

ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE INTRUSIÓN SALINA EN EL ACUÍFERO DE BARÚ,
EMPLEANDO LOS SOFTWARE VISUAL MODFLOW Y SEAWAT

JUAN DAVID DE LEÓN ORTIZ



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

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

2018

ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE INTRUSIÓN SALINA EN EL ACUÍFERO DE BARÚ,
EMPLEANDO LOS SOFTWARE VISUAL MODFLOW Y SEAWAT

JUAN DAVID DE LEÓN ORTIZ

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

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: MODELACIÓN AMBIENTAL

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.

2018

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional; por su esfuerzo día tras día, el cual fue esencial para alcanzar esta meta; por las madrugadas, alegrías y descontentos juntos; por su motivación y apoyo en todos los pasos de mi vida.

A mi director, el profesor Edgar Quiñones, por su apoyo en este trabajo; por dejar abierta siempre una puerta de oportunidades al mundo laboral y una ventana al mundo de la ciencia y tecnología: por su motivación para trazar y cumplir nuevas metas; por contagiar el amor por el estudio e investigación, y por su amistad.

A mis evaluadores, los profesores Javier Mouthon y Mónica Eljaiek, por nunca hacerse considerar como tal, sino como dos guías que con su esfuerzo y dedicación aportaron siempre a mejorar este trabajo.

A mi equipo de trabajo del proyecto Emisario submarino, Yamileth Aguirre, Luz Arango, Melissa Godoy y David Valdelamar, por su compañerismo y amistad; por hacer más ameno mi último año como estudiante de pregrado en la Universidad; porque con su buen ambiente y apoyo hicieron siempre las cosas más fáciles.

A mi novia, Mónica Mieles, por todo su apoyo y comprensión, por estar en las alegrías y descontentos, por su compañía en las noches de trabajo y estudio, y por, sobre todo, por su amor y amistad.

CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1 MARCO TEÓRICO	19
2.1.1 Acuíferos.....	19
2.1.2 Acuíferos costeros.	19
2.1.3 Intrusión salina.....	20
2.1.4 Estudio de la intrusión salina.	21
2.1.6 Modelos numéricos para el estudio de la intrusión salina.	23
2.1.7 Software para modelar la intrusión salina.....	23
2.1.8 Ecuación que gobierna el flujo de densidad variable	26
2.1.9 Índice de intrusión salina.	27
2.2 ANTECEDENTES	29
2.3 ESTADO DEL ARTE	32
2.4 MARCO NORMATIVO	35
2.4.1 Decreto 1076 de 2015.	35
3. OBJETIVOS	38
3.1 OBJETIVO GENERAL	38
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
4. ALCANCE	39

5. METODOLOGÍA.....	43
5.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	43
5.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELACIÓN.....	44
5.2.1 Suelos.....	44
5.2.2 Recarga del acuífero.....	48
5.2.3 Porcentaje de sal del mar.....	50
5.3 ESCENARIOS DE MODELACIÓN.....	53
5.3.1 Escenarios de ascenso del nivel del mar (efectos del cambio climático).	53
5.3.2 Escenarios de explotación de aguas subterráneas.....	54
5.3.3 Combinación de escenarios.	55
5.4 MODELACIÓN.....	56
5.4.1 Condiciones de frontera.....	56
5.4.2 Propiedades.....	56
5.5 INDICE DE VULNERABILIDAD DE INTRUSIÓN SALINA.....	57
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO DE BARÚ EN SUS ALREDEDORES CERCANOS A LA COSTA, EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	58
6.1.1 Geología de la Isla de Barú.....	58
6.1.2 Geología en la zona de estudio.	62
6.1.3 Hidrogeología de la zona de estudio.....	64
6.2 PLANTEAMIENTO A TRAVÉS DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW, DE UN MODELO CONCEPTUAL DE LA INTRUSIÓN SALINA SOBRE EL ACUÍFERO DE BARÚ.....	72

6.3 MODELACIÓN	74
6.4 ANALISIS DE RESULTADOS	74
6.4.1 Efectos por aumento del nivel del mar.	74
6.4.2 Efectos por variación en la explotación.....	76
6.4.3 Análisis del escenario más crítico.....	77
6.4.4 Análisis de concentración de sal en el pozo.	78
6.5 ESTIMACIÓN DE INDICES DE SALINIDAD	79
7. CONCLUSIONES	81
8. RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interface de agua dulce y agua salada.	20
Figura 2: Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación.	21
Figura 3: Zona de transición y flujo del agua subterránea en un proceso de intrusión.	22
Figura 4: Integración de MODFLOW con Visual MODFLOW.....	25
Figura 5: Pozos artesanales clausurados en el corregimiento de Barú.....	30
Figura 6: Captación de agua de un pozo artesanal en el corregimiento de Barú.	30
Figura 7: Isla de Barú.....	39
Figura 8: Sur de la Isla de Barú.....	40
Figura 9: Área modelada.....	41
Figura 10: Metodología general.....	43
Figura 11: Modelo de elevación de superficie en el área de estudio.	45
Figura 12: Modelo de elevación de fondo de estrato arenas con calizas.	46
Figura 13: Modelo de elevación fondo de estrato de arcillas.....	46
Figura 14: Modelo de elevación fondo de estrato de arenas medias no consolidadas.	47
Figura 15: Vista en 3D de la zona de recarga.	49
Figura 16: Polígono de recarga.....	50
Figura 17: Estaciones de muestreo de salinidad.....	51
Figura 18: Estaciones de mayor importancia.....	52
Figura 19: Geología general de la Isla de Barú.....	59
Figura 20: Columna estratigráfica de Formación la Popa (Qpp).	61
Figura 21: Geología en la zona de estudio.....	62
Figura 22: Líneas y electrodos de tomografía.....	64
Figura 23: Curvas de nivel de la superficie.....	67
Figura 24: Curvas de nivel, del fondo de arenas medias y calizas.....	68
Figura 25: Curvas de nivel del fondo de las arcillas.....	69
Figura 26: Curvas de nivel del fondo de arenas medias no consolidadas.....	70
Figura 27: Capas de suelo en el dominio, vista lateral derecha.....	71

Figura 28: Modelo conceptual de intrusión salina.	73
Figura 29: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 2, 5 y 8 a 10 años. .	75
Figura 30: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 7 (negro) y 9 (Verde) a 10 años.....	76
Figura 31: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 9 (verde) y 8 (rojo) a 10 años.	77
Figura 32: Gráfica de concentración de sal (mg/L) vs tiempo.....	79
Figura 33: Mapa de índice GALDIT.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Metodología índice GALDIT	28
Tabla 2: Grado de vulnerabilidad.....	29
Tabla 3: Valores de conductividad hidráulica y porosidad asignados.....	47
Tabla 4: Valores de temperatura, precipitación y recarga anual.....	48
Tabla 5: Estaciones de muestreo	52
Tabla 6: Matriz de escenarios a modelar.....	55
Tabla 7: Estratigrafía de la zona.....	63
Tabla 8: Geolocalización de electrodos de tomografía.....	63
Tabla 9: Ubicación de sondeos eléctricos verticales.....	65
Tabla 10: Sondeo 1.....	65
Tabla 11: Sondeo 2.....	65
Tabla 12: Sondeo 3.....	66
Tabla 13: Sondeo 4.....	66
Tabla 14: Datos de concentración de sal (mg/L) en el pozo.....	78
Tabla 15: Variables para el cálculo del índice GALDIT.....	79

RESUMEN

La isla de Barú está situada al sur de Cartagena y cuenta con una extensión de 7199.43 ha. Al sur de la Isla, está ubicado, con el mismo nombre, el corregimiento de Barú, el cual es hogar de 1936 personas. No obstante, pese a su cercanía con Cartagena, éste no cuenta con una red de distribución de agua potable, siendo así la explotación de agua subterránea una posible solución a dicha problemática.

Sin embargo, la explotación indebida de un ecosistema acuífero, como el de Barú, puede traer problemas como la intrusión salina, que incluso puede empeorar con el aumento el nivel del mar. Por ello, el objetivo principal de este estudio, es estimar el nivel de intrusión salina en el acuífero de Barú en distintos escenarios de ascenso del nivel del mar (Cambio climático) y de explotación de sus aguas, empleando para ello, los programas Visual MODFLOW y SEAWAT.

El análisis de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero de Barú, en la zona de estudio, respalda la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir agua, así como la homogeneidad de sus estratos, lo cual dificulta su explotación. Por otro lado, el índice GALDIT calculado para el acuífero, indica que el acuífero es moderadamente vulnerable a la intrusión salina.

La modelación inició con el desarrollo de un modelo conceptual a través del software Visual MODFLOW, el cual fue convertido a un modelo numérico, resuelto con SEAWAT, simulando un flujo saturado con densidad variable en un horizonte de tiempo de 3650 días. Tras la modelación, se concluyó que el aumento del nivel del mar no afectaba significativamente al acuífero, pero sí lo hacían los caudales de explotaciones. Se encontró en un posible pozo de extracción, niveles de salinidad hasta de 3056 mg/L, al extraer un

caudal de 260 m³/día y hasta de 22298 mg / L, cuando se extrae un caudal de 864 m³/día a 10 años.

Tras esta investigación se sugiere un caudal de explotación cercano a 260 m³/día, un estudio de recarga del acuífero, mayores estudios geoelectrónicos y el empleo de tecnologías de desalinización.

Palabras claves: Agua subterránea, Modelación e Intrusión salina.

ABSTRACT

The island of Barú is located south of Cartagena and has an area of 7199.43 ha. To the south of the island, is located, with the same name, the town of Barú, which is home to 1936 people. The town of Barú is near from Cartagena, but this town does not have a system of drinking water, so the use of groundwater could be a solution of this problem.

However, the groundwater extraction can bring problems, such as saline intrusion, which can be worse if increase the sea level. The aim of the study is to estimate the level of saline intrusion on the Barú aquifer in different scenarios of sea level rise (Climate change) and extraction of its waters, using the Visual MODFLOW and SEAWAT software.

The analysis of the geological and hydrogeological characteristics of the Barú aquifer, in the study area, supports the capacity of the aquifer to store and transmit water, as well that there is no homogeneity of its ground strata, it makes difficult the extraction. The index GALDIT calculated for the aquifer, indicates that the aquifer is moderately vulnerable to saline intrusion.

The modeling began with the development of a conceptual model through Visual MODFLOW software, which was converted to a numerical model, solved with SEAWAT, simulating a saturated flow with variable density over a time horizon of 3650 days. After the moderation, it was concluded that the rise in sea level did not significantly affect the aquifer, but it did affect the farm flows. It was found in a possible extraction well, salinity levels up to 3056 mg / L, when extracting a flow of 260 m³ / day and up to 22298 mg / L, when a flow of 864 m³ / day is extracted at 10 years.

After this investigation, an exploitation rate close to 260 m³ / day, an aquifer recharge study, greater geoelectric studies and the use of desalination technologies are suggested.

Keywords: Groundwater, Modeling and Saline Intrusion.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento de esencial importancia en la naturaleza, el cual constituye el mayor componente estructural de los seres vivos; es un recurso indispensable para la preservación y mantenimiento de la vida. El agua dulce del planeta resulta aún más importante, puesto que representa un pequeño porcentaje del total del agua disponible, y es esta, la que comúnmente se emplea como fuente de abastecimiento de agua potable para las personas, la agricultura y la ganadería (USGS, 2017a).

Del total de agua dulce del planeta, el mayor porcentaje (68,7%) se encuentra en glaciares y en capas de hielo, la cual es difícilmente aprovechable, mientras que el agua subterránea ocupa un 30.1 % del 32.2 % restante, el cual sí puede aprovecharse (The USGS Water Science School, 2016). Estas cifras dan una muestra de la importancia del agua subterránea, y permiten justificar su protección y buen uso, como garantía para que este recurso perdure en el tiempo, y pueda constituir una alternativa presente o futura como fuente de abastecimiento.

Generalmente, las aguas subterráneas son de buena calidad, sin embargo, esta calidad puede empeorarse debido a procesos de contaminación. Un caso importante de contaminación al cual están expuestas las aguas subterráneas presentes en acuíferos costeros, es el de la intrusión salina. Con la intrusión salina, el agua de un acuífero disminuye su calidad, debido al aumento en su contenido de sal (Espinoza & Molina, 2005). Este problema, es debido principalmente a la sobre explotación de los acuíferos y el aumento de las mareas, haciendo su estudio fundamental para tomar medidas preventivas o correctivas.

Esta es una problemática importante que se debe considerar, puesto que, en la Región Caribe, hay una gran cantidad de poblaciones que se abastecen o que se podrían abastecer con este tipo de recursos, debido a que emplear otro tipo de fuente de agua, algunas veces resulta insuficiente y otras veces muy costosa, como es el caso del agua proveniente de las lluvias y

el agua de mar respectivamente. Además, estos estudios son importantes para el profesional en ingeniería civil, el cual con sus conocimientos debe ser capaz de ofrecer soluciones en el campo de manejo de recursos hídricos.

Por ello, se realizó este estudio en la isla de Barú, la cual se encuentra a 10 Km del suroccidente de Cartagena de Indias, en el departamento de Bolívar. Está ubicada en la Ensenada de Cholón; cuenta con recursos de aguas subterráneas, sin embargo, actualmente el acuífero no está delimitado y tampoco hay estudios suficientes sobre este, haciendo que sea difícil diagnosticar problemas de contaminación.

La isla de Barú está delimitada por el Canal del Dique; las bahías de Cartagena y Barbacoas, tiene una extensión de 7199.43 ha. Al sur de la Isla, está ubicado, con igual nombre, el corregimiento de Barú, el cual tiene una extensión de 2438.78 ha; es hogar de 1936 personas y cuenta con 448 viviendas (Trujillo Vélez, 2013). Curiosamente, aunque este corregimiento se encuentra cerca a Cartagena y es, además, un sitio turístico, no cuenta con una red de distribución de agua potable, siendo la explotación de agua subterránea una posible solución a sus problemas de recursos hídricos.

Dicha población tendría una demanda aproximada de 193.6 m³/día de agua, esto asumiendo una dotación de 100 litros/Persona/Día (RAS, 2010). Para el año 2018, se estima una población de 2261 habitantes, equivalente a 226.1 m³/día, mientras que para el 2028, se estima una población de 2547 habitantes y, lo que equivaldría a demandas de 254.7 m³/día.

El hecho de que un acuífero costero como el de Barú sea explotado, puede traer consigo problemáticas, si se da que la extracción supere la capacidad de recarga del acuífero, haciendo que se empiece a manifestar salinización en las aguas de este, causando un proceso de contaminación ineludible, de muy difícil solución (Espinoza & Molina, 2005).

Por otro lado, se estima globalmente, como parte de los problemas de cambio climático, un aumento del nivel del mar de 1.8 ± 0.4 mm/año (IPCC, 2007). Mientras que para la costa Caribe colombiana, se estima que el aumento estará entre 2.01 mm y 3.6 mm por año, siendo 3.6 mm por año el valor más probable (Málikov, 2010; Torres, Gómez, & Afanador, 2006). El aumento en el nivel del mar podría significar un avance de la cuña salina, causando o aumentando problemas de salinización, tal como se ha analizado en Partido de la Costa, provincia de Buenos Aires (Carretero, Rapaglia, & Kruse, 2012).

Estudios corroboran que el fenómeno de intrusión salina pone en riesgo el abastecimiento de agua potable para comunidades y poblaciones costeras (Fernández, 2000; Moptma & Miner, 1994). En contra parte los estudios del fenómeno de intrusión salina, con ayuda de modelos de densidad variable, han supuesto una ayuda importante para la toma de decisiones en materia de prevención y corrección (Canales, Hanson, & Dausman, 2016; Ding, Yamashita, Lee, & Pan, 2014).

Una problemática asociada con el estudio de la intrusión salina viene dada desde el punto técnico y metodológico, puesto que según lo que se puede encontrar en la plataforma CvLAC de Colciencias, solo hay referencias de estudios realizados a escala (Botero-Acosta & Donado, 2015) y de forma metodológica (Bedoya, 2009), pero no se encuentra ninguna de intrusión salina en acuífero costero, empleando el software SEAWAT, el cual es muy confiable y utilizado para modelar intrusión salina (Ding et al., 2014). Por otro lado, en la zona, como publicación científica, solo se ha encontrado la tesis realizada por Castillo y Hernández en 2012, los cuales realizaron una simulación empleando el software VS2DT, sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, puesto que no reflejaban correctamente el fenómeno de la intrusión salina (Castillo & Hernández, 2012).

Por último, es importante tratar de predecir los escenarios en donde puedan darse los distintos procesos de contaminación, para así poder evitarlos o en su defecto, estar preparados para tomar acciones de corrección. Lo que lleva a la formulación de la siguiente pregunta:

¿Es posible estimar el nivel de la intrusión salina en el acuífero de Barú, a través de un modelo numérico, empleando los software Visual MODFLOW y SEAWAT, de forma que pueda servir de herramienta para el desarrollo de acciones de prevención o corrección?

Dicha pregunta, fue resuelta teniendo en cuenta que la intrusión salina, es el aumento del contenido de sal de las aguas de un acuífero que están en contacto con el agua de mar, lo cual produce que haya cambios en algunas propiedades del agua que se pueden identificar a través de su densidad (López-Geta & Gómez-Gómez, 2007). Lo que permite que, a través de modelos de flujo de densidad variable, como el empleado por el SEAWAT, se pueda predecir el comportamiento de la intrusión salina en un acuífero (Praveena, Abdullah, Aris, Yik, & Bidin, 2011) (Canales et al., 2016), modelo que fue realizado desde la Universidad de Cartagena, con ayuda de información secundaria proveniente de estudios de ACUACAR.

2. MARCO DE REFERENCIA

Con el objeto de exponer el contexto científico en el cual se desenvuelve la propuesta planteada, se presentarán conceptos claves sobre el problema de la intrusión salina, herramientas de modelación y antecedentes de investigación sobre dicha problemática en el acuífero de Barú y otros.

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Acuíferos.

Son formaciones geológicas las cuales se caracterizan por contener agua subterránea. Los acuíferos, son capaces de almacenar y transmitir agua en cantidades suficientes para ser explotadas. El comportamiento de un acuífero, es similar al de un embalse, donde se deben considerar tres aspectos: *caudal de entrada*, *caudal de salida*, *capacidad de almacenamiento* y *regulación* (Fuentes, 1992).

El *caudal de entrada* está constituido por agua procedente de infiltración, ésta básicamente es producto de precipitaciones, aguas superficiales, riegos, etc.

El *caudal de salida* o *caudal de descarga de agua*, se da al sustentar fuentes superficiales como manantiales o descargas subterráneas que terminan en los cauces de los ríos o en el mar. Cuando un acuífero es explotado por el hombre, también existe un caudal de salida, que se produce generalmente por bombeo.

La *capacidad de almacenamiento* depende del volumen, porosidad y fisuración del acuífero.

2.1.2 Acuíferos costeros.

Un acuífero costero, es básicamente una formación geológica capaz de conducir y mantener agua, con la particularidad que se encuentra conectado hidráulicamente con el mar y sus

aguas. Éstos por lo general están conectados con otros acuíferos, por lo que se puede llegar a considerar el último eslabón del agua dulce subterránea antes que ésta llegue al mar (López-Geta & Gómez-Gómez, 2007).

Los acuíferos costeros, según la naturaleza, se pueden clasificar en acuíferos *Detríticos* y *carbonatos*. Los acuíferos *detríticos*, están constituidos principalmente por capas alternantes de gravas, arenas, limos y arcillas, las cuales varían en su geometría y continuidad espacial; mientras que los acuíferos *carbonatos*, en su gran mayoría presentan un relieve desigual, lo que tiende a limitar el desarrollo de actividades productivas, sin embargo, pueden llegar a constituir una fuente de recurso para zonas cercanas.

