

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN
EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO
PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA

MÓNICA MARCELA MIELES MONTENEGRO



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. y C.

2021

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN
EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO
PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA

MÓNICA MARCELA MIELES MONTENEGRO

TRABAJO DE GRADO, PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: AGUAS SUBTERRÁNEAS

INFORME FINAL

EDGAR EDUARDO QUIÑONES BOLAÑOS

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

2021

CON GRATITUD A

Primeramente a Dios por permitirme llegar a este capítulo de mi vida; a mis padres: Fredy Mieles y Mónica Montenegro, quienes con su amor me han apoyado y acompañado en todo mi crecimiento como persona y profesional, alentándome siempre a dar lo mejor de mí en cada proceso. A mis hermanas: Mary, Mile y Melisa que siempre han estado brindándome su amor y compañía, siendo parte esencial de mi vida.

A mi familia, especialmente mi madrina Aura, que siempre ha creído en mí y me ha brindado su apoyo incondicional; a mi mejor amiga, Lina Palacios, que a pesar de la distancia estuvo presta a escucharme siempre que la necesité; a mi Maryjose en el cielo.

A mis maestros, especialmente a aquellos que cuentan con la virtud del buen enseñar, como el profesor Edgar Quiñones, mi director, como las profesoras Dalia Moreno y Mónica Eljaiek; a mis evaluadores, Javier Mouthon y Alfonso Arrieta, que con sus exigencias y recomendaciones permitieron que este trabajo de grado culminara de manera exitosa.

A los amigos, que hoy son como familia, aquellos que fueron compañía en noches de estudio, apoyo en épocas de parciales, que un día cualquiera decidimos apodarnos como “Colemans”. También a aquellos con los que compartí el amor por la música, mis amigos de la Coral Solem. A mis amigas foráneas, que conocí en la pensión, con las que no solo hice amistad sino que formamos una hermandad, Jessica Montes y Dayana Arias.

A Dayana Chalá, quien no solo me apoyo y aconsejo durante la realización de mi investigación sino que me contagio de su amor por el estudio de las aguas subterráneas de lo cual surgió una bonita amistad.

A mi novio y mejor amigo, Juan David De León, quien conozco desde que inicie esta carrera profesional y que desde entonces me ha apoyado y motivado a ser mejor cada día. Quien estuvo de la mano conmigo en cada tropiezo y acierto que di en esta aventura, brindándome su inigualable amor. Así mismo a su familia, por hacerme sentir como parte de ellos.

Al grupo GIMA por abrir sus puertas e infundir en los estudiantes de ingeniería el amor por el medio ambiente. Por último, a mis amigas Verónica Ramírez y Cristina Gómez, quienes sufrieron conmigo las últimas entregas, y que además, fueron de mucho apoyo emocional.



CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1. ESTADO DEL ARTE	16
2.2. MARCO TEÓRICO	19
2.2.1. Aguas subterráneas.....	19
2.2.2. Acuíferos.....	20
2.2.3. Acuíferos costeros.....	22
2.2.4. Cuña salina.....	23
2.2.5. Acuíferos costeros a escala de laboratorio	23
2.2.6. Modelos numéricos para el estudio de aguas subterráneas	25
2.2.7. Software para modelar un acuífero costero a escala.....	26
2.2.8. Cálculo de la intensidad y del régimen pluviométrico anual	30
2.2.9. Recarga natural de un acuífero.....	30
2.2.10. Estimación de la recarga del acuífero.....	30
2.3. ANTECEDENTES	31
2.4. MARCO NORMATIVO	34
3. OBJETIVOS.....	37
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	37
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
4. ALCANCE	38
5. METODOLOGÍA.....	41
5.1. PREPARACIÓN INICIAL.....	44
5.1.1. Diseño experimental del acuífero a escala de laboratorio.....	44
5.1.2. Recopilación y análisis de la información secundaria.....	45
5.2. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO ANUAL	46



5.2.1.	Cálculo del régimen pluviométrico anual.....	46
5.2.2.	Cálculo de la recarga por precipitación	47
5.3.	ANÁLISIS DE LAS ESTRATIGRAFÍAS MÁS CRÍTICAS DEL ACUÍFERO .	48
5.3.1.	Breve descripción de la estratigrafía general del acuífero.....	48
5.3.2.	Selección de estratigrafía representativa	48
5.4.	MODELACIÓN DE LA CUÑA SALINA FRENTE A CAMBIOS DE RECARGA	50
5.4.1.	Modelo conceptual bidimensional.....	51
5.4.2.	Influencia de la recarga por agua lluvia en la cuña.	52
5.5.	PLANTEAMIENTO DE RECOMENDACIONES.....	55
5.5.1.	Recomendaciones para el manejo de acuíferos pilotos.	55
5.5.2.	Sugerencias que contribuyan en la mitigación de la intrusión salina.	55
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6.1.	ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN QUE COMPRENDE EL ACUÍFERO ARROYO GRANDE.....	56
6.1.1.	Cálculo y análisis del régimen pluviométrico anual.....	56
6.1.2.	Recarga.	69
6.2.	ESTRATIGRAFÍAS GEOLÓGICAS MÁS CRÍTICAS DEL ACUÍFERO DE ARROYO GRANDE, CON RELACIÓN A LOS PROCESOS DE RECARGA Y TRANSPORTE DE SOLUTOS QUE PODRÍAN SER SIMULADAS EN UN PROTOTIPO DEL ACUÍFERO A ESCALA DE LABORATORIO.....	69
6.2.1.	Breve descripción de la estratigrafía general del acuífero.....	69
6.2.2.	Selección de estratigrafía representativa.	71
6.3.	MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CUÑA SALINA FRENTE A CAMBIOS DE RECARGA DEL ACUÍFERO CON EL FIN DE OBSERVAR LA INCIDENCIA DE LA CUÑA SALINA COMO CONTAMINANTE DE ESTE.....	73
6.4.	PLANTEAMIENTO DE RECOMENDACIONES ENTORNO A LOS TIEMPOS DE PRUEBA OPERACIONAL EN LOS ACUÍFEROS COSTEROS A ESCALA DE LABORATORIO Y LA MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA EN ACUÍFEROS COSTEROS	78
6.4.1.	Recomendaciones para el manejo de acuíferos costeros pilotos.	78



6.4.2. Sugerencias que contribuyan en la mitigación de la intrusión salina.....	86
7. CONCLUSIONES.....	87
8. RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	97
Comportamiento de las precipitaciones anuales por estación:	97
Resultados de las modelaciones de cada escenario en distintos intervalos de pasos: ..	99



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las aguas subterráneas.....	20
Figura 2. Clasificación de los acuíferos.	22
Figura 3. Partes de un acuífero costero.	23
Figura 4. Esquema de un acuífero costero a escala de laboratorio.....	24
Figura 5. Trazadores en aguas subterráneas.	25
Figura 6. Vista de la interfaz gráfica del MODEL MUSE.	27
Figura 7. Ubicación aproximada del acuífero de Arroyo Grande.	38
Figura 8. Esquema de la metodología utilizada en relación con los objetivos específicos. .	43
Figura 9. Esquema a mano alzada del diseño preliminar del acuífero costero a escala de laboratorio.....	44
Figura 10. Ubicación de las estaciones pluviométricas de Bayunca, Galerazamba y Juan de Acosta con respecto al acuífero Arroyo Grande.....	45
Figura 11. Ubicación de pozos y sondeos estudiados por CARDIQUE Y ACUACAR.	46
Figura 12. Ubicación de los sondeos geoelectricos realizados por ACUACAR.....	49
Figura 13. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 1 realizado por ACUACAR	49
Figura 14. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 2 realizado por ACUACAR.	50
Figura 15. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 11 realizado por ACUACAR.	50
Figura 16. Acuífero a escala de laboratorio sin contenido.	51
Figura 17. Esquema del modelo conceptual en dos dimensiones.	52
Figura 18. Esquema del modelo conceptual del acuífero piloto.....	52
Figura 19. Representación de la malla de elementos finitos, con sus condiciones de frontera.	54
Figura 20. Esquema de la hidrogeología general del Sistema Acuífero Arroyo Grande.	71
Figura 21. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 1.....	74
Figura 22. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 2.....	75
Figura 23. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 3.....	75
Figura 24. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 4.....	76
Figura 25. Ejemplo de la representación gráfica de la caja de un acuífero a escala de laboratorio.....	79
Figura 26. Acuíferos a escala con diferentes entradas de agua.	80
Figura 27. Ejemplo de una estructura que soporta un acuífero piloto. Fuente: Dayana Chala y Mónica Miele (2019)	81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH: Oferta.....	34
Tabla 2. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH: Demanda.....	35
Tabla 3. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH: Calidad y Riesgo.....	36
Tabla 4. Datos de precipitación anual, temperatura media anual y recarga calculada de la estación Galerazamba.....	47
Tabla 5. Escenarios escogidos para modelación numérica.....	53
Tabla 6. Parámetros de la modelación numérica para el medio poroso.....	53
Tabla 7. Variables de estudio para modelación numérica.....	55
Tabla 8. Precipitaciones mensuales de la estación Galerazamba en mm.....	57
Tabla 9. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Galerazamba.....	58
Tabla 10. Precipitaciones mensuales de la estación Juan de Acosta en mm.....	61
Tabla 11. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Juan de Acosta.....	62
Tabla 12. Precipitaciones mensuales de la estación Bayunca en mm.....	65
Tabla 13. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Bayunca.....	66
Tabla 14. Valores de recarga escogidos para la modelación.....	69
Tabla 15. Información de los sondeos que presentaron mayor vulnerabilidad a procesos de intrusión salina.....	71
Tabla 16. Comparación de concentraciones en escenarios, sección a.....	77
Tabla 17. Comparación de concentraciones en escenarios, sección b.....	77
Tabla 18. Comparación de estudios de acuíferos a escala de laboratorio con dimensiones de más de un metro en sus lados.....	83
Tabla 19. Comparación de estudios de acuíferos a escala de laboratorio con dimensiones de menos de un metro en sus lados.....	84



INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Galerazamba.	59
Gráfico 2. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Juan de Acosta.	63
Gráfico 3. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Bayunca.	67

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Galerazamba en el periodo 2000-2014.....	97
Anexo 2. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Juan de Acosta en el periodo 2000-2014.....	97
Anexo 3. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Bayunca en el periodo 2000-2014.....	98
Anexo 4. Resultados del escenario sin recarga en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.	101
Anexo 5. Resultados del escenario 2 en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.....	103
Anexo 6. Resultados del escenario 3 en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.....	105
Anexo 7. Resultados del escenario 4 en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.....	108



RESUMEN

El acuífero costero Arroyo Grande está ubicado al norte del departamento de Bolívar, a 17 kilómetros del distrito de Cartagena de Indias, entre los municipios de Santa Catalina, Clemencia, Arroyo de Piedra, Pontezuela, Bayunca y Arroyo Grande. En la zona del acuífero se encuentran inventariados 22 pozos de extracción, los cuales son utilizados para el suministro de agua de comunidades cercanas. Entre las investigaciones disponibles se encuentran los realizados por la empresa ACUACAR, la cual consistió en un estudio hidrogeológico y el de la Corporación Autónoma CARDIQUE, en el que se identificó la vulnerabilidad del acuífero ante la intrusión salina.

No obstante, existe deficiencia con respecto a la cantidad de información disponible sobre el acuífero, esto debido al alto costo de realización de algunos tipos de estudios tales como la exploración de campo, la cual podría permitir una toma de decisiones más certera con respecto a la dinámica y uso del recurso hídrico y su conservación. Por ello, se motiva esta investigación la cual tiene como objetivo principal el estudio del comportamiento o desplazamiento de la cuña salina del acuífero de Arroyo Grande ante la presencia de precipitaciones en un modelo a escala de laboratorio simulado en el software SUTRA con la interfaz gráfica de MODEL MUSE.

Para el desarrollo de este estudio se simularon tres valores de recarga a partir de las precipitaciones analizadas anualmente en un período de 15 años: 150.9 mm/h como recarga mínima; 401.2 mm/año como recarga media y 1380.6 como recarga máxima. Cada valor de recarga fue simulado en una malla de 0.5 cm x 0.5 cm con las condiciones de un medio poroso homogéneo de arena con arcilla. Adicionalmente se simuló un escenario sin recarga como medida de comparación con los escenarios con influencia de recarga, obteniéndose un total de 4 escenarios simulados. Los resultados mostraron una pequeña variación de la concentración de sal en la cuña de 1.8% a 1.7% aproximadamente, al medio minuto de haber iniciado la simulación, esto ocurrió en todos los escenarios; sin embargo, las concentraciones intentaron estabilizarse, en el transcurso de la simulación, a su valor inicial.

Palabras claves: *Agua subterránea, cuña salina, precipitaciones, modelo a escala de laboratorio, simulación numérica.*



ABSTRACT

The coastal aquifer Arroyo Grande is located at the north of the department of Bolívar, 17 kilometers away from the district of Cartagena de Indias, between the municipalities of Santa Catalina, Clemencia, Arroyo de Piedra, Pontezuela, Bayunca and Arroyo Grande. In the aquifer area, 22 extraction wells are inventoried, which are used to supply water from nearby communities. There are available investigations, one that was developed by the company ACUACAR, which consisted of a hydrogeological study and other from the Autonomous Corporation CARDIQUE, where the aquifer's vulnerability to saline intrusion was identified.

However, there is a deficiency with respect to the amount of information available on the aquifer, it is probably due to the high cost of carrying out studies such as field exploration, which could allow a more accurate decision-making regarding the dynamics and use of the water resource and its conservation. Therefore, the latter motivates this research, whose main objective is to study the behavior or displacement of the saline wedge of the Arroyo Grande aquifer in the presence of rainfall in a laboratory-scale model simulated in the SUTRA software with the graphic interface by MODEL MUSE.

For the development of this study, three recharge values were simulated from the precipitations analyzed annually in a period of 15 years: 150.9 mm/h as minimum recharge; 401.2 mm/year as average recharge and 1380.6 mm/h as maximum recharge. Each recharge value was simulated on a 0.5 cm x 0.5 cm mesh under the conditions of a homogeneous porous medium of sand with clay. Additionally, a scenario without recharge was simulated as a measure of comparison with the scenarios with recharge influence, obtaining a total of 4 simulated scenarios. The results showed a small variation of the salt concentration in the wedge from 1.8% to 1.7% approximately, half a minute after starting the simulation, this occurred in all scenarios; however, the concentrations tried to stabilize, during the simulation, at their first value.

Keywords: *Groundwater, saline wedge, precipitation, laboratory scale model, numerical simulation.*



1. INTRODUCCIÓN

Uno de los pilares de la vida en el planeta es el agua. La variabilidad de sus usos es amplia: desde algo tan elemental como hidratarse hasta usos más significativos como lo es el desarrollo de las comunidades. A pesar de ser esencial en la vida, es poca la cantidad que se puede aprovechar para el consumo diario. La disponibilidad de agua promedio anual en el planeta es de 1.386 millones de km³, de estos el 97.5% corresponde a agua de mar o agua salada, el 2.5% que resta, es decir 35 millones de km³, corresponde a agua dulce. Casi el 30% de esta última corresponde a aguas subterráneas de difícil acceso; menos del 1% es usada para el consumo humano y los ecosistemas; el 70% restante está compuesto de glaciares, nieve o hielo (Centro virtual de información del agua, 2017).

Los recursos hídricos subterráneos están dotados de extensas reservas de agua dulce, las cuales, tienden a ser menos propensas a procesos de contaminación y degradación en comparación aquellas fuentes que se encuentran en la superficie (IDEAM, 2014b). No obstante, existe agua resguardada en acuíferos situados en las zonas costeras, (acuíferos costeros), que pueden verse amenazados por la intrusión marina, aumentando la concentración de sal en el acuífero lo que a su vez limita su capacidad de explotación y por ende el aprovechamiento de su recurso.

El 31.5% del recurso hídrico subterráneo del país pertenece a la región Caribe (Jiménez Parodi & Rodríguez Marquez, 2018). Dicha región cuenta con información parcial de catorce (14) acuíferos (IDEAM, 2014a), de los cuales solo tres hacen parte del departamento de Bolívar. A pesar de que existan estos acuíferos, son pocos los estudios que se han realizado en esta zona para identificar en su totalidad los acuíferos existentes, sus recargas y características.

Dentro del registro de los sistemas acuíferos de provincias costeras e insulares del IDEAM, (2013), se tiene que sistemas acuíferos como el de Barranquilla-Sabanalarga, Ciénaga de Oro, Turbaco, Santa Marta, Mompo y Arroyo Grande han sido objeto de estudios hidrogeológicos por parte de INGEOMINAS cuyos resultados se encuentran consignados en



boletines de los años 1980 a 1990; todos ellos usados arbitrariamente para suplir necesidades de abastecimiento.

Las aguas obtenidas de captaciones subterráneas, en su mayoría, son de buena calidad (M. V. Vélez Otálvaro, 1999a), sin embargo, la inadecuada administración de las mismas puede llegar a contaminarlas. Los acuíferos que tienen alguna conexión con la costa están mayormente expuestos a procesos de contaminación. Dicha contaminación puede darse principalmente, por intrusión salina, la cual sucede cuando el nivel de agua dulce decrece, en algunos casos, debido a la sobreexplotación, lo que ocasiona que la cuña salina (zona de unión estable y natural entre el agua fresca y el agua salada), aumente lo que provoca el ingreso del agua salada al acuífero, volviéndolo de esta manera inutilizable (Weber, 2012). Esta problemática se presenta comúnmente en la región Caribe, por lo que las ciudades que abarcan los sistemas acuíferos de las provincias costeras e insulares deben delimitar y proponer acciones que contribuyan en el adecuado manejo y aprovechamiento de este recurso.

Existen diversas formas de controlar o combatir la contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros, una de ellas es la recarga, ya que a medida que aumenta el nivel de agua dulce en el interior de este, es posible que las concentraciones de sal disminuyan (Pendas Fernández, 2005). Los acuíferos, naturalmente, cuentan con un proceso de recarga que se da ya sea por infiltración de zonas húmedas cercanas a este, o por infiltración vertical de aguas lluvias. Siendo este último proceso el que provee de mayor recarga al acuífero (M. V. Vélez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2004).

Los estudios que se han realizado hasta la fecha son insuficientes, lo que ha ocasionado un bajo nivel de conocimiento, preparación técnica y académica sobre las aguas subterráneas, así como un escaso trabajo completo y permanente tanto nacional como regional y local, que permita contar con información y soporte institucional para la planificación y manejo integral de este recurso (IDEAM, 2018b).

Una alternativa viable y económica frente a los estudios en campo de las aguas subterráneas son las investigaciones a escala de laboratorio, puesto que en ellas es posible analizar el comportamiento de los acuíferos costeros ante fenómenos naturales, como sequías, intrusión



salina, entre otros, cosa que es imposible observar a simple vista en un trabajo de campo. Reducir el comportamiento de un acuífero costero a una escala manejable es posible gracias a la evaluación y análisis de las variables del sistema, compensando la realidad física y compleja a partir de algunos supuestos. La observación del flujo en el medio poroso se logra tiñendo el agua de algún trazador o tinta. El uso de estos modelos permite investigar en ellos problemas de flujo, recarga, filtraciones, dispersión e intrusión salina (Weber, 2012), (Castro-Alcalá et al., 2012), (Kuan et al., 2012), (Botero Acosta, 2015) y (Noorabadi et al., 2017).

Diversos estudios de este tipo sugieren complementar las pruebas de laboratorio con la implementación de modelos matemáticos especializados en estudiar el comportamiento del flujo en medios porosos (Bouzaglou et al., 2018), de tal manera que se facilite el entendimiento del prototipo a utilizar, lo que ahorraría en tiempo y en dinero los posibles errores que se pueden cometer al iniciar una experimentación de laboratorio. De esta manera, será posible predecir las concentraciones de sal, por ejemplo, para la formación de la cuña o según lo que se requiera para el estudio (Crestani et al., 2019).

Este tipo de investigaciones presenta una oportunidad para los estudiantes de ingeniería civil, puesto que potencia las aptitudes como futuro profesional en un área de campo que es poco abordada como lo es el manejo de recursos hídricos, en especial las aguas subterráneas. Adicionalmente, contradice la estigmatización que se tiene del ingeniero civil, al asociar únicamente dicha profesión con la construcción de edificios, puentes y carreteras.

Como se mencionó inicialmente la recarga natural del acuífero por medio de la infiltración de las precipitaciones es una de las fuentes de abastecimiento más abundante. Atendiendo a las alternativas de control ante la intrusión salina se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible determinar cómo influyen los regímenes de precipitaciones en el desplazamiento de la cuña salina en un acuífero costero modelado a escala de laboratorio, tomando de referencia el régimen de precipitaciones, las características hidrogeológicas típicas de la región del acuífero Arroyo Grande, y el uso del software SUTRA, con el fin de verificar la funcionalidad y la operatividad del uso del prototipo de acuífero simulado?



Para dar solución al interrogante expuesto se simuló la caja de acrílico que representa un acuífero costero, ubicada en el laboratorio de saneamiento de la Universidad de Cartagena en la interfaz gráfica MODEL MUSE bajo la solución numérica de SUTRA. La caja de acrílico cuenta con dimensiones internas de 2.7 m x 1.25 m x 0.1m en largo, alto y ancho, respectivamente, las cuales fueron utilizadas como dimensiones de la malla del modelo numérico. Las condiciones iniciales y de contorno fueron basadas en algunas características del acuífero Arroyo Grande, tales como el medio poroso y los valores de recarga obtenidos a partir de las precipitaciones estudiadas en el régimen pluviométrico anual de la zona de influencia del acuífero.

El poder verificar la funcionalidad de este equipo, permitió conocer en qué condiciones de frontera debe basarse y en cuáles no. La revisión bibliográfica, facilitó, a su vez la formulación de recomendaciones referentes a los aspectos más relevantes que deben y/o podrían tenerse en cuenta a la hora de construir y dar funcionalidad a un acuífero a escala de laboratorio. Del mismo modo, para no dejar de lado y seguir insistiendo en la importancia de estudiar la intrusión marina en acuíferos costeros, se incluyeron algunas sugerencias para la mitigación de la cuña salina en épocas de bajas precipitaciones.



2. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se busca poner en contexto a todas las personas que lleguen a leer esta investigación con el fin de dar mayor claridad a la temática en cuestión. Para ello se expondrán algunos estudios realizados a nivel mundial, que han sido relevantes para el planteamiento de esta investigación; a su vez se describirán conceptos claves como acuíferos costeros, los tipos de recarga de este, regímenes pluviométricos, software para el estudio de aguas subterráneas, entre otros; conformando de esta manera un marco teórico. Por último, y no por ello menos importante, se explicarán los antecedentes y las normativas existentes del estudio de acuíferos costeros en Colombia.

2.1. ESTADO DEL ARTE

Los costos de perforación en el subsuelo suelen ser altamente costosos para aquellos estudiantes que se desean estudiar el agua subterránea y comportamiento de esta en un acuífero, por lo que la implementación de pruebas en escala de laboratorio llega a ser una alternativa más accesible para dichos estudios. Un complemento para los estudios a escala de laboratorio es la implementación de software de modelos numéricos, que permiten verificar la funcionalidad del prototipo.

En Irán, la Universidad de Tabriz, con el fin de investigar la dinámica de intrusión salina construyó un modelo experimental de un acuífero costero utilizando una caja de arena con dimensiones de 120 cm de largo, 100 cm de altura y 5 cm de espesor. Analizaron el proceso de la intrusión de agua salada en un acuífero homogéneo no confinado en el laboratorio y luego, numéricamente con el código de flujo de densidad variable MODFLOW- SEAWAT. Simularon el acuífero en dos dimensiones, bajo dos escenarios de concentraciones de agua salada (35 g/L y 50 g/L), utilizaron arena de sílice como medio poroso con una conductividad hidráulica de 1 cm/s, una porosidad de 0.38; con dispersividades longitudinales y transversales de 0.001 m y 0.0001 m, respectivamente (Noorabadi et al., 2017).

En el 2018, el Instituto Nacional de Investigación Científica de Quebec, Canadá y la Universidad de Padua, Italia, desarrollaron un acuífero a escala de laboratorio en donde se simularía el proceso de intrusión salina en acuíferos costeros. El objetivo principal de este estudio fue probar la capacidad de asimilación de datos de tomografía de resistividad eléctrica



(ERT), con el fin de estimar los parámetros hidráulicos de dispersividad y permeabilidad, considerando los enfoques de asimilación de datos conjuntos y secuenciales, basados en el filtro Kalman de conjunto (En KF). En ambos enfoques se utilizó el software SUTRA, un modelo de flujo de agua subterránea y transporte dependiente de la densidad, para asimilar las resistencias eléctricas en bruto. El prototipo estaba constituido por una caja de arena elaborada en plexiglás con dimensiones de 5 m de largo, 0.3 m de ancho y 0.6 m de alto. Se utilizaron perlas de vidrio para simular un medio poroso homogéneo. Los parámetros para la simulación numérica tales como concentración del agua salada, permeabilidad, porosidad, dispersividad longitudinal, y dispersividad transversal fueron 0.0446 kg/kg, $1.30 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, 0.367, $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ y $1 \times 10^{-4} \text{ m}$, respectivamente (Bouzaglou et al., 2018).

La Universidad de Honai, Nanjing, China examinó en un estudio los procesos de intrusión de agua de mar (SWI) y retroceso de esta (SWR) en un acuífero costero no confinado a escala de laboratorio con un largo de 7.7 m., con 1.2 m de alto y un ancho de 0.16 m sometido a una marea sinusoidal sintética. Durante la investigación realizaron experimentos de laboratorio y simulaciones numéricas sobre procesos SWI y SWR ocasionados por una caída abrupta de agua interior. La caja de arena fue llenada con arena de cuarzo, permitiendo de esta forma un escenario homogéneo. Para las simulaciones numéricas utilizaron el software SUTRA, definiendo como parámetros principales una porosidad de 0.4, conductividad hidráulica de $6.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, concentración del agua salada de 34 g/L, dispersividad longitudinal y transversal de 5×10^{-3} y $5 \times 10^{-4} \text{ m}$, respectivamente (Yu et al., 2019).

En el mismo año, otros investigadores de la Universidad de Honai, Nanjing, China desarrollaron un acuífero piloto con el fin de evaluar los efectos causados por la fluctuación del nivel del mar, el bombeo de aguas subterráneas y recarga en la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros de múltiples capas. La experimentación en el laboratorio fue corroborada mediante la aplicación de un modelo numérico con el código SEAWAT. El prototipo fue construido en plexiglás, con una altura de 1.5 m, un espesor de 0.6 m y una longitud de 6.6 m. Se utilizó arena fina, arena gruesa y arcilla como el medio poroso heterogéneo. Utilizaron una conductividad hidráulica de 4.3 m/d para la arena fina, 38 m/d para la arena gruesa y 0.03 m/d para la arcilla. Así mismo utilizaron una dispersividad longitudinal y transversal de 0.1 y 0.005 m, respectivamente (Guo et al., 2019). Al año



siguiente, utilizaron el mismo acuífero piloto, con la misma estratigrafía heterogénea para estudiar dos conjuntos de experimentos que tuvieron en cuenta el aumento del nivel de mar (el agua de mar subió de 85 a 105 cm para el escenario 1 y la altura tierra adentro disminuyó de 100 a 80 cm para el escenario 2) (Guo et al., 2020).

Por su parte, Estados Unidos, por medio de la Universidad de Alabama implementó un sistema experimental de flujo radial para estudiar los procesos de intrusión de agua salada en un acuífero insular. El estudio investigó escenarios de estado estacionario y transitorios que involucran avance y retroceso cuñas de agua salada en una isla circular. Los resultados experimentales fueron simulados usando la versión de densidad acoplada del código MODFLOW-USG. Las dimensiones del sistema correspondían a una caja en acrílico de 51.5 cm de largo, 30 cm de alto y 2.6 cm de espesor en la parte del agua dulce y en la parte del agua salada un espesor con 25% más que el del agua dulce. La simulación fue representada en un modelo axisimétrico en 2D, bajo los parámetros de un medio homogéneo compuesto de perlas de vidrio como medio poroso. Establecieron como conductividad hidráulica un rango de 74 ± 4 cm/min, como porosidad 0.40 ± 0.01 ; como dispersividad longitudinal un valor de 5×10^{-4} cm y como dispersividad transversal 5×10^{-6} cm (Memari et al., 2020).

Investigadores del Reino Unido y Egipto, se unieron para el desarrollo de un acuífero costero a escala de laboratorio y la simulación en dos dimensiones de este. Su enfoque principal fue analizar el efecto que causa la subida transitoria de la cuña salina en acuíferos costeros heterogéneos. Para ello se simuló la sección transversal de un acuífero costero no confinado utilizando un tanque de flujo de laboratorio de dimensión $0.38 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$. El medio poroso fue llenado con perlas de vidrio transparente de diferentes tamaños, permitiendo de esta manera analizar un medio heterogéneo. La conductividad hidráulica utilizada fue calculada para ambos tamaños en el laboratorio, obteniendo 85 y 36 cm/min. Manejaron una porosidad de 0.3, una dispersividad longitudinal de 0.1 cm y una dispersividad transversal de 0.01 cm. El software utilizado para el análisis matemático fue el código SEAWAT (Abdoulhalik et al., 2020).

Los estudios más recientes en cuanto a acuíferos de escala piloto en Colombia se han desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en donde se



desarrollaron dos modelos físicos a escala piloto de un acuífero costero confinado, uno con una estratigrafía homogénea y el otro con una estratigrafía heterogénea, a los cuales se aplicaron barreras hidráulicas en distintos escenarios con el fin de correr la cuña salina a un sitio más cercano a la costa que del acuífero. Cada caja de arena fue elaborada con acrílico transparente de 8 mm de espesor, que permiten ver las trayectorias de flujo en medios porosos. Los tamaños de la caja de arena se establecieron en 70 cm x 45 cm x 4 cm. El medio homogéneo fue llenado con una arena de tipo S30-50, con una conductividad hidráulica de 13 m/d y una porosidad de 0.35. Para el medio heterogéneo se utilizó la combinación de tres tipos de arena: S30, S30-50 y S100, con conductividades hidráulicas y porosidades de 225 m/d, 13 m/d, 6 m/d y 0.42, 0.35, 0.2, respectivamente. Realizadas las pruebas experimentales procedieron a corroborar los resultados por medio de un modelo matemático mediante el software FEFLOW (Botero Acosta, 2015).

Cada uno de los estudios presentados anteriormente contribuyó en algunas decisiones de este trabajo de grado; por ejemplo, la selección de las características geológicas del medio poroso como la conductividad y porosidad fueron supuestas partiendo de dichas investigaciones puesto que la información secundaria del acuífero Arroyo Grande no disponía, hasta la fecha, estos datos que para la presente investigación fueron muy importantes en términos de modelación numérica. Muchas de estas investigaciones resaltan la importancia de estudiar la intrusión marina, de hecho incluyen y sugieren la importancia de estudiar y analizar qué significativo puede llegar a ser el movimiento de las olas en el desplazamiento de la cuña hacia el interior de los acuíferos costeros.

En cuanto a los softwares manejados en cada estudio, se observa que difieren según las necesidades de estudio y facilidades que brinda cada uno. Aun así, las investigaciones revisadas tienen como común denominador el uso de MODFLOW y SUTRA.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Aguas subterráneas.

