5	40,5	9	Arcillas
43-IV-A-PP-72	9	40,5	45	4,5	Arenas
43-IV-A-PP-72	10	45	54	9	Arcillas
43-IV-A-PP-72	11	54	68	14	Arenas y gravas
44-I-D-PP-01	1	0	1	1	Capa vegetal
44-I-D-PP-01	2	1	8	6,5	Arcilla
44-I-D-PP-01	3	7,5	14	6	Arenas y gravas
44-I-D-PP-01	4	13,5	22	8,5	Arcilla Gris
44-I-D-PP-02	1	0	2	2	Arenisca
44-I-D-PP-02	2	2	4	2,5	Arcilla color amarillo
44-I-D-PP-02	3	4,5	6	2	Limo color amarillo
44-I-D-PP-02	4	6,5	9	2,5	Arenisca
44-I-D-PP-02	5	9	18	9	Arcilla color amarillo
44-I-D-PP-02	6	18	27	9	Arenas y gravas
44-I-D-PP-02	7	27	34	7	Arcillas color amarillo
44-I-D-PP-02	8	34	38	4	Arenas y gravas
44-I-D-PP-02	9	38	40	2,5	Arcilla dura color amarillo

44-I-D-PP-02	10	40,5	50	9	Arenas y gravas
44-I-D-PP-02	11	49,5	86	36	Arcilla color amarillo
44-I-D-PP-02	12	85,5	98	12,5	Arenas y gravas
44-I-D-PP-02	13	98	100	2	Arcilla duras, formación on Polquera

NOTA: Los Anexos A a D, corresponden a información suministrada por CARSUCRE