2.1.3 Intrusión salina.

La intrusión salina es un proceso que ocurre en las costas, donde el agua de mar penetra tierra adentro en los acuíferos costeros (ver Figura 1) aumentando la salinidad del agua de los acuíferos

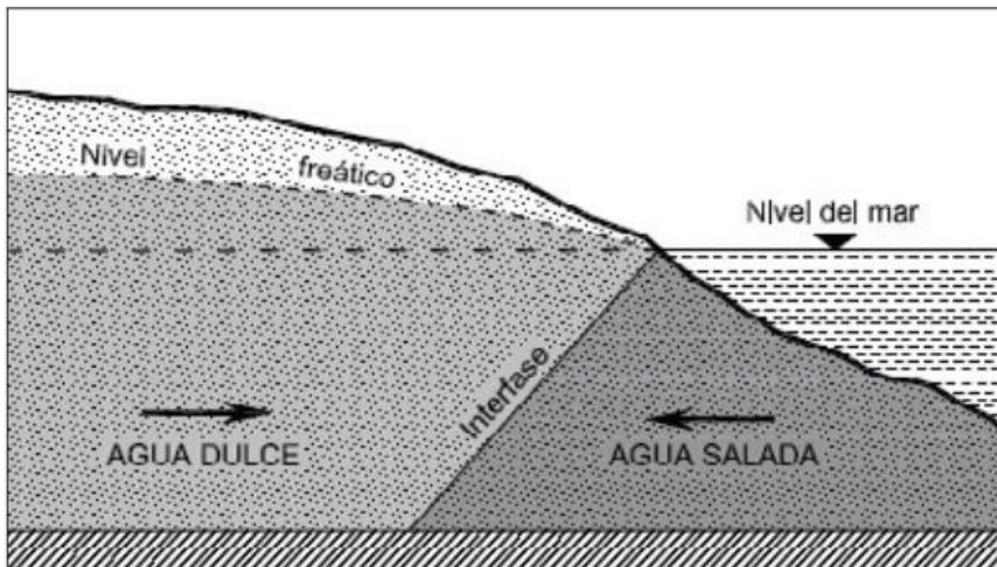


Figura 1: Interface de agua dulce y agua salada.
Fuente: (López & Gomez, 2007).

La penetración del agua salada, dependerá de las mareas, la extracción de agua dulce mediante pozos, la geometría y propiedades hidráulicas del acuífero, tales como la permeabilidad y el nivel piezométrico.

El proceso de intrusión salina es dinámico, este retrocede en los períodos de alta recarga de los acuíferos y avanza en los períodos de menor recarga. La invasión del agua marina por su parte, puede producirse de formas variadas, donde las más comunes son: el avance horizontal de la interface hacia el interior, llamada “general” o “zonal” (Lopez-geta & Mena Ingles, 1988), y el ascenso vertical en forma de cono, llamado “upconing” de la interface a favor de pozos o sondeos, como se puede apreciar en la Figura 2, en los que tiene lugar un bombeo intensivo.

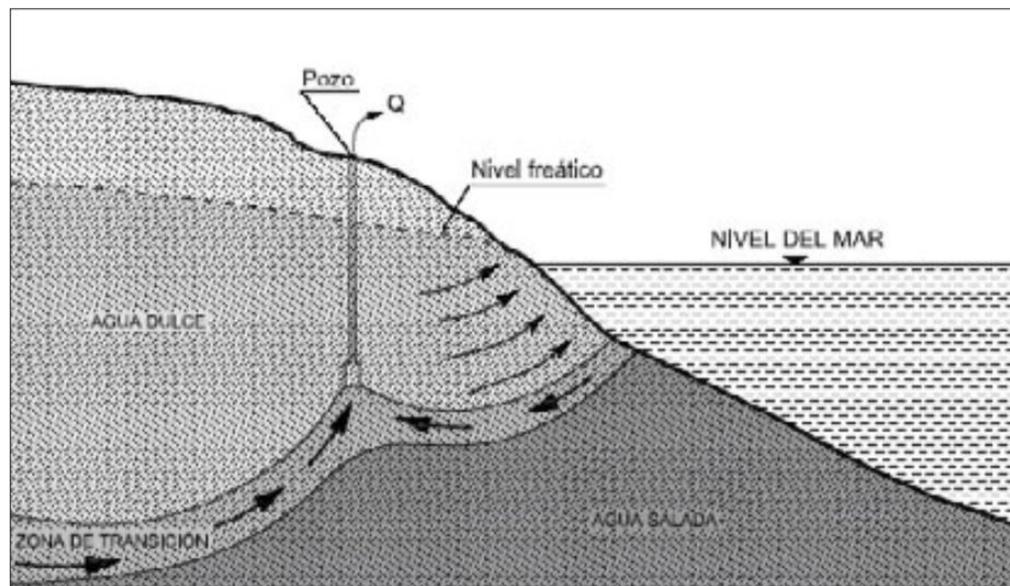


Figura 2: Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación.

Fuente: (López & Gomez, 2007).

2.1.4 Estudio de la intrusión salina.

En los acuíferos, el estudio de la intrusión salina, se puede abordar de forma simplificada, al considerar que el agua salada y el agua dulce son fluidos inmiscibles, los cuales están en contacto mediante una separación neta o brusca entre ellos, denominada interface, como se

aprecia en la Figura 1. Esta simplificación hace posible que el cálculo de la posición teórica de contacto de agua dulce sea sencillo.

Aun así, la mejor forma de realizar el estudio es cuando se consideran el agua dulce y salada como fluidos miscibles, donde el paso de un fluido a otro se da a través de una “zona de transición” o “zona de mezcla”, como es posible observar en la Figura 3. Las características físicas y químicas de la zona de transición, dependen del grado de mezcla de cada espacio y de procesos químicos que se producen en la matriz del acuífero; a su vez, la anchura de esta zona depende de características hidrodinámicas del medio, difusividad, dispersión y del grado de explotación del acuífero (Lopez-geta & Mena Ingles, 1988).

Por otro lado, cuando el agua presenta concentraciones significativas de compuestos disueltos, como lo es la sal, propiedades como la densidad pueden variar en el espacio tiempo, haciendo que la relaciones entre los niveles de agua, velocidad del flujo y presiones del fluido no sean simples ni directas, lo que ocasiona que el estudio del flujo en estas condiciones deba ser abordado en función de la presión, densidad del fluido y de la permeabilidad del medio poroso (Garzon, 2009).

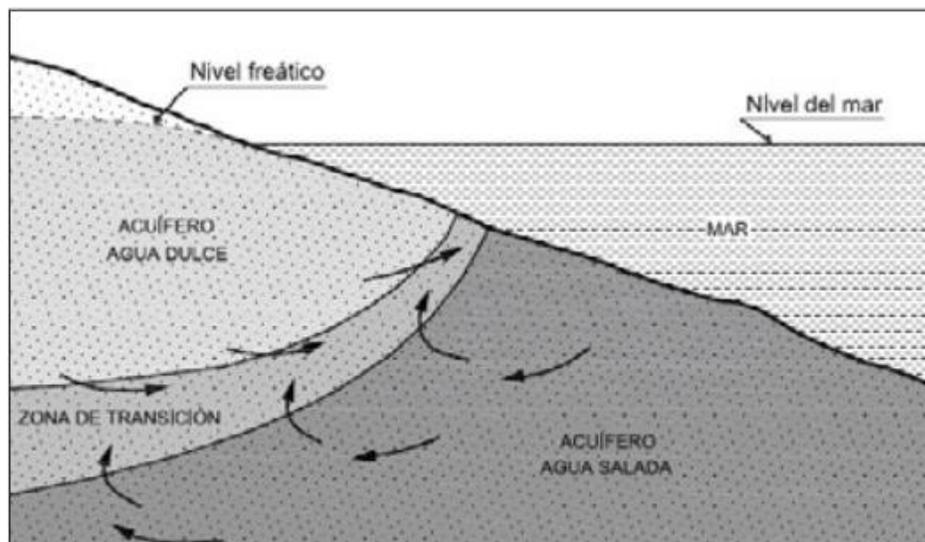


Figura 3: Zona de transición y flujo del agua subterránea en un proceso de intrusión.

Fuente: (Custodio y llamas, 1983. Modificado por (López & Gomez, 2007).

2.1.6 Modelos numéricos para el estudio de la intrusión salina.

Se han desarrollado un gran número de modelos numéricos para lograr predecir el movimiento y localización de la intrusión salina, los cuales se agrupan en dos categorías: Modelos de interfaz neta y modelos de densidad variable. Los modelos de interfaz neta, solo se pueden aplicar cuando el ancho de la zona de transición es muy pequeña en comparación con el espesor del acuífero, asumiendo la zona de transición como una interfaz (Figura 1), sin embargo, como ya se dijo, esto hace más simple el estudio, mas no mejor. Por otra parte, los modelos de densidad variable abarcan el problema de una forma más real y correcta, en donde no se consideran los fluidos inmiscibles, sino separados por una zona de transición (Figura 3), haciendo que este tipo de modelos sean los más empleados (Ding et al., 2014).

2.1.7 Software para modelar la intrusión salina.

2.1.7.1 MODFLOW.

Desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos por primera vez en 1984 y con una última actualización en el 2005, es considerado un estándar internacional para simular y predecir condiciones del agua subterránea, así como también las interacciones de agua subterránea-agua superficial. Este software cuenta con una familia de programas capaces de simular la administración del agua subterránea, modelos de densidad variable, parámetros de estimación y más (USGS, 2017b). Desde 1980 hasta la fecha, los principales avances y códigos del MODFLOW se enuncian a continuación:

- MODFLOW-2000
- MODFLOW-2005
- SEAWAT
- MODFLOW-LGR

- MODFLOW-NWT
- MODFLOW-USG
- MODFLOW-SURFACT (A proprietary version developed by HydroGeoLogic, Inc (HGL))

2.1.7.2 SEAWAT.

Es un programa diseñado para simular flujos de densidad variable en tres dimensiones con diferentes sustancias diluidas y transporte de calor. Este software ha sido empleado en una gran variedad de estudios de aguas subterráneas, en los que se hace énfasis en la intrusión salina de acuíferos costeros.

Actualmente funciona el SEAWAT Versión 4, el cual reemplazó al SEAWAT-2000

2.1.7.3 Visual MODFLOW.

Para que el MODFLOW funcione, es necesario tener una serie de archivos de textos que describan los atributos del modelo, en los que están dimensiones celda por celda, propiedades y límites. Sin embargo, esto hace que el proceso de modelación sea complejo y tome mucho tiempo. El Visual MODFLOW funciona como interfaz gráfica de usuario (GUIs), el cual permite desarrollar el modelo en la pantalla, usando archivos comunes de hidrogeología como Excel y base de datos; AutoCAD, GIS Data, etc. Además, ayuda a asistir en el post proceso, puesto que ayuda a interpretar los resultados generados por MODFLOW y producir mapas fáciles de analizar (Waterloo Hidrogeologic, 2017).

El proceso en el que se integran los Software MODFLOW y Visual MODFLOW, están descritos en la Figura 4.

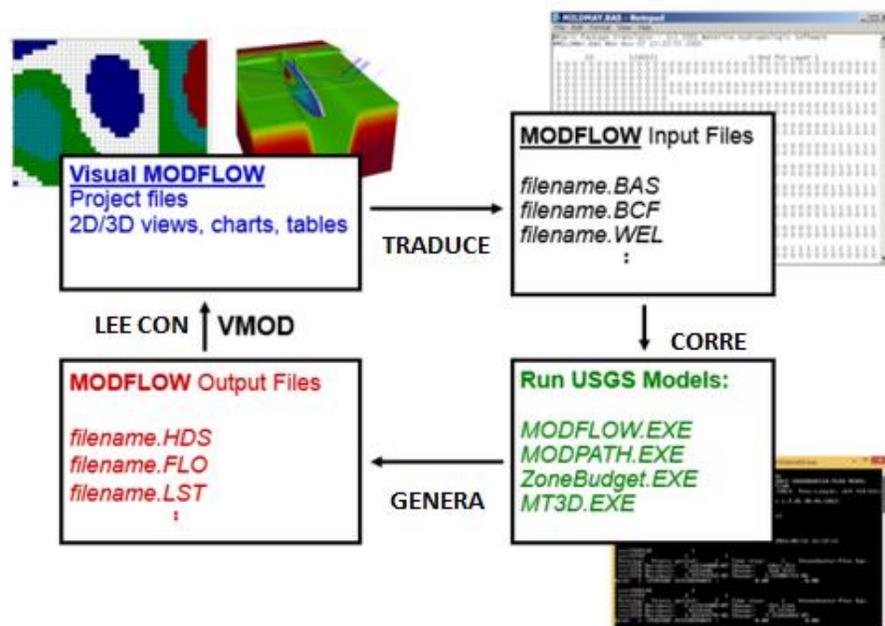


Figura 4: Integración de MODFLOW con Visual MODFLOW.

Fuente: (Waterloo Hydrogeologic, 2017).

Visual MODFLOW, cuenta con dos interfaces de usuario, las cuales son: Visual MODFLOW Classic y Visual MODFLOW Flex.

2.1.7.4 Visual MODFLOW Flex.

Es una interfaz gráfica de usuario con mucha flexibilidad a la hora de adaptar modelos numéricos, donde se inicia realizando un modelo conceptual, empleando formas en 2D y 3D con diferentes atributos, lo que permite una modificación fácil y un entendimiento mejorado de las situaciones a analizar. Sin embargo, existen situaciones las cuales aún no pueden ser modeladas por esta interfaz, como las que se manejan con el SEAWAT, no obstante, se puede emplear para el inicio del proyecto, donde se realizaría un modelo conceptual, que luego sería empleado en el Visual MODFLOW Classic (Hidrogeologic, 2017).

2.1.7.5 Visual MODFLOW Classic.

Es la primera interfaz de Visual MODFLOW, esta no tiene tanta flexibilidad en comparación del Visual MODFLOW Flex, pero es necesaria para la realización de modelos de intrusión salina, donde se utiliza el SEAWAT.

2.1.8 Ecuación que gobierna el flujo de densidad variable

La ecuación que gobierna el flujo de densidad variable, la cual es resulta en Visual MODFLOW, cuando se corre el SEAWAT es la siguiente (Ding et al., 2014; Guo & Langevin, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left\{ \rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right\} = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s$$

- α, β & γ : Ejes coordenados
- $K_{f\alpha}, K_{f\beta}$ & $K_{f\gamma}$: Conductividades o permeabilidades en los tres ejes coordenados (L/T)
- ρ : Densidad del fluido (ML^{-3})
- ρ_f : Densidad del agua dulce (ML^{-3})
- h_f : Cabeza hidráulica del agua dulce (L)
- Z : Elevación sobre el dato de una celda modelo (L)
- S_f : Almacenamiento específico (L^{-1})
- θ : Porosidad específica (Adimensional)
- C : Concentración del soluto (ML^{-3})
- $\bar{\rho}$: Densidad del agua entrante (ML^{-3})
- t : Tiempo (T)
- q_s : Tasa de flujo que entra o sale por fuentes o sumideros (T^{-1})

2.1.9 Índice de intrusión salina.

Existen numerosos índices para la intrusión salina, donde la mayoría de ellos están basados en parámetros físico químicos y en particular del Ion Cloruro, el cual es considerado como el más confiable de los elementos para describir e identificar procesos de intrusión salina (Ballesteros, Morell, García-Menéndez, & Renau-Pruñonosa, 2016). Entre ellos se encuentran los siguientes:

Sólidos disueltos totales (Total dissolved solids, TDS), el cuál es un indicador de salinidad y calidad del agua subterránea (Voudouris, Mandilaras, & Antonakos, 2004).

Índice de intrusión marina (Itemized Index of Marine Intrusion, IPI), el cual discretiza un acuífero y le asigna un peso a cada una de las celdas en función de la concentración del Ion Cloruro (Murillo Díaz & Navarro Iañez, 1991).

Índice SITE, el cual está basado en datos fáciles de obtener, cuyo objeto es caracterizar el proceso de intrusión salina y proporcionar una evaluación del estado general del acuífero. Está basado en las concentraciones de Ion de cloruro (Ballesteros et al., 2016).

Índice GALDIT: El cual consiste en un modelo aditivo, que tiene en cuenta parámetros hidrogeológicos e indica a través de una puntuación la vulnerabilidad de un acuífero con respecto al problema de la intrusión salina (Chachadi & Ferreira, 2005).

El índice GALDIT, se calcula a través de los siguientes 6 parámetros:

- Tipo de acuífero
- Conductividad hidráulica
- Altura del agua subterránea por encima del nivel del mar
- Distancia de la costa
- Impacto actual de la intrusión salina

- Espesor del acuífero

Cada parámetro tiene un peso (importancia) y recibe una puntuación de acuerdo a las características del acuífero, como se compila en la Tabla 1.

Tabla 1: Metodología índice GALDIT

PUNTUACIÓN /VARIABLE	10	7.5	5	2.5	PESO
Tipo de acuífero	Confinado	No confinado	Poco confinado	Acuífero delimitado	1
Conductividad hidráulica (m/día)	mayor a 40	10 a 40	5 a 10	menor a 5	3
Altura del agua subterránea por encima del nivel del mar (m)	Menor a 1	1 a 1.5	1.5 a 2	mayor a 2	4
Distancia a la costa (m)	Menos de 500	500 a 750	750 a 1000	mayor a 1000	4
Impacto actual de la intrusión salina (%)	Mayor a 2	1.5 a 2	1 a 1.5	menor a 1	1
Espesor del acuífero (m)	mayor a 10	7.5 a 10	5 a 7.5	menor a 5	2

Luego, se calcula el índice de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Índice GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 (\text{Puntuación} \times \text{Peso})}{\sum_{i=1}^6 \text{Peso}}$$

Posteriormente, de acuerdo al resultado obtenido, se categoriza la vulnerabilidad del acuífero según la Tabla 2.

Tabla 2: Grado de vulnerabilidad

Índice GALDIT	GRADO DE VULNERABILIDAD
>7.5	Altamente vulnerable
5 a 7.5	Moderadamente vulnerable
<5	Poco vulnerable

2.2 ANTECEDENTES

El corregimiento de Barú, pese a su cercanía a Cartagena y al Canal del Dique, nunca ha contado con acueducto, por ello, sus pobladores han recurrido al aprovechamiento del agua lluvia y el agua subterránea, siendo esta última de vital importancia dadas las prolongadas épocas de sequías. No obstante, aunque el recurso del agua subterránea ha sido de vital importancia para los pobladores de Barú, con el paso de los años, muchos pozos artesanales han sido clausurados debido a la disminución de su caudal y calidad de agua, como se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5: Pozos artesanales clausurados en el corregimiento de Barú.

Aun así, en el corregimiento de Barú existen pozos en funcionamiento, como el apreciable en la Figura 6, aunque sus aguas no son utilizadas para consumo, sino para hacer aseo o lavar, debido a su baja calidad, lo cual podría desprenderse de fallos técnicos en la construcción (la cual fue completamente artesanal) y la falta de estudios.



Figura 6: Captación de agua de un pozo artesanal en el corregimiento de Barú.

En Colombia, no hay muchas referencias de antecedentes de modelación, esto, debido a que quizá la mayoría de estudios de intrusión salina han sido realizados por privados. Aun así, en 2009, se realizó una propuesta metodológica para el manejo de acuíferos costeros, haciendo énfasis en el problema de intrusión salina, en el cual se ilustra una modelación a través de Visual MODFLOW y SEAWAT (Bedoya, 2009).

En el año 2006, se realizó un estudio el cual pretendió identificar la vulnerabilidad del acuífero costero de Arroyo Grande ante la intrusión salina, realizando un inventario de los pozos del acuífero, con el fin de analizarlos mediante el modelo SEAG, encontrando de bajas a insignificantes vulnerabilidades a la intrusión de la cuña salina (CARDIQUE, 2016).

Actualmente se cuenta con la beca Reina Elizabeth II por parte del Grupo de Investigación Modelación Ambiental de la Universidad de Cartagena, la cual consiste en la formación de doctores en el fortalecimiento de la resiliencia del agua subterránea frente a los efectos del cambio climático en la Costa Caribe Colombiana, lo cual motiva el desarrollo de este estudio.

En el corregimiento de Barú, por su parte, se realizó una evaluación y se estudió la dinámica del recurso hídrico, donde se constató la carencia de los servicios de acueducto y alcantarillado en la población, sin embargo, se encontró que los habitantes manipulan agua dulce, de botella, salobre y salada con tal de suplir las necesidades básicas. Como resultado de la evaluación de la calidad del agua, la cual se hizo comparando algunas variables fisicoquímicas y microbiológicas frente a los parámetros descritos en la constitución colombiana, se encontró que el agua no es apta para el consumo humano, puesto que presenta coliformes (Berdugo Moreno, Betancourt Morales, Maldonado Chaparro, & Garzón, 2012).