A manera simple puede decirse que el agua subterránea, es todo aquel flujo que se filtra a través del suelo y queda saturado sus capas. La fuente de recarga principal, de un acuífero, son las precipitaciones, las cuales lo alimentan por medio de la infiltración. Otras fuentes de



recarga localizada son los ríos, arroyos, lagos y lagunas que se encuentran cercanos o en la superficie de estas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático saturando completamente los poros del terreno (Collazo-Caraballo & Montaña-Xavier, 2012), (Ordoñez, 2011), (Ver Figura 1)

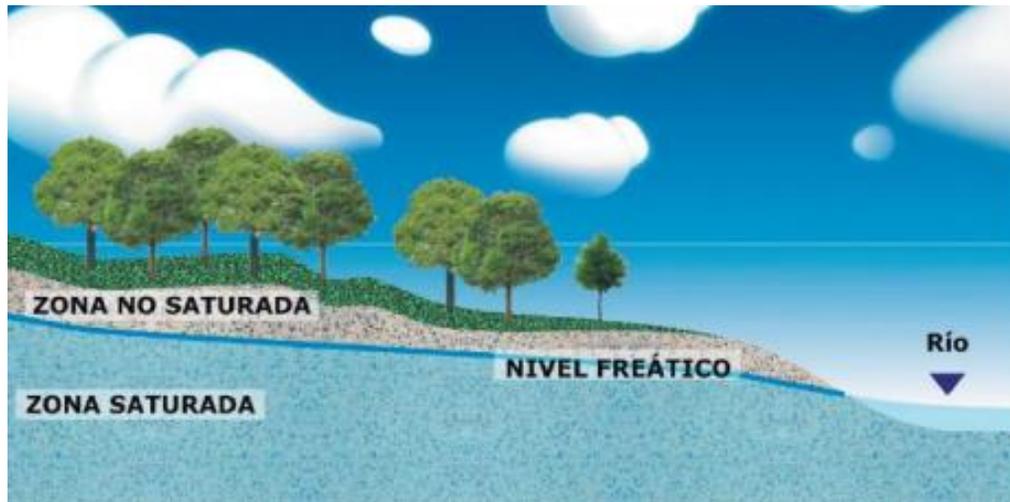


Figura 1. Esquema de las aguas subterráneas.

Fuente: Manual de agua subterránea, Uruguay (2012, sec. 1, pág.24).

2.2.2. Acuíferos.

Un acuífero es un medio poroso con la capacidad de acumular y ceder agua del subsuelo para su extracción y uso. Los materiales que normalmente conforman un acuífero son gravas y arenas (Serrano et al., 2014).

Los acuíferos transportan el agua desde sus zonas de recarga hasta cuerpos de agua superficial cercanos a estos, y captaciones construidas por el hombre (pozos); todos estos pueden ser aprovechados para suplir las necesidades de abastecimiento de sus usuarios (Ministerio de Ambiente, 2003).

2.2.2.1. Clasificación de los acuíferos.

➤ Acuíferos libres o no confinados.

Se definen como libres porque su nivel de agua se encuentra por debajo del lecho de formación permeable. Liberan agua por saturación, es decir, el agua que conceden proviene del drenaje de sus poros (Ordoñez, 2011). (Ver Figura 2).



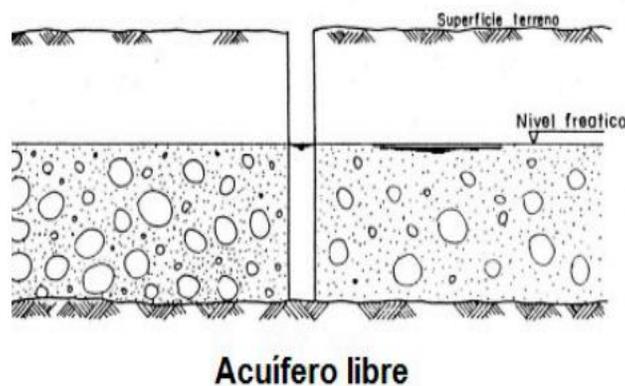
La simulación del acuífero Arroyo Grande en el modelo físico de acuíferos costero corresponde a un tipo de acuífero libre.

➤ Acuíferos confinados.

El agua de estos se encuentra “confinada” o resguardada dentro de terrenos poco permeables, ubicando al medio permeable por encima y por debajo de éstos. Todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión que está en los poros es mayor que la atmosférica (IDEAM, 2015). (Ver Figura 2).

➤ Acuíferos semiconfinados.

Corresponde al tipo de acuífero con que mayormente se frecuenta en la naturaleza. En estos, el techo, el piso o ambos, están conformados por medios porosos con menor permeabilidad que los confinados, por ende el agua puede circular a través de ellos, verticalmente (Collazo-Caraballo & Montaña-Xavier, 2012). (Ver Figura 2).



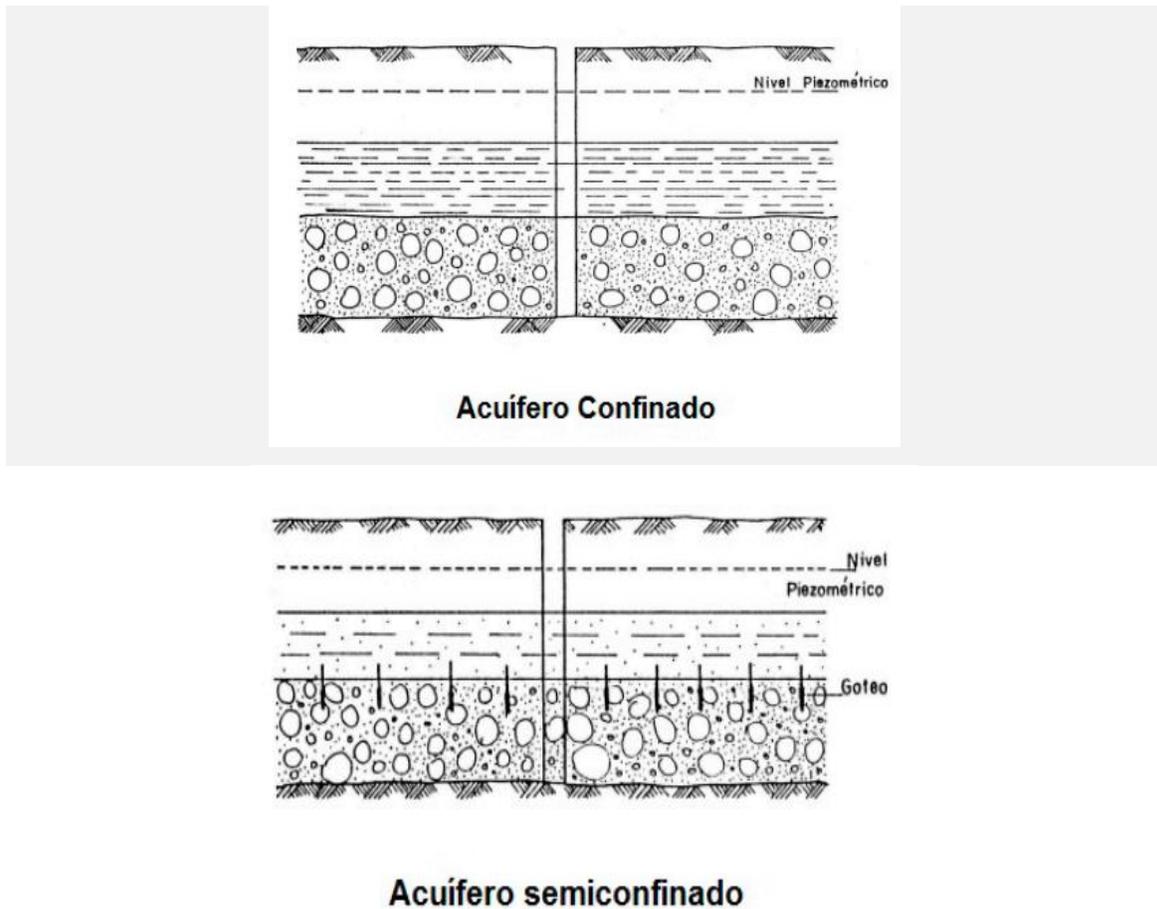


Figura 2. Clasificación de los acuíferos.

Fuente: Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia. (2015, pág. 20)

2.2.3. Acuíferos costeros.

Este tipo de acuífero tiene una particularidad y es que hidráulicamente se encuentra conectado con el mar. En algunos casos, puede estar relacionado hidráulicamente en uno de sus límites con otros acuíferos del interior, de este modo pueden considerarse como “el último eslabón en el ciclo natural del agua depositada en el subsuelo, debido a que reciben agua de otros acuíferos” (Lopez-geta & Gomez-Gomez, 2007). (Ver Figura 3).

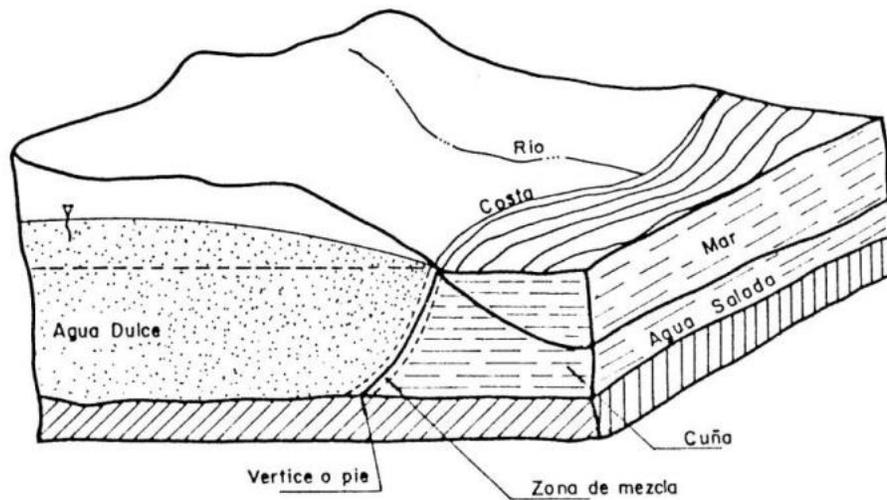


Figura 3. Partes de un acuífero costero.

Fuente: (M. V. Vélez Otálvaro, 1999b)

2.2.4. Cuña salina.

Se denomina así a la formación que une de manera constante el agua dulce de un acuífero costero con el agua salada del mar. Dicha unión mantiene un estado de equilibrio natural entre ambas fuentes de agua, lo cual hace que el agua dulce se mantenga en dirección constante hacia el mar y el agua de mar en dirección contraria. La formación de esta depende de algunas características del acuífero, tales como su geometría, permeabilidad, y nivel piezométrico (Lopez-geta & Gomez-Gomez, 2007).

2.2.5. Acuíferos costeros a escala de laboratorio

Estos son prototipos que se realizan con el fin de analizar el comportamiento de los acuíferos, de tal manera que se pueda observar en ellos eventos como intrusión marina, recarga natural, artificial, entre otros, que difícilmente son observados en los estudios de campo. Son cajas de arena (sandbox) o simplemente cajas, que se construyen regularmente en acrílico (Botero Acosta, 2015), plexiglás (Bouzaglou et al., 2018; Weber, 2012), o cualquier otro material siempre y cuando permita visualizar el material granular y demás.

Los tamaños de estos varían según su estudio y necesidad, pueden ser de dimensiones pequeñas como la de Botero Acosta, (2015) y Castro-Alcalá et al., (2012) o más grandes como las de Bouzaglou et al., (2018); Weber, (2012) y Yu, Xin, & Lu, (2019).

El diseño se compone de una caja que se divide en tres módulos: el módulo del centro es donde se deposita el material granular y es el más grande; los extremos, más pequeños, son donde se agrega el agua dulce y el agua salada, respectivamente, de tal manera que se permita el paso del agua a la caja de arena (Ver Figura 4).

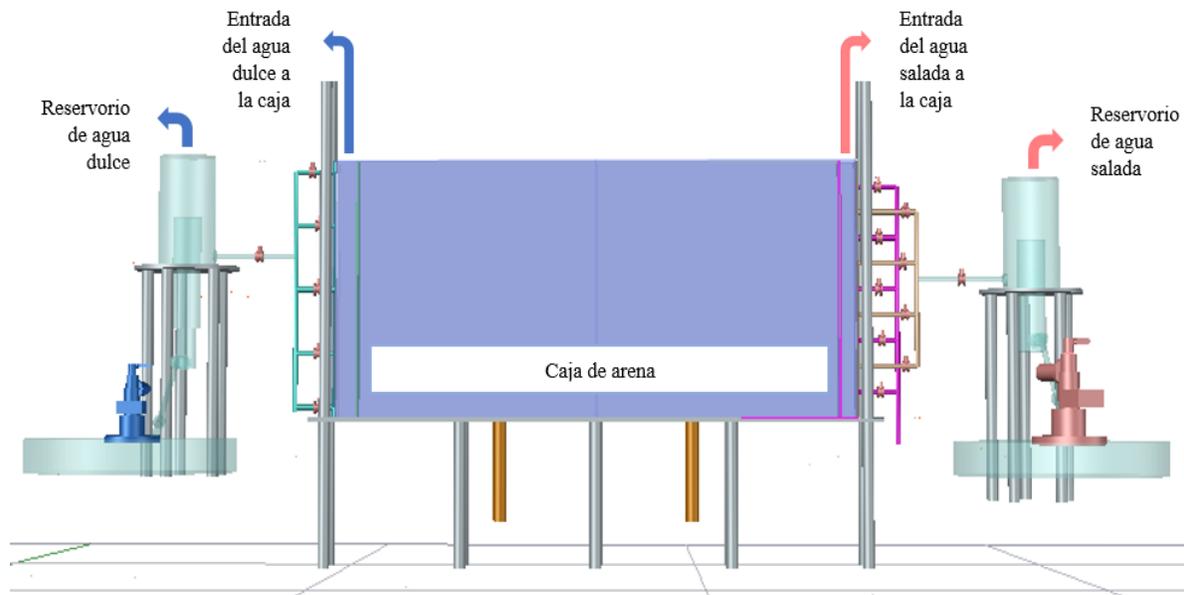


Figura 4. Esquema de un acuífero costero a escala de laboratorio.

Fuente: Dayana Chalá y Mónica Mieles, 2019.

Es importante resaltar que las dimensiones de un prototipo de este tipo no tienen ningún lineamiento teórico que explique y permita escoger las medidas idóneas para cada experimento, esto depende únicamente de las necesidades de la investigación, de lo que se quiera observar y analizar.

2.2.5.1. Trazadores

Estos cumplen como función principal brindar información acerca de la dirección del movimiento, velocidad y los contaminantes que podrían estar presentes en un depósito de aguas subterráneas (acuífero). También contribuyen en la determinación de otros parámetros hidráulicos, como, por ejemplo, la conductividad hidráulica, porosidad, dispersividad, coeficientes de distribución químicos (Custodio & Llamas, 1996; Davis et al., 1985). (Ver Figura 5)

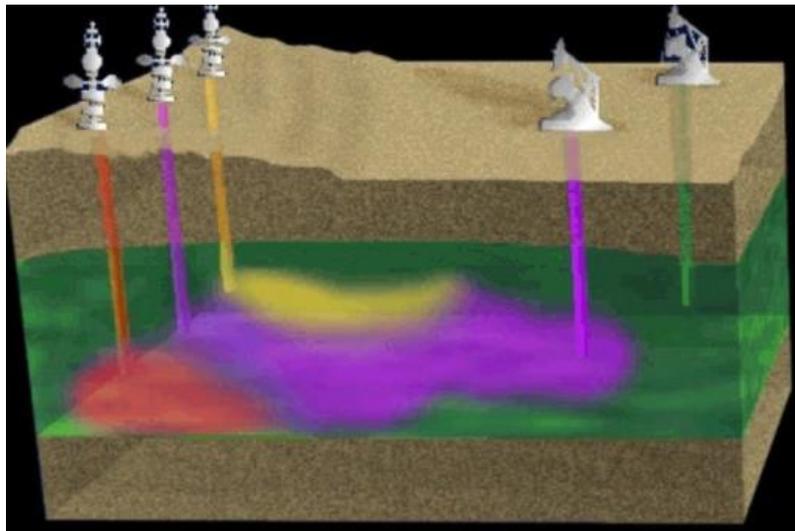


Figura 5. Trazadores en aguas subterráneas.

Fuente: Arredondo, Cárcamo, Ortíz, & Chivano, (2016)

2.2.6. Modelos numéricos para el estudio de aguas subterráneas

Los modelos numéricos, con sus limitaciones y bondades, permiten una representación aproximada de la realidad de un fenómeno o suceso de la naturaleza, en donde se aplican diferentes métodos, y se estudian diversas dimensiones, según sea el objetivo del estudio y la información inicial con la que se cuente (Antonio et al., 2017). Dichos modelos, pueden aplicarse para el estudio de acuíferos, para lo que es necesario conocer las características de este, tales como su geometría, sus parámetros hidrogeológicos, etc.

Se han establecido diferentes programas que aplican varios de estos modelos numéricos. Sus métodos se basan en diferencias finitas y elementos finitos, los cuales son utilizados para la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (Joaquín et al., 2007). El dominio del modelo en el que se aplica el método de diferencias finitas, se constituye de una cuadrícula ortogonal que puede ser variable o uniforme según sea la complejidad del modelo; la grilla del modelo se hará más cercana a las zonas de interés, de tal manera que se obtenga un mejor detalle de estas (Antonio et al., 2017).

El método de los elementos finitos, por su parte, consiste en la subdivisión del dominio de solución en un gran número de elementos triangulares, es decir, en vez de definir una función global, única y continua para la solución aproximada, se simboliza la solución usando un



numero de funciones de interpolación local, cada una definida dentro de un elemento dado (Antonio et al., 2017). En contraparte con el método por diferencias finitas, los elementos finitos tienen mayor flexibilidad de adaptación de la geometría del problema, debido a la gran cantidad de elementos desarrollada (Joaquín et al., 2007).

2.2.7. *Software para modelar un acuífero costero a escala*

2.2.7.1. SUTRA

SUTRA o Saturated-Unsaturated Transport, es un software que simula el movimiento de los fluidos y el transporte de energía o sustancias disueltas en un subsuelo de estudio (acuíferos). Fue creado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en 1984 (The USGS science for changing world, 2010). La última modificación realizada hasta la fecha fue en 2019, con la versión 3.0, la cual presenta diversas mejoras en comparación con su versión anterior (SUTRA 2.0), como, por ejemplo (The USGS science for changing world, n.d.):

- ✓ Soporte para condiciones límite "generalizadas", una implementación modificada de presiones y concentraciones o temperaturas especificadas, y lagos. Dos nuevos tipos de condiciones límite "generalizadas" facilitan la simulación de una amplia gama de procesos hidrológicos que interactúan con el modelo de agua subterránea, como ríos, desagües y evapotranspiración.
- ✓ La forma en que se formulan numéricamente dos de los tipos originales de condiciones límite de SUTRA (presión especificada y concentración o temperatura especificadas) dentro de SUTRA se ha modificado de manera que los factores de conductancia especificados por el usuario (conocidos como GNUP y GNUU en versiones anteriores de SUTRA) ya no son necesarios.
- ✓ La capacidad de un lago, que funciona con todo tipo de condiciones de contorno SUTRA, incluidas las nuevas condiciones de límite generalizadas, permite la simulación de la interacción del flujo de agua subterránea y el transporte con agua del lago "ponchada" en la superficie de un modelo tridimensional. La coalescencia y división de los lagos se rastrea a medida que las etapas del lago aumentan o disminuyen, respectivamente.



2.2.7.2. MODELMUSE

MODELMUSE es una interfaz gráfica de usuario (GUI) para los modelos de US Geological Survey (USGS) tales como MODFLOW 6, MODFLOW – 2005, MODFLOW-LGR, MODFLOW-LGR2, MODFLOW-NWT, MODFLOW-CFP, MODFLOW-OWHM, MODPATH, ZONEBUDGET, PHAST, SUTRA 2.2, SUTRA 3.0, MT3D-USGS y WellFootprint y el modelo MT3DMS que no es de USGS. Este software proporciona una GUI para crear el archivo de entrada de flujo y transporte para PHAST y los archivos de entrada para los otros modelos. De los modelos mencionados se escogió SUTRA 3.0 como modelo de flujo, como preferencia particular en la aplicación de elementos finitos con respecto a las diferencias finitas que utilizan las versiones de MODFLOW.

En MODELMUSE, los datos espaciales del modelo son independientes de la cuadrícula y los datos temporales son independientes de los períodos de estrés. Poder ingresar estos datos de forma independiente permite al usuario redefinir la discretización espacial y temporal a voluntad (Winston, 2020). La versión que se utilizó para esta investigación fue el MODELMUSE v.4.3.0.0 lanzada en agosto del 2020.

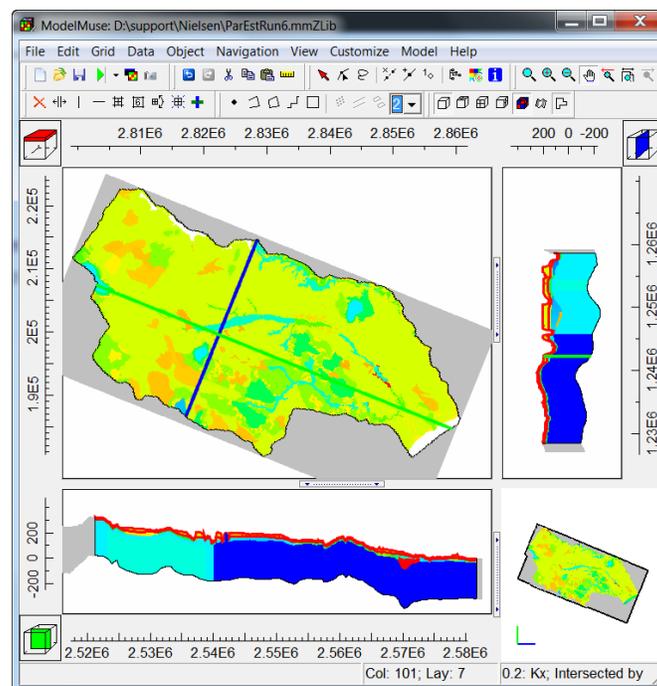


Figura 6. Vista de la interfaz gráfica del MODELMUSE.

Fuente: (Winston, 2020)



2.2.7.3. Ecuaciones de transporte

Las expresiones matemáticas que describen los mecanismos físicos que impulsan el transporte de energía térmica y el transporte de solutos en el entorno subterráneo son casi idénticas, por tanto, el código SUTRA toma a su beneficio dicha similitud para representar, mediante dos modelos físicos el flujo de agua subterránea y el movimiento de energía térmica o un solo soluto en el agua subterránea (The USGS science for changing world, 2010).

Las expresiones matemáticas tanto para el cálculo del flujo de agua subterránea como para el cálculo del movimiento o transporte de energía térmica o de un soluto se presentan a continuación (The USGS science for changing world, 2010):

- Balance de masa de fluido

El balance de masa de fluido o simulación de flujo proporcionada por SUTRA es en realidad un cálculo de cómo la cantidad de masa de fluido contenida dentro de los espacios vacíos de la matriz sólida cambia con el tiempo. Se define así:

$$\left(S_w \rho S_{op} + \varepsilon \rho \frac{\partial S_w}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\varepsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial U} \right) \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{K K_r \rho}{\mu} \right) \cdot (\nabla p - \rho g) \right] = Q_p$$

Donde,

- ✓ S_w : saturación de agua por saturación (volumen de agua por volumen de huecos)
- ✓ ρ : densidad del fluido, medida en unidades de longitud por volumen (M / L^3)
- ✓ S_{op} : almacenamiento específico de presión ($M / L * s^2$)⁻¹
- ✓ ε : porosidad (volumen de huecos por volumen total).
- ✓ p : presión del fluido ($M / L * s^2$)
- ✓ t : tiempo (T)
- ✓ U : representa concentración de soluto, C, o Temperatura del fluido, T.
- ✓ ∇ : Elevación
- ✓ \underline{K} : permeabilidad de la matriz solida (L^2)
- ✓ K_r : permeabilidad relativa al flujo de fluido (L)
- ✓ μ : viscosidad del fluido ($M / L_f * s$)



✓ g : aceleración de la gravedad (L / s^2)

- Balance de masa de solutos y adsorbatos

La simulación de transporte de solutos en SUTRA tiene en cuenta la masa de una sola especie almacenada en una solución fluida, así como la masa de soluto y de especies almacenada como adsorbato en las superficies de los granos de matriz sólida. Se define así:

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho C)}{\partial t} + \frac{\partial[(1 - \varepsilon) \rho_s C_s]}{\partial t} \\ = -\nabla \cdot (\varepsilon S_w \rho \underline{v} C) + \nabla \cdot \left[\varepsilon S_w \rho \left(D_m \underline{I} + \underline{D} \right) \cdot \nabla C \right] + \varepsilon S_w \rho \Gamma_w + (1 - \varepsilon) \rho_s \Gamma_s \\ + Q_p C^*$$

Donde,

- ✓ ε : porosidad (volumen de huecos por volumen total).
- ✓ S_w : saturación de agua por saturación (volumen de agua por volumen de huecos)
- ✓ ρ : densidad del fluido, medida en unidades de longitud por volumen (M/L^3)
- ✓ C : fracción de masa de soluto líquido o concentración de soluto (M_s / M)
- ✓ t : tiempo (T)
- ✓ ρ_s : densidad de granos sólidos en matriz sólida ($M_G / * L^3_G$).
- ✓ C_s : Concentración específica de adsorbato en granos sólidos (M_s / M_G).
- ✓ \underline{v} : velocidad promedio del fluido (L / s).
- ✓ D_m : Tensor de dispersión (L^2 / s).
- ✓ \underline{I} : Tensor de identidad (L).
- ✓ \underline{D} : Tensor de dispersión (L^2 / s)
- ✓ Γ_w : Fuente de masa de soluto en fluido ($M_s / M * s$)
- ✓ Γ_s : Fuente de masa de adsorbida ($M_s / M_G * s$)
- ✓ Q_p : Fuente de masa fluida ($M / L^3 * s$)
- ✓ C^* : Concentración de solutos de fuentes fluidas (M_s / M)



2.2.8. *Cálculo de la intensidad y del régimen pluviométrico anual*

La intensidad corresponde al valor en mm/h de la lluvia (s) que se desean representar. Para ello es importante realizar un estudio previo del régimen anual pluviométrico del lugar que se desee simular. Para calcular el régimen pluviométrico o como también es conocido módulo pluviométrico anual medio, se escoge primero un periodo de tiempo mayor a 10 años y se toman los valores de las precipitaciones registradas mensualmente en cada año. Luego, se promedian las precipitaciones mensuales para ese periodo (todas las precipitaciones de enero durante el periodo de años escogido, así mismo febrero, marzo, etc.), y por último se suman todas. El resultado obtenido corresponde al régimen pluviométrico anual (Custodio & Llamas, 1996), y se interpreta como la magnitud de las lluvias de la zona estudiada (Chereque Morán, 1989; Villodas & Segerer, 2006).

2.2.9. *Recarga natural de un acuífero.*

La recarga natural de un acuífero puede proporcionarse de diversas formas, por infiltración de aguas lluvias, por humedales cercanos: ríos o lagos, por irrigación, embalses, etc. (M. V. Vélez Otálvaro, 1999b). El tipo de recarga más común se da por la infiltración de aguas lluvias, sin embargo, no toda el agua llega a la superficie del suelo se infiltra, bien sea por el nivel de saturación de este, lo que provocaría que el agua que no se infiltra tome el curso de escorrentía, otro caso podría ser que el agua de dichas precipitaciones arrastre materiales que se encuentren depositados en el suelo y parte de su volumen se quede en los cuerpos de estos.

2.2.10. *Estimación de la recarga del acuífero.*

Existen diversas técnicas o formas que permiten estimar la recarga de un acuífero, las cuales deben ser escogidas con base a parámetros como la confiabilidad, intervalos de tiempo, y la disponibilidad de recursos (M. V. Vélez Otálvaro, 1999b).

Dentro de las diversas técnicas se tienen las siguientes (M. Vélez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2004):

- ✓ Medidas directas. La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten medir el flujo que drena hasta el acuífero.



- ✓ Balance hídrico. Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance; hacen parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del
- ✓ nivel freático, y el que iguala la descarga a la recarga.
- ✓ Trazadores. Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga, aunque se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.
- ✓ Aproximaciones de Darcy. Se encuentran valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.
- ✓ Empíricos. Consiste en el desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación.

La técnica de modelos empírico fue la utilizada para el cálculo de la recarga del acuífero de esta investigación. De estos se escogió la expresión matemática de Turc (1954):

$$r = p \left(1 - \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right) \dots (3)$$

Donde:

$$L: 300 + 25T + 0.05T^2$$

r, tasa de recarga promedio anual (mm/año)

p, precipitación anual (mm/año)

T, temperatura media anual (°C)

2.3. ANTECEDENTES

A nivel general, los primeros estudios hidrogeológicos de Colombia se han realizado por iniciativa de INGEOMINAS en el año 1950. En primera instancia, estos estudios permitieron el reconocimiento geológico, gracias a las perforaciones realizadas, en el Valle del Cauca,



Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Córdoba y Antioquia. Diez años después, se realizaron estudios en los departamentos de Tolima, Bolívar, Santander y Caldas. En los años siguientes continuaron con estudios en otros departamentos. En el año 2004, INGEOMINAS desarrolló un plan de exploración de aguas subterráneas, el cual contribuyó a la creación del Estudio Nacional del Agua (2010), (IDEAM, 2015).

Por su parte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en conjunto con el IDEAM expidió en marzo de 2010 la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), la cual, en aras de establecer un “Instrumento Rector” que diseñara y promoviera líneas de acción a nivel nacional que hagan posible el manejo y aprovechamiento sostenible del agua subterránea en Colombia crea el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB). Con dicho programa se pretende que por medio del fortalecimiento educativo, institucional y normativo se manejen y aprovechen los acuíferos del país garantizando su preservación y buen uso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b).

La actualización más reciente del Estudio Nacional del Agua es un reporte de avance presentado en el 2018, por el IDEAM. En este, se plantean “nuevas metodologías para el aprovechamiento y adecuado manejo de las aguas superficiales y subterráneas del país”. Estas últimas, siguen presentando bajos niveles de preparación técnica y académica, y soporte institucional que permitan la planificación y manejo del recurso hídrico subterráneo (IDEAM, 2018b).

A nivel regional existen registros parciales de estudios realizados en acuíferos costeros, como es el caso del acuífero Arroyo Grande. Los últimos estudios publicados en relación a este sistema acuífero, fueron por parte de CARDIQUE, (2006), en donde se evaluó la vulnerabilidad de dicho acuífero ante procesos de intrusión salina, y por ACUACAR & Independence drilling, (2014) el cual realizó un estudio hidrogeológico en el sector Arroyo de Piedra, para evaluar la existencia de aguas subterráneas en dicho sector.

En cuanto a la ciudad de Cartagena, no se cuenta con información confiable ni certera de si alguna vez han desarrollado e implementado acuíferos a escala de laboratorio en ninguna de las universidades y centros de investigación pública y privada. Sin embargo, la Universidad de Cartagena, por medio del Grupo de Investigación Modelación Ambiental, en conjunto con



la Universidad de Ryerson se encuentran desarrollando el proyecto “Fortalecimiento de la resiliencia de acuíferos costeros y la utilización de las aguas subterráneas para enfrentar los efectos del cambio climático en la Costa Caribe colombiana”, el cual está orientado a apoyar y fortalecer el estudio del uso sostenible del agua subterránea, como alternativa de abastecimiento en zonas donde el agua potable sea escasa. Durante la vigencia del proyecto mencionado se construirá un modelo piloto a escala de laboratorio para el estudio y análisis del comportamiento de los acuíferos costeros, el cual contribuirá en el desarrollo de tesis doctorales, de maestría y de pregrado en Ingeniería Civil.

Dentro del marco de estudio de los aspirantes a grado del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, se han desarrollado trabajos de grado con la temática de aguas subterráneas. Entre ellos, los más recientes son “Análisis del comportamiento hidrogeológico del flujo de aguas subterráneas en la cabecera municipal de Turbaco, Bolívar” (Barrios Quintero & Correa Jiménez, 2016), “Estimación del nivel de intrusión salina en el acuífero de Barú, empleando los software Visual Modflow y Seawat” (De León Ortiz, 2018), y “Análisis del uso y manejo del agua subterránea en la región Caribe Colombiana” (Jiménez Parodi & Rodríguez Marquez, 2018).

2.4.MARCO NORMATIVO

La normativa ambiental vigente para la conservación, uso sostenible y manejo de las aguas subterráneas contempla los cuatro primeros objetivos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, PNGIRH: oferta, demanda, calidad y riesgo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b). (Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3)

Tabla 1. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH: Oferta.

Objetivo	Estrategia	Aspecto regulado	Norma
Oferta	Conocimiento	Investigación de Aguas Subterráneas	Decreto 1541/78, art. 178
		Sistema Nacional de Investigación Ambiental	Decreto 1600/94, arts. 7 a 10
			Decreto 2370/09
		Permisos de Exploración	Decreto 1541/78, arts. 146 a 154 y 158
		Estudios Hidrogeológicos	Ley 373/97, art. 10
		Sistema Nacional de Información Ambiental	Decreto 2811/74, arts. 20 a 24
			Decreto 1541/78, art. 172
	Decreto 1600/94, arts. 1 a 6		
	Pago por servicios ambientales	Ley 1450/11, art. 210	
	Planificación	Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos	Decreto 1640/12, arts. 5 Par. 1°, 35 Par. y 61 a 65
	Conservación	Protección de Zonas Recarga	Ley 99/93, art. 1.4
			Decreto 3600/07, art. 4
Decreto 2372/10, art. 29			

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b)



Tabla 2. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH: Demanda.

Objetivo	Estrategia	Aspecto regulado	Norma
Demanda	Caracterizar y cuantificar	Sistema de Información del Recurso Hídrico	Decreto 1323/07
		Registro de Usuarios del Recurso Hídrico	Decreto Ley 2811/74, arts. 64 a 66
			Decreto 1541/78, arts. 257 a 265
			Decreto 303/12
		Subsistema de Información sobre Uso de Recursos Naturales Renovables–SIUR y Registro Único Ambiental–RUA	Resolución 941/09
		Módulos de Consumo y Metas de Uso Eficiente	Decreto 1541/78, art. 110
			Ley 373/97, Arts. 4 Y 7
		Medición de Consumos	Decreto 2811/74, arts. 120 a122
			Decreto 1541/78, arts. 164-G, 171 y 199; Ley 373/97, art. 6
	Caudal Explotable	R 872/06, arts. 1, 3 y 4	
	Usuarios en GIRH	Planes Departamentales de Agua	Decreto 3200/08
			Ley 1450/11, art. 21
	Uso Eficiente y Sostenible	Uso Eficiente y Ahorro del Agua	Decreto 2811/74, art. 133
Ley 373/9			

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b)



Tabla 3. Normativa vigente en materia de aguas subterráneas, enmarcada en objetivos de la PNGIRH:
Calidad y Riesgo.

Objetivo	Estrategia	Aspecto regulado	Norma	
Calidad	Ordenamiento y Reglamentación	Ordenamiento del Recurso Hídrico	Decreto 3930/10, arts. 4 a 8	
		Reglamentación del Uso de las Aguas	Decreto 2811/74, arts. 156 y 157	
			Decreto 1541/78, art. 173 Conc. 107 y ss.	
		Reglamentación de Vertimientos	Decreto 3930/10, arts. 65 a 73	
	Reducción de la Contaminación	Prevención y Control de la Contaminación		Decreto 2811/74, arts. 134 y ss.
				Decreto 1541/78, arts. 166, 167 y 175 a 177
				Decreto 1575/07
				Decreto 3930/10, arts. 24-2, 28 y 76
		Reconversión a Tecnologías Limpias	Decreto 3930/10, arts. 61 y ss.	
	Monitoreo, Seguimiento y Evaluación	Protocolos para el Monitoreo y Seguimiento		Decreto 3930/10, art. 34
				R 941/09, Art. 2, Par. R 1023/10
		Acreditación y Certificación de Laboratorios Ambientales	Decreto 1600/94, art. 5	
Riesgo	Información y conocimiento	Planes de Gestión del Riesgo	Ley 1523/12, arts. 32 a 37	
		Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres	Ley 1523/12, arts. 45 y 46	
		Mapas de Riesgo	Decreto 1575/07, art. 15	
			R 4716/10	
		Planes de Contingencia	Decreto 321/99	
	Gestión de Riesgo en el Manejo de Vertimientos	Decreto 3930/10, arts. 35 y 44		
	El Riesgo en los Instrumentos de Planificación	Instrumentos de Planificación para la Gestión del Riesgo	Ley 1523/12, arts. 31 y 38 a 42	
Medidas de Reducción y Adaptación	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático	Ley 1450/11, art. 217		

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b)



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar cómo influyen los regímenes de precipitaciones en el desplazamiento de la cuña salina en un acuífero costero modelado a escala de laboratorio, tomando de referencia el régimen de precipitaciones, las características hidrogeológicas típicas de la región del acuífero Arroyo Grande, y el uso del software SUTRA, con el fin de verificar la funcionalidad y la operatividad del uso del prototipo de acuífero simulado.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analizar los regímenes de precipitaciones en la región que comprende el acuífero Arroyo Grande.
- ✓ Definir las estratigrafías geológicas más críticas del acuífero de Arroyo Grande, en relación a los procesos de recarga y transporte de solutos que podrían ser simuladas en un prototipo del acuífero a escala de laboratorio.
- ✓ Modelar el comportamiento de la cuña salina frente a cambios de recarga del acuífero en función de las precipitaciones máximas, mínimas y medias teniendo en cuenta el régimen de precipitación anual del acuífero en estudio, con el fin de observar la incidencia de la cuña salina como contaminante de este.
- ✓ Plantear recomendaciones que permitan optimizar los tiempos de prueba operacional en los acuíferos costeros a escala de laboratorio y a su vez plantear sugerencias que contribuyan en la mitigación de los efectos del desplazamiento de la cuña salina al interior del acuífero en épocas de bajas precipitaciones.



4. ALCANCE

El presente estudio, tuvo como finalidad verificar la funcionalidad y operatividad de usar un prototipo a escala de laboratorio para estudiar cómo influyen los regímenes de precipitaciones en el desplazamiento de la cuña salina de un acuífero costero, en este caso el de Arroyo Grande, tomando como referencia el régimen de precipitaciones y las características hidrogeológicas típicas del acuífero, por medio de la aplicación de un modelo matemático con la ayuda del software SUTRA y la interfaz gráfica de MODEL MUSE, en dos dimensiones.

El sistema acuífero de Arroyo Grande se encuentra ubicado al norte del departamento de Bolívar a 17 kilómetros aproximadamente del distrito de Cartagena de Indias, en el sector comprendido entre los municipios de Santa Catalina, Clemencia, Arroyo de Piedra, Pontezuela, Bayunca y Arroyo Grande (Ver Figura 7).

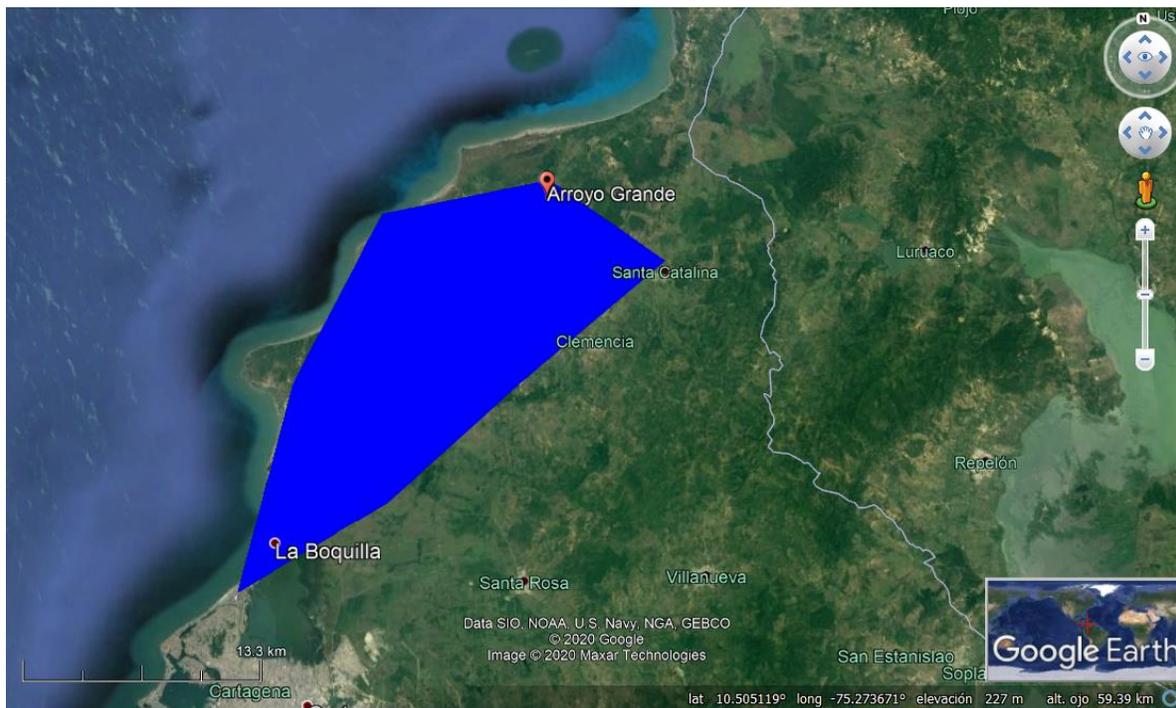


Figura 7. Ubicación aproximada del acuífero de Arroyo Grande.

Fuente: Google Earth



Este, según CARDIQUE, (2006), tiene un área aproximada de 62 km², un espesor promedio de 120 m y una estimación de recarga de 150 mm/año. Sin embargo, las dimensiones del transecto a modelar serán las definidas por el acuífero piloto: 1.25 m de alto, por 2.7 m de largo y 0.1 m de ancho; el espacio o volumen de agua de cada esquina es de 1.25 m de alto por 0.1 m de largo y ancho.

El acuífero a escala de laboratorio hace parte de los estudios sobre agua subterránea que se adelantan con el proyecto “Fortalecimiento de la resiliencia de acuíferos costeros y la utilización de las aguas subterráneas para enfrentar los efectos del cambio climático en la costa Caribe Colombiana” que desarrolla el Grupo de Investigación en Modelación Ambiental en colaboración con la Universidad de Ryerson, gracias a la Canadian Queen Elizabeth II Diamond Jubilee Scholarships.

Cabe resaltar que en esta investigación solo se realizó la modelación numérica, y de acuerdo con los resultados obtenidos se expone en qué condiciones podría funcionar el acuífero a escala de laboratorio, por lo que el modelo conceptual está basado en las dimensiones de la caja de arena. Se espera que los próximos estudiantes interesados en el estudio del agua subterránea, una vez controlada la presente pandemia, puedan comprobar los resultados alcanzados aquí.

La modelación del acuífero piloto partió desde una condición “estable”, es decir, el acuífero fue simulado sin recarga, esto con el fin de mirar la estabilización natural de la cuña. Posteriormente, con los datos obtenidos de recarga por precipitaciones en la zona de influencia del acuífero costero Arroyo Grande, se simularon tres escenarios bajo valores de recarga mínima, media y máxima. Cada caso fue simulado por tres horas.

La litología del medio poroso fue seleccionada a partir de la información recolectada de los estudios de ACUACAR, lo cual fue posible gracias a un análisis de las estratigrafías con mayor vulnerabilidad ante procesos de intrusión salina.

Una parte de las recomendaciones fueron basadas en estudios de acuíferos costeros a escala de laboratorio, estas se centraron especialmente en su construcción y puesta en marcha, para luego ser comparadas con los resultados de la modelación. Las recomendaciones en cuánto



a mitigaciones ante el desplazamiento de la cuña salina al interior de los acuíferos, se basaron en documentaciones como planes de manejo ambiental de acuíferos costeros, entre otros.

La implementación del software SUTRA en conjunto con la interfaz gráfica MODEL MUSE, permitió el desarrollo de una malla de elementos finitos capaz de simular el proceso de intrusión salina con las condiciones de un acuífero real en un acuífero a escala de laboratorio, esto gracias a las condiciones de contorno generalizadas permitidas para establecer presiones, cabezas hidráulicas y concentraciones.

Se utilizaron como variables independientes la recarga y la estratigrafía del medio; como variables dependientes se utilizó la concentración de sal y el desplazamiento de la cuña. Atendiendo a lo que se espera en un modelo físico, se tomaron como parámetros principales cabezas hidráulicas constantes para la zona costera y la zona del acuífero con agua dulce; así mismo se consideraron la conductividad, permeabilidad, y porosidad del medio.

Por otro lado, el modelo numérico no pudo ser calibrado, puesto que, hasta el momento, por motivos de la pandemia, la construcción del acuífero a escala se encuentra en receso y no se han podido realizar pruebas de manejo. Sin embargo, con los resultados obtenidos de la modelación numérica es posible saber en qué condiciones y supuestos podría funcionar el acuífero a escala, lo cual reduce la cantidad de pruebas previas que deben considerarse para que el acuífero simule un acercamiento de la realidad de un fenómeno natural como el de la intrusión salina.

Con los resultados presentados de este estudio, se espera que, a futuro, los estudiantes del programa de Ingeniería Civil y los estudiantes de posgrado en áreas afines, interesados en el estudio del agua subterránea puedan disponer de este proyecto como una guía de uso que les permita utilizar el prototipo que se encontrará instalado en el laboratorio de Saneamiento Ambiental. A su vez, se espera que la metodología abordada sirva como antecedente de investigaciones que busquen afianzar la resiliencia de acuíferos costeros.



5. METODOLOGÍA

El tipo de investigación realizado se considera de tipo experimental, puesto que las pruebas abordadas involucran la manipulación de una o más variables: unas para controlar el aumento o disminución de estas (variables independientes), y otras para observar cómo afectan los cambios realizados (variables dependientes). Para este estudio se intentó demostrar mediante una simulación con el software SUTRA el comportamiento de la cuña salina de un acuífero costero modelado a escala de laboratorio, tomando de referencia el régimen pluviométrico y las características hidrogeológicas típicas de la región del acuífero Arroyo Grande.

El desarrollo del estudio se llevó a cabo en cinco fases: 1. Preparación inicial, 2. Determinación del régimen pluviométrico, 3. Análisis de las estratigrafías más críticas del acuífero, 4. Modelación de la cuña salina frente a cambios de recarga y 5. Planteamiento de recomendaciones (Ver Figura 8).

Cada una de las fases mencionadas permitió el desarrollo del objetivo general de la presente investigación. La primera fase contempla las consideraciones tenidas para el diseño de un acuífero costero a escala de laboratorio y a su vez, expone la información recolectada y el uso que se le dio a esta. Todo lo anterior es un preámbulo necesario para el desarrollo de las cuatro fases restantes. Es importante mencionar que estos pasos, permitieron la modelación numérica del acuífero a escala de laboratorio en el software SUTRA, y que todos los resultados no obedecen a ninguna experimentación en el laboratorio.

Luego de plantear un bosquejo del acuífero a escala de laboratorio, se escogió un acuífero de la región que contara con información primaria referente a su recarga y composición litológica. Al tener ubicado el acuífero se procedió a analizar la lluvia de la zona, se escogieron estaciones pluviométricas según la disponibilidad de datos del IDEAM. Con lo anterior, se calculó el régimen pluviométrico anual para un periodo de 15 años y se calcularon tres valores de recarga: uno máximo, uno medio y uno mínimo.

Por otro lado, con la información recolectada acerca del acuífero se analizó su estratigrafía, y se escogió un escenario, teniendo en cuenta las dimensiones y condiciones del acuífero a escala de laboratorio, el cual fue utilizado como medio poroso de la malla usada para la modelación en el software. Finalmente, se hicieron algunas recomendaciones basadas, por



una parte, en la operatividad de un acuífero costero a escala de laboratorio y, por otra parte, en la mitigación de los efectos del desplazamiento de la cuña salina al interior del acuífero en épocas de bajas precipitaciones.

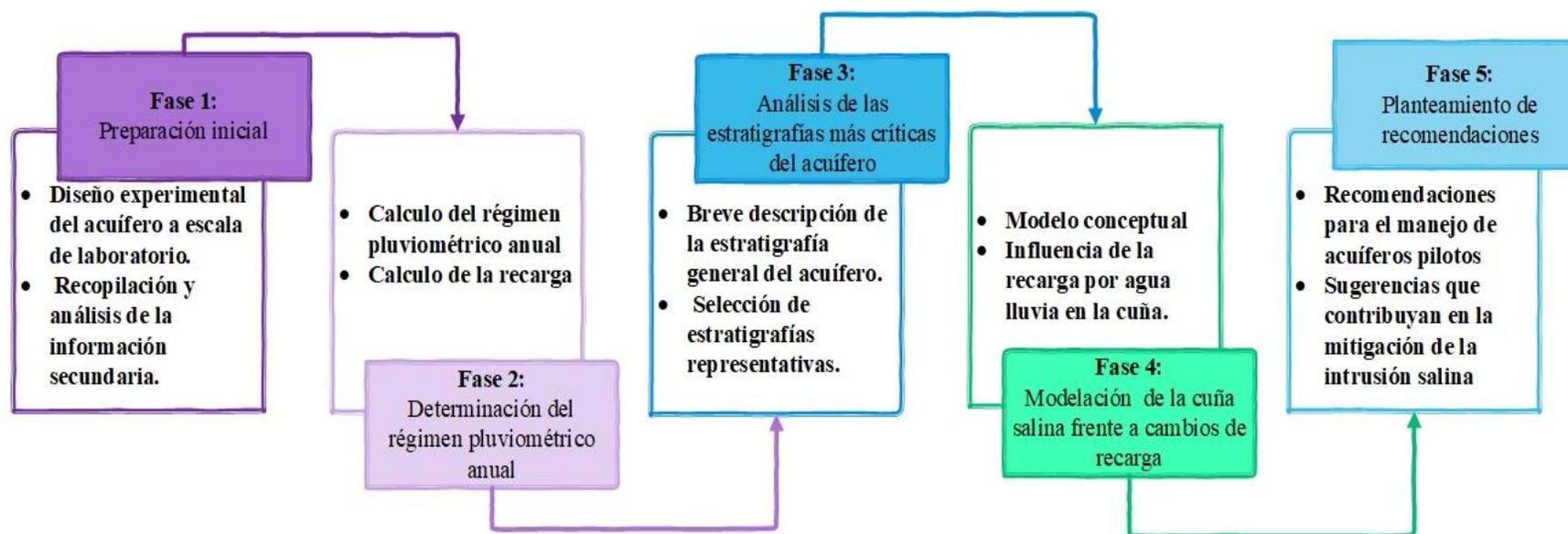


Figura 8. Esquema de la metodología utilizada en relación con los objetivos específicos.

Fuente: Autor.



5.1. PREPARACIÓN INICIAL

5.1.1. Diseño experimental del acuífero a escala de laboratorio.

El diseño preliminar del acuífero a escala fue dirigido por la estudiante del Doctorado en Ingeniería, Dayana Chalá Díaz, y apoyado por la estudiante de pregrado y autora del presente trabajo de Grado, Mónica Mieles. Para ello se tomó como guía el trabajo de grado de Weber (2012) en donde se utiliza un acuífero costero compuesto de cuatro módulos con 1.25 m de largo, 1.25 m de alto y 0.05 m de espesor, teniéndose un total de 5 m de largo.

Debido a que las instalaciones predispuestas para la ubicación del acuífero en la Universidad de Cartagena, no son tan amplias, las dimensiones iniciales fueron de 2.5 m de largo, 1.50 m de alto y 0.4 m de espesor, sin embargo, gracias a las recomendaciones realizadas por Eduardo Alcalá, docente de la Universidad Nacional de Colombia el cual cuenta con experiencia en el estudio de aguas subterráneas, específicamente en el uso de acuíferos a escala de laboratorio, se modificaron así: 2.7 m de largo, 1.25 m de alto y 0.1 m de espesor. Las longitudes definitivas, permiten analizar las condiciones de un acuífero costero en dos dimensiones. Otra característica del trabajo de grado de Weber fueron las cámaras o cajas laterales que ayudan a mantener cabezas hidráulicas constantes, según la altura que se necesite. En las recomendaciones planteadas de la fase 5 (Título 6.4.1), pueden verse más detalles y consideraciones que se tuvieron en cuenta para el diseño del acuífero a escala de laboratorio.

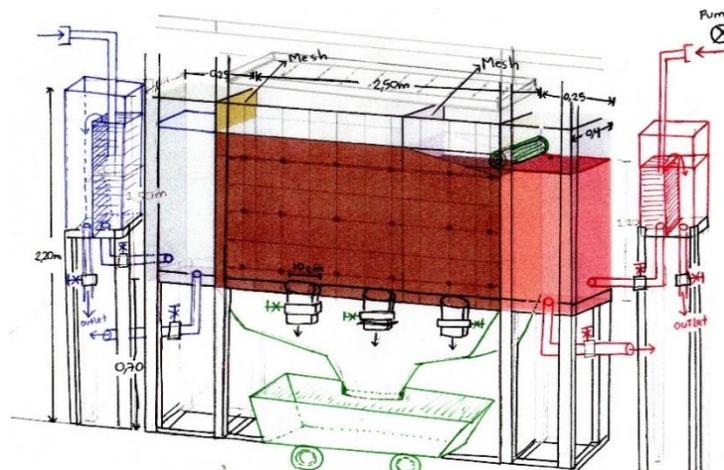


Figura 9. Esquema a mano alzada del diseño preliminar del acuífero costero a escala de laboratorio.

Fuente: Dayana Chalá y Mónica Mieles.



5.1.2. Recopilación y análisis de la información secundaria.

Primeramente, se solicitó al IDEAM un catálogo que permitiera establecer las estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de estudio; se escogió la estación Bayunca ubicada a las afueras del municipio de Bayunca, al norte del departamento de Bolívar, por ser la única que se encontraba en mayor cercanía a los 11 pozos inventariados por ACUACAR (Ver Figura 10 y Figura 11). Sin embargo, se amplió el foco de estudio, escogiendo dos estaciones más: Juan de Acosta y Galerazamba, una por su concordancia en altitud (Chereque Morán, 1989) y la otra por la cercanía en km (CARDIQUE, 2006).

Posteriormente, se gestionó la información de las precipitaciones captadas por la estación Galerazamba, Juan de Acosta y Bayunca para un periodo de 19 años (2000-2018) a la misma entidad. No obstante, solo se obtuvieron valores del 2000 al 2014; los datos faltantes no se encuentran registrados en la plataforma de la entidad hasta la fecha.

Los estudios realizados por ACUACAR y CARIQUE, como información secundaria, permitieron conocer la estratigrafía más representativa del acuífero, que a su vez puede utilizarse para un acuífero piloto, teniendo en cuenta limitaciones de diseño, para finalmente tomar las características propias de estas como parámetros de modelación en el software SUTRA y la interfaz gráfica MODEL MUSE.

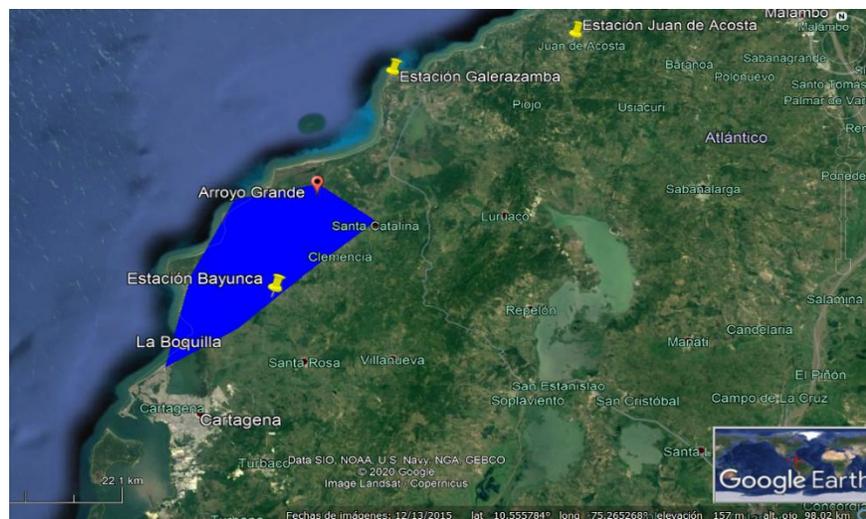


Figura 10. Ubicación de las estaciones pluviométricas de Bayunca, Galerazamba y Juan de Acosta con respecto al acuífero Arroyo Grande.

Fuente: Google Earth.



Figura 11. Ubicación de pozos y sondeos estudiados por CARDIQUE Y ACUACAR.

Fuente: Google Earth

5.2. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO ANUAL

5.2.1. Cálculo del régimen pluviométrico anual.

Con la información suministrada por el IDEAM se realizó un análisis del comportamiento de las precipitaciones diarias evaluadas en valores mensuales, lo que contribuyó en la identificación del comportamiento del régimen pluviométrico anual. Estos valores fueron comparados con un estudio realizado por CARDIQUE.

Con los valores calculados se realizaron procedimientos estadísticos (valores medios, dispersión respecto a ellos, coeficiente de variabilidad, etc.) de tal manera que se sintetizase el máximo de información. Para ello se tuvo en cuenta los análisis hechos por Custodio & Llamas, (1996) Chereque Morán, (1989), y Albentosa, (1976).

5.2.1.1. Lluvia media mensual

En este espacio se calculó las medias de las precipitaciones recibidas en cada mes durante una serie de años para así obtener la lluvia media mensual.

5.2.1.2. Módulo pluviométrico anual medio

Se hizo una sumatoria de las lluvias medias mensuales calculadas en el anterior apartado, lo que permitió conocer el módulo pluviométrico anual medio. Para verificar dicho valor se hizo una sumatoria de todas las lluvias para cada año, y se calculó el promedio de estas,



dando como resultado el mismo valor. También, se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad para cada estación. Con el módulo pluviométrico se realizó un análisis estadístico que permitió estimar los porcentajes de lluvia esperados en un año con probabilidades del 68%, 95% y 98%.

5.2.2. Cálculo de la recarga por precipitación

Para el cálculo de la recarga se utilizó la ecuación empírica de Turc (Ver 2.2.10), la cual relaciona las precipitaciones anuales con las temperaturas promedio anuales. Los valores ideales de precipitación son de la estación que presentó menor porcentaje de coeficiente de variación, es decir, la que presentó menor dispersión de valores con respecto a la media, en este caso la estación de Bayunca fue quién menos presentó dispersión. Sin embargo, esta estación no presenta datos de temperatura en los registros del IDEAM (IDEAM, 2018a). Por lo tanto, se escogieron los datos de precipitación de la estación Galerazamba, debido a su cercanía con la zona de estudio. De esta estación se tomaron los datos de precipitaciones anuales y los datos de temperatura media anual para el período de años estudiado (2010-2014). En la siguiente Tabla 4 se encuentran las recargas calculadas:

Tabla 4. Datos de precipitación anual, temperatura media anual y recarga calculada de la estación Galerazamba.

Año	Precipitación (mm/año)	Temperatura media por año (°C)	Recarga (mm/año)
2000	867,1	24,9	207,6
2001	1125,7	25,4	376,5
2002	780,1	25,8	150,9
2003	1576,3	25,7	735,7
2004	1159	25,6	398,0
2005	1159,7	25,4	401,2
2006	1422,8	25,8	603,4
2007	1609	25,7	762,6
2008	1208,5	25,2	440,7
2009	992,4	25,6	280,6
2010	2286,3	25,8	1380,6
2011	1709,9	25,4	856,8
2012	1333,7	25,3	538,4
2013	1022,1	25,5	301,2
2014	1033,4	25,6	307,8



5.3. ANÁLISIS DE LAS ESTRATIGRAFÍAS MÁS CRÍTICAS DEL ACUÍFERO

5.3.1. Breve descripción de la estratigrafía general del acuífero.

Como ya se mencionó anteriormente (revisar título 2.3), los últimos estudios conocidos públicamente con información del acuífero Arroyo Grande, son CARDIQUE y ACUACAR. De estos se pudo conocer el tamaño aproximado del acuífero, su recarga promedio anual, las características litológicas, la vulnerabilidad de este ante los procesos de intrusión salina, entre otras cosas, todas indispensables para la simulación matemática del acuífero costero a escala de laboratorio.

5.3.2. Selección de estratigrafía representativa

La información recolectada, permitió escoger las estratigrafías más representativas del acuífero Arroyo Grande, teniendo en cuenta la intrusión salina, las cuales se simularán con el software SUTRA y su respectiva interfaz gráfica, MODEL MUSE. Dichas estratigrafías fueron simplificadas de tal manera que correspondiera al tamaño del acuífero piloto.