En el año 2012 también se realizó en el corregimiento de Barú, una modelación de la intrusión salina, desde las bahías de Cartagena y Barbacoas hacía el acuífero. Se realizó, además, un estudio de calidad del agua, que arrojó índices de salinidad que estaban en el orden de 7.64 g/l a 245 m de la bahía de Barbacoas, y 735 m de la bahía de Cartagena, y se concluyó que el

nivel salino se debe a la continua extracción de agua y baja capacidad de recarga del acuífero (problema de sobreexplotación). La modelación se hizo a través del software VS2DT de la USGS y arrojó como resultado, que la cuña salina tenía un avance de 0.649 m/día por parte de la Bahía de Barbacoas, y de 0.25 m/día por parte de la Bahía de Cartagena. Como resultado de la investigación, se recomendó la construcción de una planta desalinizadora y la utilización de herramientas legales para la disminución de la tasa de bombeo (Castillo & Hernández, 2012)

Actualmente, la empresa ACUACAR se encuentra realizando estudios en la zona, no obstante, según se aprecia en los documentos que ellos han facilitado, los estudios se han limitado a pruebas exploratorias con geotomografía cuyo objetivo fue localizar zonas de posible extracción y ensayos de pruebas de bombeo para la obtención de características hidrogeológicas, no existiendo a la fecha un estudio de modelación flujo o intrusión salina.

2.3 ESTADO DEL ARTE

Debido a que el fenómeno de la intrusión salina representa una problemática importante, este ha sido objeto de estudio por la comunidad académica y científica de distintas partes del mundo.

En el 2001, se hizo un estudio de casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la península de Nicoya en Costa Rica, donde se evidenció que debido a la sobre explotación de acuíferos, 10 pozos se contaminaron provocando pérdida de la calidad del agua (Arellano & Vargas, 2001).

En 2008, se publicó un artículo sobre la influencia de la topografía tridimensional de dunas en la intrusión del agua salada en Marina Romea, Italia. Donde a través del software Visual MODFLOW y SEAWAT, se modeló la intrusión salina, agregando además información topográfica en 3D empleando un LIDAR y ArcGIS 9.0 con lo que se encontró una enorme

incidencia entre la topografía y el avance de la intrusión salina (Mollema, Antonellini, Minchio, & Gabbianelli, 2008).

En la Llanura Costera de Liao Dong, en China, donde se realizó una modelación conjunta de Visual MODFLOW y SEAWAT, con el fin de investigar la extensión de la intrusión de agua de mar, que concluyó la necesidad de algunas protecciones para el acuífero. También, se mencionó y analizó la importancia de que el estudio de intrusión salina se haga a través de un modelo de densidad variable, como el manejo por el SEAWAT o FETFLOW, esto con el fin de obtener resultados más precisos e información sobre la zona de transición entre agua salada y agua dulce (Ding et al., 2014).

Otro estudio reciente, donde se realizó una modelación empleando en conjunto Visual MODFLOW Y SEAWAT, fue el realizado en Boca Abierta, Sonora, en México, donde el acuífero se encontró sobre explotado y con problemas de contaminación por agua de mar y se probó la eficiencia de una doble barrera de pozos de bombeo para controlar el avance la contaminación (Canales et al., 2016).

En el acuífero costero de la región de Motooka, en Japón, se llevó a cabo una modelación numérica para predecir la intrusión salina, como producto de cambios presentados en los caudales de explotación y variación en la recarga, como producto del cambio de uso del suelo. Los resultados de dos modelos mostraron que las altas tasas de explotación, aumentaba la concentración de sal en el acuífero, donde el problema se veía acrecentado por disminución en la recarga (Konishi, 20017).

En este año, en el sur de la costa de Laizhou Bay, China, se realizó una modelación numérica de la intrusión salina en el acuífero costero de la zona y se estudió con detalle la interacción entre el agua dulce y salada, utilizando el modelo SEAWAT y MODFLOW, donde se predijo una disminución de 2 m de la cabeza del agua dulce al finalizar el tiempo de estudio debido a la sobre explotación del acuífero, cuyas aguas son utilizadas para el riego de cultivo, además

se encontró que la salinidad decrecería en algunas zonas pero incrementaría en otras (Chang et al., 2018)

También se han realizado modelaciones en búsqueda de prever las consecuencias del cambio climático en los acuíferos. Por ejemplo, en la Zona Costera Nile Delta en Egipto se estudió el comportamiento del agua dulce y salada con diferentes niveles del mar, en donde se concluyó que el acuífero se vería afectado en distintos escenarios propuestos, por ello se propusieron y evaluaron varias medidas de mitigación, como recarga artificial, barreras impermeables, entre otras (Nofal, Fekry, & El-Didy, 2014).

En Partido de la Costa, provincia de Buenos Aires, se estudió el futuro avance de la intrusión salina, debido al aumento de un metro en el nivel del mar como respuesta al cambio climático, encontrando un avance de 25 a 38 metros de la cuña salina, dependiendo de los escenarios de recarga del acuífero (Carretero et al., 2012).

Lo estudios recientes indican, que el aumento en el nivel del mar es un factor importante al momento de predecir escenarios futuros de intrusión salina, el cual adquiere más importancia debido a la tendencia exponencial del aumento en el nivel del mar debido a los problemas por el cambio climático (Chang et al., 2018; IPCC, 2007). No obstante, algunos análisis de sensibilidad, demuestran que los parámetros más importantes en relación con la intrusión salina son: La precipitación (que tiene que ver con la recarga del acuífero) y la tasa de bombeo o explotación del acuífero, siendo además la conductividad o permeabilidad de los suelos un parámetro nada despreciable en este tipo de estudio (Mollema et al., 2008; Sun & Xiao, 2016; Zeng et al., 2018).

En cuanto a los modelos utilizados para el estudio de intrusión salina, son altamente recomendados en la literatura los modelos de densidad variable, como el SEAWAT o FETFLOW (Bayon, Valero, García-bartual, & Jos, 2016; Chang et al., 2018; Ding et al., 2014; Doulgeris & Zissis, 2014), siendo el SEAWAT ventajoso por ser de distribución libre

por la USGS (Guo & Langevin, 2002) y con la posibilidad de ser integrado al software Visual MODFLOW el cual ayuda en el pre procesamiento, modificaciones y es de interfaz amigable (Hidrogeologic, 2017).

2.4 MARCO NORMATIVO

2.4.1 Decreto 1076 de 2015.

Por el medio del cual se expidió el “Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”, el cual compila las normas de carácter reglamentario que rigen el sector del medio ambiente. Fue expedido el 26 de mayo de 2015 por el presidente de la república a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

2.4.1.1 Instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y de acuíferos (Capítulo 1, del título 3 “Aguas no marítimas”).

Este capítulo del decreto reglamenta conforme a la estructura definida en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Ámbito de aplicación (Artículo 2.2.3.1.1.2.): Las disposiciones del capítulo son de carácter permanente y además rigen en todo el territorio nacional.

Estructura para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos (Artículo 2.2.3.1.1.4.): La estructura es 4. Microcuencas y acuíferos,

Instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos (Artículo 2.2.3.1.1.5): El instrumento que se implementa es 5. Planes de manejo Ambiental de Acuíferos.

Instancias para la coordinación de la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos (Artículo 2.2.3.1.1.6.):

- El consejo ambiental regional de la macro cuenca, en cada una de las áreas hidrográficas o Macrocuencas del país.
- La Comisión Conjunta, en las Subzonas Hidrográficas o su nivel subsiguiente, cuando la cuenca correspondiente sea compartida entre dos o más autoridades ambientales competentes.

Instancias de participación (Artículo 2.2.3.1.1.7.):

- Mesas de Trabajo: Para la micro cuencas y acuíferos sujetos de Plan de Manejo Ambiental.

2.4.1.2 Plan de manejo ambiental de acuíferos.

Objeto y responsabilidad (Artículo 2.2.3.1.11.1.): Está a cargo de la autoridad ambiental competente.

Selección y priorización (Artículo 2.2.3.1.11.2.): Se seleccionarán acuíferos que no hagan parte de un Plan de Ordenación y Majeo de la Cuenca Hidrográfica y que presenten por lo menos una de las siguientes condiciones:

- Agotamiento o contaminación del agua subterránea.
- Única o principal fuente de abastecimiento para el consumo humano.
- El acuífero es estratégico para el desarrollo socioeconómico de una región.
- Existen conflictos por el uso de su agua.
- Requerimiento del acuífero como fuente alterna por desabastecimiento de agua superficial.

Fases (Artículo 2.2.3.1.11.3.): Son las siguientes:

- **Aprestamiento:** Conformación del equipo técnico y definición del plan de trabajo, estrategia de socialización, entre otros).
- **Diagnóstico:** Se analizará vulnerabilidad, oferta y demanda, conflictos y problemáticas.
- **Formulación:** Se definen medidas a implementar, proyectos a ejecutar, se establece cronograma, costos y responsables.
- **Ejecución:** Se desarrolla lo estipulado en fase de formulación.
- **Seguimiento y evaluación:** Con el objeto de definir ajustes.

Aprobación (Artículo 2.2.3.1.11.4.): Se aprueba por las autoridades ambientales competentes de los dos meses siguientes a la terminación de la formulación del plan.

Financiación (Artículo 2.2.3.1.11.5.): Va por parte de la autoridad ambiental competente, entidades territoriales y toda entidad con responsabilidad en el acuífero.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar el nivel de intrusión salina en el acuífero de Barú, en diferentes escenarios de ascenso del nivel mar y de explotación de sus aguas, a través de un modelo numérico con el software visual MODFLOW y SEAWAT, que pueda servir de herramienta para el desarrollo de acciones de prevención o corrección.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero de Barú en sus alrededores cercanos a la costa, en la zona de estudio.
- Plantear a través del software Visual MODFLOW, un modelo conceptual de la intrusión salina sobre el acuífero, el cual relacione la información disponible acerca del acuífero.
- Analizar posibles escenarios de ascenso del nivel del mar (efectos del cambio climático) según proyecciones regionales, y escenarios de explotación de agua en el acuífero acorde al crecimiento de la población.
- Estimar índices de salinidad en los diferentes escenarios definidos de ascenso del nivel mar y explotación del acuífero.

4. ALCANCE

El estudio se realizó con base en información de campo secundaria, en la zona de estudio, la cual está ubicada en la Isla de Barú (Ver Figura 7) en el departamento de Bolívar, que se localizada en las coordenadas $10^{\circ}14'12.73''$ N y $75^{\circ}34'49.32''$ O aproximadamente.

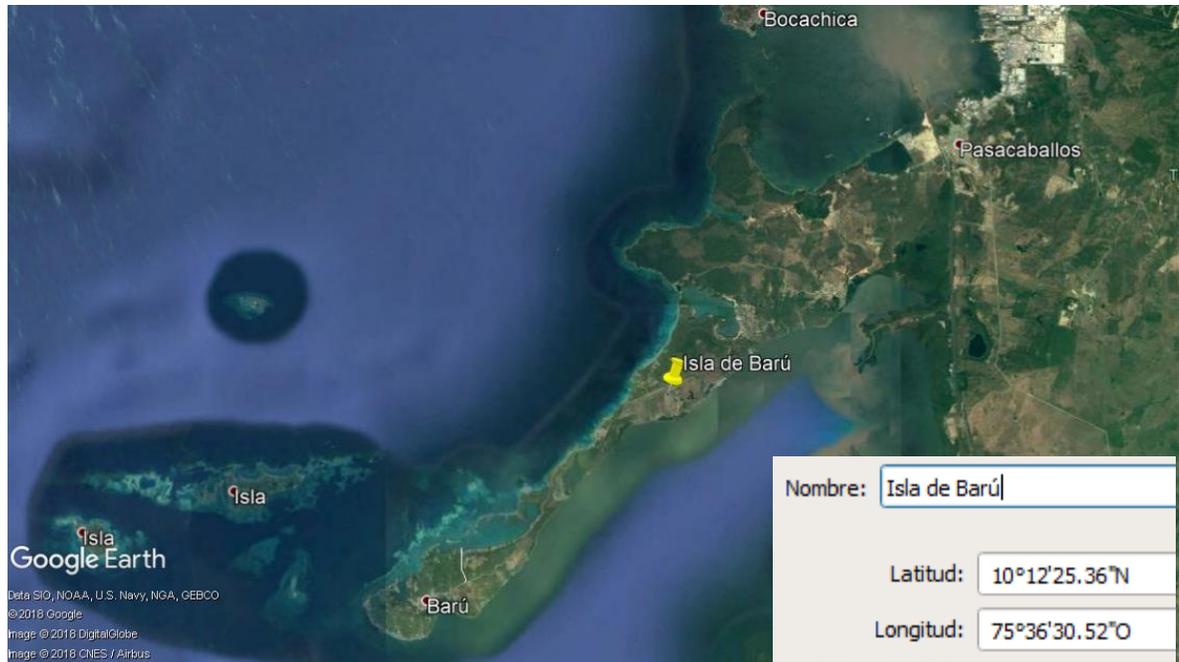
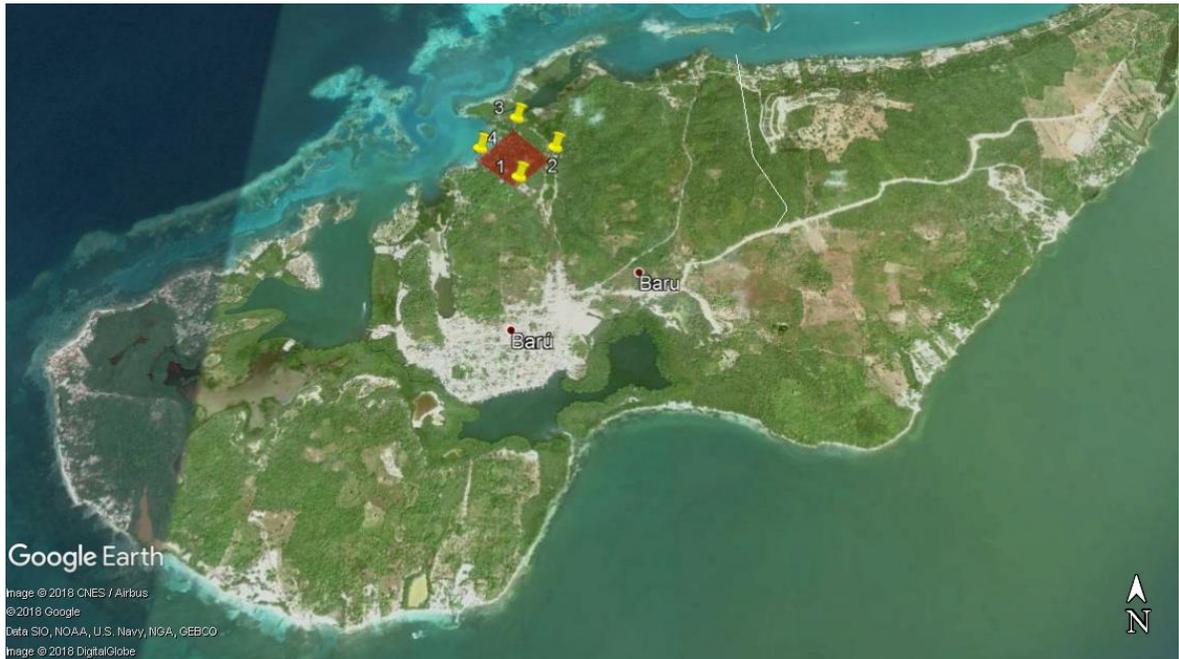


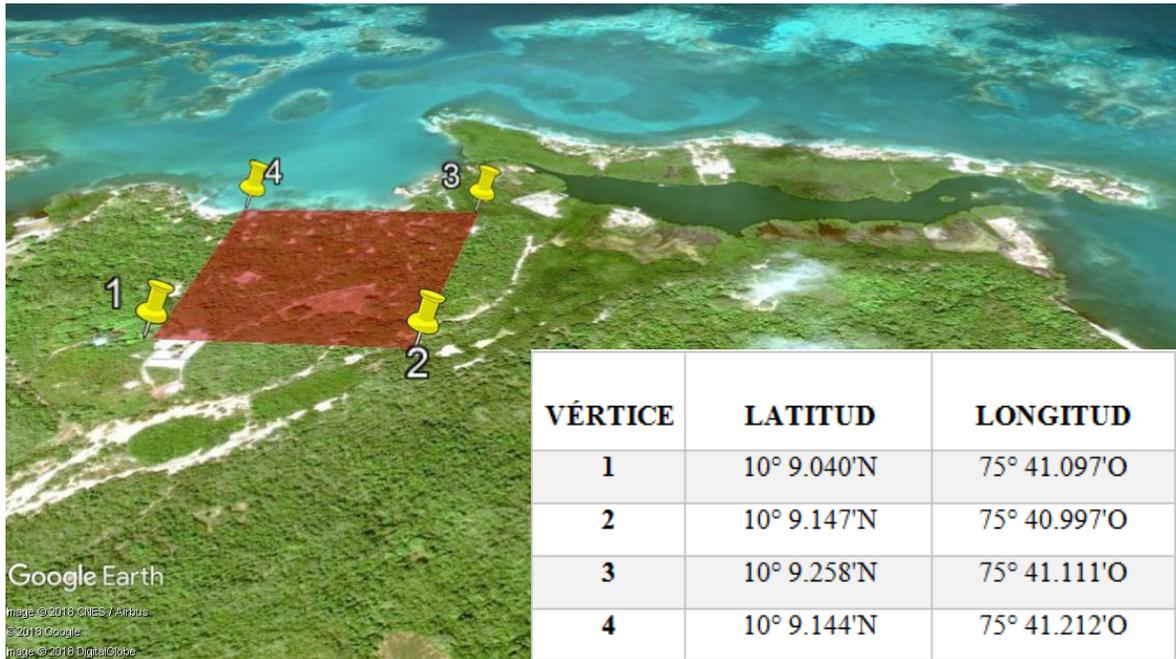
Figura 7: Isla de Barú.
Fuente: Google Earth Pro.

Dentro de la isla, la zona de estudio está en la parte sur, al norte del corregimiento de Barú, como se muestra en la Figura 8, y se delimitó, de acuerdo a la cantidad y calidad de la información disponible, así como también por sus posibilidades reales de ser utilizada para la captación del agua subterránea.



*Figura 8: Sur de la Isla de Barú.
Fuente: Google Earth Pro.*

Dentro de la zona de estudio, el área que se modeló fue un rectángulo de 270 m por 300 m, dentro del que se dispone información de tomografías geoelectricas y sondeos verticales, así como también un registro estratigráfico y un informe de pozo de exploración. Este rectángulo está delimitado por los vértices que pueden ser apreciados en la Figura 9.



*Figura 9: Área modelada.
 Modificada de: Google Earth Pro.*

La modelación se realizó desde el primero de enero de 2018 hasta el 31 de diciembre de 2027, equivalente a 10 años. Se utilizó información de precipitaciones y temperaturas del año 2010 al 2017; información sobre el aforo de la población; posibles caudales de explotación; posibles escenarios regionales de ascenso en el nivel del mar, y por último se utilizó toda la información geológica disponible de la zona, publicada en el Servicio Geológico Colombiano.

La revisión bibliográfica y la recolección de información secundaria permitió un análisis y descripción de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero de Barú en la zona de estudio.

La utilización del Software Visual MODFLOW abrió la posibilidad, gracias a su interfaz gráfica, de que se pudiera tener en cuenta las diferencias de elevaciones por topografía y la no homogeneidad de los estratos de suelo, brindándole más exactitud al estudio y ofreciendo

un modelo conceptual antes de pasar a un modelo numérico, el cual facilitará futuras investigaciones y/o comprobaciones.

Se utilizó el motor SEAWAT 4, para darle solución al modelo, utilizando un tipo de flujo saturado con densidad variable.

Las variables utilizadas en el modelo fueron: Aumento del nivel del mar y explotación como variables independientes y concentración de sal, como variable dependiente. Algunos de los parámetros utilizados fueron la conductividad, permeabilidad y forma de los estratos de suelos, concentración de sal del mar, recarga del acuífero y alturas piezométricas.

No fue posible realizar una calibración del modelo, puesto que no se ha hecho registro de alturas piezométricas y la zona tiene el acceso restringido actualmente.