Del estudio de ACUACAR se estudiaron todos los sondeos geoelectrónicos realizados y de estos se escogieron los sondeos número uno, dos y once (Ver Figura 12), los cuales se encuentran ubicados, respectivamente, en el sector de Pontezuela, sobre camino real, diagonal a la entrada de Cartagena Laguna Club, a 0.6 km de la Vía al Mar; en el sector de Arroyo Grande, sobre la antigua vía a Arroyo Grande a 400 metros al suroccidente del pozo que abastece a Arroyo Grande y en el sector de Arroyo de Piedra, sobre la vía que conduce a Tierra Santa a 90 metros de la Vía al Mar y 380 metros al suroriente de Arroyo de Piedra (ACUACAR & Independence drilling, 2014), (Ver Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

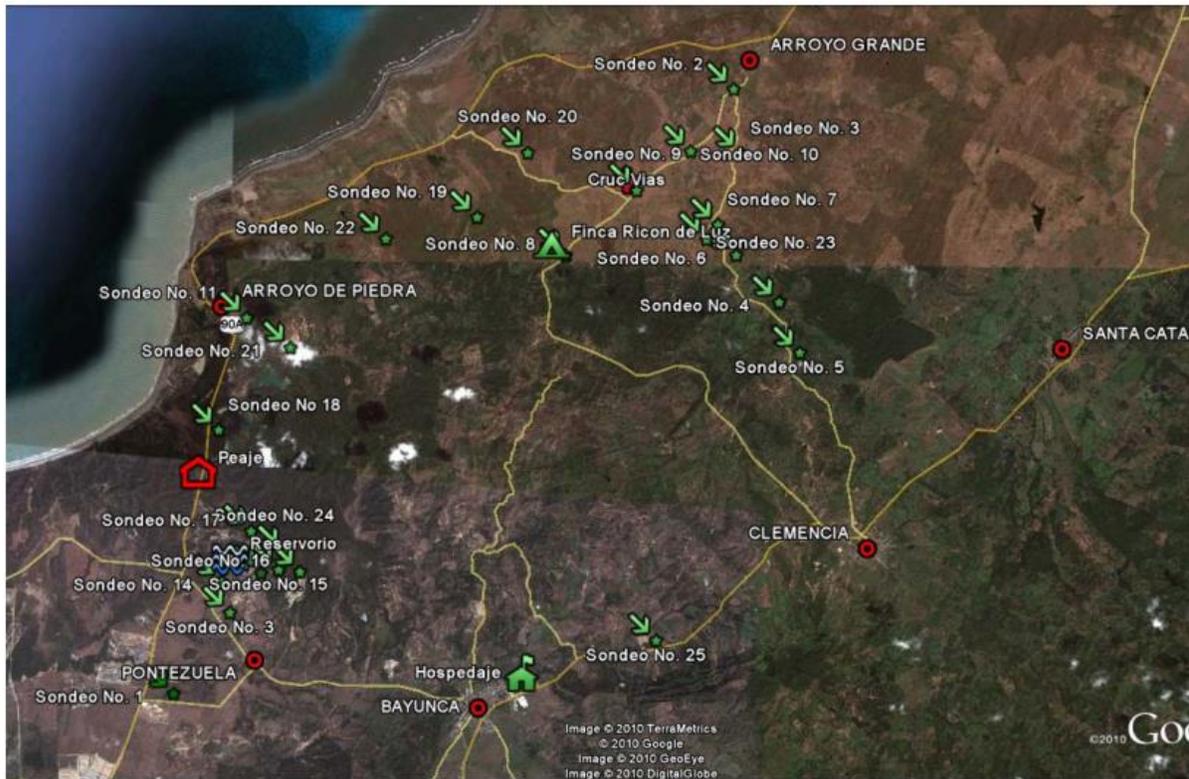


Figura 12. Ubicación de los sondeos geoelectricos realizados por ACUACAR.

Fuente: tomado de (ACUACAR & Independence drilling, 2014)

Capa No.	RESISTIVID. (Omh-metro)	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	77	1.2	1.2	Suelo seco
2	1.7	4.8	6	Arenas saturadas de agua salobre
3	5	9	15	Arenas saturadas salobres intercaladas con arcillas
4	2.8	18	33	Arenas saturadas de agua salobre
5	9	-	-	Basamento Terciario

Figura 13. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 1 realizado por ACUACAR

Fuente: tomado de (ACUACAR & Independence drilling, 2014)



Capa No.	RESISTIVID. (Omh-metro)	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	15.5	1.15	1.15	Suelo seco
2	4.8	3.05	4.2	Arcillas intercaladas con arenas
3	15	10.6	14.8	Arcillas intercaladas con arenas saturadas de aguas duras
4	5.7	29.2	44	Arenas saturadas salobres intercaladas con arcillas
5	25	-	-	Areniscas saturadas de aguas duras con arcillolitas

Figura 14. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 2 realizado por ACUACAR.

Fuente: (ACUACAR & Independence drilling, 2014)

Capa No.	RESISTIVID. (Omh-metro)	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	3.6	1.4	1.4	Suelo
2	7.6	3.1	4.5	Arcillas intercaladas con arenas
3	56	11	15.5	Arenas intercaladas con arcillas
4	3	107.5	123	Arenas saturadas de aguas salobres
5	23	-	-	Basamento Terciario

Figura 15. Información obtenida del sondeo geoelectrico N° 11 realizado por ACUACAR.

Fuente: (ACUACAR & Independence drilling, 2014).

Luego de revisar y analizar la información de cada sondeo, se seleccionó arena y arcilla combinada para simular un solo estrato homogéneo.

5.4. MODELACIÓN DE LA CUÑA SALINA FRENTE A CAMBIOS DE RECARGA

El acuífero costero piloto está conformado por un canal de flujo, con dos reservorios de agua (dulce y salada) a los costados, que se encuentran conectados a este por medio de tuberías; dos bombas peristálticas suministran el agua al reservorio y de este a las cámaras de la caja. El canal está construido en acrílico transparente con grosor de 15 mm, y cuenta con las siguientes dimensiones: 2.7 m de largo, 1.25 de alto, y 0.1 m de espesor. De esos 2.7 m, 0.1 m corresponden a una cámara lateral de agua salada, y 0.1 m a una cámara lateral de agua dulce; los 2.5 m restantes corresponden al material granular en donde se simularía como tal un acuífero. (Ver Figura 16).

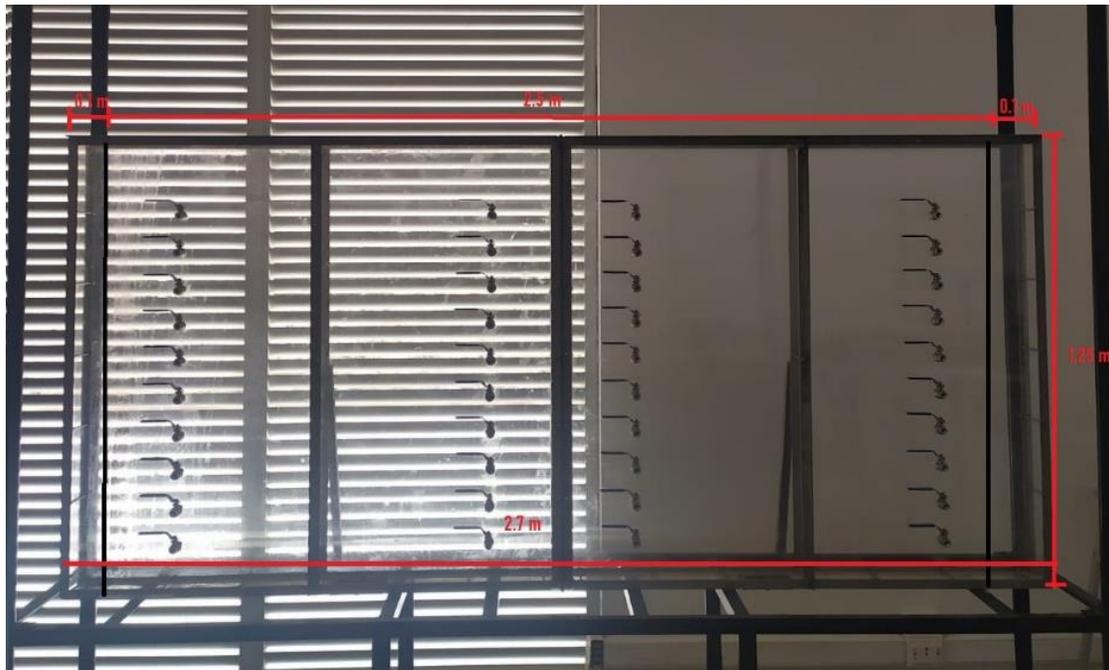


Figura 16. Acuífero a escala de laboratorio sin contenido.

5.4.1. Modelo conceptual bidimensional

Este corresponde a la representación conceptual del acuífero piloto simulado. En él se presenta parte de la hidrodinámica del estudio. En la Figura 17 se presenta un esquema del modelo en dos dimensiones y en la Figura 18 se presenta el mismo esquema, pero en tres dimensiones. Como ya fue aclarado en el alcance, la modelación se realizó para dos dimensiones, sin embargo, se muestra este esquema en 3D con el fin de visualizar como se esperaría que se viera la caja que contiene el acuífero costero piloto de cualquier estudio en laboratorio, ya sea con estas dimensiones o no.

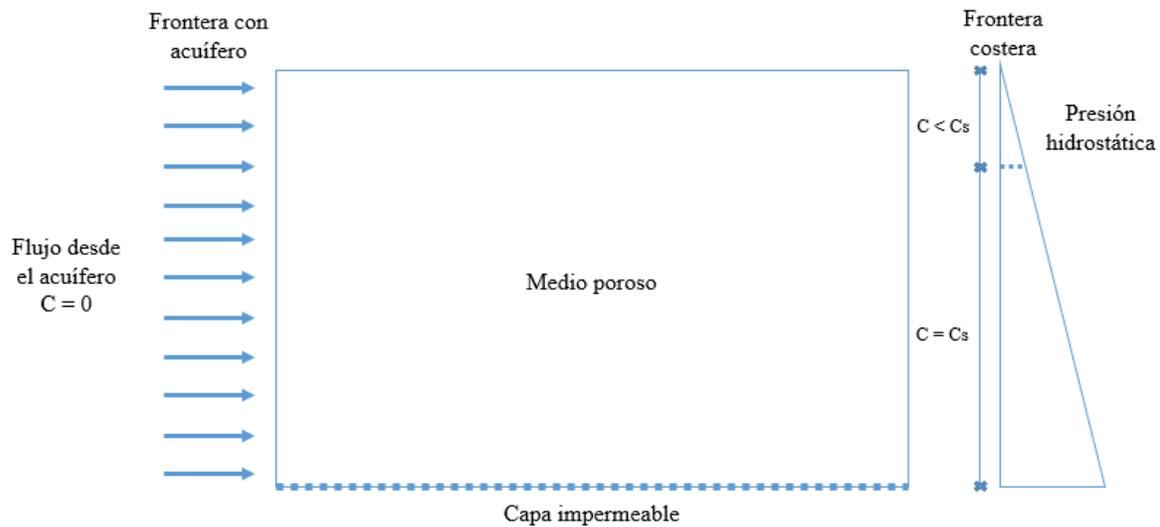


Figura 17. Esquema del modelo conceptual en dos dimensiones.

Fuente: editado de (Botero Acosta, 2015)

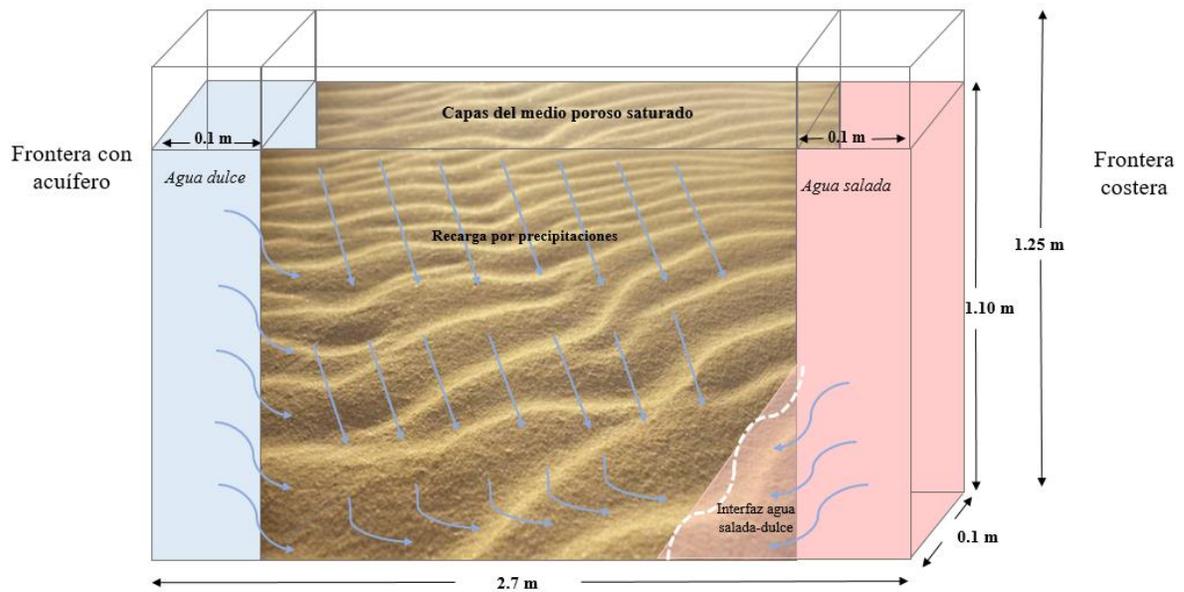


Figura 18. Esquema del modelo conceptual del acuífero piloto.

5.4.2. Influencia de la recarga por agua lluvia en la cuña.

A continuación, se presentan los escenarios planteados, teniendo en cuenta la estratigrafía escogida previamente y, a su vez, se muestran los parámetros utilizados en la modelación numérica.



5.4.2.1. Escenarios de estudio para la modelación

Los escenarios escogidos se basan en la variación de un parámetro: la recarga obtenida de las precipitaciones. Se escogió una estratigrafía homogénea para representar el sistema acuífero Arroyo Grande. Con esta se simuló las recargas calculadas y escogidas como representativas de la zona: un valor máximo, un valor medio y un valor mínimo que conservan el régimen pluviométrico analizado:

Tabla 5. Escenarios escogidos para modelación numérica.

Medio \ Recarga	Sin recarga	Mínima	Media	Máxima
Homogéneo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4

5.4.2.2. Parámetros para la modelación en SUTRA y MODEL MUSE

Como ya se mencionó anteriormente, la información relacionada a la litología escogida fue tomada del estudio realizado por ACUACAR, sin embargo, este no cuenta con algunos datos hidrogeológicos necesarios para la modelación. En vista de eso, algunos parámetros han sido supuestos gracias a la orientación de artículos, libros, y reportes (Abdoulhalik et al., 2020; AQTESOLV, 2012; Botero-Acosta & Donado, 2015; Cutodio & Llamas, 1996; Energía chi cuadrado, 2012; Guo et al., 2019, 2020). Las unidades presentadas en la Tabla 6 corresponden a las que usa el modelo para sus soluciones. En el caso de los valores de recarga estos fueron convertidos de mm/año a m³/s.

Tabla 6. Parámetros de la modelación numérica para el medio poroso.

Definición	Unidad	Valor	
Conductividad hidráulica	m/s	Arena y arcilla:	1x10 ⁻⁸
Densidad del agua dulce	Kg/m ³	1.000	
Densidad del agua salada	Kg/m ³	1.012,6	
Concentración del agua dulce	%	0	
Concentración del agua salada	%	1.8	
Dispersividad longitudinal y transversal	m	0.002	
Porosidad		0.35	
Tiempo simulado	horas	3	
Recarga	m ³ /s	Mínima	4,78184x10 ⁻⁹
		Media	1,27135x10 ⁻⁸
		Máxima	4,37495 x10 ⁻⁸



5.4.2.2.1. Condiciones de frontera y geometría

Las condiciones de frontera utilizadas para el modelo fueron dos cabezas hidráulicas constantes ubicadas en cada esquina de la malla, que van desde el final a la superficie de la malla. La geometría de la malla fue un rectángulo cuadrado de 1.10 de alto por 2.5 de largo, discretizado con 540 elementos en el eje “x”, y 220 elementos en el eje “y”. El alto del modelo no fue de 1.25 debido a que, en la vida real, el acuífero piloto debe tener un espacio del medio poroso a la superficie total, caso tal que cuando se simulen procesos de inundaciones y/o recarga por precipitaciones no se desborde el agua.

El tamaño de los elementos de la malla, o resolución, fue de 0.5 x 0.5 cm. Se utilizó un tamaño de paso de 30 segundos, para tres horas, lo cual dio como resultado 360 pasos. La información se recolectó cada 20 minutos.

Adicional, a las cabezas hidráulicas se utilizaron dos condiciones de flujo en la parte superior e inferior. En la parte superior se estableció una condición de flujo que permitió el paso de la recarga, y en la inferior una condición de no flujo.

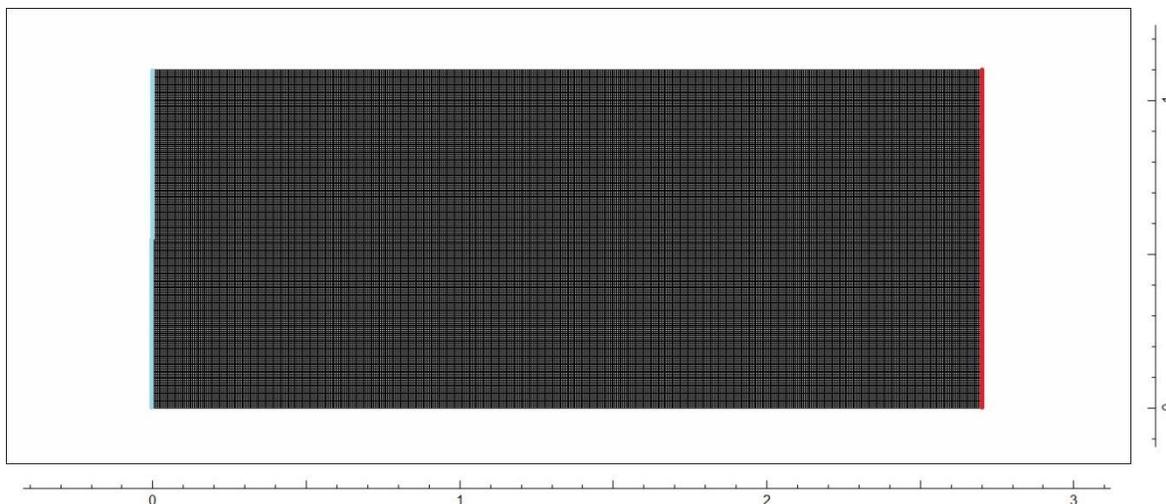


Figura 19. Representación de la malla de elementos finitos, con sus condiciones de frontera.

La línea roja, al costado derecho simboliza la cabeza hidráulica del agua salada que simula el contacto del acuífero con el mar; la línea azul simboliza la cabeza hidráulica del agua dulce del acuífero. En cuanto a las condiciones de flujo, no logran visualizarse en la Figura 19, puesto que la malla es ampliamente fina.



5.4.2.2.2. Condiciones iniciales

Tabla 7. Variables de estudio para modelación numérica.

Variables de estudio			
Independientes	Valor	Dependientes	Valor
Recarga	Sin recarga	Concentración de sal	1.8 %
Estratigrafía	Escenarios propuestos	Desplazamiento de la cuña	Formación “natural” en el modelo

5.5. PLANTEAMIENTO DE RECOMENDACIONES

5.5.1. Recomendaciones para el manejo de acuíferos pilotos.

Las recomendaciones acordes a la operatividad de prototipos de acuíferos costeros fueron basadas en diversos estudios encontrados en la literatura y en los resultados obtenidos por medio de la modelación. Primeramente, se describen algunos de los parámetros más relevantes que deben tenerse en cuenta para la construcción de un acuífero a escala de laboratorio. Luego, se presentan dos tablas en donde se compararon los tamaños de los prototipos y las variables involucradas en cada estudio. También se tuvo en cuenta el material granular que simularía el medio poroso de cada equipo y finalmente, no por menos importante, se observaron los procesos de llenado del prototipo para que la formación de la cuña fuese estable. Cabe resaltar que todos los equipos son diferentes y que no se tiene hasta el momento un manual certificado que especifique el tamaño que deben tener estos.

Finalmente, se describe uno de los posibles procesos de llenado del tanque o caja que simula al acuífero costero.

5.5.2. Sugerencias que contribuyan en la mitigación de la intrusión salina.

De acuerdo con la literatura consultada se mencionan algunas medidas que se han utilizado en el mundo cuando un acuífero costero presenta procesos de intrusión marina y se comparan con las políticas ambientales que dispone la nación para este tipo de eventos.



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo presentado a continuación son los resultados obtenidos durante la investigación. Cada uno de estos dan respuesta al objetivo general, para el cual se obtuvo: el análisis del régimen medio anual de las precipitaciones de la zona de influencia del acuífero de Arroyo Grande; las estratigrafías geológicas más críticas del acuífero; la modelación del comportamiento de la cuña salina frente a cambios de recarga del acuífero en función de las precipitaciones máximas, mínimas y medias, y por último el planteamiento de recomendaciones en cuanto a la operatividad de acuíferos costeros a escala de laboratorio y a su vez, sugerencias que contribuyan en la mitigación de los efectos del desplazamiento de la cuña salina al interior del acuífero en épocas de bajas precipitaciones.

6.1. ANÁLISIS DE LOS RÉGIMENES DE PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN QUE COMPRENDE EL ACUÍFERO ARROYO GRANDE.

6.1.1. *Cálculo y análisis del régimen pluviométrico anual.*

A continuación, se presenta el comportamiento de las precipitaciones medidas por mes en un período de 15 años para las estaciones de Bayunca, Galerazamba y Juan de Acosta. En cada una se muestra el análisis pluviométrico anual y mensual; parámetros estadísticos como desviación estándar y coeficiente de variabilidad.

Las estaciones escogidas hacen parte del catálogo disponible del IDEAM que cuentan con mayor cercanía a la zona de estudio. Otro motivo por el que se seleccionaron estas, es que la estación de Bayunca y la de Galerazamba fueron objeto de estudio para el balance hídrico realizado por CARDIQUE, (2006). Sin embargo, la estación Juan de Acosta ubicada en el departamento del Atlántico fue escogida por tener la misma latitud (Chereque Morán, 1989) que la de Galerazamba y por ser la más cercana a la zona de estudio en comparación a la de Piojó que también fue usada en el estudio de CARDIQUE.

En la Figura 10 se aprecia la ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas, tomadas como referente de la zona de influencia del acuífero Arroyo Grande. El polígono en azul es un aproximado del área del acuífero el cual fue esquematizado gracias a la ubicación de los sondeos y pozos estudiados por CARDIQUE Y ACUACAR (Ver Figura 11).



6.1.1.1. Estación Galerazamba.

Tabla 8. Precipitaciones mensuales de la estación Galerazamba en mm.

Precipitaciones mensuales (mm)													
Año/Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Σ
2000	0	0	0	0	41,5	86,3	128	46,9	172,4	173,5	89,7	69,5	807,8
2001	0	0	0	0	39,9	15,8	14,3	68,9	158,9	217,5	48,7	72,5	636,5
2002	0	0	0	0	46	43	32,5	143,3	125,4	57,3	56,3	0	503,8
2003	0	0	0	67	65	58,3	47,6	179,5	338	88,6	52,9	41,5	938,4
2004	0	0	0	0	179,6	97,3	139,8	83,7	242	112,1	84,5	0	939
2005	0	0	0	2	49,2	116,6	60,5	44,2	127,6	139,9	329,2	0	869,2
2006	0,6	1,1	0	75,9	69	83,1	144,8	77,7	62	75,2	99,1	5,5	694
2007	0	0	3,2	44,3	120	193,6	148,5	301,9	47	349,8	50,1	0	1258,4
2008	0	0	0,4	3,7	71,4	39,8	98,1	243,2	237	234,6	193,1	0	1121,3
2009	0	0	3,5	0	22,2	103	9	90,1	104,6	45,6	122,3	4,4	504,7
2010	0	0	96	9,5	82,3	192,9	405,6	165,8	123,5	404,2	320,3	106	1906,1
2011	2,9	0	2,9	0,4	95,2	86,4	120,2	158,5	203,4	361,8	225,6	11,3	1268,6
2012	0	0	0	2,4	87,2	18,9	3,1	153,3	101,5	162,3	40,1	0	568,8
2013	0	0	0	6	118,9	31,7	28,4	204,2	109,8	208,2	46,8	18,2	772,2
2014	0	0	0	0	19,8	1,3	0	49,8	71,1	96,3	42,4	0	280,7
\bar{x}	0,23	0,07	7,07	14,08	73,81	77,87	92,03	134,067	148,28	181,79	120,07	21,93	871,3

Fuente: Autor.

El módulo pluviométrico anual para las precipitaciones presentadas en la Tabla 8 es de 871,3 mm. Dicho valor corresponde también al valor central dominante de los datos; indica o da una idea aproximada de la magnitud de las lluvias anuales en Galerazamba.

Con el valor anterior se calculó también la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad:



Tabla 9. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Galerazamba.

Año	Precipitaciones por año (mm)	Desviación Estándar (S_x)	
		$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
2000	807,8	-63,5	4032,3
2001	636,5	-234,8	55131,0
2002	503,8	-367,5	135056,3
2003	938,4	67,1	4502,4
2004	939	67,7	4583,3
2005	869,2	-2,1	4,4
2006	694	-177,3	31435,3
2007	1258,4	387,1	149846,4
2008	1121,3	250,0	62500,0
2009	504,7	-366,6	134395,6
2010	1906,1	1034,8	1070811,0
2011	1268,6	397,3	157847,3
2012	568,8	-302,5	91506,3
2013	772,2	-99,1	9820,8
2014	280,7	-590,6	348808,4
S_x (mm)			401,81
Y			46,12 %

Fuente: Autor.

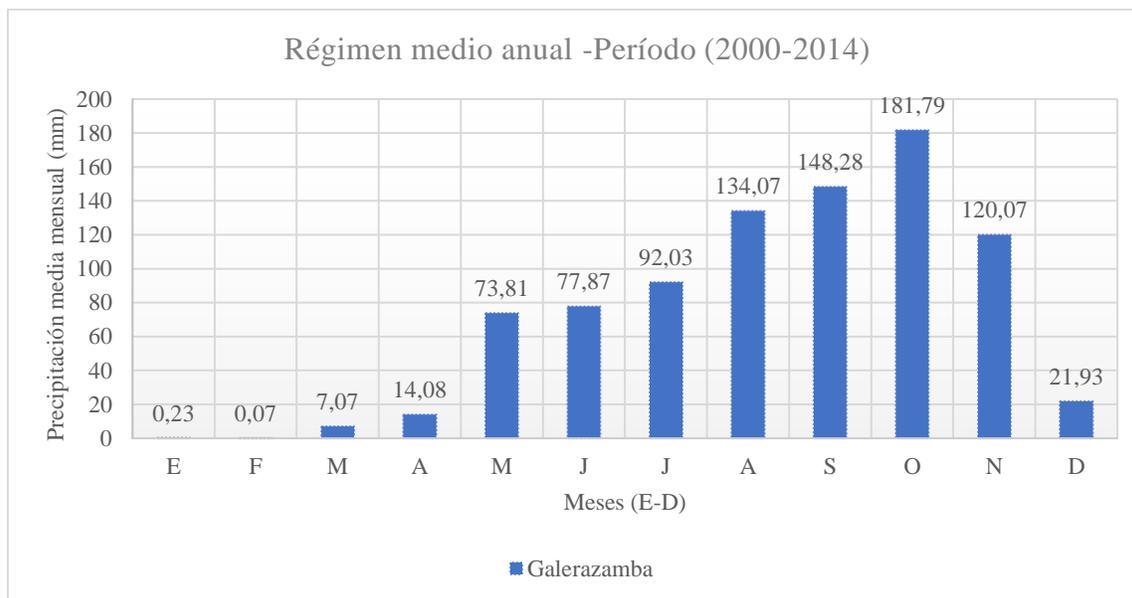


Gráfico 1. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Galerazamba.

Fuente: Autor.

El Gráfico 1 permite observar que el mes con mayor precipitación durante los 15 años de estudio es el mes de octubre con 181.79 mm y que el mes con menor precipitación es enero con 0,23 mm. Sin embargo, al analizar los valores mensuales de todos los años del período evaluado se observa que solo dos años (2006 y 2011) presentan precipitación, por tanto, se crea cierta incertidumbre al decir que 0,23 mm es el valor que representa las precipitaciones del mes de enero, cuando la naturalidad de este es no presentar ninguna precipitación. Con el mes de octubre se observa que los valores a pesar de ser dispersos el valor medio del mes se considera más aceptable.

Por otro lado, en la Tabla 9 se observa que la desviación estándar respecto al módulo pluviométrico anual es de 401,81 mm, con un coeficiente de variación del 46,12% lo que supone una dispersión grande de los valores con respecto a la media. Aun así, al suponer que las precipitaciones anuales de Galerazamba constituyen una población normal, y que la muestra estudiada corresponde también a una distribución de frecuencias normal como la población, se tiene entonces que el punto medio de la campana de Gauss corresponde al valor medio (módulo pluviométrico anual), y los demás valores respecto a la media se reparten así:



- ✓ El 68% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm S_x$
- ✓ El 95% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm 2 S_x$
- ✓ El 98% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm \frac{2}{3} S_x$

Es decir,

- ✓ Existe una probabilidad del 68% que se tenga una precipitación anual entre 1273,11 y 469,49 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 95% que se tenga una precipitación anual entre 1674,92 y 67,68 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 98% que se tenga una precipitación anual entre 1139,17 y 603,42 mm.



6.1.1.2. Estación Juan de Acosta.

Tabla 10. Precipitaciones mensuales de la estación Juan de Acosta en mm.

Precipitaciones mensuales (mm)													
Año/ Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Σ
2000	0	0	0	29,2	108	148,7	169,6	76,3	77,5	129	44,9	121,1	904,3
2001	0	0	1,4	22,5	138,3	29,3	50,5	155,5	188,8	227,8	95,4	76,4	985,9
2002	0	0	0	20,6	31,5	38,8	106,1	65,3	188,6	215,6	147,6	1,1	815,2
2003	0	0,3	0	79,5	96,5	86,3	147,4	219,2	207,6	266,1	194,1	193,6	1490,6
2004	0	0	0	0	0	39,4	113	125,2	104,1	294,2	153,9	0	829,8
2005	0,8	0	0,5	6,4	115,5	286,1	153,3	97,4	154,9	302,6	306,4	0,8	1424,7
2006	15,9	0	6,3	28,5	92,1	168,5	99,8	107,8	193,4	168,5	202	38	1120,8
2007	0	2,5	0	117,9	107,7	92,8	97,5	280,8	154	235,2	43,9	31,8	1164,1
2008	0	0	7,3	32,2	51	111,9	119,6	154,5	360,5	254,4	289,6	21,9	1402,9
2009	0	0,5	2,8	0	94,4	273	72,2	120,3	71,1	188,6	169,4	14	1006,3
2010	0	0	25,1	50,5	88,5	328,4	275,1	392,6	105,3	276,6	391,7	97	2030,8
2011	4,4	0	6	23,8	132	304,9	292,7	203,3	168,1	384,1	318,8	66,9	1905
2012	0	0	18,5	147,3	186,9	88	59,5	213,1	73	189,2	105,6	25,5	1106,6
2013	0	0	0,3	62,7	143,5	140,9	64	156,5	166,7	199,5	136,4	34,6	1105,1
2014	0	0	0	10,6	106,4	15,4	23,2	100,6	189,5	177,6	100,2	63,8	787,3
\bar{x}	1,41	0,22	4,55	42,11	99,49	143,49	122,90	164,56	160,21	233,93	179,99	52,43	1205,3

Fuente: Autor.

El módulo pluviométrico anual para las precipitaciones presentadas en la Tabla 10 es de 1205,3 mm. Dicho valor corresponde también al valor central dominante de los datos; indica o da una idea aproximada de la magnitud de las lluvias en Juan de Acosta (Atlántico).

Con el valor anterior se calculó también la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad:



Tabla 11. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Juan de Acosta.

Año	Precipitaciones por año (mm)	Desviación Estándar (S_x)	
		$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
2000	904,3	-301,0	90597,0
2001	1424,7	219,4	48139,3
2002	985,9	-219,4	48133,4
2003	815,2	-390,1	152172,8
2004	838,8	-366,5	134317,4
2005	1481,6	276,3	76345,4
2006	1120,8	-84,5	7139,1
2007	1164,1	-41,2	1696,9
2008	1402,9	197,6	39048,4
2009	1006,3	-199,0	39598,3
2010	2030,8	825,5	681461,3
2011	1905	699,7	489589,4
2012	1106,6	-98,7	9740,4
2013	1105,1	-100,2	10038,7
2014	787,3	-418,0	174718,4
S_x (mm)			370,70
Y			30,76%

Fuente: Autor

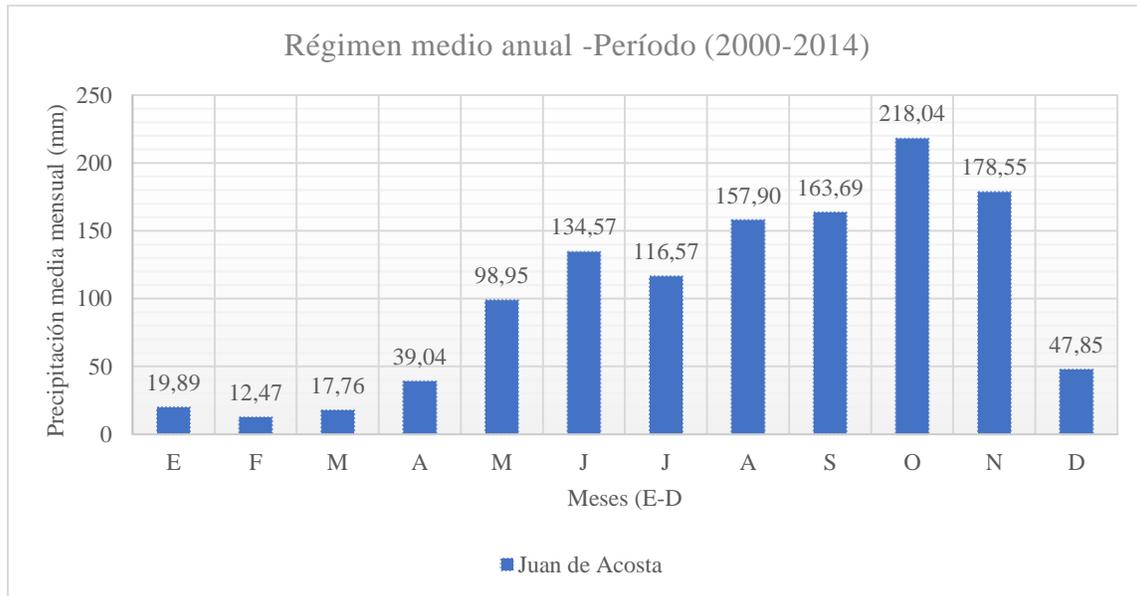


Gráfico 2. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Juan de Acosta.

Fuente: Autor

El Gráfico 2 permite observar que el mes con mayor precipitación durante los 15 años de estudio es el mes de octubre con 218,04 mm y que el mes con menor precipitación es febrero con 12,47 mm. Sin embargo, al analizar los valores mensuales de todos los febreros del período evaluado se observa que solo tres años (2003, 2007 y 2009) presentan precipitación, por tanto, se crea cierta incertidumbre al decir que 12,47 mm es el valor que representa las precipitaciones del mes de febrero, cuando la naturalidad de este es no presentar ninguna precipitación.

Por otro lado, en la Tabla 11 se observa que la desviación estándar respecto al módulo pluviométrico anual es de 370,70 mm con un coeficiente de variación del 30,76% , lo que a diferencia de la estación Galerazamba, supone una dispersión menor respecto a la media de 1205,3. Por tanto, al suponer que las precipitaciones anuales de Juan de Acosta constituyen una población normal, y que la muestra estudiada corresponde también a una distribución de frecuencias normal como la población, se tiene entonces que el punto medio de la campana de Gauss corresponde al valor medio (módulo pluviométrico anual), y los demás valores respecto a la media se reparten así:

- ✓ El 68% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm S_x$



- ✓ El 95% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm 2 S_x$
- ✓ El 98% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm \frac{2}{3} S_x$

Es decir,

- ✓ Existe una probabilidad del 68% que se tenga una precipitación anual entre 1576 y 834,6 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 95% que se tenga una precipitación anual entre 1946,7 y 463,9 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 98% que se tenga una precipitación anual entre 1452,43 y 958,17 mm.



6.1.1.3. Estación Bayunca.

Tabla 12. Precipitaciones mensuales de la estación Bayunca en mm.

Precipitaciones mensuales (mm)													
Año/ Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Σ
2000	0,9	0,4	0,7	30,1	146,9	86,3	101,9	126,2	167,4	78,5	89,9	37,9	867,1
2001	60,5	0	62	5	106,9	110,9	103,2	14,4	69,4	460,1	118,3	15	1125,7
2002	2,1	0	12	16	178,6	81,6	58,2	104,5	98,7	60,7	166,2	1,5	780,1
2003	0	0	0	96,9	50,6	303,8	177	100,2	217,6	255,5	174,5	200,2	1576,3
2004	0	0	0	0	0	45	174,5	157,8	237,9	231,4	312,4	0	1159
2005	0,2	0	1,1	2,5	155	82,6	125,6	157,8	97,5	267	263,4	7	1159,7
2006	24	0	3	49,3	202,5	131,2	109,7	110,1	217,1	261,6	255,9	58,4	1422,8
2007	0	1	0	162,4	141,6	69,9	94,2	171,7	177	700,6	90,6	0	1609
2008	0	0	0	86,5	63,7	142,6	251,8	144,3	179,4	124,8	212,4	3	1208,5
2009	11,7	0,5	0	5,7	93,3	225,5	80,1	141,5	143,3	137,4	114,2	39,2	992,4
2010	0	0	14	48,8	120,3	187,3	265,5	273,4	189,5	449	552,8	185,7	2286,3
2011	0	0	27,8	30	109	230,6	155,8	142,6	263,3	387,7	261,2	101,9	1709,9
2012	0	0	0	196,5	175,9	62,9	59,4	240,3	288,4	239,1	64	7,2	1333,7
2013	0	0	0	39,7	83,4	154,8	139,9	160,8	158,5	188,4	96,6	0	1022,1
2014	0	0	0	52	54,2	35	8,5	152,7	157	389,5	171,2	13,3	1033,4
\bar{x}	6,63	0,13	8,04	54,76	112,13	130,00	127,02	146,55	177,47	282,09	196,24	44,69	1285,73

Fuente: Autor

El módulo pluviométrico anual para las precipitaciones presentadas en la Tabla 10 es de 1285,73 mm. Dicho valor corresponde también al valor central dominante de los datos; indica o da una idea aproximada de la magnitud de las lluvias en la estación Bayunca que se encuentra en la ciudad de Cartagena de Indias.

Con el valor anterior se calculó también la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad:



Tabla 13. Desviación estándar y coeficiente de variabilidad para la estación Bayunca.

Año	Precipitaciones por año	Desviación Estándar (S _x)	
		$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
2000	867,1	-418,6	175253,9
2001	1125,7	-160,0	25610,7
2002	780,1	-505,6	255665,1
2003	1576,3	290,6	84429,0
2004	1159	-126,7	16061,3
2005	1159,7	-126,0	15884,4
2006	1422,8	137,1	18787,3
2007	1609	323,3	104501,3
2008	1208,5	-77,2	5965,0
2009	992,4	-293,3	86044,4
2010	2286,3	1000,6	1001133,7
2011	1709,9	424,2	179917,4
2012	1333,7	48,0	2300,8
2013	1022,1	-263,6	69502,5
2014	1033,4	-252,3	63672,1
S_x			370,70
Y			28,83 %

Fuente: Autor

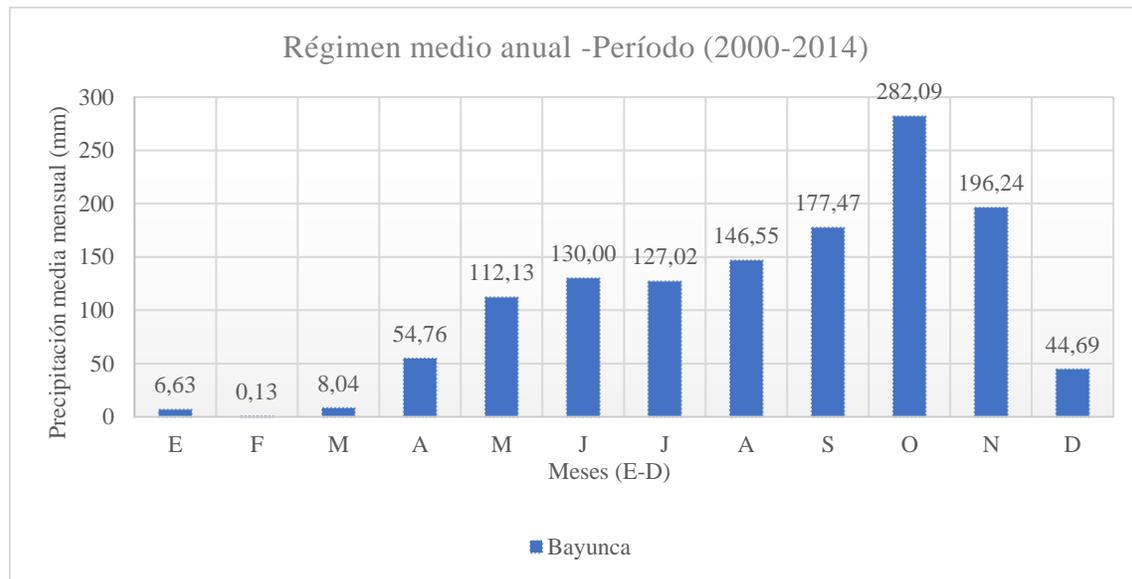


Gráfico 3. Comportamiento de las lluvias para un período de 15 años en la estación Bayunca.

Fuente: Autor

El Gráfico 3 permite observar que el mes con mayor precipitación durante los 15 años de estudio, al igual que en las otras estaciones, es el mes de octubre con 282,09 mm y que el mes con menor precipitación es febrero con 0,13 mm. Sin embargo, al analizar los valores mensuales de todos los febreros del período evaluado se observa que solo tres años (2000, 2007 y 2009) presentan precipitación, por tanto, se crea cierta incertidumbre al decir que 0,13 mm es el valor que representa las precipitaciones del mes de febrero, cuando la naturalidad de este es no presentar ninguna precipitación.

Por otro lado, en la Tabla 13 se observa que la desviación estándar respecto al módulo pluviométrico anual es de 370,70 mm, con un coeficiente de variación del 28,83% lo que a diferencia de la estación Galerazamba, supone una dispersión menor respecto a la media de 1285,73. Por tanto, al suponer que las precipitaciones anuales de Cartagena constituyen una población normal, y que la muestra estudiada corresponde también a una distribución de frecuencias normal como la población, se tiene entonces que el punto medio de la campana de Gauss corresponde al valor medio (módulo pluviométrico anual), y los demás valores respecto a la media se reparten así:

- ✓ El 68% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm S_x$



- ✓ El 95% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm 2 S_x$
- ✓ El 98% de los datos se localiza entre $\bar{x} \pm \frac{2}{3} S_x$

Es decir,

- ✓ Existe una probabilidad del 68% que se tenga una precipitación anual entre 1656,43 y 915,03 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 95% que se tenga una precipitación anual entre 2027,13 y 544,33 mm.
- ✓ Existe una probabilidad del 98% que se tenga una precipitación anual entre 1532,86 y 1038,59 mm.

Al comparar los tres coeficientes de variación se aprecia que la estación que más presenta dispersión respecto a sus datos es la estación Galerazamba y la que menos presenta es la estación Bayunca, seguida de la estación de Juan de Acosta. Es probable que ello sea producto de la insuficiencia de datos correspondientes a un día pluviométrico para el periodo de 15 años (2000-2014) de la estación Galerazamba, entregados en la documentación del IDEAM; puesto que se encontraron meses de 30 días con información para 20 días, y casos más extremos como un mes que solo tenía información para 5 días.

A pesar de las discrepancias encontradas, es posible resaltar que en las tres estaciones el mes que presenta más lluvias es octubre y los que menos presentan corresponden a enero, febrero, marzo y diciembre, lo cual concuerda con el comportamiento climatológico general de la zona de estudio (ACUACAR & Independence drilling, 2014).

Otro factor que es posible analizar son los años que más lluvias presentaron. En las tres estaciones, el año que más presentó mm de precipitación fue el año 2010, seguido casi inmediatamente por el año 2011 (Ver Anexo 1, Anexo 2, y Anexo 3). Ambos concuerdan con el fenómeno de la niña que azotó al país, especialmente en la región Andina, Pacífica y Caribe, dejando numerosos estragos en esta última. En cuanto al año con menor precipitación se encuentra el año 2014 en las estaciones Galerazamba y Juan de Acosta; en Bayunca esto ocurrió en el año 2002. No obstante, el año 2014 concuerda con el inicio del fenómeno del Niño que culminó en el año 2016. Estos acontecimientos cíclicos han marcado y seguirán



marcado a la región mientras no se tomen las medidas pertinentes, especialmente en los municipios que tienen deficiencias en estructuras de protección contra inundaciones cuando se presenta el fenómeno de la Niña, y mecanismos de prevención cuando le corresponde el ciclo al fenómeno del Niño.

6.1.2. Recarga.

Los datos calculados permitieron escoger los valores mínimos, medios y máximos de recarga, relacionados con las precipitaciones representativas de la zona de estudio. Estos datos, fueron utilizados posteriormente para la modelación.

Tabla 14. Valores de recarga escogidos para la modelación.

Recarga (mm/año)		
Valor mínimo	Valor medio	Valor máximo
150,9	401,2	1380,6

Fuente: Autor.

6.2. ESTRATIGRAFÍAS GEOLÓGICAS MÁS CRÍTICAS DEL ACUÍFERO DE ARROYO GRANDE, CON RELACIÓN A LOS PROCESOS DE RECARGA Y TRANSPORTE DE SOLUTOS QUE PODRÍAN SER SIMULADAS EN UN PROTOTIPO DEL ACUÍFERO A ESCALA DE LABORATORIO.

Cuando se tiene la intención de modelar un acuífero a escala piloto se busca que este sea lo más cercano a la realidad, por ello es importante conocer sus características y con base a la intención del estudio, usarlas para recrearlo en el laboratorio. Por otro lado, también es pertinente modelar numéricamente el piloto, puesto que cuando se construye uno es difícil saber a qué concentraciones, conductividades hidráulicas, porosidades, estratigrafías, etc. funciona.

6.2.1. Breve descripción de la estratigrafía general del acuífero.

El acuífero costero Arroyo Grande, hace parte del Sistema Acuífero Arroyo Grande, el cual comprende materiales de tipos sedimentarios pertenecientes a la Formación Arroyo Grande, Formación Bayunca, Formación Arjona, Depósitos De Playa y Coluvioaluviales, siendo la



primera la más importante y extensa desde el punto de vista hidrogeológico. Dicho acuífero cuenta con una extensión de aproximadamente 62 km² y un espesor promedio de 120 m. Su recarga real se estima en 150 mm/año con una porosidad del 20% (CARDIQUE, 2006).

Un poco más en detalle, se tiene que (ACUACAR & Independence drilling, 2014), (Ver Figura 20):

- El sistema acuífero Arroyo Grande se observan rellenos cuaternarios arenosos influenciados por formaciones terciarias.
- En las primeras capas se observa un suelo seco con resistividades que oscilan entre 3.6 a 710 Ohm-m y espesores que varían entre los 1.15 y los 6.6 metros, esta resistividad tiene variaciones dependiendo del grado de humedad que presente y al porcentaje de material fino.
- En la siguiente capa se distinguen formaciones arcillo-arenosas con resistividades de 5 a 12 Ohm-m.
- En las terceras capas se observan arenas saturadas de aguas salobres resistividades que oscilan entre los 1.5 a 4.9 Ohm-m.
- Luego se encuentran capas de arenas saturadas de agua salobre intercaladas con arcillas con resistividades que varían entre 3.2 a 8.9 Ohmm.
- Por último, se encuentra una capa que se correlaciona con el basamento sedimentario cuya resistividad varía entre 2.8 a 12.7 Ohm-m, igualmente se relaciona basamento terciario calcáreo con resistividades mayores que oscilan entre 3.3 a 23 Ohm-m.

Se observa, además que en el sector de Arroyo Grande se observan capas de arena saturadas de aguas duras con resistividades de 19.7 a 43 Ohm-m, que en algunos casos presenta intercalaciones de material arcilloso bajando su resistividad a valores de 10.5 Ohm-m. En algunos casos se observan formaciones calcáreas con resistividades que oscilan entre 82 a 610 Ohm-m.

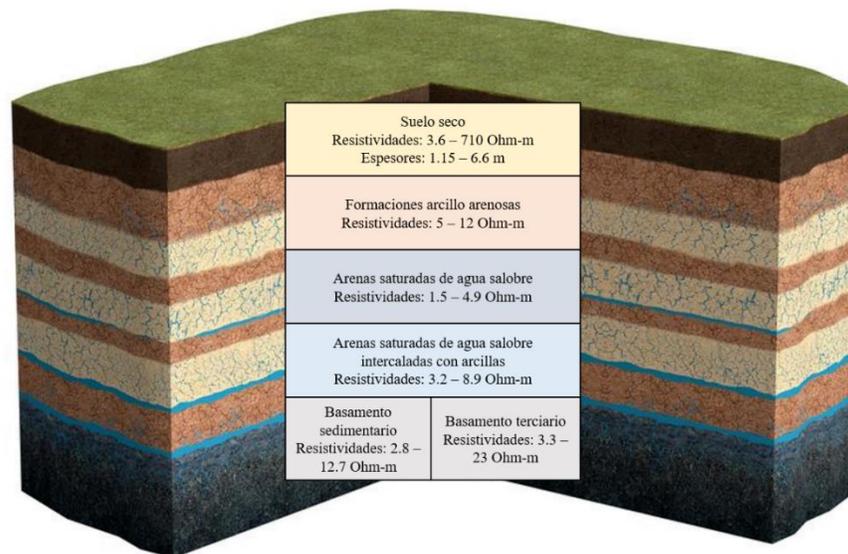


Figura 20. Esquema de la hidrogeología general del Sistema Acuífero Arroyo Grande.

6.2.2. Selección de estratigrafía representativa.

De los sondeos realizados por ACUACAR se escogieron las zonas con mayor vulnerabilidad a procesos de intrusión salina y/o presencia de material arcilloso: los sondeos 1, 2, y 11 (Ver Tabla 15).

Tabla 15. Información de los sondeos que presentaron mayor vulnerabilidad a procesos de intrusión salina.

Sondeo	Ubicación	Correlación hidrogeológica
1	Sector de Pontezuela, sobre camino real, diagonal a la entrada de Cartagena Laguna Club, a 0.6 km de la Vía al Mar.	<ul style="list-style-type: none"> Suelo seco Arenas saturadas de agua salobre Arenas saturadas intercaladas con arcillas Arenas saturadas de agua salobre Basamento terciario
2	Sector de Arroyo Grande, sobre la antigua vía a Arroyo Grande a 400 metros al suroccidente del pozo que abastece a Arroyo Grande	<ul style="list-style-type: none"> Suelo seco Arcillas intercaladas con arenas Arcillas intercaladas con arenas saturadas de aguas duras Arenas saturadas salobres intercaladas con arcillas Areniscas saturadas de aguas duras con arcillolitas
11	Sector de Arroyo de Piedra, sobre la vía que conduce a Tierra Santa a 90 metros de la Vía al Mar y 380 metros al suroriente de Arroyo de Piedra.	<ul style="list-style-type: none"> Suelo Arcillas intercaladas con arenas Arenas intercaladas con arcillas Arenas saturadas de aguas salobres Basamento terciario

Fuente: modificado de (ACUACAR & Independence drilling, 2014)



Es importante aclarar que de la información de los sondeos N°1 y N°11 no son parte directa del acuífero Arroyo Grande, sino del Sistema Acuífero como tal. Estos fueron escogidos por su alta presencia de aguas salobres y arcilla en comparación con el resto de los sondeos realizados por la entidad. Por otro lado, el sondeo N°2 es el único que se encuentra en mayor cercanía con el acuífero y que además presenta agua salobre en su interior. En general, ACUACAR, resalta que los acuíferos de la zona son salobres por lo tanto es muy probable que el agua que se extraiga tendrá concentraciones salinidad relativamente altas, de esta manera su uso estaría condicionado a los parámetros de calidad.

Se esperaba tomar alguno de los sondeos analizados y simularlo, sin embargo, se evaluaron todas las características de estos sondeos, y se encontró una gran prevalencia de arena y arcilla en las capas saturadas, por ello se decidió simular un solo estrato homogéneo obtenido de la combinación de arena con arcilla. Lo anterior facilitó el escalamiento, puesto que todo el medio poroso tendría la dimensión del modelo numérico, tal como planteó (Botero Acosta, 2015) en su tesis de maestría, en la cual tomó como referencia la estratigrafía del acuífero costero de Morrosquillo y simuló dos estratos de arena, uno homogéneo y otro heterogéneo.

6.2.2.1. Escalamiento de estratigrafía que puede ser utilizada en un acuífero costero a escala de laboratorio.

Normalmente los estudios a escala de laboratorio utilizan estratigrafías homogéneas puesto que estas facilitan la representación de algunas condiciones del acuífero en estudio, por ejemplo la saturación del medio y las reacciones del trazador que tiñe la cuña con el medio poroso (Botero Acosta, 2015; Bouzaglou et al., 2018; Memari et al., 2020; Noorabadi et al., 2017; Yu et al., 2019). En concordancia con estos estudios, la modelación realizada fue con la siguiente estratigrafía, acercando así una simulación a escala de laboratorio a la realidad de una zona de estudio.

Escalamiento de la estratigrafía seleccionada:

- Espesor de suelo: 110 cm
- Tipo de suelo: Arenas con arcillas saturadas de agua salobre.



6.3. MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CUÑA SALINA FRENTE A CAMBIOS DE RECARGA DEL ACUÍFERO CON EL FIN DE OBSERVAR LA INCIDENCIA DE LA CUÑA SALINA COMO CONTAMINANTE DE ESTE

Luego de algunas pruebas en el modelo, se determinaron tres horas como tiempo ideal para correr el modelo en cada escenario evaluado. A continuación, se presenta el comportamiento de la cuña en la simulación del acuífero a escala sin recarga y con valores de recarga (mínimo, medio y alto). Para ello se compara como se ve la cuña en los primeros 20 minutos y como se ve la cuña pasadas las tres horas.

Las figuras presentadas a continuación, muestran en su inciso “a” la variación de la cuña en los primeros segundos (inicio de coloración en el lado derecho) frente a la misma cuña luego de 180 minutos de simulación (3 horas). Así mismo, en la sección “b” de las figuras se observa el aumento de la cuña en el acuífero en diez minutos (coloración en el lado derecho) frente a la misma cuña luego de 180 minutos de simulación (3 horas). Cada figura se compone de dos leyendas, “color legend” y “contour legend”, la primera indica las concentraciones de agua dulce y la segunda, las concentraciones de agua salada en el acuífero; también, se observan dos ejes que hacen referencia al tamaño de la malla tanto en el eje x, como el eje y (Ver Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24).



Escenario 1: acuífero piloto sin recarga: $0 \text{ m}^3/\text{s}$

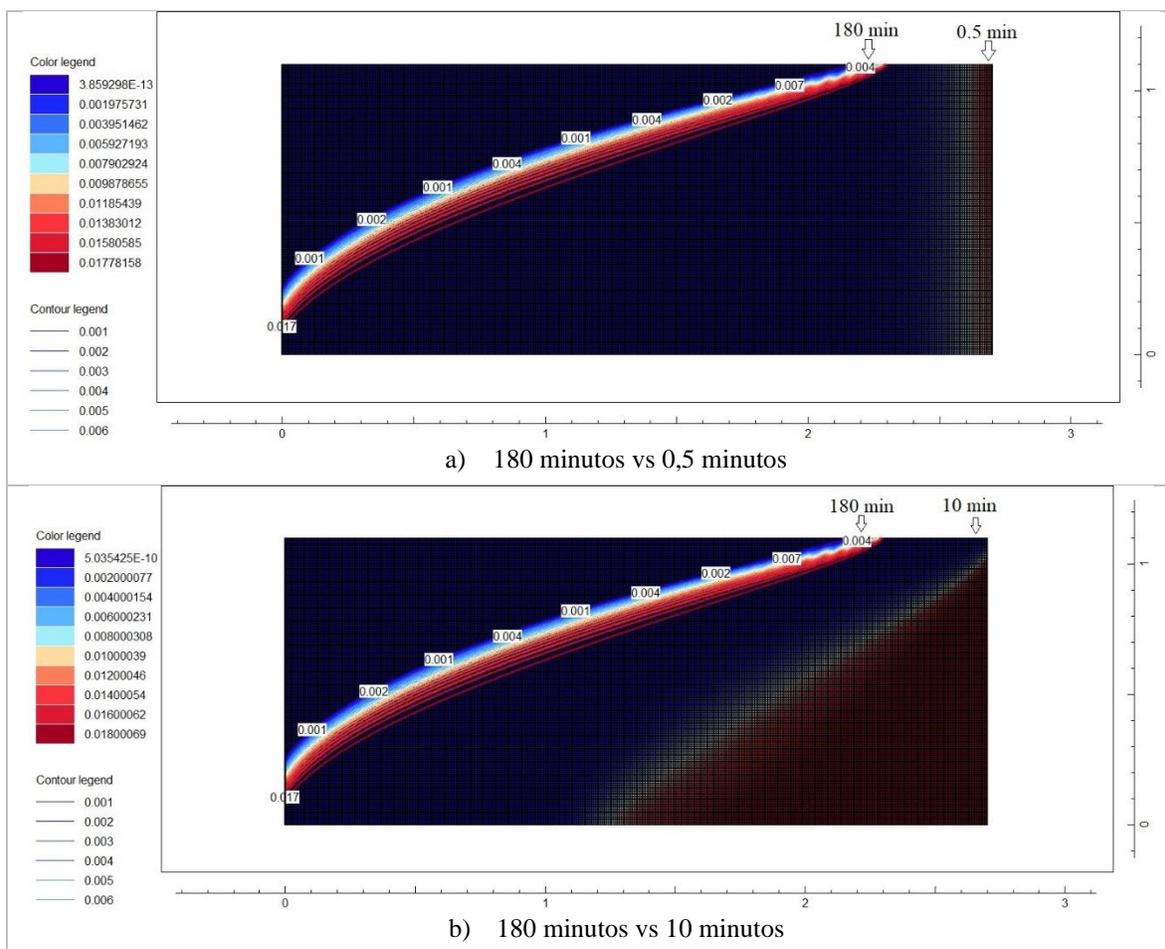
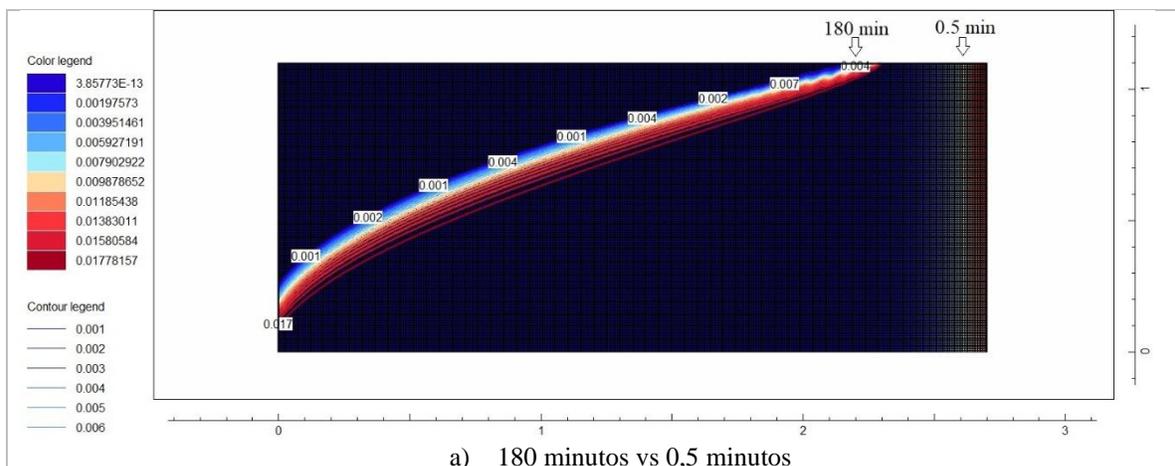


Figura 21. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 1.

Escenario 2: acuífero piloto bajo condiciones de recarga mínima: $4,78184 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$



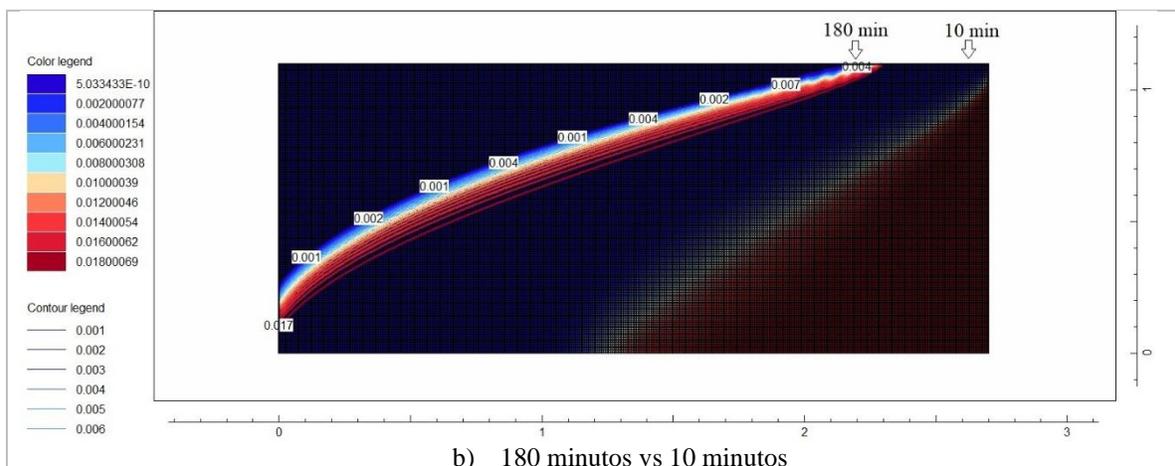


Figura 22. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 2.