Al analizar los resultados, se asume la concentración de sal obtenida, como la cantidad total de sales dispuestas en la zona analizada y como el porcentaje del impacto actual de la intrusión salina, al calcular el índice GALDIT.

Con la culminación del estudio propuesto, se espera que este sirva como una herramienta para la toma de decisiones con respecto a la utilización del acuífero, con tal de evitar problemáticas de intrusión salina que terminen afectando el abastecimiento de agua de la población (Fernández, 2000).

Este estudio, también podría servir como una referencia metodológica para el estudio de la intrusión salina por parte de estudiantes y profesionales de la ingeniería, así como sus datos y resultados pueden ser empleados para la calibración de futuros modelos; como antecedente para la realización de otros estudios en la región.

5. METODOLOGÍA

La investigación realizada fue de tipo experimental, puesto que fue objetiva, sistemática y controlada, y tuvo como objetivo predecir los fenómenos de intrusión salina a través de un estudio de variables (Aumento en el nivel del mar y caudales de explotación de agua subterránea), lo cual permitió observar los efectos en el aumento de la cuña salina en el área de estudio o acuífero de Barú. Para llevar a cabo este estudio, se siguió el esquema metodológico que se aprecia en la Figura 10.

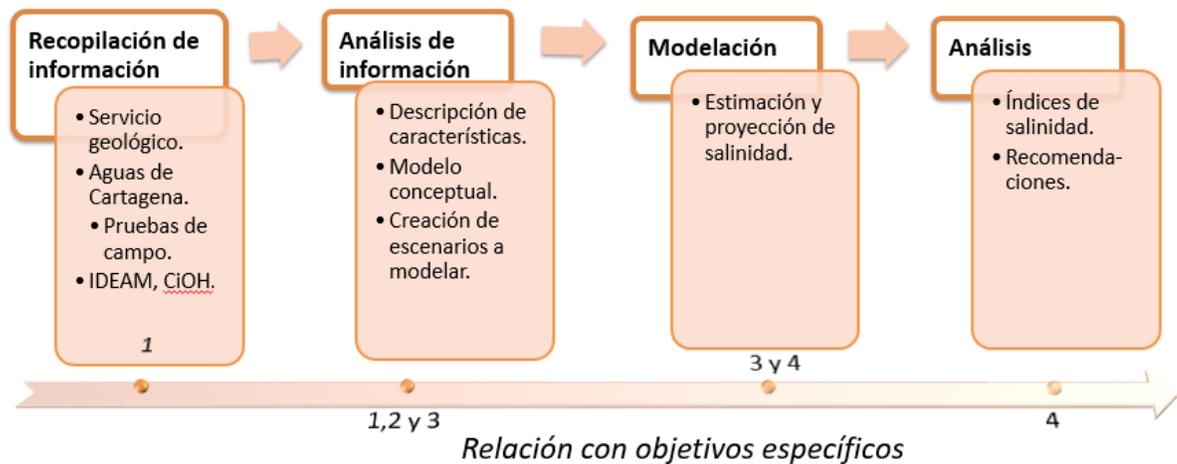


Figura 10: Metodología general.

5.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se recolectó información geológica, a través del Servicio Geológico Colombiano, obteniendo planchas de la zona con sus respectivas memorias explicativas; se obtuvo a través de una solicitud al IDEAM, un registro histórico de precipitaciones de la estación más cercana (estación Aeropuerto Rafael Nuñez); del portal tutiempo.net, se obtuvieron datos de temperatura de la estación meteorológica: 800220 (SKCG), ubicada en el aeropuerto Rafael Nuñez.

Se obtuvo información secundaria de la zona de estudio de ACUACAR, lo que permitió la obtención de tres informes hidrogeológicos de la zona, en donde estaban contenidas tres geotomografías, cuatro sondeos eléctricos verticales, un registro estratigráfico, una prueba de bombeo, además de análisis, recomendaciones y conclusiones sobre el acuífero de Barú.

Por medio de una búsqueda en la biblioteca de artículos virtuales en los portales del IDEAM y CIOH, se consiguieron registros de mediciones del aumento del nivel del mar en los últimos años y estimaciones del comportamiento futuro del nivel del mar.

Por su parte, se extrajo información de la población que existe en Barú, a través del último censo nacional poblacional realizado por el DANE en el año 2005 y se obtuvo información sobre la salinidad de las aguas cercanas a la zona, a través de resultados de campañas realizadas por el CIOH.

5.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELACIÓN

5.2.1 Suelos

Con ayuda de los software Google Earth Pro y Surfer se consiguió una aproximación de la superficie del área a modelar, la cual se introdujo posteriormente al software Visual MODFLOW. La topografía resultante de esta operación, se aprecia en la Figura 11.

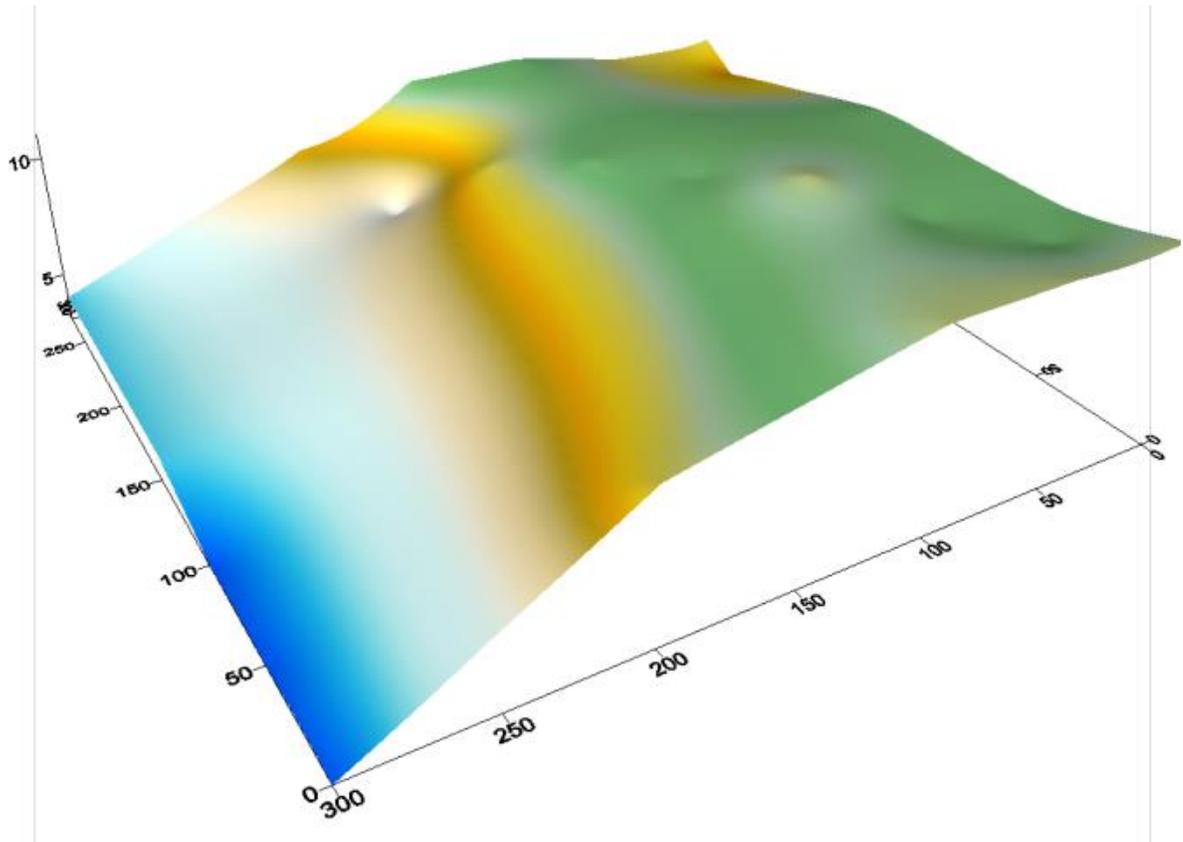


Figura 11: Modelo de elevación de superficie en el área de estudio.

Para los estratos inferiores del suelo, se obtuvo información a través de los sondeos eléctricos verticales (SEV) subcontratados por ACUACAR, obteniendo tres capas que sirvieron para delimitar tres estratos principales de suelos presentes en la zona (arenas gruesas con calizas, arcillas y arenas medias no consolidadas), como se puede observar en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

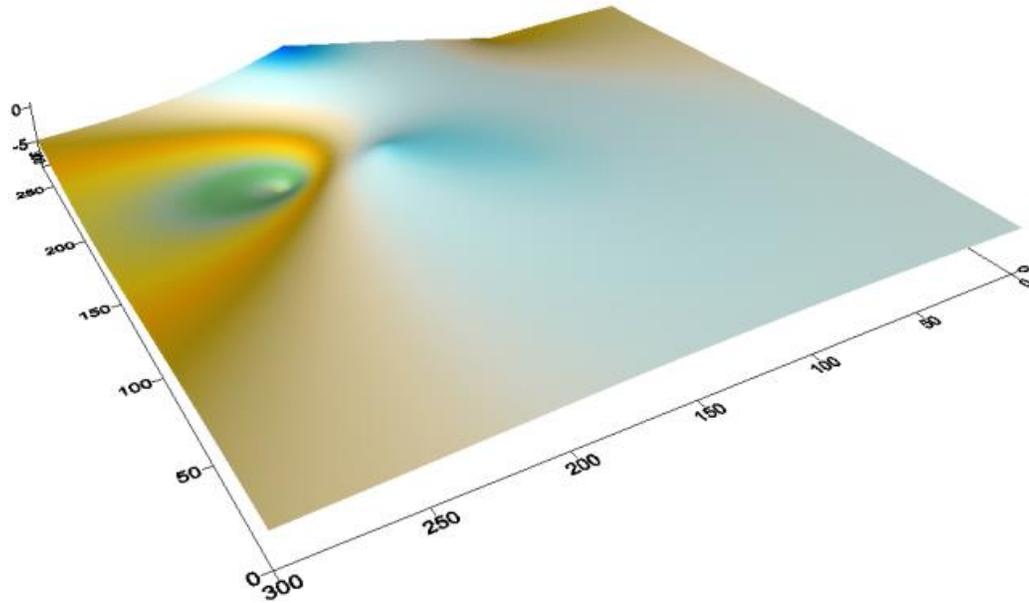


Figura 12: Modelo de elevación de fondo de estrato arenas con calizas.

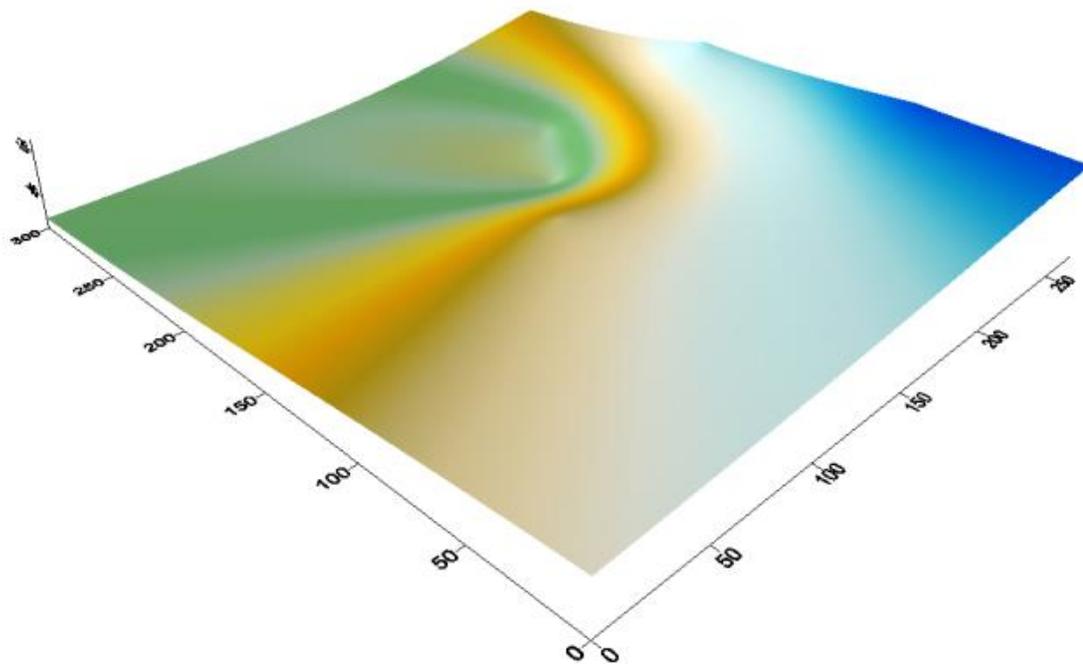


Figura 13: Modelo de elevación fondo de estrato de arcillas.

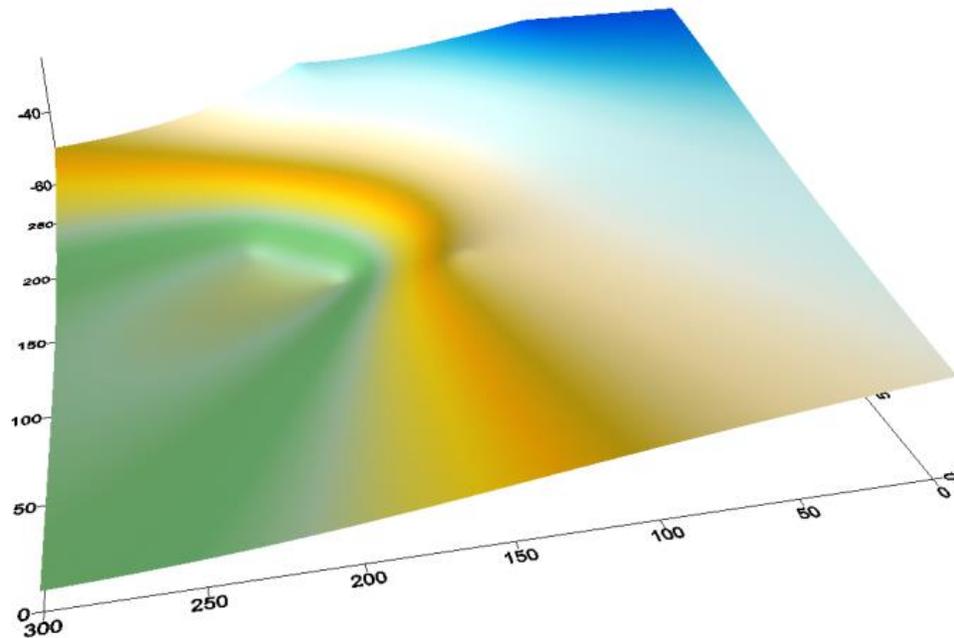


Figura 14: Modelo de elevación fondo de estrato de arenas medias no consolidadas.

Una vez se identificaron los tres tipos de suelos (arenas gruesas con calizas, arcillas y arenas medias no consolidadas), por medio de una revisión bibliográfica, se obtuvieron las cualidades y valores típicos de las conductividades, las cuales se ajustaron posteriormente de acuerdo a los resultados que se iban obteniendo en la modelación como proceso de calibración, los cuales están contemplados en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de conductividad hidráulica y porosidad asignados.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/s)
Arenas gruesas con calizas	1E-4
Arcillas	1E-9
Arenas medias no consolidadas	1E-5

5.2.2 Recarga del acuífero

Por su parte, lo correspondiente a la recarga del acuífero, fue calculada a través de la fórmula empírica de Turc (Vélez & Vásquez, 2004), donde la recarga de un acuífero es estimada en función de las precipitaciones anuales y el promedio de las temperaturas. La recarga futura, se calculó ponderando los valores de precipitación y temperatura desde el 2010 hasta el 2017, con el objeto de obtener una predicción acertada ya que en ese período de tiempo se presentó tanto el fenómeno del niño, como de la niña. Los resultados en función de la temperatura y precipitación se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores de temperatura, precipitación y recarga anual.

AÑO	TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL(°C)	PRECIPITACIÓN ANUAL (mm/año)	RECARGA (mm/año)
2010	28.2	2469.2	1499.633
2011	28	2130.2	1187.104
2012	28.3	988.5	249.7528
2013	28.3	853.7	171.1001
2014	28.4	627.2	67.68693
2015	28.6	372.3	4.44629
2016	28.5	283.8	0
2017	28.3	259.7	0
2018 -2027	28.325	998.1	255.5092

No obstante, el dominio del modelo (El cual se ilustró en la Figura 9) no representa toda la zona estimada de recarga, puesto que es notorio que es apenas una parte de la subcuenca, como se ve en la Figura 15.

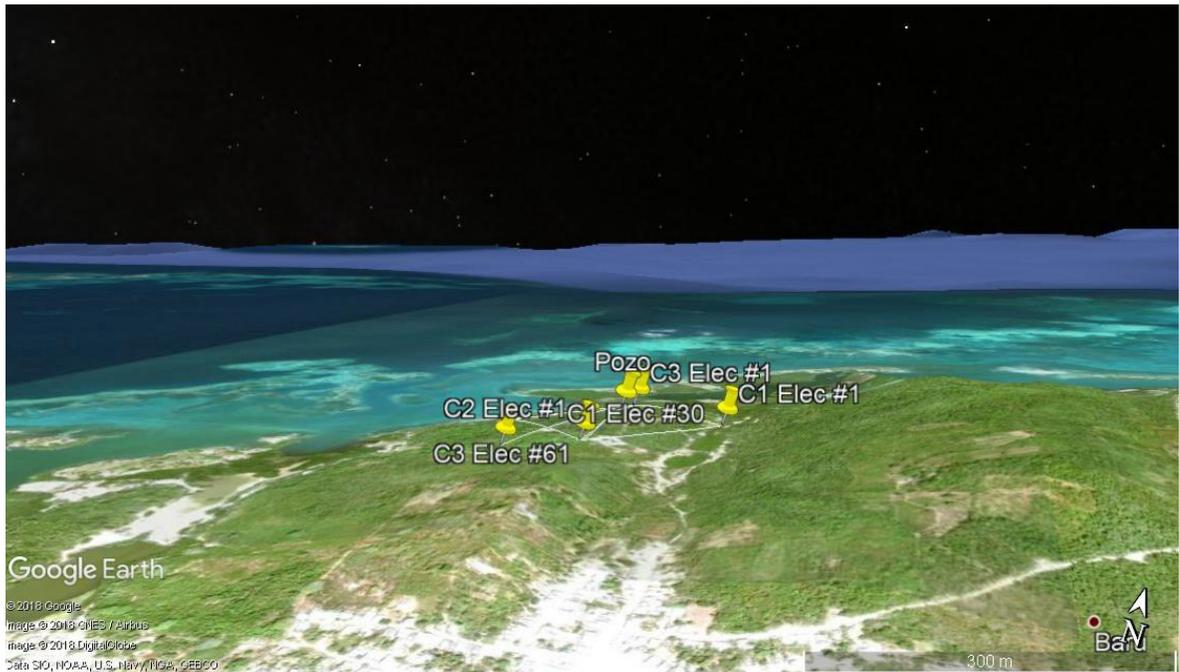


Figura 15: Vista en 3D de la zona de recarga.

Por ello, a través de una ampliación en la escala vertical del modelo tridimensional de la zona, se estimó la subcuenca donde está contenida el área de estudio, con el fin de obtener una estimación más cercana de la recarga, delimitando la subcuenca con el polígono blanco de la Figura 16. El cual tiene un área de 917.471 m², frente a los 81.000 m² modelados, lo que significa una relación de 11.32 a 1. Lo que se compensará, teniendo en cuenta esa relación, sobre la recarga en el dominio del modelo.

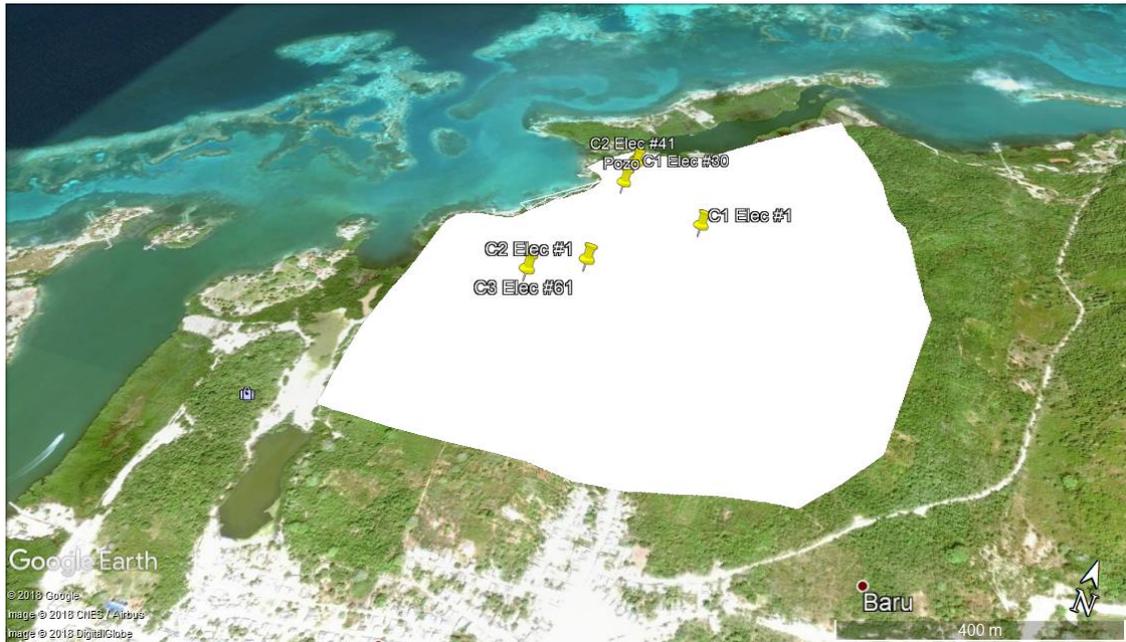


Figura 16: Polígono de recarga

5.2.3 Porcentaje de sal del mar

Para determinar el porcentaje de sal presente en el mar, cercano a la costa de la zona de estudio, se analizaron nueve puntos de muestreo, realizados por el CIOH en octubre de 2015, como se puede observar en la Figura 17.

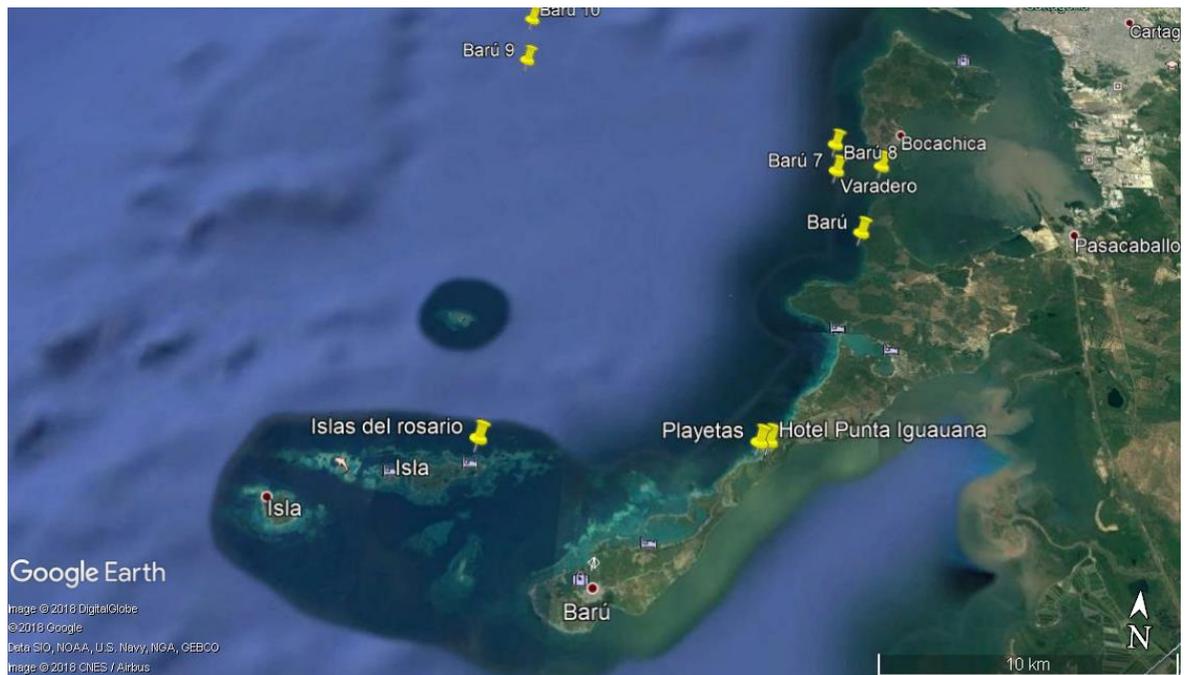


Figura 17: Estaciones de muestreo de salinidad

No obstante, es común suponer que la salinidad en algunas estaciones está afectada debido a la influencia del Canal del Dique, haciendo entonces que se consideren utilizar solamente las estaciones más cercanas a la costa en la zona de estudio, como lo es la estación Islas del Rosario, Playetas y Hotel Punta Iguana, como se puede ver en la Figura 18.

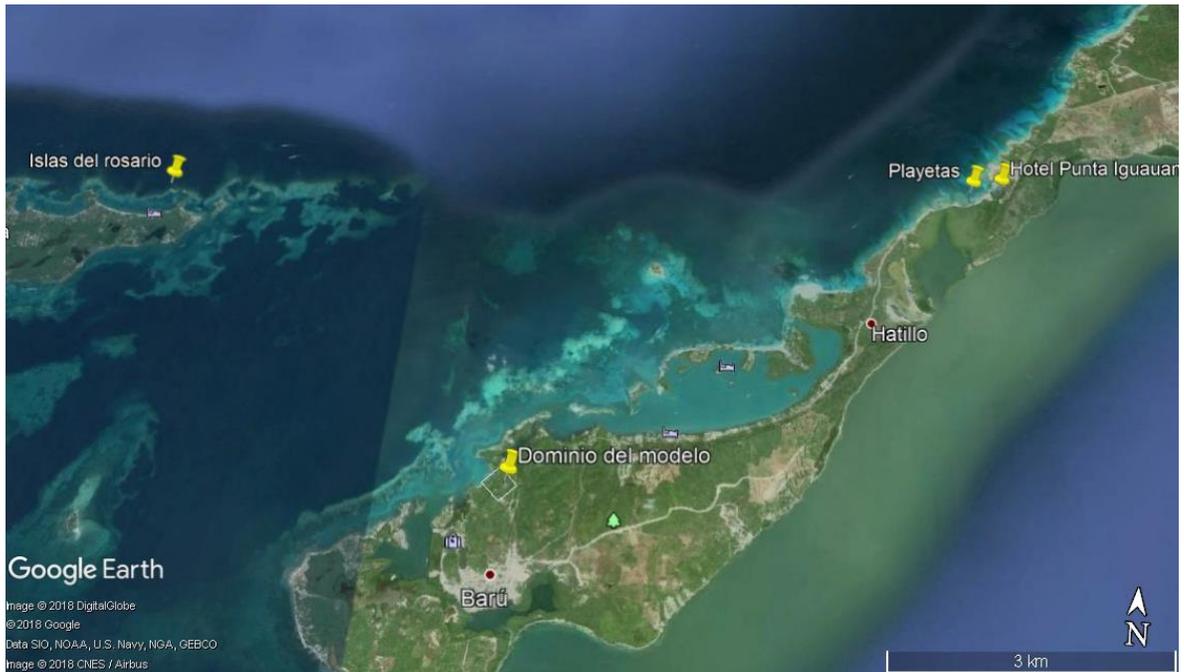


Figura 18: Estaciones de mayor importancia

El lugar de muestreo, descripción del sitio y localización exacta de estas estaciones están presentes en la Tabla 5.

Tabla 5: Estaciones de muestreo

LUGAR DE MUESTREO	DESCRIPCIÓN SITIO	SITIO	LOCALIZACIÓN
Mar Caribe	Playetas	Est. No. 1	10°11'29.20"N 75°38'2.90"O
	Hotel Punta Iguana	Est. No. 2	10°11'30.90"N 75°37'51.00"O
	Islas del Rosario	Est. No. 4	10°11'8.50"N 75°43'41.60"O

5.3 ESCENARIOS DE MODELACIÓN

Se propusieron diferentes escenarios de ascenso del nivel del mar (efectos del cambio climático) según proyecciones regionales, y escenarios de explotación de agua en el acuífero acorde al crecimiento de la población. También se propusieron escenarios hipotéticos, donde no se tiene en cuenta la variación en el nivel del mar, ni existe explotación, con el objetivo de realizar comparaciones. Actualmente no existe una existe ningún tipo de aprovechamiento o explotación del acuífero registrada ante la autoridad competente (CARDIQUE), pero sí existe evidencia del aumento del nivel del mar (IPCC, 2007; Málikov, 2010; Torres et al., 2006).

5.3.1 Escenarios de ascenso del nivel del mar (efectos del cambio climático).

Primer escenario: Sin ascenso del nivel del mar.

Aunque existe mucha evidencia científica que confirma que el nivel del mar ha estado cambiando y se espera que lo siga haciendo, es importante realizar una modelación sin considerar el ascenso del nivel mar para que sirva de referencia comparativa.

Segundo escenario: Un ascenso del nivel del mar de 2.01 cm.

Es el escenario más optimista de cambio de nivel del mar, según mediciones del CIOH, donde se esperarían tan solo un cambio en el nivel del mar de 2.0 mm por año (Torres et al., 2006).

Tercer escenario: Un ascenso del nivel del mar de 3.58 cm.

El escenario más probable de aumento del nivel del mar en la región es de 3.6 mm por año (Málikov, 2010; Torres et al., 2006), por ello es quizá el escenario de cambio climático más importante, el cual se analizaría para un total de 10 años.

5.3.2 Escenarios de explotación de aguas subterráneas.

Primer escenario: Sin explotación de aguas subterráneas.

Según la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), actualmente no hay concesiones ni permisos de explotación de aguas subterráneas, por ello, un escenario importante a predecir es aquél donde no hay descarga a través de pozos. Esto ofrecería un panorama objetivo sobre las condiciones que se tendrán en un momento futuro que se decida explotar el recurso hídrico.

Segundo escenario: Explotación de un caudal de 864 m³/día.

Según estudios de ACUACAR, se encontró en el punto de coordenadas 10° 9.200'N y 75° 41.107'O un sitio con condiciones hidrogeológicas favorables, el cual permitiría el bombeo de un caudal de 10 L/s, equivalente a 864 m³/día, el cual podría abastecer a un total de 8640 personas/día, con una dotación de 100 L/Persona/Día (RAS, 2010), lo cual es suficiente para la población del corregimiento de Barú, la cual en 2005 era de 1936 personas, y que se estima que para el 2018 ésta será de 2261 personas.

Tercer escenario: Explotación de un caudal de 260 m³/día.

El corregimiento de Barú contaba para el 2005 con una población de 1936 habitantes según el DANE, cuya demanda sería de casi 193.6 m³/día de agua, asumiendo una dotación de 100 litros/Persona/Día (RAS, 2010). Para el año 2018, se estima una población de 2261

habitantes, equivalente a 226.1 m³/día, mientras que para el 2028 se proyecta una población de 2547 habitantes lo que equivaldría a demandas de 254.7 m³/día.

5.3.3 Combinación de escenarios.

Con el objetivo de llegar a escenarios más probables, con efectos que pudiesen ser más críticos, se realizó una combinación de los escenarios anteriores, los cuales están consignados en la Tabla 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Son los nueve escenarios resultantes, los que serán modelados.

Tabla 6: Matriz de escenarios a modelar.

ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR	CAUDAL DE EXPLOTACIÓN		
	Q = 0 m ³ /día	Q = 864 m ³ /día	Q = 260 m ³ /día
ANM = 0 mm/año	1. Sin ascenso del nivel del mar, ni explotación.	2. Sin ascenso del nivel del mar, con caudal de explotación de 864 m ³ /día.	3. Sin ascenso del nivel del mar, con caudal de explotación de 260 m ³ /día.
ANM = 2.01 mm/año	4. Ascenso del nivel del mar de 2.01 cm.	5. Ascenso del nivel del mar de 2.01 cm, con caudal de explotación de 864 m ³ /día.	6. Ascenso del nivel del mar de 2.01 cm, con caudal de explotación de 260 m ³ /día.
ANM = 3.58 mm/año	7. Ascenso del nivel del mar de 3.58 cm..	8. Ascenso del nivel del mar de 3.58 cm, con caudal de explotación de 864 m ³ /día.	9. Ascenso del nivel del mar de 3.58 cm, con caudal de explotación de 260 m ³ /día.

5.4 MODELACIÓN

La modelación se realizó empleando el software Visual MODFLOW 5 y el motor SEAWAT 4.00.05. Se modeló a un tiempo de 3650 días (10 años), el cual se consideró suficiente para estudiar el comportamiento del avance de la cuña salina. El flujo fue de tipo saturado, con densidad variable.

5.4.1 Condiciones de frontera.

- Concentración constante: Se trabajó con una concentración constante de sal de 34 717 mg/L a lo largo de la línea de costa, la cual se obtuvo al promediar los datos de salinidad de las campañas del CIOH.
- Cabeza constante: Se trabajó, con una cabeza conocida, que se mantenía constante o variaba (según los escenarios a modelar) a lo largo de la línea de la costa, que representaba promedios anuales del nivel del mar.
- Recarga: Se trabajó con una recarga promedio anual sobre el dominio del modelo, de 2892.3732 mm/año, de acuerdo a lo analizado en la sección 5.2.2.
- Bombeo: Se ubicó un pozo, con tasas de bombeo de 0 m³/día, 260 m³/día y 864 m³/día, según el escenario a modelar, en la ubicación que la empresa ACUACAR ha encontrado con posibilidades reales de extraer caudales importantes.

5.4.2 Propiedades

Se emplearon las tres capas de conductividad diferentes, descritas con anterioridad se eligieron niveles piezométricos iniciales, según información de sondeos y según el nivel del mar, se utilizó una concentración inicial promedio de 34717 mg/L para la línea de costa y de 0 para el resto del dominio del modelo.

Al momento de correr el modelo, el flujo se trabajó con el solucionador: Conjugate Gradient Solver (PCG), mientras que el transporte se trabajó con el solucionador: Generalized Conjugate Gradient (GCG), de forma explícita.

5.5 INDICE DE VULNERABILIDAD DE INTRUSIÓN SALINA

De los índices propuestos, se eligió el índice GALDIT, por similitud de parámetros, con los dispuestos y por ser el recomendado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial (Vargas Quintero, 2010).

Este, se evaluó en los puntos de los sondeos eléctricos verticales, por ser aquellos donde se disponía con más información. El impacto de la intrusión salina, requerido por el índice, fue hallado tras la modelación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, los cuales fueron: La descripción de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero de Barú; la creación de un modelo conceptual de intrusión salina, el cual fue base para el modelo numérico, con el objeto de facilitar la información disponible; un análisis de escenarios a modelar, los cuales variaron en función de las condiciones de explotación y aumento de mareas; la modelación y por último la estimación de índices de vulnerabilidad de intrusión salina, empleando el índice GALDIT.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL ACUÍFERO DE BARÚ EN SUS ALREDEDORES CERCANOS A LA COSTA, EN LA ZONA DE ESTUDIO

6.1.1 *Geología de la Isla de Barú.*

La información de las características geológicas de la Isla de Barú, y en específico de la zona de estudio, se da como el análisis y recopilación de información de estudios del Servicio Geológico Colombiano, en las planchas 29-30 (Reyes, Barbosa, & Gilberto, 2008), la memoria explicativa de las planchas 29-30 (Reyes, Guzmán, Barbosa, & Zapata, 2001), e informes de consultoría contratados por la empresa ACUACAR, realizados por las empresas CORCEL (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016) y GIESE (Giese Pozos e Ingeniería S.A.S, 2016).

La isla de Barú, se encuentra sobre la zona geológica conocida como el cinturón del Sinú, donde afloran rocas sedimentarias cuya edad varía del Mioceno hasta el Cuaternario, datadas por métodos micro-paleontológicos, con las siguientes formaciones: Formación Arjona (PgNga), Formación Bayunca (Ngb), Gravas de Rotinet (Qpr), Formación Arroyo Grande (Qpag) y Formación la Popa (Qpp).

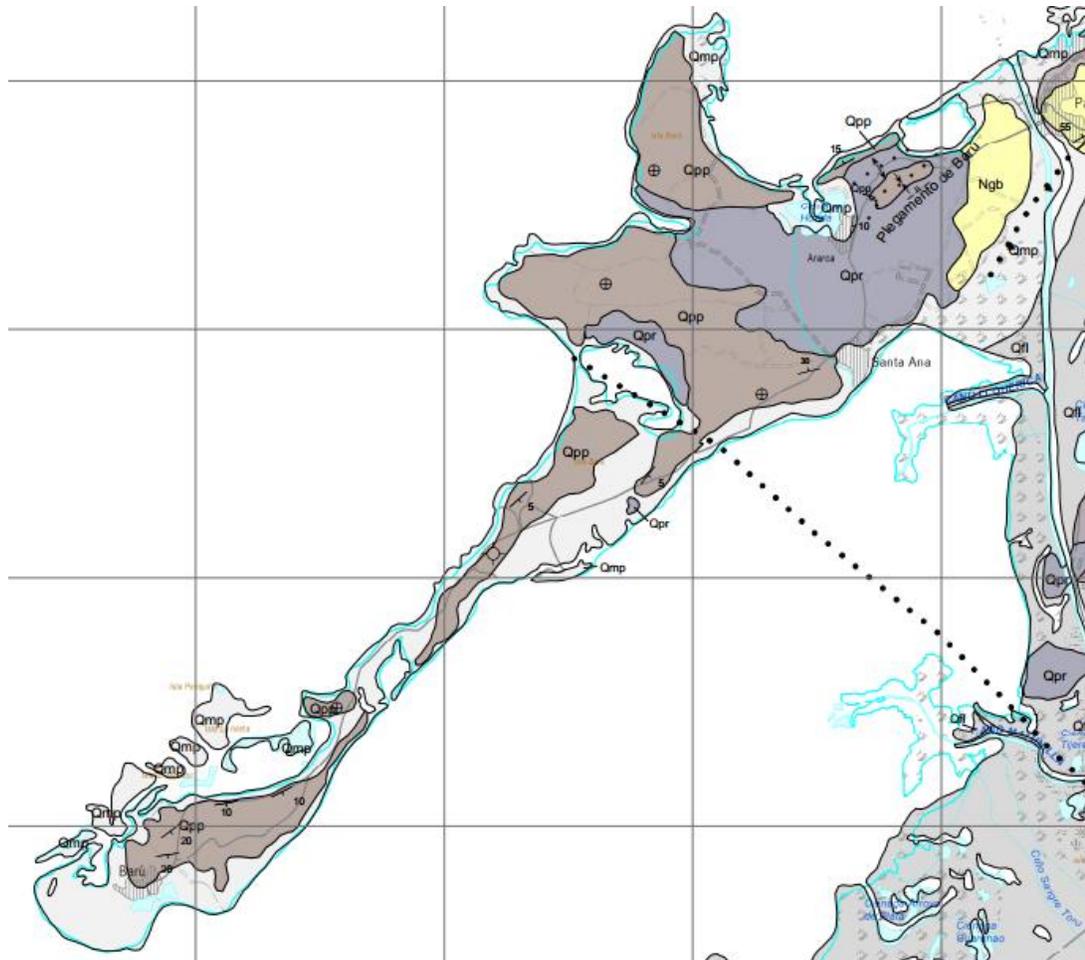


Figura 19: Geología general de la Isla de Barú.

Modificada de: (Reyes et al., 2008).

No obstante, en la Isla de Barú, se encuentran en específico las formaciones visibles en la Figura 19, las cuales se describen a continuación:

Formación Bayunca (Ngb): En esta formación se observa alternancia de areniscas de grano fino en capas cuyo espesor fluctúa entre 3, 5 y 10 cm, interestratificadas con capas gruesas de limolitas arcillosas con concentración de moluscos y nódulos que sobresalen por ser más resistentes a la erosión que las areniscas calcáreas. Su espesor es muy variable, puesto que

en la zona se presentan fallas, sin embargo, se estima que es de 500 m, y su edad está entre el Mioceno y el Plioceno.