Escenario 3: acuífero piloto bajo condiciones de recarga media: $1,27135 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$

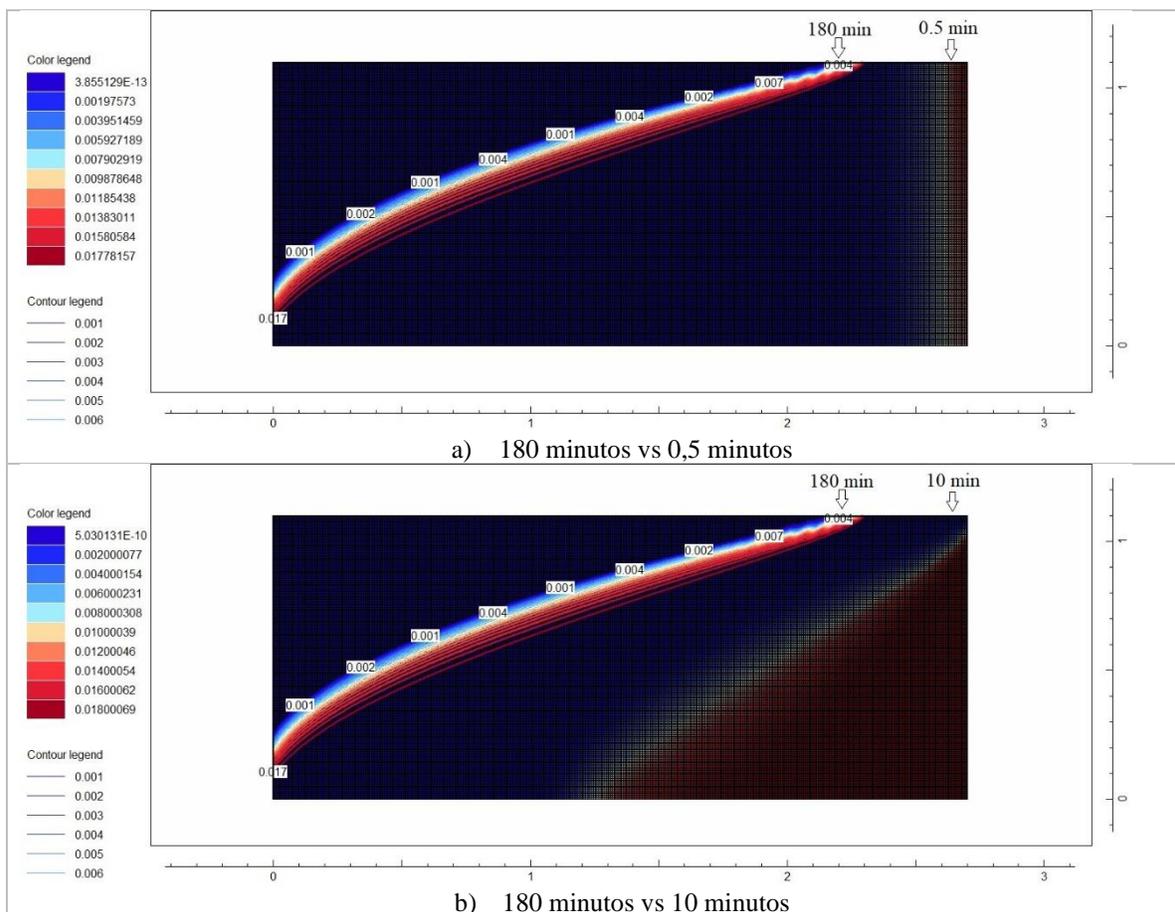


Figura 23. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 3.



Escenario 4: acuífero piloto bajo condiciones de recarga máxima: $4,37495 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$

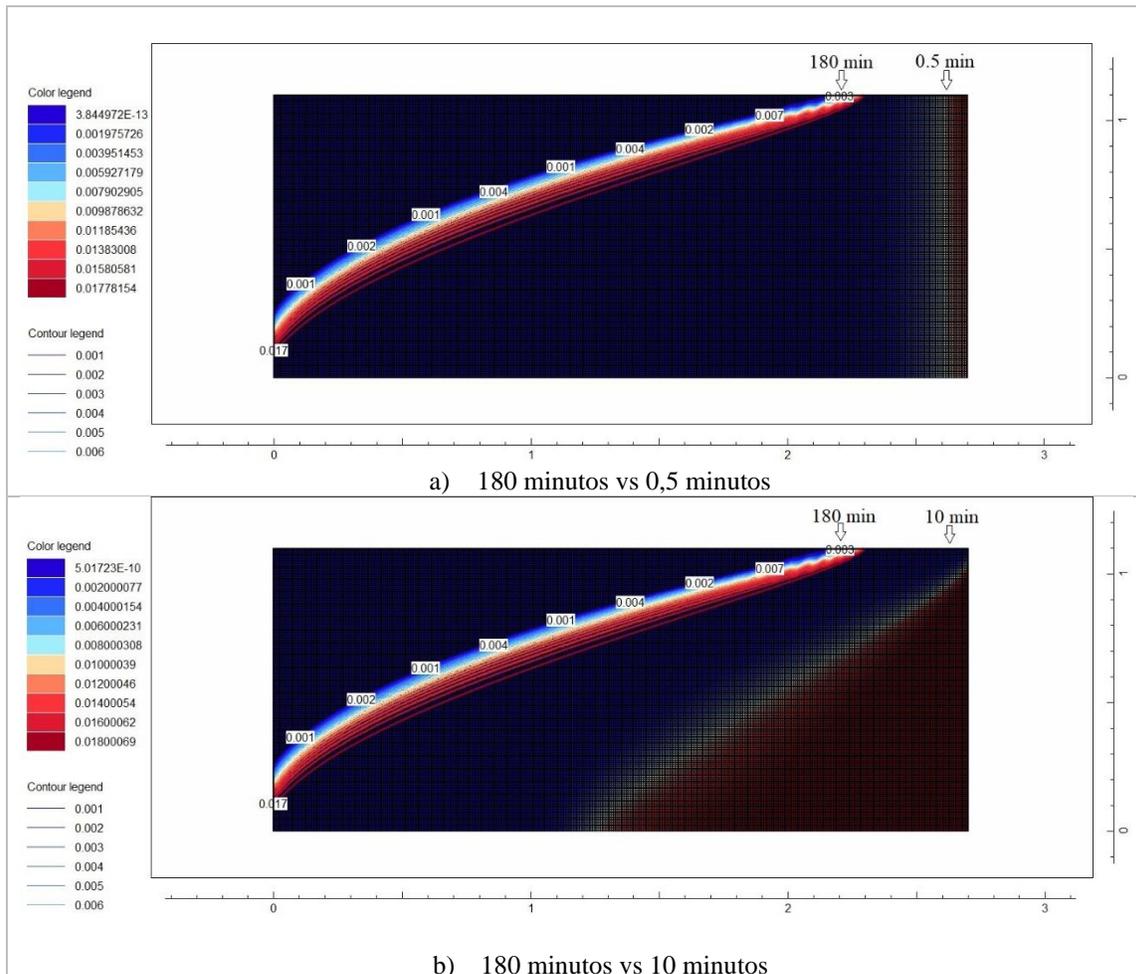


Figura 24. Posición de la cuña en dos tiempos diferentes, escenario 4.

Tal como se observa en cada uno de los escenarios la cuña salina, al no tener ninguna barrera hidráulica entra al acuífero de forma rápida, esto puede deberse a la diferencia de densidades entre el agua salada y el agua dulce, pues al tener cabezas iguales no se logra una estabilización de presiones, y por consiguiente la cuña ingresa cada vez más. No obstante, la cuña intenta estabilizarse entre los 120-360 minutos (Ver Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7).

Las diferencias encontradas en cada simulación son pequeñas, pero existentes, esto puede corroborarse al mirar los valores de concentración de cada leyenda. Por ejemplo, si se comparan las secciones "a", en donde se compara la intrusión salina en 0,5 minutos con la



intrusión obtenida luego de 180 minutos, de cada figura, se evidencia una disminución de las concentraciones así:

Tabla 16. Comparación de concentraciones en escenarios, sección a.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Concentración dulce	$3,859 \times 10^{-13}$	$3,858 \times 10^{-13}$	$3,855 \times 10^{-13}$	$3,845 \times 10^{-13}$
Concentración sal	0,01778158	0,01778157	0,01778157	0,01778154

Del mismo modo, al comparar las secciones “b”, en donde se compara la intrusión salina en 10 minutos con la intrusión obtenida luego de 180 minutos de cada figura, se tiene la siguiente variación:

Tabla 17. Comparación de concentraciones en escenarios, sección b.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Concentración dulce	$5,035 \times 10^{-10}$	$5,033 \times 10^{-10}$	$5,030 \times 10^{-10}$	$5,017 \times 10^{-10}$
Concentración sal	0,01800069	0,01800069	0,01800069	0,01800069

Al comparar los resultados obtenidos con investigaciones como la de Botero Acosta, (2015), se observa que la disminución de la cuña por aumento en la recarga puede ser más complejo si no se interfiere directamente en la interfaz agua dulce-salada. No obstante, al comparar más de cerca las metodologías de ambos estudios, se observa que Botero utiliza como condiciones de contorno flujos y no cabezas, lo cual para ella fue posible gracias a pruebas previas en el laboratorio, pero casi imposible para el presente estudio. Aun así, las variaciones y movimiento de la cuña a través del acuífero piloto pueden apreciarse pese a la lenta disminución de la concentración de sal.



6.4. PLANTEAMIENTO DE RECOMENDACIONES ENTORNO A LOS TIEMPOS DE PRUEBA OPERACIONAL EN LOS ACUÍFEROS COSTEROS A ESCALA DE LABORATORIO Y LA MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA EN ACUÍFEROS COSTEROS

6.4.1. Recomendaciones para el manejo de acuíferos costeros pilotos.

Lo primero que debe tenerse en cuenta para el diseño de un acuífero piloto es el objetivo funcional de este. Por ejemplo, si lo que se requiere es emplear el piloto para distintas investigaciones, es recomendable hacer uno de dimensiones considerables como los de Bouzaglou et al., (2018); Guo et al., (2020); Noorabadi et al., (2017); Weber, (2012); Yu et al., (2019), en caso de necesitarse para un estudio específico, sin esperanzas de reutilizar el prototipo, lo mejor sería construir con dimensiones de no más de un (1) metro en cada lado. Lo anterior debido a que recrear un acuífero, por más económico que sea frente a los estudios de campo, representa un costo, y el construir uno grande que pasada la investigación no se vuelva a utilizar es una pérdida de dinero y tiempo.

Una vez se tenga claro el objetivo de su construcción, es recomendable buscar artículos y/o tesis que tengan fines similares, lo cual sirve para escoger primeramente las dimensiones, como el caso del acuífero modelado en este documento: sus dimensiones fueron orientadas por el trabajo de grado de Weber (Chalá Díaz & Mieles Montenegro, 2019).

6.4.1.1. Parámetros que deben tenerse en cuenta en la construcción de un acuífero costero a escala de laboratorio.

Así mismo como con las dimensiones, deben establecerse parámetros tales como:

6.4.1.1.1. Parámetros en relación con la construcción del modelo piloto.

- *Material de la caja:*

Con las dimensiones se crea o recrea la caja que contendrá el medio poroso o material granular a simular como acuífero. Seguido a esto, debe escogerse un material para la caja, este puede ser plexiglás, acrílico o vidrio templado, o como en el caso de Noorabadi et al., (2017) una caja de acero con la parte frontal en plexiglás. Lo importante es escoger un material que resista las presiones a las cuales estará sometida dicha caja. Normalmente, es difícil comprar una caja hecha en acrílico, por ejemplo, por lo que debe

construirse in situ, por ello para unir las láminas que moldearán la caja debe recurrirse a materiales inoxidables (tuercas, tornillos, etc.) debido a que estarán expuestos al contacto de agua dulce y agua salada constantemente (Ver Figura 25).

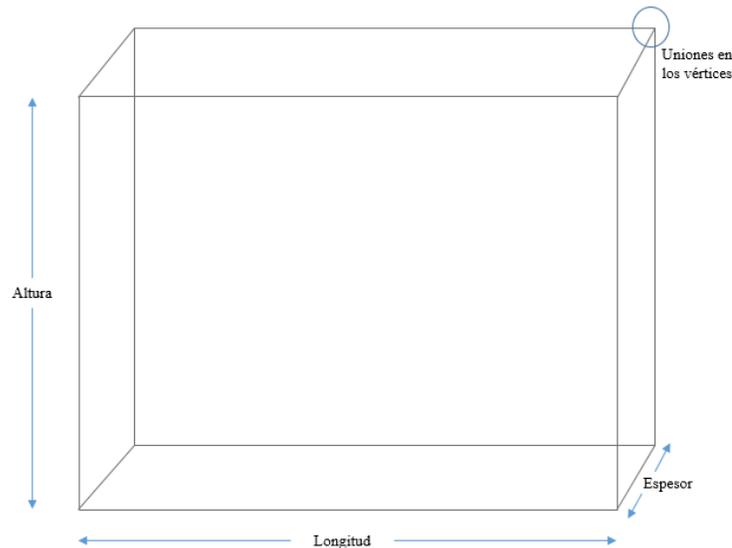


Figura 25. Ejemplo de la representación gráfica de la caja de un acuífero a escala de laboratorio.

- *Entrada de agua a la caja:*

Ahora bien, es importante pensar cómo va a funcionar la caja, es decir, cómo se convertirá un espacio lleno de arena (medio poroso) en un acuífero. Según lo observado en la literatura dichas cajas pueden conectarse a dos cámaras y a dos reservorios: dos cámaras en cada lado que ayudan a mantener el acuífero en condición saturado y dos reservorios conectados a cada cámara para mantener un nivel de agua constante (Bouzaglou et al., 2018; Noorabadi et al., 2017; Weber, 2012) (Ver Figura 26,a). Sin embargo, otros estudios no utilizan cámaras sino reservorios: conectan por medio de mangueras laterales la caja y suministran de agua dulce al acuífero por los reservorios (Botero Acosta, 2015), (Ver Figura 26,b); o utilizan solo una cámara costera y mantienen la saturación del medio por inyección de agua desde arriba (Memari et al., 2020)(Ver Figura 26,c).

Con las cámaras y reservorios pueden realizarse procesos de recirculación del agua por medio de bombas peristálticas, lo que supondría un ahorro significativo del agua. Cabe

aclarar que solo es recomendable recircular el agua dulce, ya que la salada debe mantener una concentración tal de sal y colorante para que la cuña salina se forme y sea visible.

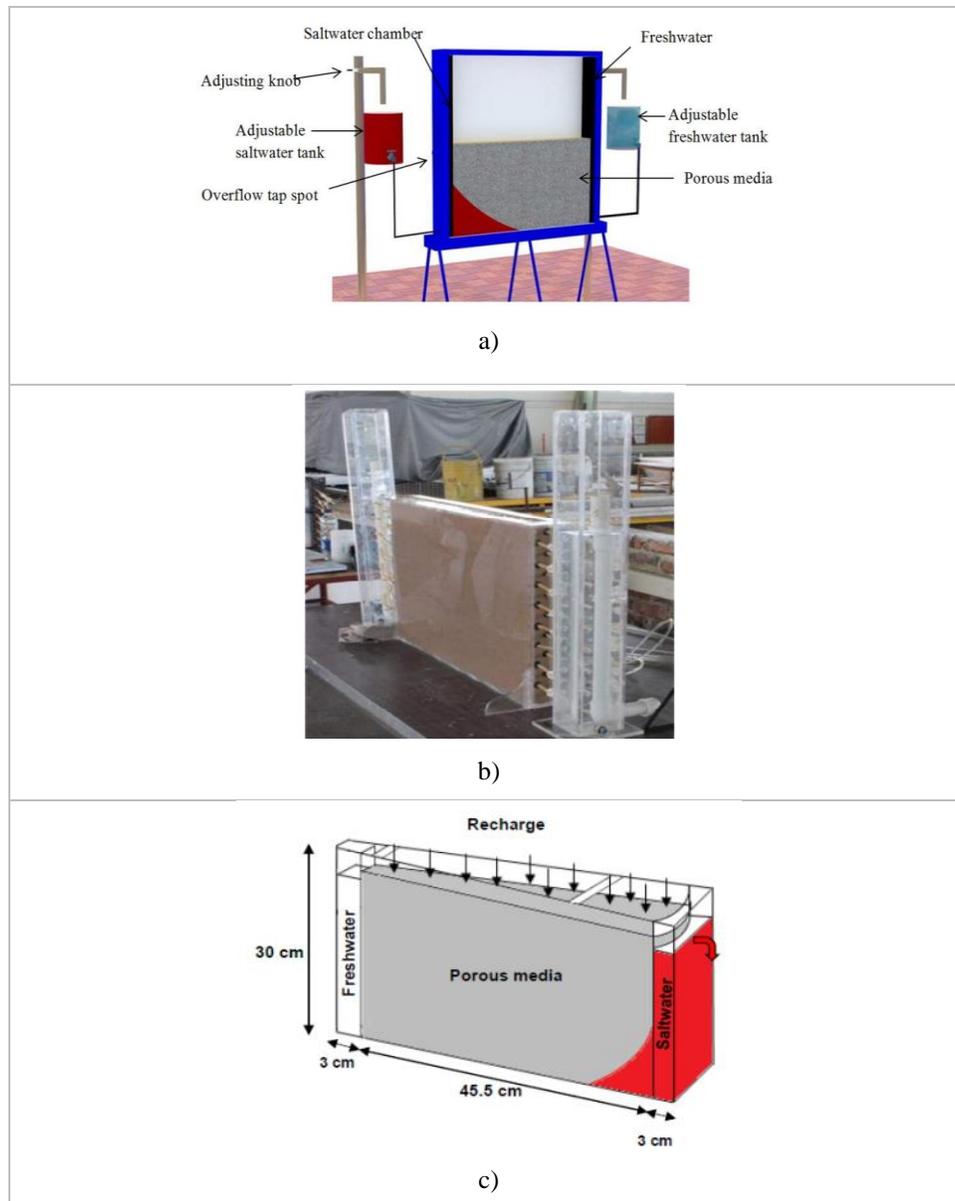


Figura 26. Acuíferos a escala con diferentes entradas de agua.

- Soporte de la caja:

Dependiendo del tamaño de la caja debe definirse un soporte para esta, puede ser en acero, hierro, o concreto. Lo principal y más importante es que la caja quede estable y no se mueva. El acuífero simulado, está sujeto a una mesa de acero, que la sujeta con tornillos por detrás. Tiene una altura de unos 70 centímetros, la cual fue escogida con esa



magnitud porque la caja del acuífero tiene una abertura en la parte inferior que permite la salida del material granular cuando este desee cambiarse, y dicha abertura a esta altura permite la extracción del material sin complicaciones. No se tomó una magnitud mayor porque el acuífero es relativamente alto y porque encima de este se espera construir un simulador de lluvias para futuras investigaciones (Ver Figura 27).



Figura 27. Ejemplo de una estructura que soporta un acuífero piloto. Fuente: Dayana Chalá y Mónica Mieles (2019)

6.4.1.1.2. Parámetros en relación con las características litológicas del acuífero a simular.

- *Tipo de acuífero:*

Debe definirse el tipo de acuífero que se desea modelar (confinado, no confinado o semiconfinado), lo cual se puede orientar con la estratigrafía de un acuífero real escogido, o simplemente crear el piloto tal que puedan montarse diferentes escenarios. A su vez debe especificarse si el medio poroso será un estrato homogéneo o si se realizarán capas heterogéneas.

- *Material granular:*

El medio poroso ubicado en la caja (sandbox), puede ser arena gruesa o fina (más usado), arcilla (menos usado), cuencas o perlas de vidrio, entre otros. Hay que tener en cuenta, además, la disponibilidad del producto en el mercado y el presupuesto con el que se cuenta. Es posible utilizar arena de un lugar específico o comprarla, en cualquiera de los



casos es indispensable conocer sus propiedades tales como porosidad, saturación, conductividad hidráulica y dispersividad. Según el medio poroso escogido se puede determinar qué trazador es el más adecuado para posteriormente teñir la cuña salina.

- Color de la cuña salina:

Teñir para dar visibilidad a la formación de la cuña generada por la intrusión salina en un acuífero costero a escala de laboratorio, resulta muy beneficioso puesto que facilita el análisis visual de los procesos de dicha formación y cómo ésta se ve afectada si se aumenta la recarga del acuífero, si desciende, o si el nivel del mar baja, o aumenta, etc.

Escoger el trazador dependerá primeramente del suelo con el que tendrá contacto y su tiempo de exposición (Zojer, 2000). Entre los trazadores más usados en este tipo de investigaciones están los químicos como la Rodamina WT y la Uranina, sin embargo, algunos estudios han optado por tintes para comida, en colores rojo y azul (Ver Tabla 18). Se quiere hacer pruebas de adherencia o adsorción para verificar que el tinte o trazador no se quede pegado en el medio poroso.

- Concentración y densidades del agua dulce y salada:

La concentración normal de sal del agua de mar es de aproximadamente 35 ppm, es decir 35 de cada 1000 de volumen de agua marina es derivada de sales disueltas (The USGS science for changing world, 2005). Recrear un acuífero costero, incluye estas consideraciones, por ello, varias investigaciones han utilizado desde 18 g/L hasta 50 g/L con densidades de 1014 kg/m^3 y 1040 kg/m^3 , respectivamente (Ver Tabla 18 y Tabla 19).

A continuación, se presentan dos tablas comparativas con estudios que han involucrado la aplicación de acuíferos costeros a escala de laboratorio, con el fin de mostrar las similitudes existentes en este tipo de investigaciones. Es importante mencionar que los estudios escogidos para esta comparación fueron aquellos que más influyeron científicamente y analíticamente en este trabajo de grado, y que varios de ellos fueron presentados como estado del arte (Ver Tabla 18 y Tabla 19).



Tabla 18. Comparación de estudios de acuíferos a escala de laboratorio con dimensiones de más de un metro en sus lados.

Características/autor	(Weber, 2012)	(Noorabadi et al., 2017)	(Bouzaglou et al., 2018)	(Yu et al., 2019)	(Guo et al., 2020)
Dimensiones caja	1.25 m de alto 5 m de largo 0.05 m de ancho	1 m de alto 1.1 m de largo 0.05 m de ancho	0.6 m de alto 5 m de largo 0.3 m de ancho	1.2 m de alto 7.7 m de largo 0.16 m de ancho	1.5 m de alto 6.6 m de largo 0.6 m de ancho
Dimensiones de reservorios de agua dulce y salada que inyectan agua al acuífero	1.25 m de alto 5 m de largo 0.05 m de ancho Los reservorios hacen parte de la caja de arena.	1 m de alto 1.1 m de largo 0.05 m de ancho Los reservorios hacen parte de la caja de arena	1.9 m de alto 8.9 m de largo 1.5 m de ancho Los reservorios hacen parte de la caja de arena	Los reservorios se encontraban debajo de la caja y son llenados por conexión de bombas	Dos reservorios
Uso de tanques de carga constante (chambers)	Dos tubos de acrílico con 54.6 cm de largo y 29.2 cm de diámetro	Dos tanques ajustables ubicados a los lados; se desconocen sus dimensiones	Dos tanques: uno aguas arriba para la zona dulce y uno aguas abajo	n/a	
Material caja	Plexiglás de 1.9 cm de espesor	Acero en la parte posterior y plexiglás en la parte frontal	Plexiglás	Vidrio templado	Plexiglás con espesor de 1.5 cm
Tipo de acuífero	Costero no confinado homogéneo	Costero no confinado homogéneo	Costero confinado homogéneo	Costero no confinado homogéneo	Costero heterogéneo confinado y costero heterogéneo no confinado
software	n/a	Seawat, por el método de diferencias finitas	SUTRA, por el método de elementos finitos	SUTRA, por el método de elementos finitos	Seawat, por el método de diferencias finitas
Condiciones de frontera	Tanques para establecer cabezas constantes	Los límites derecho e izquierdo se establecieron como constantes condiciones de contorno de cabeza. Además, el límite izquierdo se asignó como un límite de concentración constante de agua salada.	Superior e inferior: sin flujo Límites superiores laterales insaturados; límites de presión aguas arriba y aguas abajo	Inferior: flujo cero Izquierda: cabeza constante Derecho:	Superior: libre Inferior: Flujo cero Izquierda o costa: nivel del mar constante Derecha: cabeza hidráulica constante
Cuña salina y concentración	32-35 mg/L con una densidad de 1025 kg/m ³	35 y 50 g/L con densidades de 1,025 y 1,04 g/cm ³	46 g/L con una densidad 722.15 kg/m ³	35 ppt con una densidad de 1024 kg/cm ³	18 g/L con una densidad de 1014 kg/m ³
Material granular	Arena de sílice	Arena de sílice	Perlas de vidrio	Arena de cuarzo	Arena fina, arena gruesa y arcilla
Trazador	Rodamina WT	Tinte colorante rojo	Tinte colorante rojo	Colorante rojo	Colorante azul brillante



Tabla 19. Comparación de estudios de acuíferos a escala de laboratorio con dimensiones de menos de un metro en sus lados.

Características/autor	(Botero Acosta, 2015)	(Abdoulhalik et al., 2020)	(Memari et al., 2020)
Dimensiones caja	45 cm de alto 70 cm de largo 4 cm de ancho	13 cm de alto 38 cm de largo 0.2 cm de ancho	30 cm de alto 51.5 cm de largo 2.6 cm de ancho
Dimensiones de reservorios de agua dulce y salada que inyectan agua al acuífero	Dos torres laterales de acrílico de 70 cm de alto 8 cm de largo 8 cm de ancho	Dos reservorios circulares	El tanque es llenado con agua dulce por la infiltración de agua desde una bomba peristáltica ubicada arriba.
Uso de tanques de carga constante (chambers)	n/a	n/a	n/a
Material caja	Acrílico transparente de 0.8 cm de espesor		
Tipo de acuífero	Costero confinado homogéneo y costero confinado heterogéneo	Costero no confinado homogéneo y costero no confinado heterogéneo	Costero no confinado homogéneo
software	Feflow por el método de elementos finitos	Modflow, por el método de diferencias finitas	Modflow, por el método de diferencias finitas
Condiciones de frontera	<u>Flujo:</u> Superior e inferior: flujo cero Izquierdo: Flujo entrante, a partir del gradiente y conductividad hidráulica. conocido Derecho o costa: Nivel de mar constante <u>Transporte:</u> Izquierda: 0 mg/L Derecha o costa: 36000 mg/L	Izquierda: cabeza constante Derecha: cabeza constante	Izquierda: sin flujo Derecha: cabeza constante de agua salada.
Cuña salina y concentración	Concentración del agua salada de 36gr/L con una densidad de 1026 kg/m ³	con una densidad de 1020 kg/m ³	35 kg/m ³ con una densidad de 1025 kg/m ³
Material granular	Homogéneo: arena Heterogéneo: tres tipos de arena	Homogéneo: perlas de vidrio transparente Heterogéneo: Dos tamaños diferentes de perlas de vidrio transparente	Homogéneo: perlas de vidrio
Trazador	Rodamina WT	Colorante	Colorante de comida rojo



6.4.1.2. Proceso de llenado y estabilización de la caja que contiene al acuífero costero.

Una vez construido el prototipo y ubicado en el lugar donde se realizarán las experimentaciones se procede a realizar pruebas de funcionamiento, es decir, se realizan ensayos para que se puedan recrear condiciones lo más cercanas a la realidad.

Lo primero es definir el proceso de llenado. (Botero Acosta, 2015) propone en su tesis tres formas de empaquetado para el material granular, que en su caso fue arena: a) aplastado, agregando capas finas de arena saturada, b) vibrado, agregando finas capas de arena saturada y b) vibrado, agregando finas capas de arena seca. Con sus pruebas de laboratorio, concluyó que la mejor forma de empaquetar la caja es por medio de la vibración, agregando finas capas de arena saturada, lo cual concuerda con las experimentaciones de (Oliviera et al., 1996).

El método sugerido puede ser usado en acuíferos de cualquier tamaño, sin embargo, debe tenerse especial cuidado con acuíferos con dimensiones considerables. (Weber, 2012), por ejemplo, sugiere un método similar, que consiste en llenar primero la caja de agua y luego, por medio de un embudo ir agregando finas capas de arena, de tal manera que no se tenga ningún escape de aire que perjudique la saturación de la capa. A medida que se ponen las capas se sugiere golpear (vibrar) a los lados de la caja para que la arena se asiente.

Con el medio poroso saturado en la caja, se disponen las cabezas hidráulicas de tal manera que la frontera con la costa sea menor a la de la frontera con el agua dulce. El flujo del acuífero en el momento de disposición del medio poroso es agua dulce en ambos extremos, y una vez se tiene la saturación deseada, se realiza el cambio de cabezas, y se agrega la sal y el tinte, para iniciar el proceso de intrusión del agua salada al agua dulce. Esto puede durar varios días, hasta conseguir un estado estacionario de la cuña.

Debe calcularse un período de dilución del agua salada, para mantener una concentración dentro de los parámetros normales del agua de mar. Este puede calcularse por medio de la ecuación de dilución ($V_1C_1 = V_2C_2$), en donde el V_1 corresponde al volumen inicial, y V_2 corresponde al volumen del depósito de agua salada más el volumen agregado de agua dulce por día, representado en $V_1 + Q_f \cdot t$, de lo cual se reemplaza y despeja t , para conocer cada cuánto debe adicionarse sal a la mezcla.



6.4.2. *Sugerencias que contribuyan en la mitigación de la intrusión salina*

Si bien se sabe, el proceso de intrusión salina cobija a todos los acuíferos costeros del mundo. Normalmente, este proceso viene de la mano con la sobreexplotación del recurso subterráneo que causan las poblaciones que no tienen ningún otro medio hídrico para abastecer sus necesidades, o que en épocas de lluvias los cuerpos de agua superficiales se secan y recurren a este medio para subsanar sus necesidades básicas.

Investigaciones como la de (Lopez-geta & Gomez-Gomez, 2007) sugieren que antes de proponer ideas en cuanto al control de la intrusión salina debe considerarse el recurso hídrico subterráneo, superficial y la interacción entre ambos. Además, debe conocerse su funcionamiento hidrogeológico, los procesos de contaminación que lo pueden afectar, los recursos disponibles y las dinámicas antrópicas de la zona. Lo importante es proporcionar una gestión integral de los recursos en cuestión.

Cuando se demuestra que un acuífero se encuentra bajo efectos de la intrusión, puede optarse por el uso de técnicas clásicas más utilizadas que pueden frenarla o incluso hacer que se invierta: disminución y redistribución del bombeo; recarga artificial; y barreras hidráulicas de inyección y depresión (Botero-Acosta & Donado, 2015; Lopez-geta & Gomez-Gomez, 2007).

Una contribución significativa en épocas de sequía que podría darse con la colaboración de las comunidades que se abastecen de dicho recurso es el consumo consciente, pero para que esta sea posible, los entes de control municipales, departamentales y nacionales deben recurrir a estrategias como la capacitación recurrente a estas zonas, para que en estas épocas los consumos no sean tan elevados y de esta manera contribuir en pequeña medida a la preservación del recurso hídrico subterráneo.

Actualmente en Colombia son pocos los programas que confrontan esta problemática de las zonas costeras, sin embargo, MINCIENCIAS abre convocatorias bastante diversas que permiten y obligan al estado a trabajar por obras que beneficien el medio ambiente. Dentro de las políticas ambientales vigentes se tiene (IDEAM, 2018b; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a, 2015)



7. CONCLUSIONES

De las estaciones pluviométricas estudiadas, es posible concluir que, a pesar de encontrar diferencias significativas entre cada régimen de precipitación media anual, teniendo Galerazamba un régimen medio anual de 871.5 mm, Juan de Acosta de 1205.3 mm y Bayunca de 1285.73 mm, se observa que el comportamiento de las lluvias para el periodo de 15 años evaluados es similar, pues el incremento de las lluvias se da a partir del mes de marzo con una variación de aproximadamente 0 mm a 7.07, 4.55, y 8.04 mm en cada estación; el decrecimiento de las mismas se da con bajas de 61.66, 54.03, y 85.85 mm entre octubre y noviembre. Así mismo se observa que el mes con mayor mm de lluvias registradas es octubre con precipitaciones de 181.73, 233.93 y 282.09 mm.

Lo anterior concuerda con el comportamiento normal de las lluvias en el país, donde los meses de menor precipitación son enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre con precipitaciones de 0 a 250 mm, y los de mayor precipitación son de abril a octubre, con precipitaciones de 250 a 2750 mm. Si se compara la zona evaluada (región Caribe) con, por ejemplo, la región Pacífica, la cual según Arango, Dorado, Guzmán, & Ruiz, (2014) registra los máximos núcleos de precipitación en todo el año con registros anuales hasta 2750 mm, se observa que hay zonas que presentan mayor humedad a lo largo del año y que su normalidad es presentar precipitaciones altas todos los meses con respecto a las demás regiones.