Gravas de Rotinet (Qpr): Está conformada por gravas de cuarzo, chert negro, rocas volcánicas, neises y limolitas, en capas muy gruesas, cuneiformes, con estratificación en artesa y macizas, con intercalaciones de arenitas cuarzosas a sublíticas, de grano fino a medio, deleznable, en capas cuneiformes delgadas y gruesas, con estratificación cruzada. La interestratificación de las gravas y las arenitas es gradual, el espesor en la zona de estudio es de alrededor de 70 m y su edad y correlación se ubican en el Pleistoceno.

Formación la Popa (Qpp): Está constituida por una sucesión de areniscas, arcillolitas, conglomerados y calizas con abundantes fósiles moluscos, de espesor variable, donde se estima que, en la Isla de Barú, es menor a los 40 m, y su edad es del Plioceno y Pleistoceno; su columna estratigráfica se presenta en la Figura 20.

Depósitos de Playa (Qmp): Los depósitos de playa están localizados a lo largo de la línea de la costa. Están constituidos de arenas de grano fino a grueso, ocasionalmente con gravas; la mayoría son de color amarillo ocre a grises; en las playas de Barú son blancas.



Figura 20: Columna estratigráfica de Formación la Popa (Qpp).

Modificada de: (Reyes et al., 2008).

6.1.2 Geología en la zona de estudio.

La zona de estudio, o zona a modelar, tiene una geología un poco más específica y detallada. Según las planchas del Servicio Geológico Colombiano, se puede observar que la zona está compuesta básicamente por Formación la Popa (Qpp) y Depósitos de Playa (Qmp), como se observa en la Figura 21.

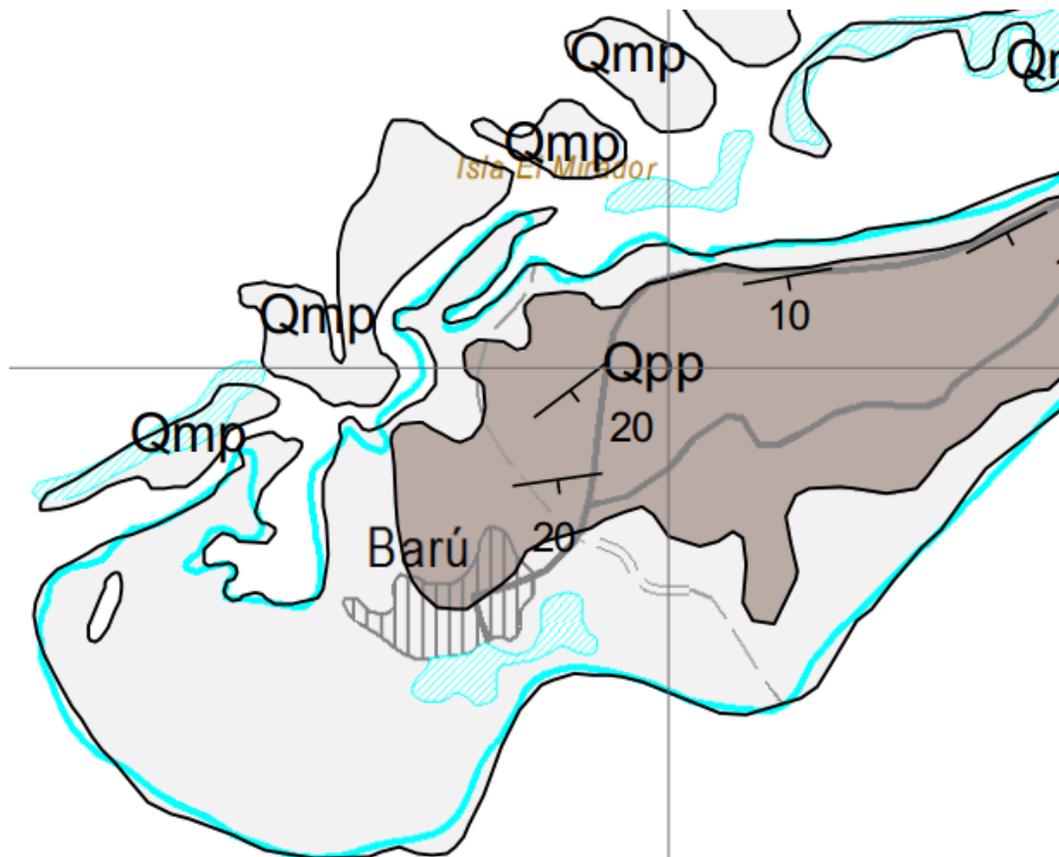


Figura 21: Geología en la zona de estudio.

Modificada de: (Reyes et al., 2008).

En esta zona, la empresa ACUACAR, como resultado de una excavación exploratoria, realizó una estratigrafía en las coordenadas 10° 9.200'N y 75° 41.107'O al norte del corregimiento de Barú. Lo que dio como resultado una muestra geológica más detallada de la zona hasta 80 m de profundidad, cuyos resultados se aprecian en la Tabla 7.

Tabla 7: Estratigrafía de la zona.

PROFUNDIDAD (m)			DESCRIPCIÓN
1	-	6	Arena gruesa
7	-	15	Calizas
16	-	24	Arcilla amarilla
25	-	28	Arena blanca
29	-	31	Arcilla amarilla
32	-	36	Arcilla amarilla arenosa
37	-	59	Arcilla gris
60	-	70	Arena media
71	-	80	Arcilla gris

La empresa, ACUACAR, también contrato la realización de prospecciones geofísicas en la zona, empleando el método tomografía de resistividad eléctrica, las cuales se localizaron al norte del corregimiento de Barú, como se aprecia en la Figura 22; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y cuyas coordenadas se encuentran en la Tabla 8:

Tabla 8: Geolocalización de electrodos de tomografía.

CÓDIGO	COORD. N	COORD. W
<i>Tomografía de Resistividad Eléctrica No.1</i>		
Electrodo No. 1	10° 09' 08.80"	75° 40' 59.80"
Electrodo No. 30	10° 09' 15.47"	75° 41' 06.53"
<i>Tomografía de Resistividad Eléctrica No. 2</i>		
Electrodo No. 1	10° 09' 02.40"	75° 41' 05.82"
Electrodo No. 41	10° 09' 15.49"	75° 41' 06.66"

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

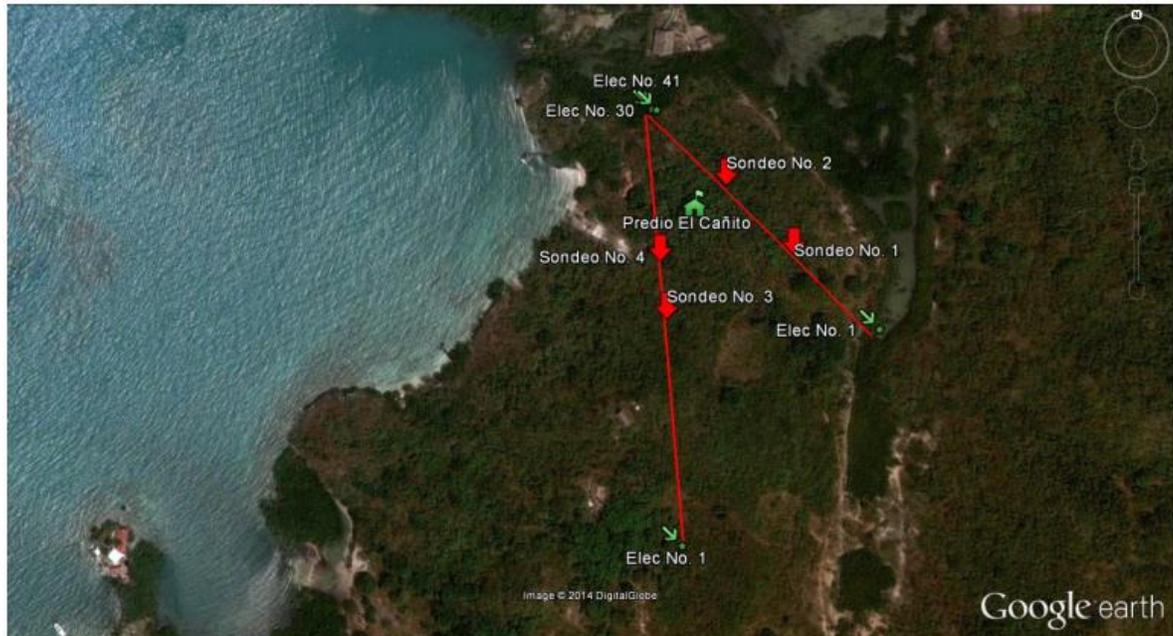


Figura 22: Líneas y electrodos de tomografía.

Fuente: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016)

Cuyo resultado e interpretación dan una muestra de la irregularidad de la estratigrafía y por ende una variación en la geología en distintos puntos de la zona a igual profundidad, lo cual se explica por la presencia de fallas locales y cambios laterales de facies de los sedimentos debido a periodos de transición y regresión del mar.

6.1.3 Hidrogeología de la zona de estudio.

En las líneas de las tomografías, la empresa ACUACAR contrató la realización de cuatro sondeos eléctricos verticales, con el fin de recopilar información más exacta de las características hidrogeológicas, cuya ubicación es apreciable en la Tabla 9. Los registros geoelectrónicos de la zona, indican la presencia de capas de formación la Popa, las primeras capas indican la presencia de arena calcárea saturada por agua salobre, posteriormente se encuentran capas de limos y arenas saturadas, con propiedades hidrogeológicas

desfavorables y, por último, se encuentran capas de arena media no consolidadas con condiciones hidrogeológicas favorables.

Tabla 9: Ubicación de sondeos eléctricos verticales.

CÓDIGO	COORD. N	COORD. W
Sondeo No. 1	10° 09' 11.20"	75° 41' 02.16"
Sondeo No. 2	10° 09' 13.29"	75° 41' 04.19"
Sondeo No. 3	10° 09' 09.27"	75° 41' 06.04"
Sondeo No. 4	10° 09' 11.00"	75° 41' 06.23"

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

Las capas anteriormente mencionadas se dieron en una estratigrafía irregular, en donde se encontraron importantes diferencias de profundidades y cuyos resultados se aprecian en la Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 10: Sondeo 1.

SONDEO 1			
CAPA	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	2.5	2.5	Suelo seco
2	12.3	14.8	Arenas saturadas
3	9.1	23.9	Limos arenosos saturados de agua salobre
4			Sedimentos del pleistoceno saturados de agua salobre

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

Tabla 11: Sondeo 2.

SONDEO 2			
CAPA	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	1.6	1.6	Suelo seco
2	5.6	7.2	Arenas saturadas
3	22	29.2	Limos arenosos saturados
4			Sedimentos del pleistoceno saturados

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

Tabla 12: Sondeo 3.

SONDEO 3			
CAPA	ESPESOR (Metros)	PROFUND. (Metros)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	2.4	2.4	Suelo seco
2	8	10.4	Arenas saturadas de agua
3	34.9	45.3	Limos arenosos saturados de agua
4			Sedimentos del pleistoceno saturados

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

Tabla 13: Sondeo 4

SONDEO 4			
CAPA	ESPESOR (m)	PROFUND. (m)	CORRELACION HIDROGEOLOGICA
1	2.2	2.2	Suelo seco
2	6	8.2	Arenas saturadas
3	53	61.2	Limos arenosos saturados
4			Sedimentos del pleistoceno saturados

Modificado de: (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016)

La información de los sondeos, permitió la creación de curvas de nivel, como una aproximación a los límites de las capas conocidas, como es posible apreciar en la Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26.

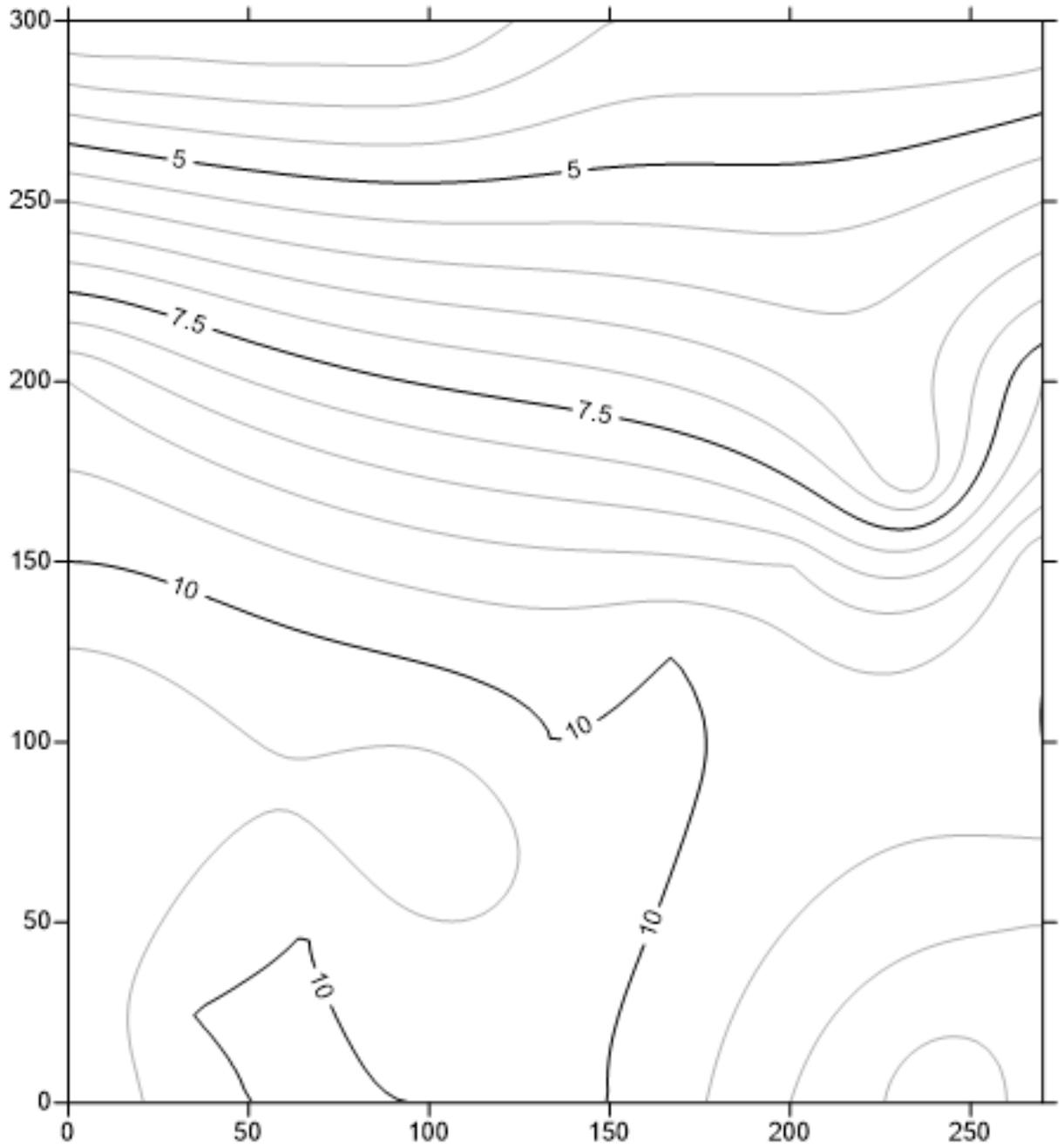


Figura 23: Curvas de nivel de la superficie

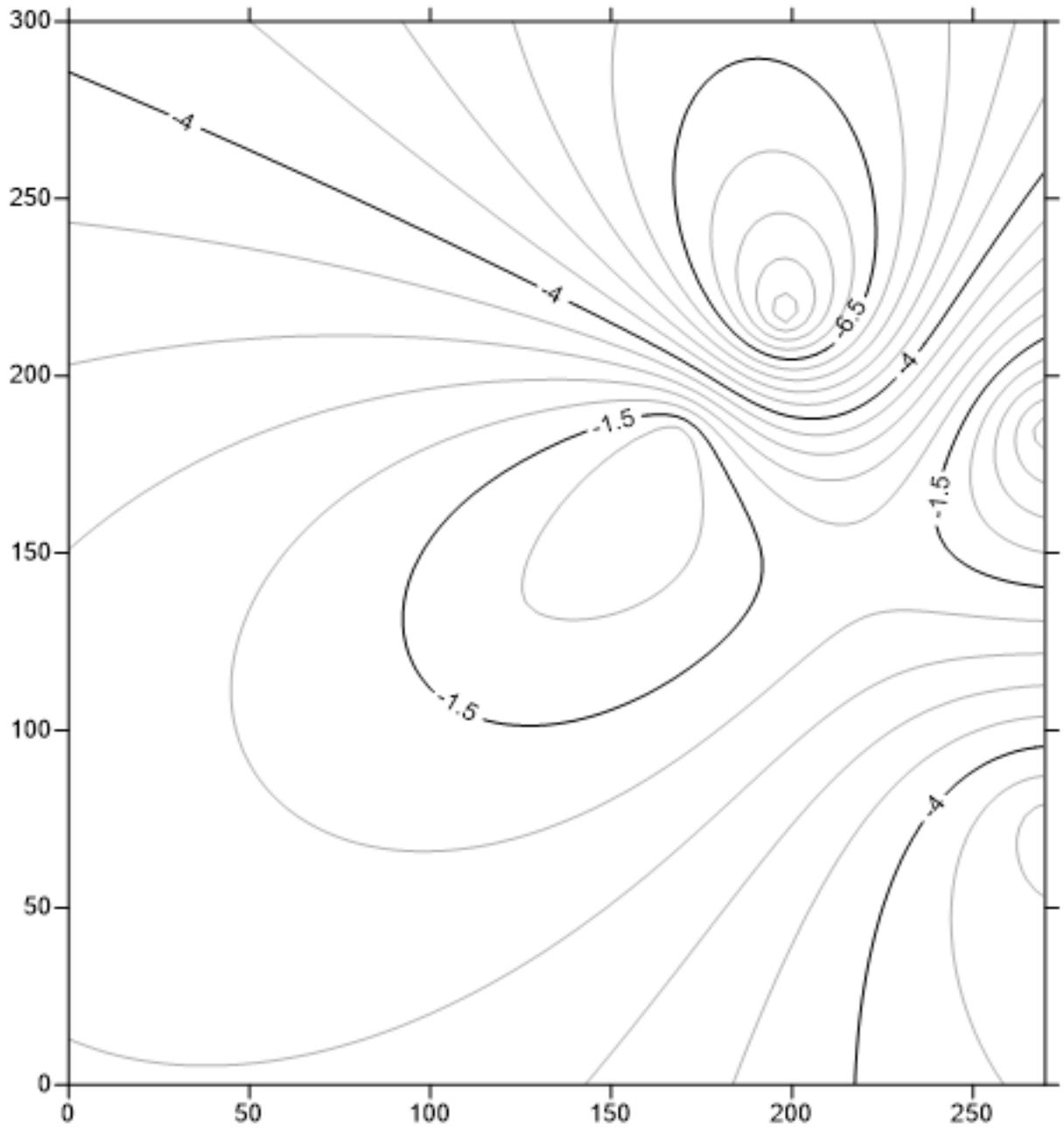


Figura 24: Curvas de nivel, del fondo de arenas medias y calizas

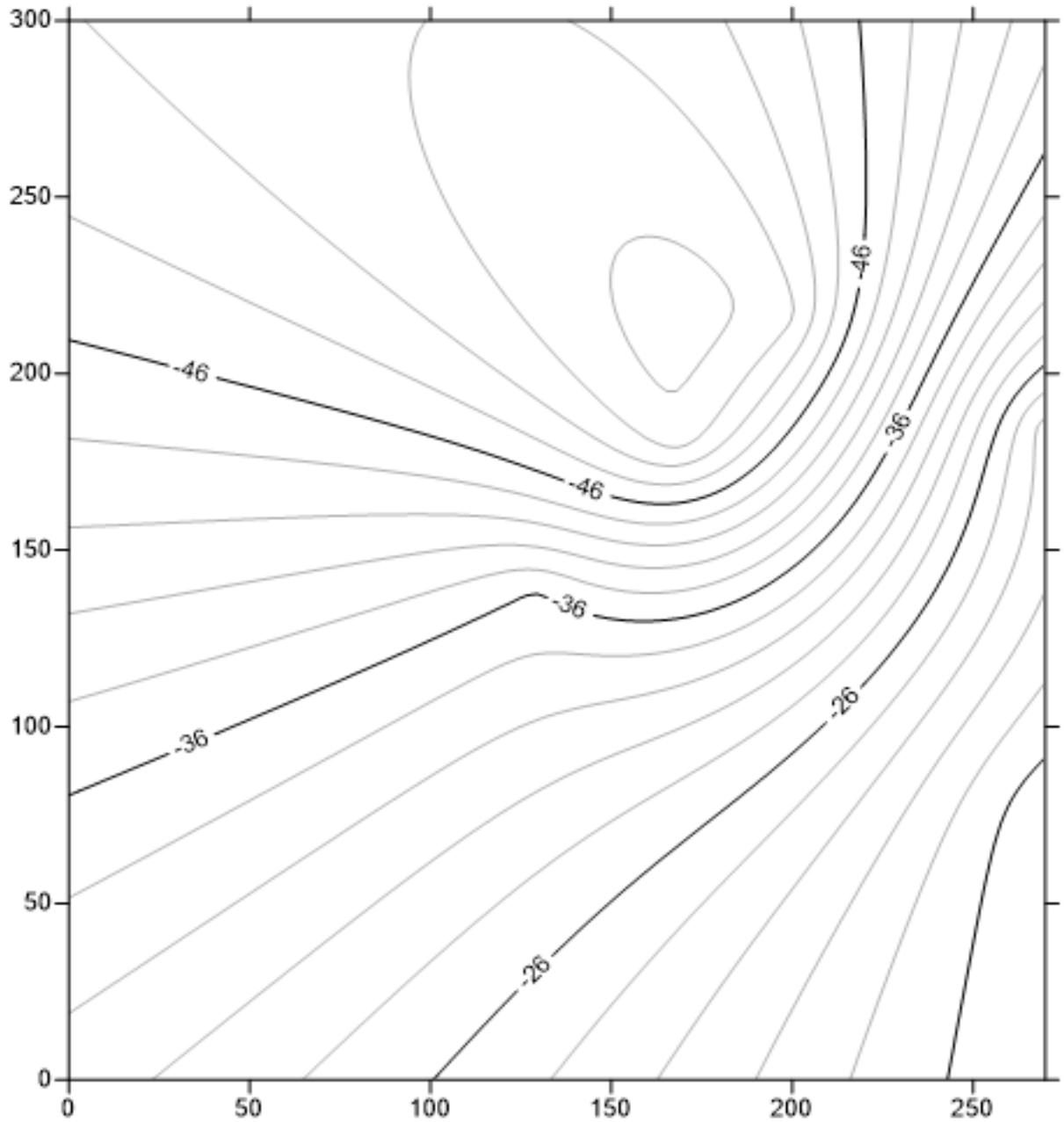


Figura 25: Curvas de nivel del fondo de las arcillas

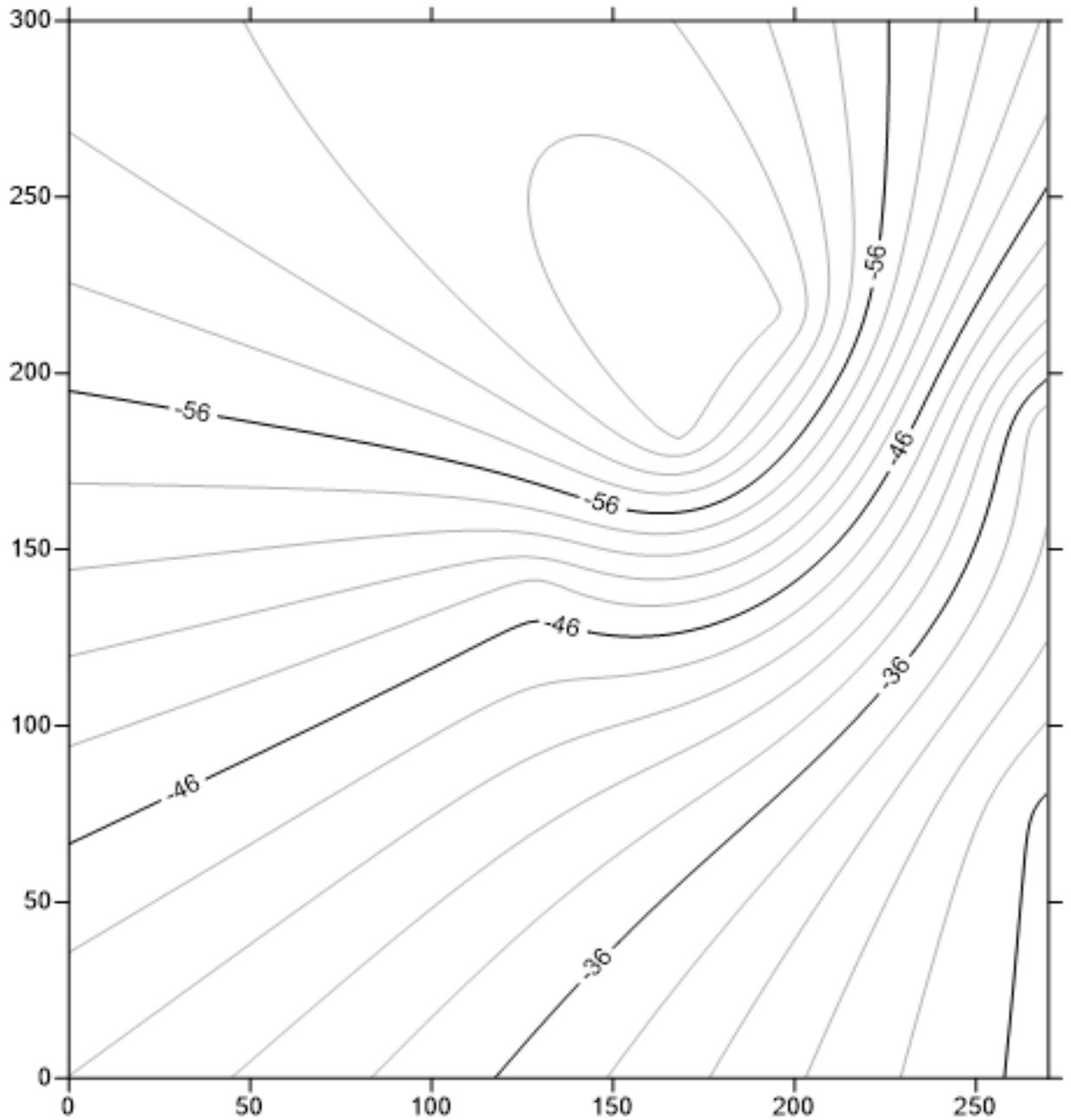


Figura 26: Curvas de nivel del fondo de arenas medias no consolidadas

Mientras que en la Figura 27 se consigue apreciar un modelo de elevación que integra la información disponible de las diferentes curvas.

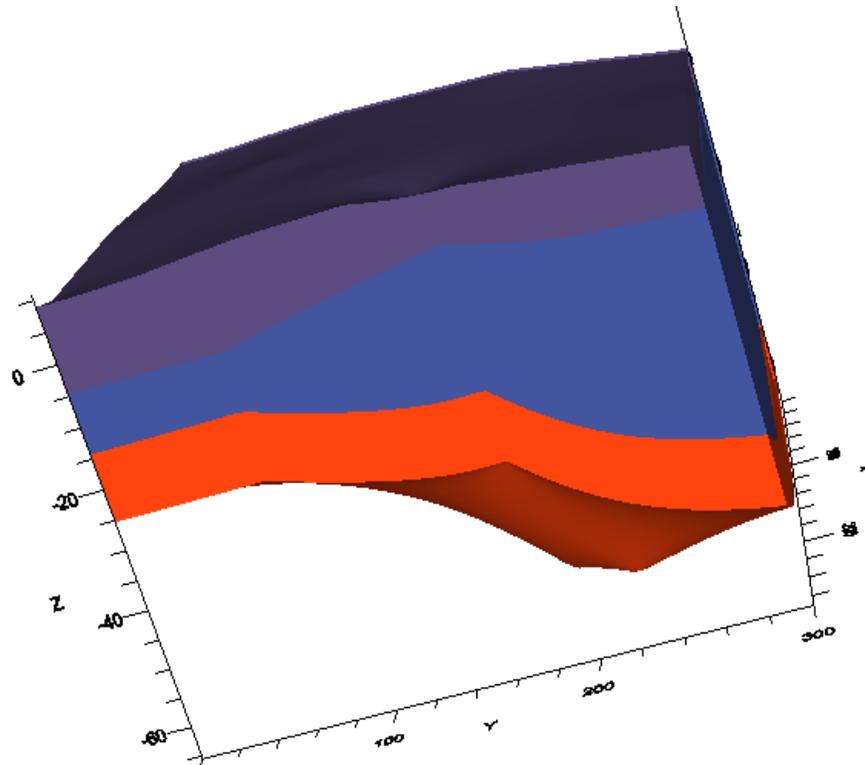


Figura 27: Capas de suelo en el dominio, vista lateral derecha

En la zona de estudio, ACUACAR hizo dos pozos exploratorios: uno con posibilidades de explotación de un importante caudal de 10 L/s, cuya transmisibilidad calculada por el método de Jaboc arrojó un valor de 12.0 m²/día, y otro fallido, por problemas de transmisibilidad, lo que indica que la permeabilidad en los estratos no es homogénea, lo cual tiene concordancia con la geología de la región (Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda, 2016).

Al promediar los datos de salinidad medidos por el CIOH, se obtuvo un promedio de: 3.4717 % de sal en el agua, el cual se considerará como el porcentaje de sal presente en la línea de costa cercana a la zona de estudio.

6.2 PLANTEAMIENTO A TRAVÉS DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW, DE UN MODELO CONCEPTUAL DE LA INTRUSIÓN SALINA SOBRE EL ACUÍFERO DE BARÚ

A través del software Visual MODFLOW, sumado a la edición de imágenes del software Adobe Photoshop CC, se realizó el modelo conceptual, el cual está en la Figura 28.

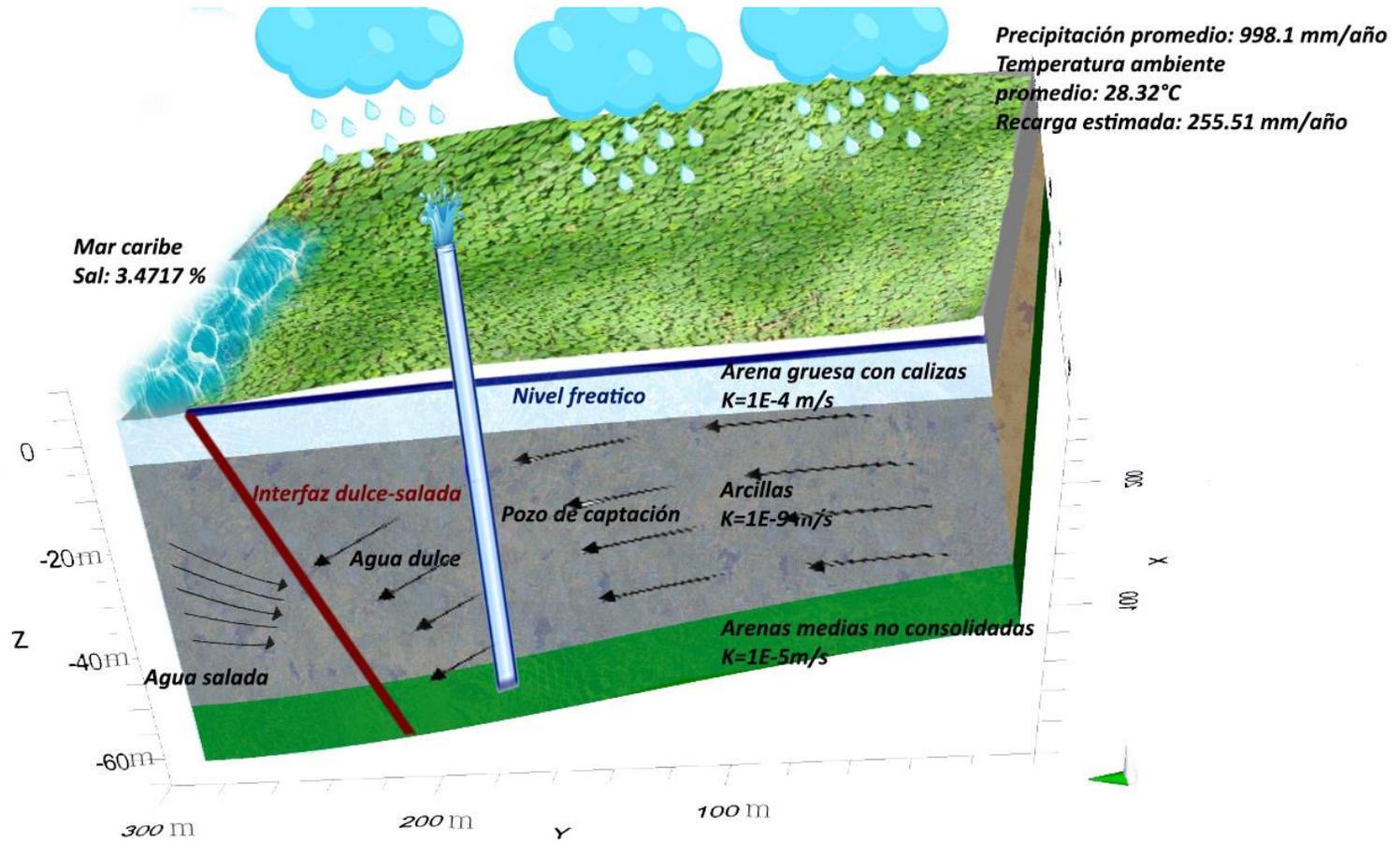


Figura 28: Modelo conceptual de intrusión salina.

6.3 MODELACIÓN

El modelo numérico fue corrido a 10 años para cada uno de los escenarios, lo que generó como resultado mapas de concentración de salinidad en mg/L, los cuales se encuentran en bruto en la lista de ANEXOS D y se analizan a continuación.

6.4 ANALISIS DE RESULTADOS

6.4.1 Efectos por aumento del nivel del mar.

Observando comparativamente los escenarios en los que se mantiene constante el bombeo o explotación, pero donde cambia el nivel del mar (Por ejemplo, escenario 1, 4 y 7; 2, 5 y 8 o 3, 6 y 9), se observa que los efectos del nivel del mar, prácticamente no repercuten en los resultados. Esto se debe a que la variación del nivel del mar a 10 años, no es siquiera mayor a los 4 cm, siendo la variación de intrusión salina no apreciable en los resultados del modelo. Se superpusieron las líneas de concentración de sal, y no se observó ninguna variación, como se aprecia en la Figura 29.

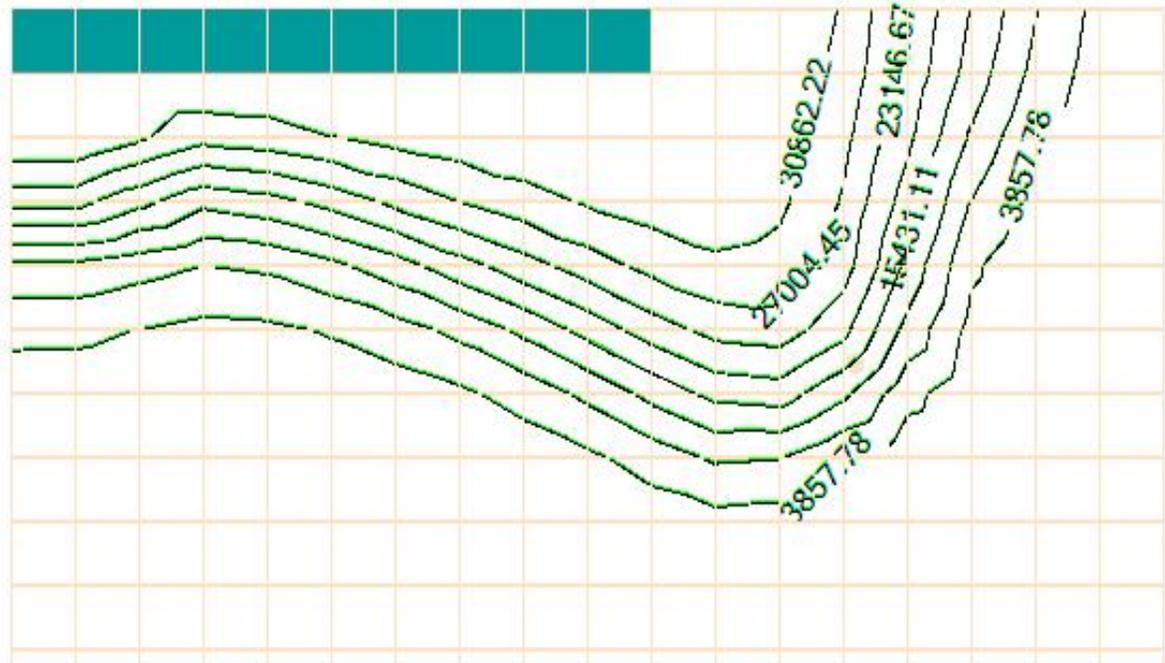


Figura 29: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 2, 5 y 8 a 10 años.

Estos resultados son comparables a los obtenidos en Partido de la Costa, provincia de Buenos Aires, donde al existir un escaso aumento en el nivel del mar, los resultados a penas y fueron apreciables (Carretero et al., 2012), y difieren con los resultados del estudio en Delta del Nilo, Egipto, donde hubo una diferencia muy significativa (Nofal et al., 2014). Esta diferencia se puede deber a muchos factores, tales como: La diferencia en la estimación del nivel del mar, donde los estudios mencionaron usaron un pronóstico de un aumento de 1 m en treinta años (Frente a los 3.58 cm, utilizados en este estudio); las condiciones de explotación, puesto que a la fecha en la isla de Barú no se han encontrado zonas con una transmisividad que permita la extracción de caudales comparables a los de grandes acuíferos, como los mencionados anteriormente, y las diferencias de permeabilidad, puesto que la zona acuífera de la zona de estudio, está conformada en su mayoría por suelos con condiciones hidrogeológicas desfavorables tales como arcilla y calizas no fracturadas.

6.4.2 Efectos por variación en la explotación.

El avance de la intrusión salina en relación a la extracción de agua de un acuífero se debe al cambio que esto produce en el balance entre agua dulce y salada (Ding et al., 2014). Esta relación se puede apreciar en los resultados de la modelación, sobre todo cuando se comparan escenarios de igual nivel del mar, pero diferente caudal de explotación (cómo al comparar los escenarios 1,2 y 3; 4, 5 y 6 o 7, 8 y 9). Muestra de esto se observa en la Figura 30 y Figura 31.

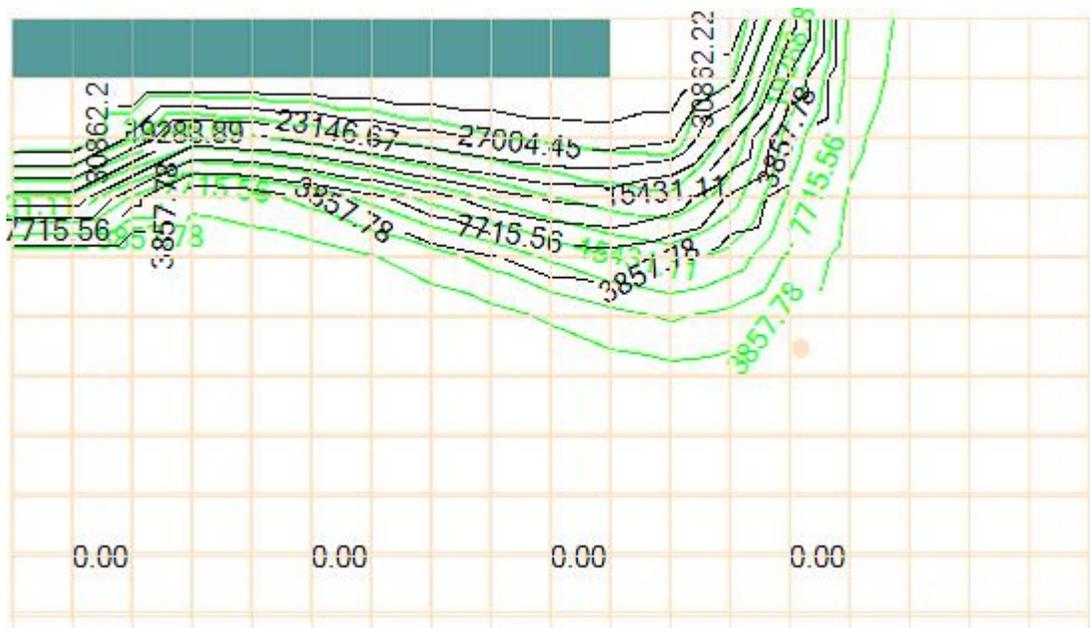


Figura 30: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 7 (negro) y 9 (Verde) a 10 años.