En el estudio realizado por CARDIQUE, (2006) analizaron las estaciones Bayunca, Rafael Núñez, Galerazamba y Piojó, las dos primeras ubicadas en Cartagena, la tercera en Galerazamba y la última en el departamento del Atlántico. Los datos presentados son muy regulares por no decir incipientes, no muestra para qué periodo de tiempo fueron analizados, ni por qué escogieron esas estaciones pluviométricas. Aun así, el comportamiento de la estación Galerazamba analizada por ellos presenta un régimen pluviométrico medio anual de 694 mm y el analizado en la presente investigación registra un régimen de 871,5 mm. La diferencia entre estos valores es amplia, sin embargo, si se contara con la información de los años que faltaron por analizar (2015-2018) es probable que el régimen analizado disminuya,



acercándose un poco más al registrado por CARDIQUE. Respecto al comportamiento de todos los meses, en ambos estudios octubre se identifica con mayor mm de precipitaciones, y febrero como el mes de menor precipitación.

Al observar la ubicación del acuífero de Arroyo Grande y compararla con la ubicación de las estaciones analizadas, se escoge la de Galerazamba como la que representa mayormente al acuífero, además, es la única que se encuentra en la zona de estudio. El déficit de lluvias que se presentan en dicha zona a lo largo del año es preocupante puesto que, al no tener agua superficial suficiente para abastecerse, los lugareños recurren al agua subterránea como provisión desmedida para sus actividades agrícolas y ganaderas, lo que puede traer consigo la incrementación de la cuña salina al acuífero.

En cuanto a la información litológica recolectada para la selección de un estrato que represente la hidrogeología del acuífero Arroyo Grande en un acuífero costero a escala de laboratorio, se concluye que las capas encontradas presentan condiciones posibles para una modelación de laboratorio. Sin embargo, en este estudio se buscó simplificar la información en un solo estrato homogéneo, puesto que los datos de las capas de los sondeos escogidos no contaban con información suficiente que contribuyeran a los parámetros de una modelación física y su vez numérica.

Con la estratigrafía homogénea de arena con arcilla, y los valores de recarga obtenidos a partir de las precipitaciones anuales analizadas, se obtuvieron las modelaciones numéricas del acuífero a escala, de las cuales es posible concluir varios aspectos teniendo en cuenta la baja influencia en la disminución de la cuña frente a los valores de recarga simulados. Una de las razones por las cuales es posible que no se apreciaran grandes diferencias en cada recarga se debe a las diferencias de densidades e iguales cabezas hidráulicas consideradas como condiciones de frontera izquierda y derecha, puesto que, al ser la densidad del agua salada mayor, el acuífero no logra igualar sus presiones, y aunque se aumente la cantidad de agua dulce (por la recarga), el acuífero puede terminar lleno de agua salada.

Otra razón importante de la baja influencia es que los valores de recarga utilizados son valores calculados a partir de los valores de lluvia de todo un año, que, comparado con una lluvia normal, es menos intensa, puesto que estos promedios incluyen períodos secos y no



secos de un período más largo, por lo que, si se utilizan valores de lluvias específicas, es posible que el desplazamiento de la cuña sea más notorio.

Las modelaciones realizadas, permitieron conocer en qué condiciones no sería recomendable operar el acuífero a escala de laboratorio. De estas condiciones se recalca, como sugerencia importante, no poner la cabeza del agua dulce igual a la del agua salada.

Un acuífero a escala de laboratorio sigue presentándose como una opción viable para el estudio de aguas subterráneas en cualquier nivel académico. Investigaciones de este tipo pueden servir como fuente de verificación para planes de manejo ambiental de acuíferos gracias a su conveniente implementación. Pueden analizarse los efectos producidos por las fluctuaciones del mar, así como los aumentos de nivel de este; se pueden instalar pozos de captación; adaptar simuladores de precipitaciones, etc.

A manera global, puede ratificarse que la metodología propuesta y utilizada para este estudio da solución a los objetivos específicos y por consiguiente al objetivo general planteado.



8. RECOMENDACIONES

Para el análisis de las precipitaciones en la zona de influencia del acuífero, se recomienda hacer el estudio para un periodo más largo de tiempo y evaluar distintos periodos de retorno. Así mismo construir curvas de intensidad-duración-frecuencia para interpretar más a fondo el comportamiento de las lluvias en la zona. Por otro lado, se recomienda analizar la cuenca completa utilizando interpolaciones entre estaciones pluviométricas, podrían ser las mismas que se usaron en este estudio o adicionar otras que cuenten con características bastante similares, como, por ejemplo, la misma altitud.

En los datos proporcionados por el IDEAM se encontraron algunas falencias, como meses incompletos; algunos no tenían los días completos y algunos no presentaban información de un mes completo. Por lo anterior, se recomienda establecer líneas directas de comunicación para que puedan dar solución a situaciones como estas, dado el caso que la entidad no pueda hacer nada porque no existan registros de esos días, buscar recurrir a expertos para proceder a realizar interpolaciones o partir de un análisis diferente que proporcione mayor seguridad en los resultados.

Una recomendación en cuanto a la estratigrafía escogida para simular en el acuífero piloto es recolectar información más reciente y completa de un acuífero diferente, puesto que con el escogido para este estudio existieron limitaciones que obligaron a suponer valores para la modelación numérica. De esta manera se podrían plantear escenarios heterogéneos con capas de suelo con combinaciones y escalamientos más cercanos a un acuífero real. Si el caso no es estudiar un acuífero en específico, se recomienda probar otros materiales y realizar pruebas de laboratorio que permitan conocer características como la conductividad hidráulica, permeabilidad y porosidad.

Para el caso de la modelación numérica, se recomienda usar software más avanzados y con mayor trascendencia en investigaciones de este tipo como MODFLOW. También, es recomendable, en caso de no contar con pruebas de laboratorio, probar distintas cabezas hidráulicas, hasta obtener dos valores que formen una cuña estable en poco tiempo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdoulhalik, A., Abdelgawad, A. M., & Ahmed, A. A. (2020). Impact of layered heterogeneity on transient saltwater upconing in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 581(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124393>
- ACUACAR, A. de C., & Independence drilling. (2014). *Estudio hidrogeológico-Proyecto Arroyo de Piedra*.
- Albentosa, L. M. (1976). La aplicación del método estadístico en Climatología. El régimen anual de precipitaciones en Barcelona (II). *Revista de Geografía*, 10(1), 79–112.
- Antonio, A. H., Antonio, M. C. J., Martínez, T., Brandebourger, M. C. N. I., & Mora, A. (2017). *Modelación numérica para la determinación de flujos subterráneos . Sitio Piloto : La Paz , Baja California Sur , México*.
- AQTESOLV, T. O. A.-I.-O. P. for A. T. A. (2012). *Hydraulic Properties .: Aquifer Testing 101*. http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruiz, J. . (2014). Climatología trimestral de Colombia. *Ideam*, 19.
- Arredondo, C., Cárcamo, R., Ortíz, C., & Chivano, V. (2016). *Trazadores en la agricultura y la industria*. <http://trazador-18.blogspot.com/2008/09/trazadores-en-la-agricultura-y-la.html>
- Barrios Quintero, R. J., & Correa Jiménez, A. S. (2016). *Análisis del comportamiento hidrogeológico del flujo de aguas subterráneas en la cabecera municipal de Turbaco Bolívar* [Universidad de Cartagena]. <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/2395>
- Botero-Acosta, A., & Donado, L. D. (2015). Laboratory Scale Simulation of Hydraulic Barriers to Seawater Intrusion in Confined Coastal Aquifers Considering the Effects of Stratification. *Procedia Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.04.006>
- Botero Acosta, A. (2015). *Simulación a escala de laboratorio de barreras hidráulicas contra*



la intrusión salina en acuíferos costeros confinados considerando los efectos de la estratificación del medio. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Bouzaglou, V., Crestani, E., Salandín, P., Gloaguen, E., & Camporese, M. (2018). Ensemble Kalman filter assimilation of ERT data for numerical modeling of seawater intrusion in a laboratory experiment. *Water (Switzerland)*, 10(4), 1–26. <https://doi.org/10.3390/w10040397>

CARDIQUE. (2006). *Identificación de la vulnerabilidad del Acuífero Arroyo Grande ante la intrusión salina.* www.cardique.gov.co

Castro-Alcalá, E., Fernández-García, D., Carrera, J., & Bolster, D. (2012). Visualization of mixing processes in a heterogeneous sand box aquifer. *Environmental Science and Technology*, 46(6), 3228–3235. <https://doi.org/10.1021/es201779p>

Centro virtual de información del agua. (2017). *Agua en el planeta.* Agua.Org.Mx. <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

Chalá Díaz, D. C., & Míeles Montenegro, M. M. (2019). *Fortalecimiento de la resiliencia del acuífero costero y el uso del agua subterránea contra los efectos del cambio climático en el Caribe.*

Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería civil* (CONCYTEC (ed.); Segunda). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Collazo-Caraballo, M. P., & Montañón-Xavier, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea.* <https://doi.org/978-9974-594-09-8>

Crestani, E., Camporese, M., & Salandín, P. (2019). *Technical note : an alternative approach to laboratory benchmarking of saltwater intrusion in coastal aquifers.* April. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-127>

Custodio, E., & Llamas, M. (1996). Sección 6. Componentes primarios del ciclo hidrológico. In Ediciones Omega S.A. (Ed.), *Hidrología subterránea* (Segunda, pp. 300–306). http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1442/5/Capitulo_2.pdf



- Cutodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Sección 5. Conceptos básicos y definiciones. In *Hidrología subterránea* (2nd ed.).
- Davis, S. N., Campbell, D. J., Bentley, H. W., & Flynn, T. J. (1985). *An introduction to groundwater tracers*. EPA. University of Arizona.
- De León Ortíz, J. D. (2018). Estimación del nivel de intrusión salina en el Acuífero de Barú, empleando los software Visual Modflow y Seawat. In *Repositorio Institucional*. Universidad de Cartagena.
- Energía chi-cuadrado. (2012). *Introducción a la geotermia (II)*. <https://energiaysostenibilidad.wordpress.com/2012/12/19/introduccion-a-la-geotermia-ii/>
- Guo, Q., Huang, J., Zhou, Z., Wang, J., & Yu, X. (2019). *Experiment and Numerical Simulation of Seawater Intrusion under the Influences of Tidal Fluctuation and Groundwater Exploitation in Coastal Multilayered Aquifers*. <https://doi.org/10.1155/2019/2316271>
- Guo, Q., Zhang, Y., Zhou, Z., & Zhao, Y. (2020). *Saltwater Transport under the Influence of Sea-Level Rise in Coastal Multilayered Aquifers*. April. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00189.1>
- IDEAM. (2013). *Aguas Subterráneas en Colombia: Una Visión General*. Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- IDEAM. (2014a). Anexo 4. Fichas Síntesis de sistemas acuíferos y aguas subterráneas frente a indicadores. In *Estudio Nacional del Agua* (p. 77).
- IDEAM. (2014b). *Estudio Nacional del Agua* (M. y E. A. – I. Instituto de Hidrología (ed.)).
- IDEAM. (2015). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia - Contenidos del Taller de Formación* (I. de Hidrología & M. y E. A.- IDEAM (eds.)). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- IDEAM. (2018a). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*.



<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IDEAM. (2018b). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua. In *Cartilla ENA 2018*.

Jiménez Parodi, T., & Rodríguez Marquez, D. (2018). *Análisis del uso y manejo del agua subterránea en la región Caribe Colombiana*. Universidad de Cartagena.

Joaquín, A., Abia, C. D. E., & Martínez, L. (2007). Modelos Matemáticos en Hidrogeología. In *Modulo I: Contaminación Ambiental*. EOI - Escuela de organización industrial.

Kuan, W. K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes, B., & Li, L. (2012). Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers. *Water Resources Research*, 48(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2011WR010678>

Lopez-geta, J., & Gomez-Gomez, J. de D. (2007). La Intrusión Marina Y Su Incidencia En Los Acuíferos Españoles. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 16(3), 266–273.

Memari, S. S., Bedekar, V. S., & Clement, T. P. (2020). Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion Processes in a Circular Island Aquifer. *Water Resources Research*, 56(2). <https://doi.org/10.1029/2019wr025325>

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2003). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. <http://www.minvivienda.gov.co/GuiasRAS/RAS - 007.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014a). Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. In *MADS, Colombia*. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Manejo_de_acuiferos/GUÍA_FORMULACIÓN_PLANES_ACUÍFEROS.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014b). Programa Nacional de Aguas Subterráneas. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Acuíferos / Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1936-acuiferos>

Noorabadi, S., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., & Delirhasannia, R. (2017). Laboratory and



- numerical investigation of saltwater intrusion into aquifers. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(12), 4273–4283.
<https://doi.org/10.26872/jmes.2017.8.12.450>
- Oliviera, I. B., Demond, A. H., & Salehzadeh, A. (1996). Packing of Sands for the Production of Homogeneous Porous Media. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1), 49–53.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010010x>
- Ordoñez, J. . (2011). Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geográfica de Lima*, 2–44.
- Pendas Fernández, F. (2005). Acuíferos costeros e intrusión salina. In *Universidad de Oviedo, España*.
- Serrano, M., Pérez, D., Guzmán, D., & Forero, J. (2014). Modelo Físico de Acuífero: su implementación para un curso de aguas subterráneas. *Cienc. Docencia Tecnol.*, XXV, 209–223. /scielo.php?script=sci_arttext&pid=&lang=pt
- The USGS science for changing world. (n.d.). *SUTRA Version 3.0.0 Release Notes*.
<https://doi.org/10.5066/P9PPEHHM>
- The USGS science for changing world. (2005). *La Ciencia del Agua para Escuelas: ¿Porqué el Océano es Salado?* <https://water.usgs.gov/gotita/whyoceansalty.html>
- The USGS science for changing world. (2010). SUTRA - A model for saturated-unsaturated variable-density groundwater flow with solute or energy transport. In *USGS: Water resources investigations Report 02-4231* (Vol. 2010).
<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware>
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999a). Capítulo 1. Introducción. In *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (Segunda Ed, p. 156). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999b). Capítulo 10. Acuíferos Costeros. In *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (Segunda Ed, p. 151). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Vélez Otálvaro, M. V., & Vásquez Ariza, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga de acuíferos. In *Biblioteca Digital Universidad Nacional; Postgrado en*



Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. <http://www.bdigital.unal.edu.co/4442/1/EA3760.pdf>

Vélez Otálvaro, M., & Vásquez Ariza, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances En Recursos Hidraulicos*, 11, 51–62.

Villodas, R., & Segerer, C. (2006). Unidad 5: Las precipitaciones. In *Hidrología I: Vol. I y II* (p. 80 pag). Universidad Nacional de Cuyo Facultad de Ingeniería Civil.

Weber, S. (2012). *Impact of saltwater inundation event on freshwater supply in a coastal aquifer: Sand flume experiments*. University of Western Ontario.

Winston, R. B. (2020). *ModelMuse: una interfaz gráfica de usuario para modelos de agua subterránea* (ModelMuse version 4.3). U.S. Geological Survey Software Release. <https://doi.org/https://doi.org/10.5066/P9XMX92F>

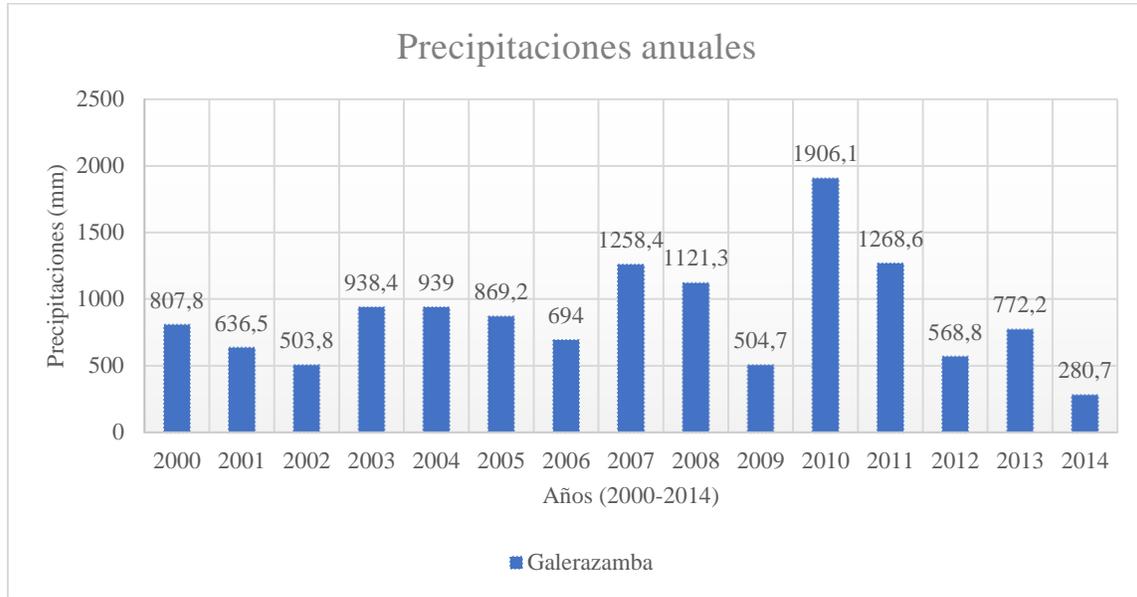
Yu, X., Xin, P., & Lu, C. (2019). Seawater intrusion and retreat in tidally-affected unconfined aquifers: Laboratory experiments and numerical simulations. *Advances in Water Resources*, 132(August). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103393>

Zojer, H. (2000). Técnicas de trazadores I. *Ingeniería Hidráulica Mexico*, 58.

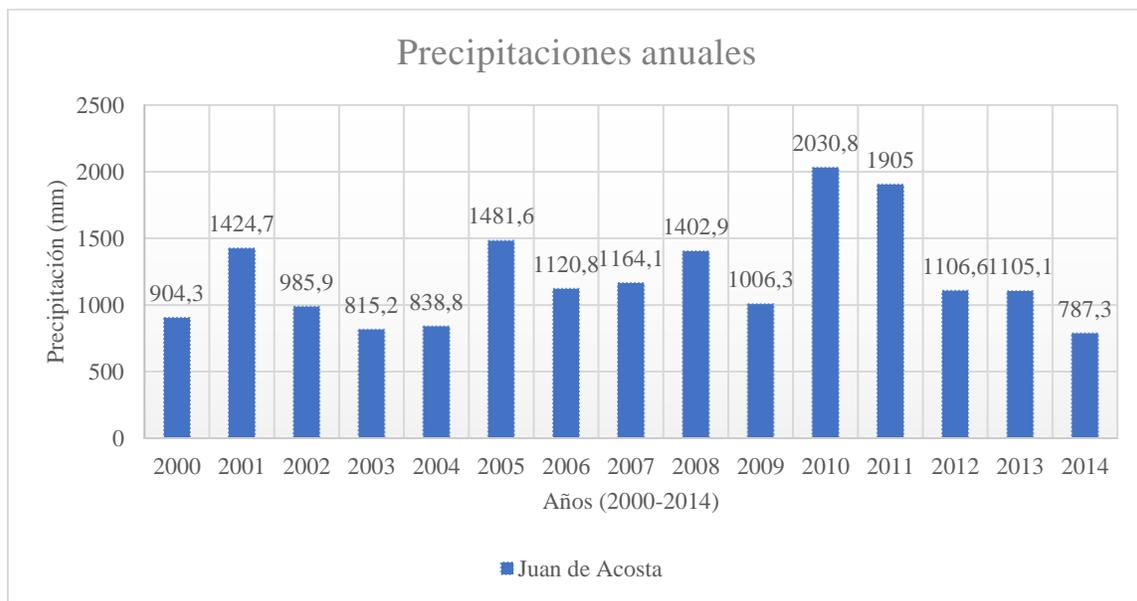


ANEXOS

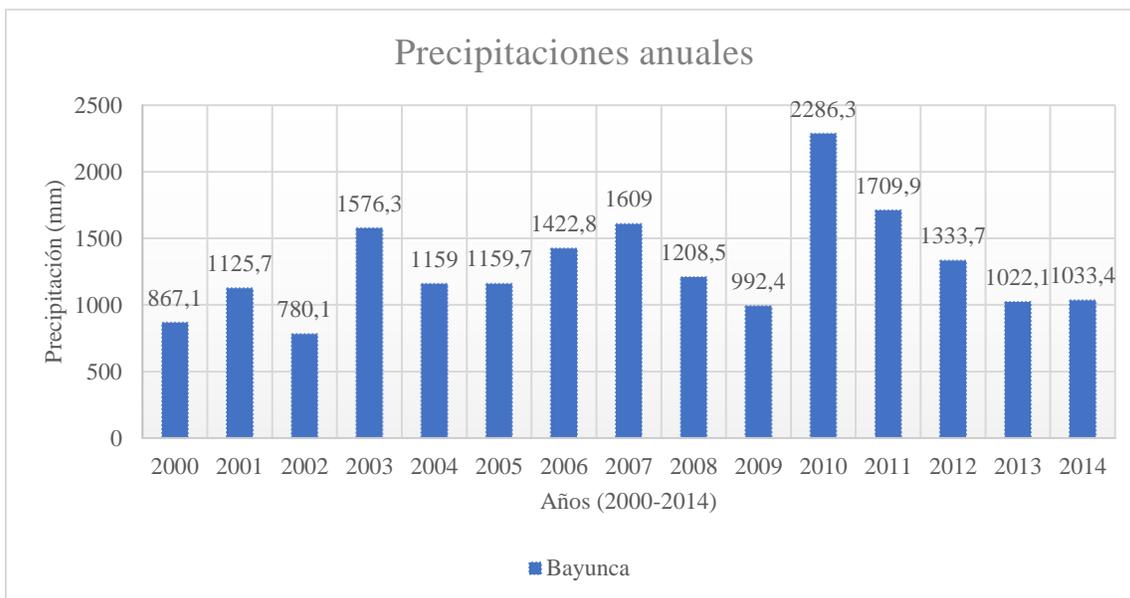
Comportamiento de las precipitaciones anuales por estación:



Anexo 1. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Galerazamba en el periodo 2000-2014.



Anexo 2. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Juan de Acosta en el periodo 2000-2014.

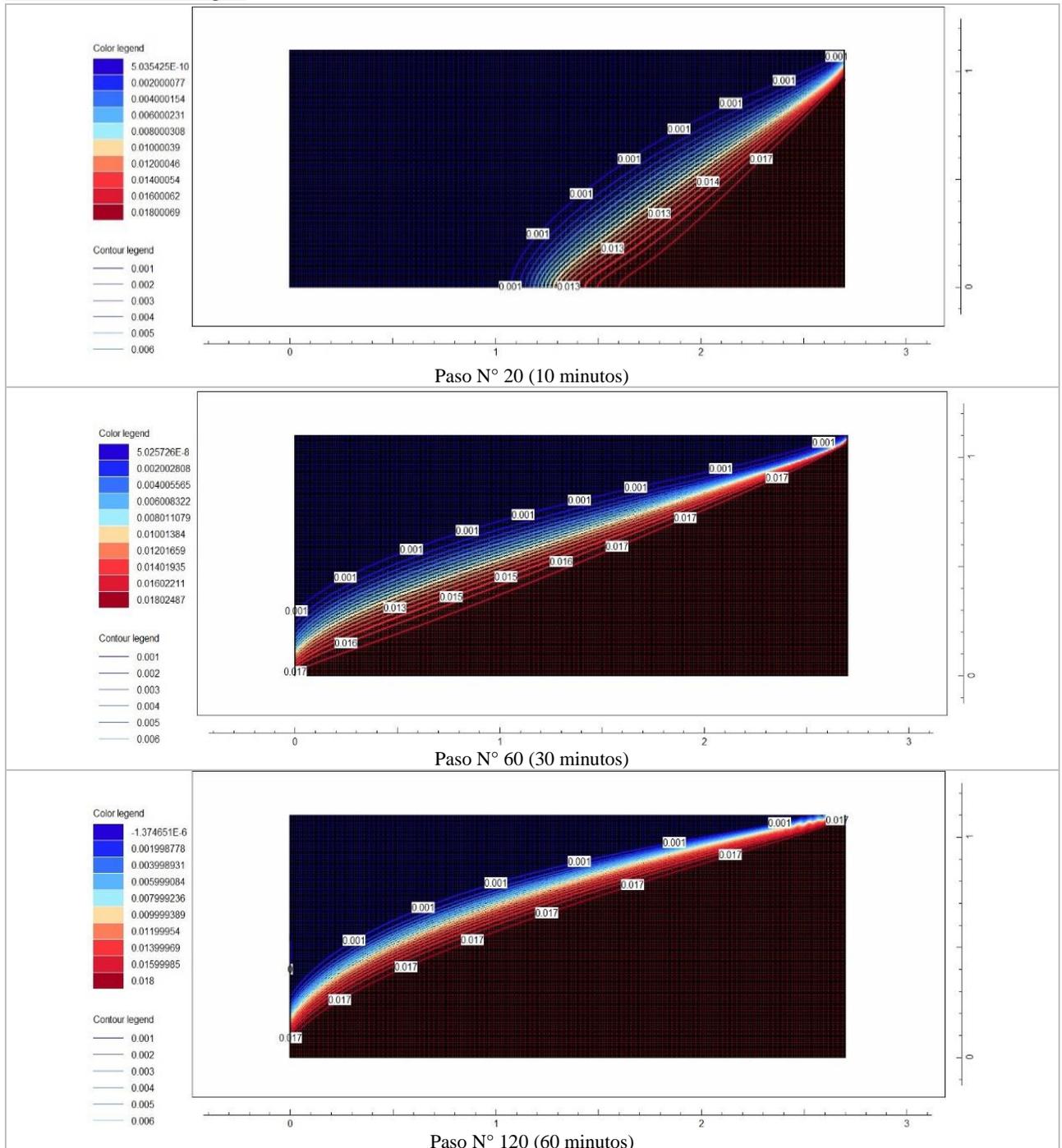


Anexo 3. Gráfico de las precipitaciones totales anuales de la estación Bayunca en el periodo 2000-2014.



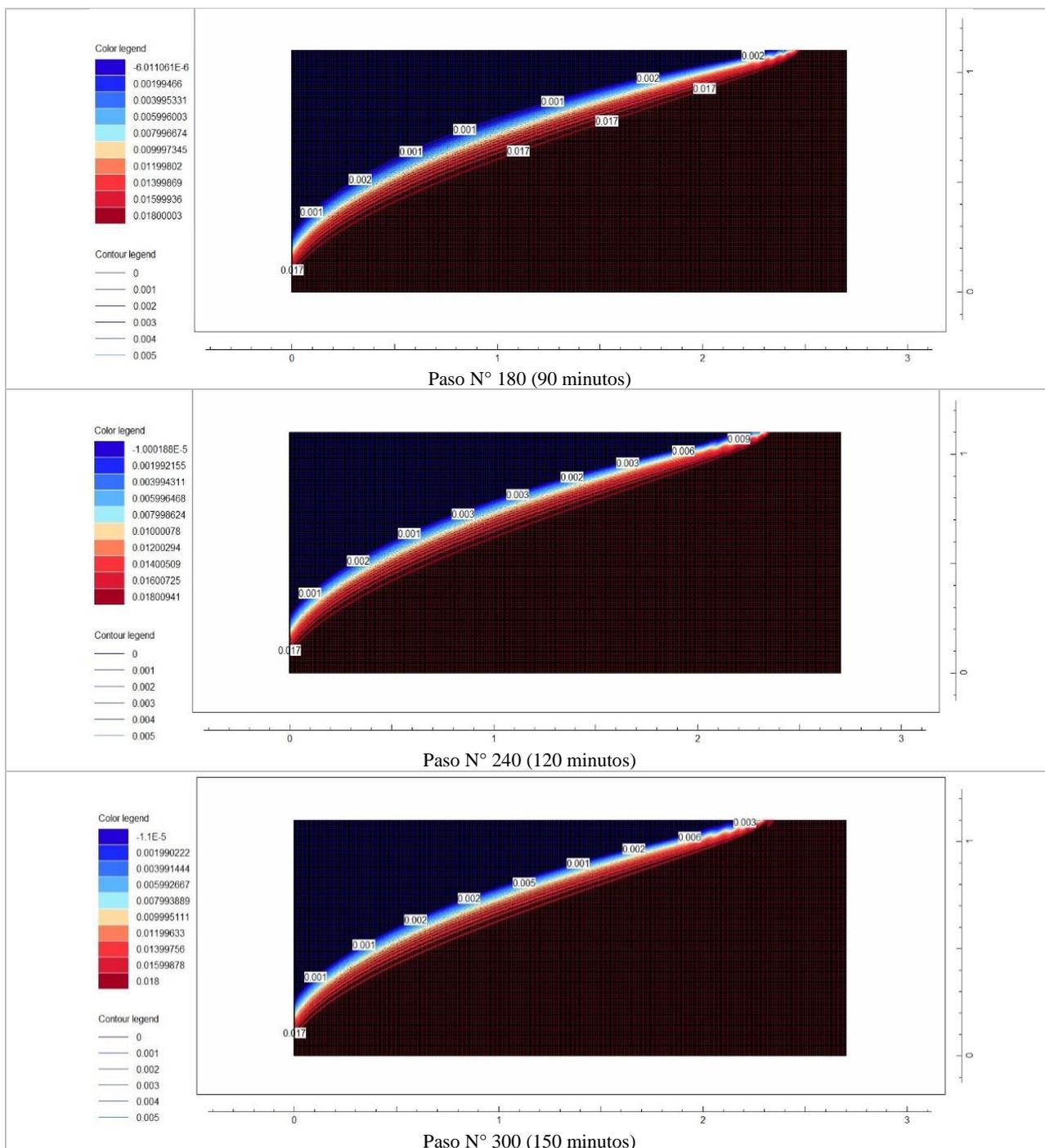
Resultados de las modelaciones de cada escenario en distintos intervalos de pasos:

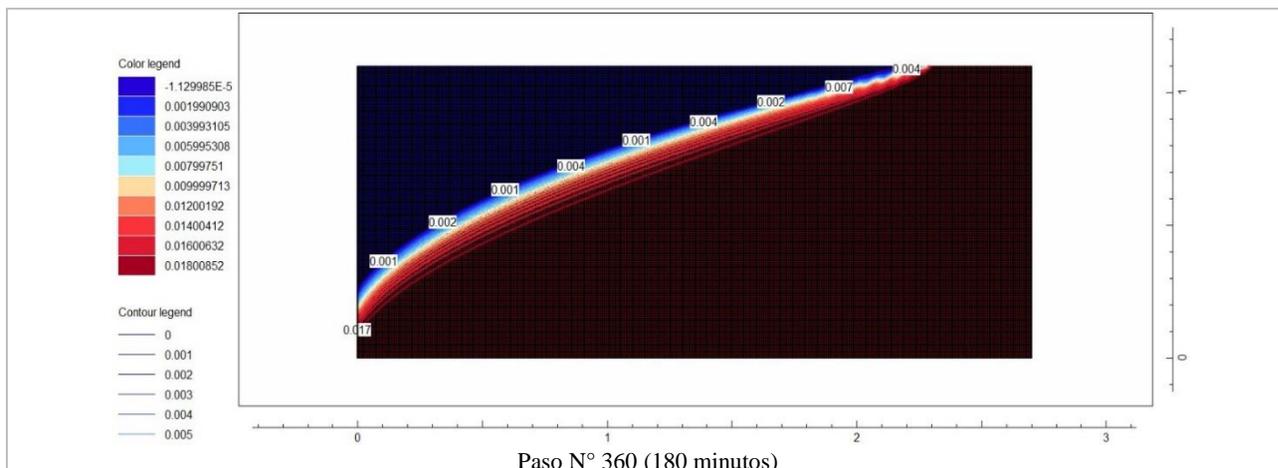
Escenario sin recarga:





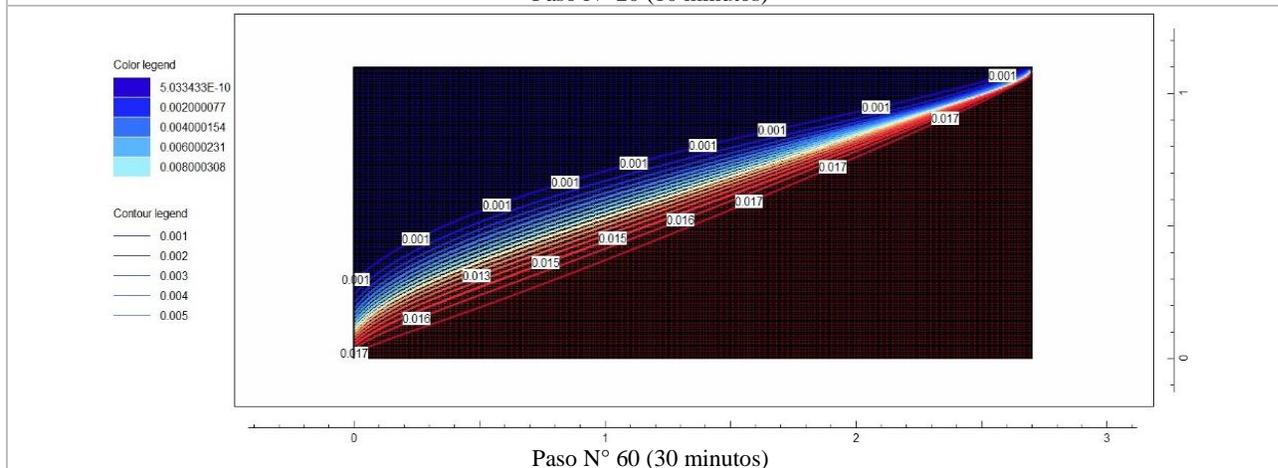
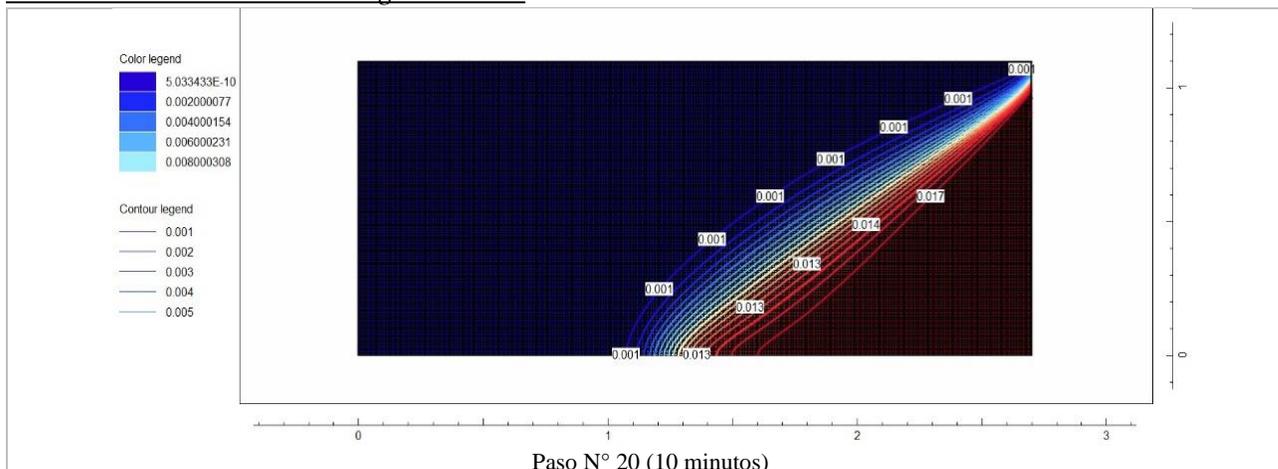
DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA





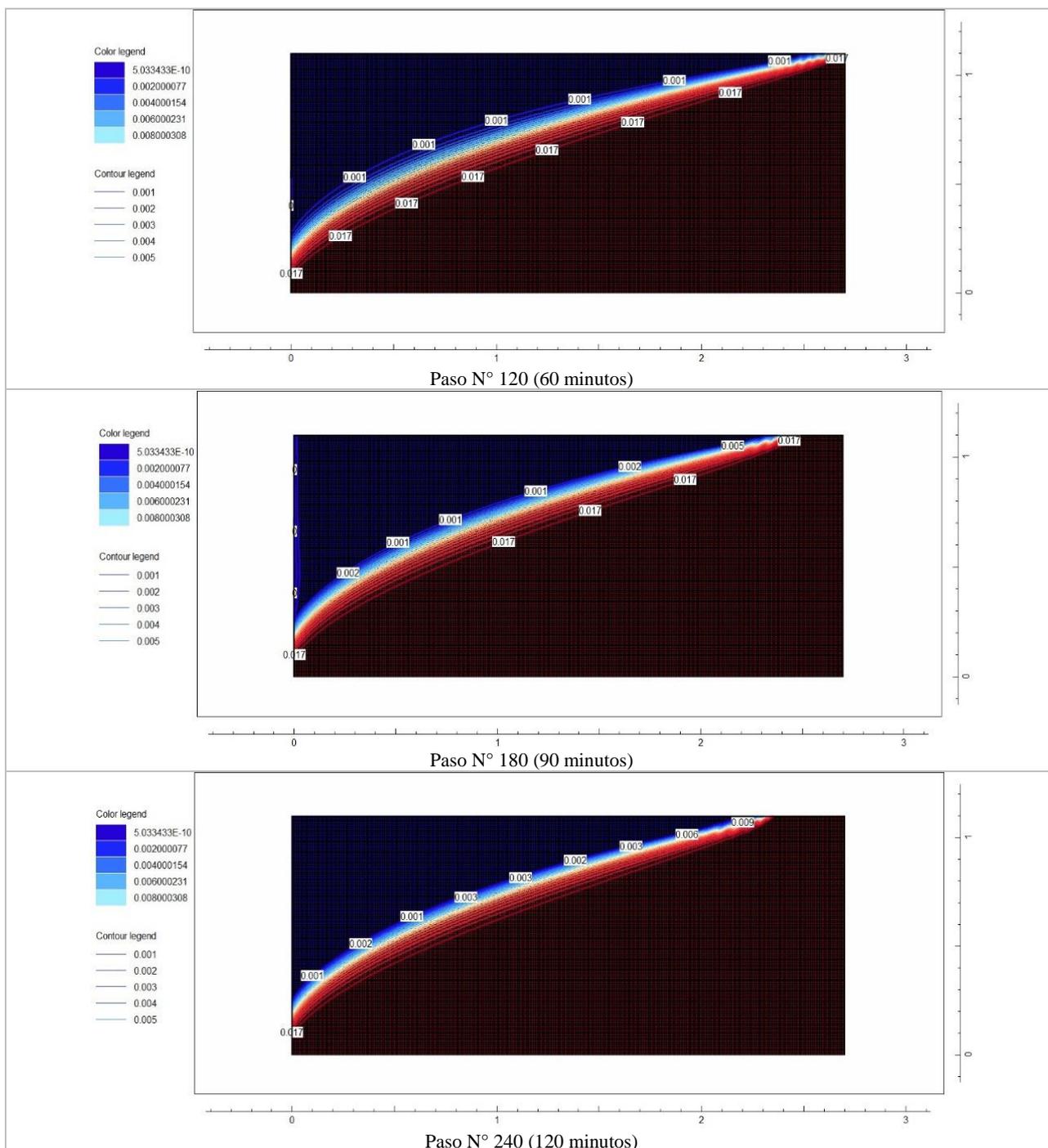
Anexo 4. Resultados del escenario sin recarga en los pasos 20, 60, 120, 180, 240, 300 y 360.

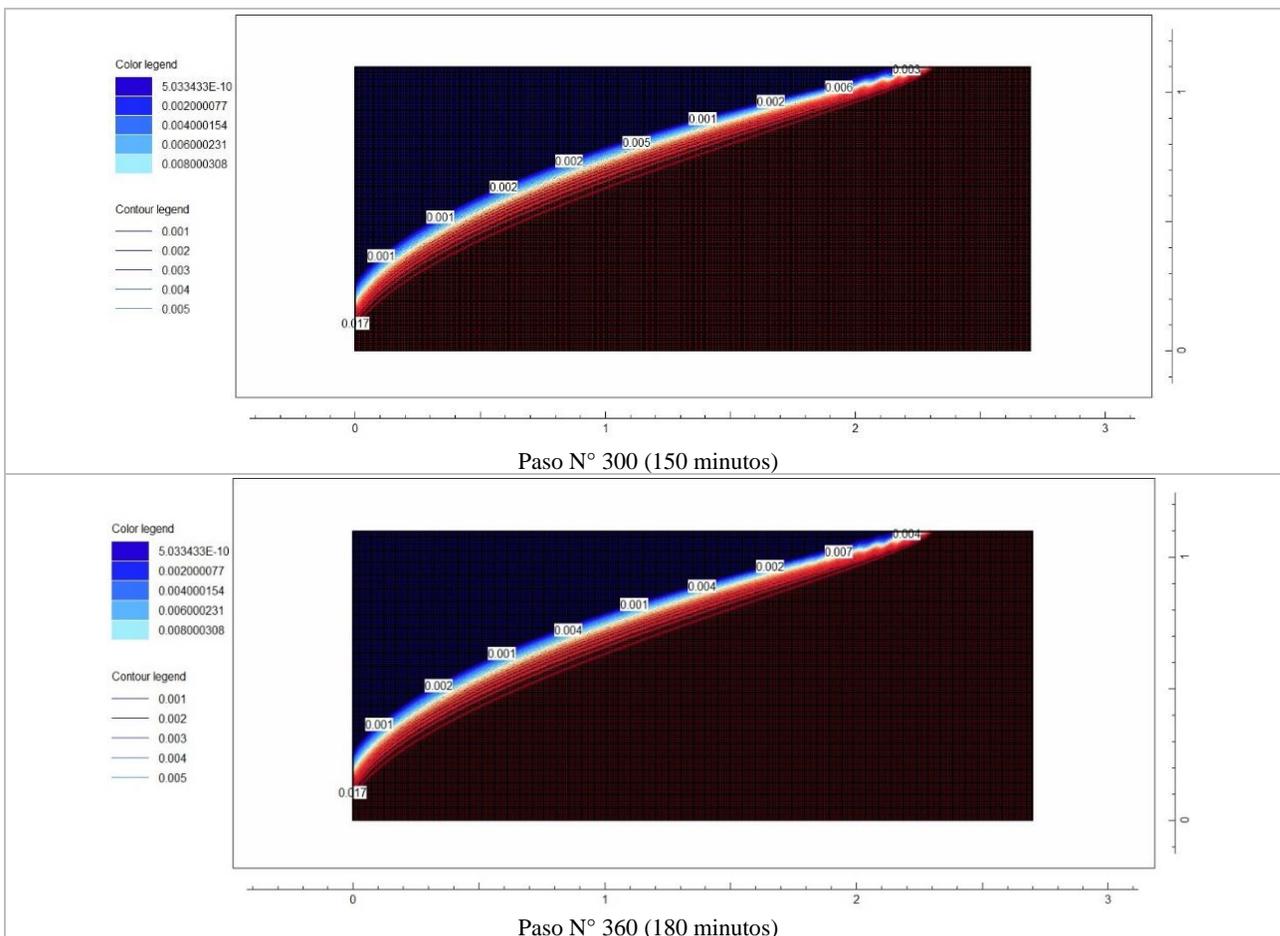
Escenario con valor de recarga mínimo:





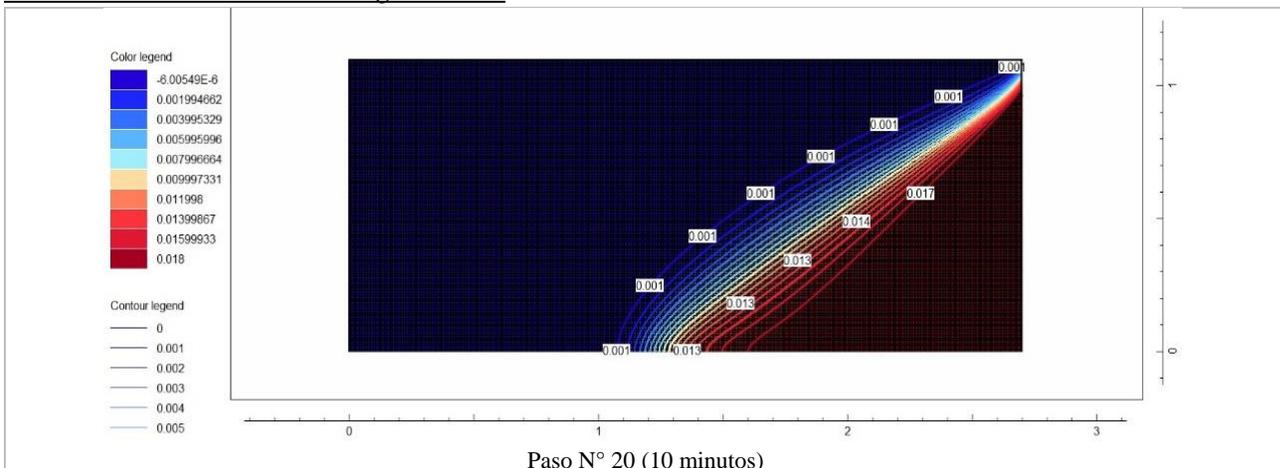
DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA





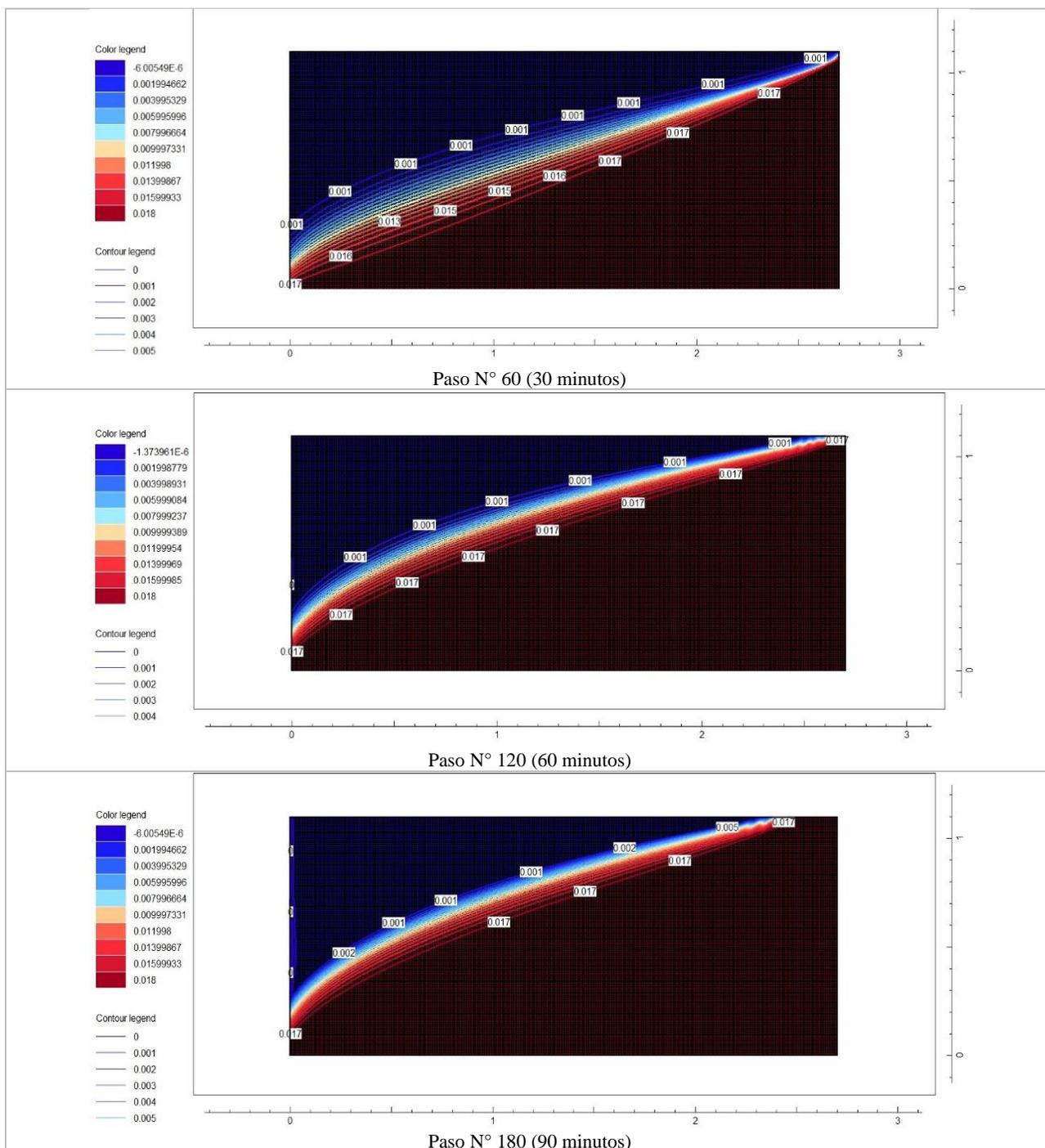
Anexo 5. Resultados del escenario 2 en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.

Escenario con valor de recarga medio:



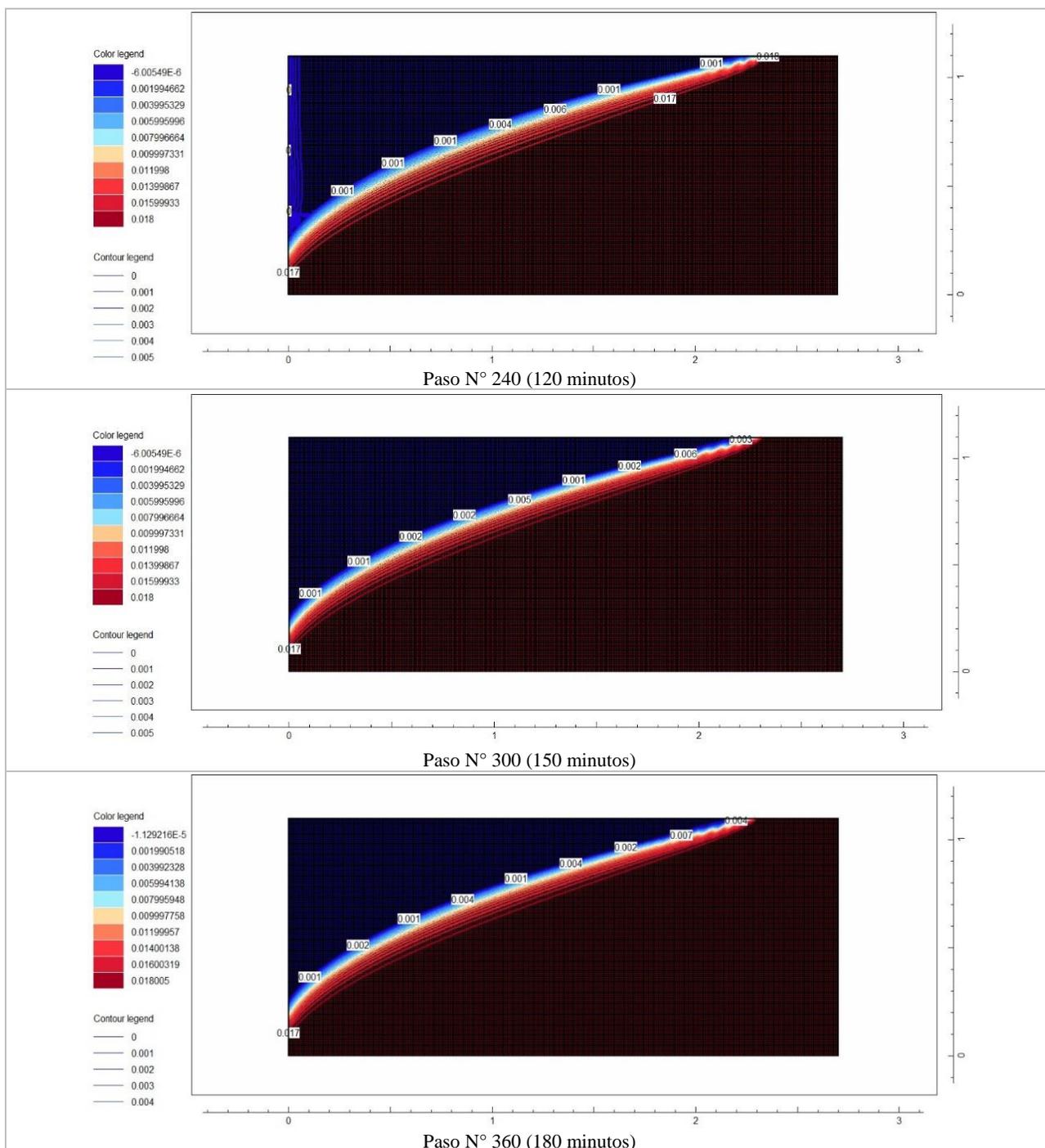


DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA





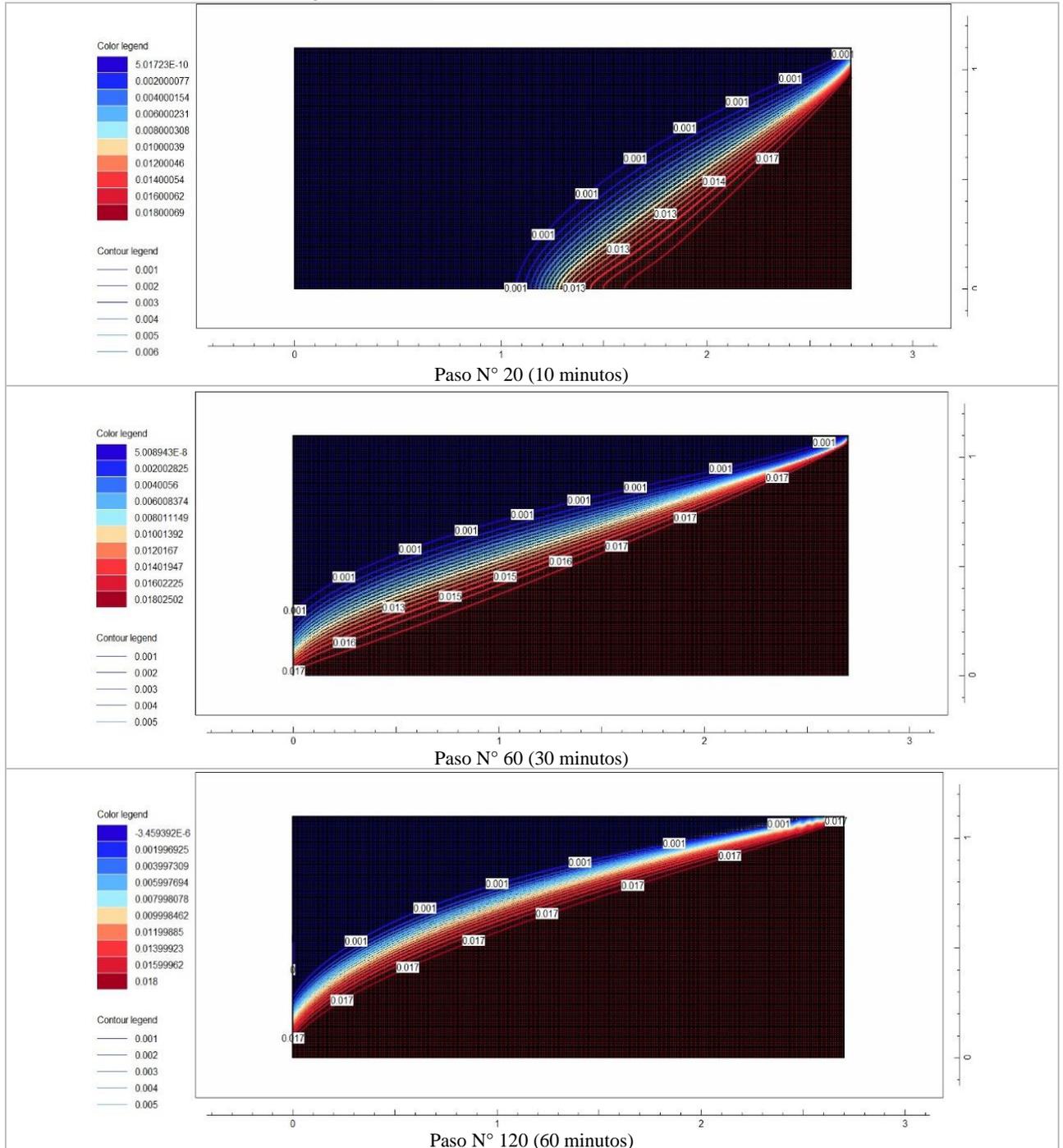
DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA



Anexo 6. Resultados del escenario 3 en los pasos 20, 60, 120, 180,240, 300 y 360.

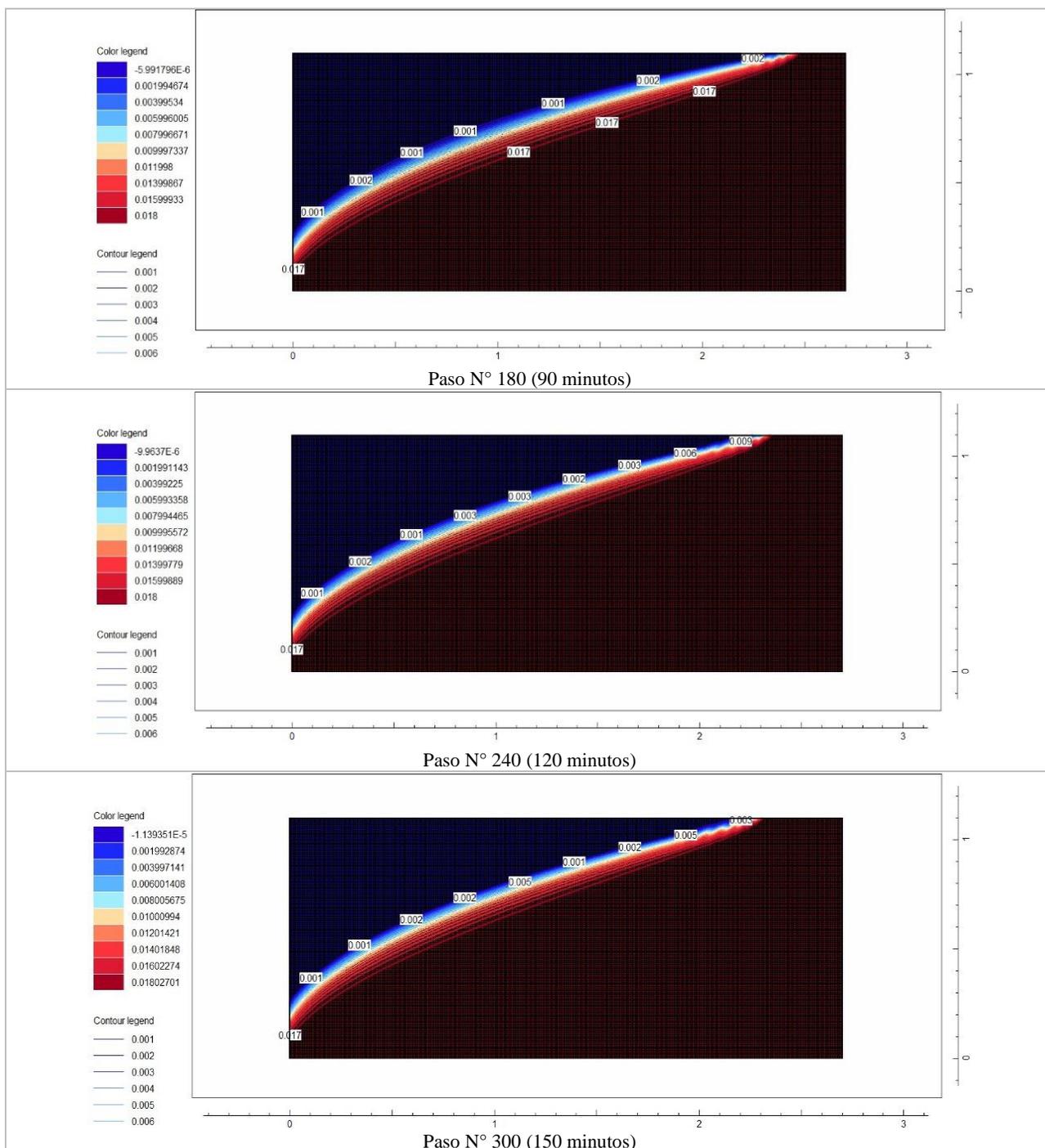


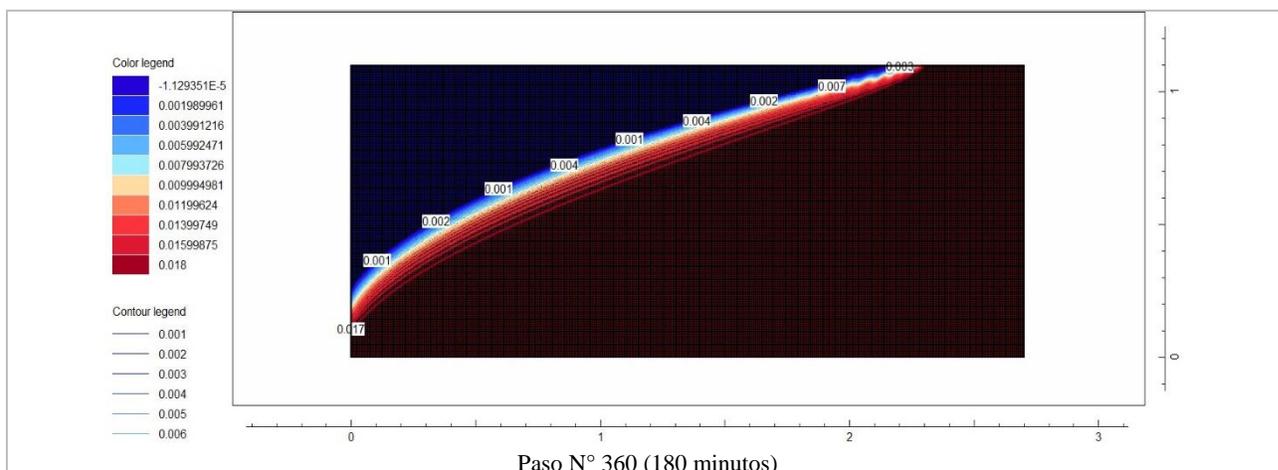
Escenario con valor de recarga máximo:





DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA CUÑA SALINA DE UN ACUÍFERO COSTERO PILOTO UTILIZANDO EL SOFTWARE SUTRA





Anexo 7. Resultados del escenario 4 en los pasos 20, 60, 120, 180, 240, 300 y 360.