Al comparar dos escenarios, cuya diferencia es la explotación de 260 m³/día frente a 0 m³/día (Sin explotación), como lo son el escenario 9 y 7 respectivamente, se aprecia una diferencia entre el avance de la cuña salina, que resulta mayor en la zona donde se encuentra el posible pozo de extracción (ver Figura 30).



Figura 31: Superposición de líneas de salinidad (mg/L) de escenarios 9 (verde) y 8 (rojo) a 10 años.

De forma análoga, cuando se comparan dos escenarios cuya diferencia está en la explotación de $864 \text{ m}^3/\text{día}$ frente a $260 \text{ m}^3/\text{día}$, como lo son el escenario 8 y 9 respectivamente, se aprecia una diferencia mayor entre la cuña salina (ver Figura 31).

Estos resultados son acordes a estudios anteriores, donde también existió una relación directa entre la captación del recurso hídrico y el aumento en el contenido de sal en el agua de algunos puntos de los acuíferos (Arellano & Vargas, 2001; Paiva, Cavalcanti, & Scalia, 2010; Praveena et al., 2011)

6.4.3 Análisis del escenario más crítico.

De los nueve escenarios modelados, el más probable es el escenario 8, puesto que tiene la proyección más probable de aumento del nivel del mar (Málikov, 2010; Torres et al., 2006) y puesto que el escenario más probable de explotación es el máximo, dadas las necesidades del recurso hídrico de la zona.

En este escenario, se observó que, al modelar a un año, se encuentran concentraciones de 0.385 % de sal a 70 metros de la línea de costa, mientras que, a 5 años, esta misma concentración avanza hasta 76 metros de la línea de costa y luego en diez años hasta 85 metros.

6.4.4 *Análisis de concentración de sal en el pozo.*

La recopilación de los resultados de concentración de sal en mg/L al modelar los escenarios 7,8 y 9 (teniendo en cuenta que en estos escenarios fueron modelados con el mismo ascenso de nivel del mar de 3.58 mm/año) puede ser apreciadas en la Tabla 14.

Tabla 14: Datos de concentración de sal (mg/L) en el pozo

ESCENARIOS	TIEMPO (años)				
	1	3	5	7	10
E8	16861.14	20960	22128	22253	22298
E9	2482	2515	2611	2761	3056
E7	1.863	5.542	3.1233	0	0.01

Esta información se graficó, y se realizó un ajuste por mínimos cuadrados, tratando de obtener ecuaciones predictivas, como se muestra en la Figura 32. No obstante, los coeficientes de determinación de las ecuaciones, frutos de la linealización no fueron lo suficientemente buenos. Esto se debe a que existen factores no manipulables, tales como los relacionados con el tipo de suelo que influyen en los procesos de intrusión salina que se mantienen invariables en los escenarios. Es notorio con los resultados que a través del tiempo la intrusión salina sigue aumentando, pero esta no aumenta de la misma forma a lo largo del modelo, lo que se debe entre otras cosas a la línea de costa irregular y a las características del suelo, que difieren a lo largo de la zona estudiada (Garzon, 2009; Lopez-geta & Mena Ingles, 1988; Zeng et al., 2018).

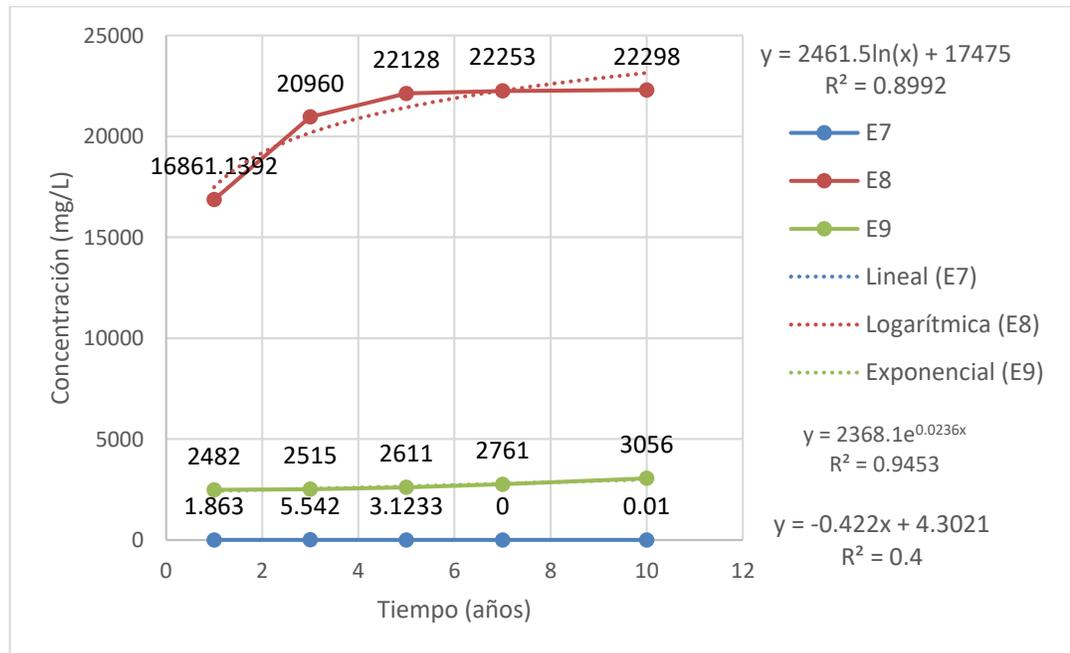


Figura 32: Gráfica de concentración de sal (mg/L) vs tiempo.

6.5 ESTIMACIÓN DE INDICES DE SALINIDAD

Teniendo en cuenta que el estrato inferior del acuífero se encuentra confinado por arcillas, posee una conductividad típica de arenas no consolidadas de 0.864 m/día, la altura del agua subterránea está por encima de 2 metros, la distancia de la costa de la zona de estudio es menor a 500 m, el impacto actual de intrusión salina es bajo (No se reporta explotación) y se encuentran espesores de acuíferos de hasta 70 m. Se construye la Tabla 15.

Tabla 15: Variables para el cálculo del índice GALDIT.

Variable	Puntuación	Peso
Tipo de acuífero	10	1
Conductividad hidráulica (m/día)	2.5	3
Altura del agua subterránea por encima del nivel del mar (m)	2.5	4
Distancia a la costa (m)	10	4
Impacto actual de la intrusión salina (%)	2.5	1
Espesor del acuífero (m)	10	2

Luego, se utilizó la fórmula del índice de vulnerabilidad por intrusión salina GALDIT, obteniendo en promedio, un valor de 6, para el área de estudio, dejándola en la categoría de moderadamente vulnerable (Chachadi & Ferreira, 2005). Se realizó un mapa de distribución de valores del índice en la zona de estudio, el cual se aprecia en la Figura 33.

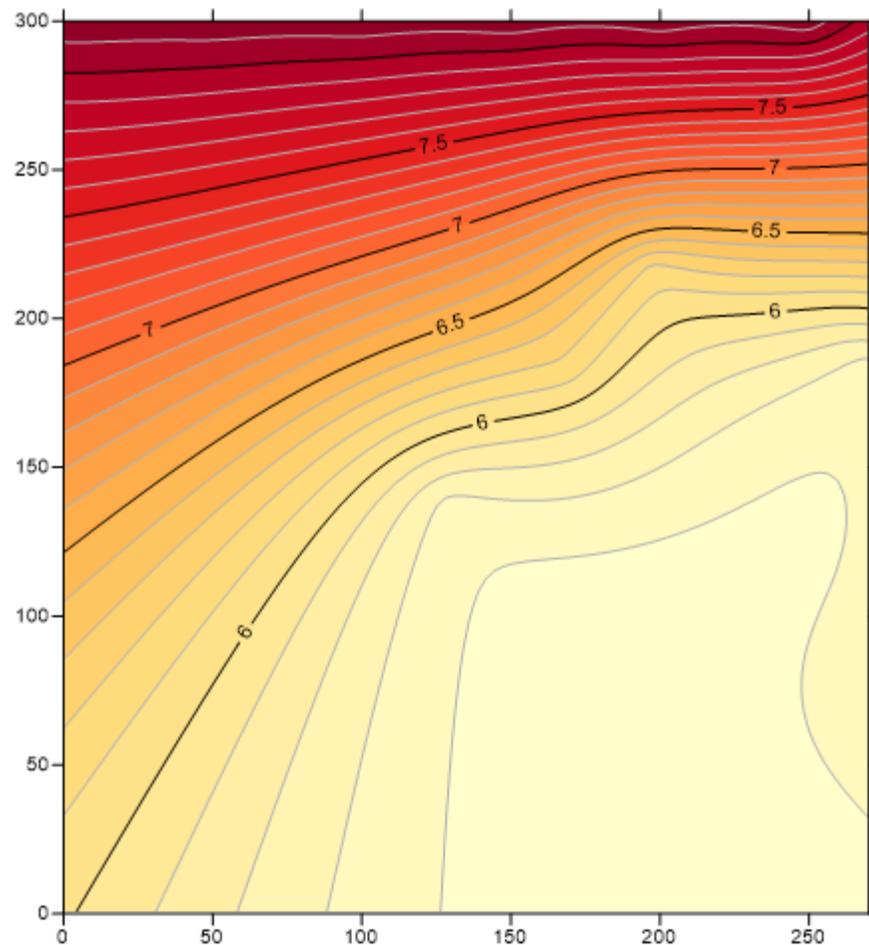


Figura 33: Mapa de índice GALDIT.

Por la forma en la que se calcula el índice (puntuación por intervalos de valores), sumado a que la puntuación es producto de algunas características que no varían del acuífero, no hubo diferencia en los resultados del índice en los diferentes escenarios modelados.

7. CONCLUSIONES

Como resultado de la interpretación hidrogeológica de la zona, se concluye que el acuífero tiene potencial para almacenar y transmitir un volumen de agua importante, la evidencia de eso, está en los grandes espesores de acuífero encontrados, así como zonas que por su importante transmisividad son capaces de ofrecer caudales de hasta 10 L/s. No obstante, existe dificultad con las capas del acuífero, puesto que la exploración eléctrica con sondeos verticales y la estratigrafía indican una importante irregularidad en sus capas a lo largo del área de esta, lo que hace que se requiera estudiar de forma cuidadosa los sectores donde se piense explotar el recurso hídrico. Dicho análisis y recopilación de la información, sumado al uso del software Visual MODFLOW, permitió la creación de un modelo conceptual, el cual ilustra de manera gráfica mucha de la información disponible acerca del acuífero.

Existe evidencia en la literatura que el aumento en el nivel del mar repercute en el aumento de la intrusión salina en los acuíferos (Bedoya, 2009; Carretero et al., 2012), así como el hecho general que las dinámicas del mar repercuten con las condiciones de los acuíferos costeros (Kuan et al., 2012; C Robinson, Gibbes, Carey, & Li, 2007; C Robinson, Li, & Prommer, 2007; Clare Robinson, Gibbes, & Li, 2006), no obstante en la modelación no se encontró una variación en escenarios de aumento del nivel del mar. Esto se debió al hecho de que la variación del nivel del mar fue en promedio muy pequeña en el horizonte de tiempo estudiado, sin embargo, es posible que de hacerse un estudio con un horizonte mayor sean apreciable estos efectos o en un estudio de horizonte de tiempo menor, donde se trabaje con información de mareas por estaciones mensuales, y así apreciar la dinámica con relación a las mareas lo que daría resultados cuyo promedio anual debería similar al calculado, pero con tiempos donde el nivel de intrusión salina aumentaría y disminuiría según las mareas. En algunos estudios, fue posible apreciar diferencias entre la intrusión salina y el aumento del nivel mar, con un aumento de 1 m en el nivel del mar, en un periodo de tiempo de 30 años (Carretero et al., 2012; Nofal et al., 2014)

Por otro lado, la variación de la intrusión salina en función de la explotación fue muy significativa y diferente, mientras que en el escenario de explotación de un caudal de 260 m³/día, se encontró en la ubicación del pozo, concentraciones de salinidad de 2482 mg/L a 1 año, hasta 3056 mg/L a 10 años, en el escenario de explotación de un caudal de 864 m³/día, con una curva que parece describir una función exponencial, en la misma ubicación se encontraron concentraciones de 16861 mg/L a 1 año y hasta de 22298 mg/L a 10 años, con una curva de salinidad que parece describir una función logarítmica.

El índice GALDIT, corrobora lo encontrado en la modelación, y es que el acuífero es vulnerable a los problemas de intrusión salina, por ello, hay que tener especial cuidado al momento en el que se hace uso del recurso hídrico presente en él (Chachadi & Ferreira, 2005). Por otro lado, al desarrollar el índice, se encontró que este no variaba según los escenarios, puesto que, la mayoría de los parámetros dependen de características propias del acuífero y las diferencias no lograban otra puntuación, por lo que se entiende, que no es necesario calcular el índice GALDIT por escenario, sino por zonas de este.

Según lo obtenido en esta investigación, no resulta viable la explotación de 864 m³/día por el alto contenido de sal que se encontraría, pero sí la de 260 m³/día, la cual corresponde a un caudal suficiente para cubrir las necesidades a mediano plazo de la población del corregimiento de Barú mas no para el resto de poblaciones de la isla.

En general, el desarrollo y los resultados de este estudio, consiguieron resolver positivamente la pregunta de investigación, además se consigue un respaldo científico para dar muestra de la importancia y necesidad de realizar estudios de intrusión salina, para garantizar la calidad y durabilidad de este preciado recurso.

8. RECOMENDACIONES

Este proyecto contó con algunas limitantes de tiempo y presupuesto, por lo que se tuvo que recurrir a datos de literatura y formulas empíricas que, aunque tienen trayectoria científica, y un sustento lógico, pudieron no haber brindado una exactitud igual a la que sí pudiesen dar pruebas de campo, que requieren de mayor tiempo y presupuesto.

Por ello, para mejorar el estudio de intrusión salina, se recomienda realizar una medida directa de la recarga, como la que se puede obtener realizando un balance hídrico, o un estudio de recarga a través de trazadores (Vélez & Vásquez, 2004), estos estudios, aunque tienen la desventaja de ser costosos, pueden dar una muestra real de los valores de recarga del acuífero en horizontes de tiempo conocidos, lo que permitiría corroborar o refutar el uso de fórmulas empíricas como método de estimación. También se recomienda, que una vez iniciada la explotación, se instalen piezómetros y se haga un registro del cabezal hidráulico por al menos un año, donde es importante que los piezómetros penetren el estrato de arenas medias, el cual se encuentra a más de 60 m sobre la superficie, pero que cuenta con las características hidrogeológicas más favorables. Con el registro del cabezal hidráulico, se podría realizar una calibración del modelo, lo que ajustaría datos de permeabilidad en los estratos, mejorando o corroborando los resultados.

En cuanto a la utilización del acuífero, se recomienda más exploración geo eléctrica, con el fin de hallar zonas con buena transmisividad más lejos de la costa, esto disminuiría la concentración de sal encontrada en los caudales captados. Así mismo, se recomienda no explotar el acuífero con un caudal mayor al que pueda necesitar el corregimiento de Barú a mediano plazo (aproximado a los 260 m³/día) con el fin de aprovechar el recurso hídrico sin concentraciones excesivas de sal, lo cual hace viable su aprovechamiento y tratamiento.

Por otro lado, si se desea extraer caudales importantes, es posible que se haga necesario la utilización de tecnologías desalinizadoras, no obstante, es necesario la realización de un

estudio de factibilidad de acuerdo a la calidad de agua y tecnología de tratamiento. Se recomienda la utilización de la tecnología de osmosis inversa, frente a la de intercambio iónico, por su relativa facilidad de manejo, operación y bajo costo de producción, teniendo en cuenta el bajo nivel socio económico de la ciudad (Diseños y soluciones sostenibles, 2016; Dpto. Comercial INQUINAT S.A., 2008).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arellano, F., & Vargas, A. (2001). Casos de contaminación por intrusión salina en Acuíferos Costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central*, 25, 77–84. Recuperado a partir de <http://aguas.igme.es/igme/publica/tiac-01/Area IV-11.pdf>
- Ballesteros, B. J., Morell, I., García-Menéndez, O., & Renau-Pruñonosa, A. (2016). A Standardized Index for Assessing Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: The SITE Index. *Water Resources Management*, 30(13), 4513–4527. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1433-4>
- Bayon, A., Valero, D., García-bartual, R., & Jos, F. (2016). Environmental Modelling & Software Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Water Resources Management*, 80, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>
- Bedoya, J. (2009). *Propuesta metodológica para el manejo de acuíferos costeros: El problema de la intrusión salina*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/2304/1/71316950.2009.pdf>
- Berdugo Moreno, M., Betancourt Morales, A., Maldonado Chaparro, A., & Garzón, J. (2012). Evaluación y dinámica de uso del recurso hídrico en el corregimiento de Barú (Cartagena, Bolívar, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 9(1), 23–36. Recuperado a partir de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/27075>
- 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*, 25, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.04.006>
- Canales, A. G., Hanson, R. T., & Dausman, A. (2016). Modelo Seawat para intrusión salina en el acuífero de Boca Abierta, Sonora, *Water Resources Management*, 30(13), 155–160.
- CARDIQUE. (2016). Identificación de la vulnerabilidad del acuífero costero de Arroyo Grande ante la intrusión salina, 1–84. Recuperado a partir de www.cardique.gov.co

- Carretero, S., Rapaglia, J., & Kruse, E. (2012). Análisis de la futura intrusión salina en un acuífero costero como respuesta al cambio climático . Partido de la Costa , provincia de Buenos Aires, 34–40.
- Castillo, Y., & Hernández, J. (2012). *Modelación de la intrusión salina desde las Bahías de Cartagena y Barbacoas hacia el acuífero de Barú*. Universidad de Cartagena.
- Chachadi, A., & Ferreira, J. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicators Description. *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, 1–12. Recuperado a partir de <http://www.aprh.pt/celtico/PAPERS/26.PDF>
- Chang, Y., Hu, B. X., Xu, Z., Li, X., Tong, J., Chen, L., ... Ma, Z. (2018). Numerical simulation of seawater intrusion to coastal aquifers and brine water/freshwater interaction in south coast of Laizhou Bay, China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 215(29), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.06.002>
- Corcel: Consultoria & Interventoria Ltda. (2016). *Estudio hidrogeológico al suroccidente de la Isla de Barú - Cartagena (Bolívar)*. Santa Marta.
- Ding, F., Yamashita, T., Lee, H. S., & Pan, J. (2014). A modelling study of seawater intrusion in the liao dong bay coastal plain, china. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 22(2), 103–115. <https://doi.org/10.6119/JMST-012-0220-1>
- Diseños y soluciones sostenibles, D. S. . (2016). Osmosis inversa (RO). *Ingeniería para un desarrollo sostenible*, 1–27. Recuperado a partir de http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa_ro.pdf
- Doulgeris, C., & Zissis, T. (2014). 3D Variable Density Flow Simulation to Evaluate Pumping Schemes in Coastal Aquifers. *Water Resources Management*, 28(14), 4943–4956. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0766-0>
- Dpto. Comercial INQUINAT S.A. (2008). Desmineralización de agua ¿Ósmosis Inversa o Intercambio Iónico?
- Espinoza, C., & Molina, M. E. (2005). Estudio de intrusión salina en cuifero costeros: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV Región., 261. Recuperado a partir de <http://documentos.dga.cl/SUB4438.pdf>

- Fernández, J. (2000). Incidencia de la sobreexplotación y salinización de los acuíferos en el abastecimiento de poblaciones. *Aguas Subterráneas y Abastecimiento Urbano*, 251–256.
- Fuentes, J. (1992). Aguas subterráneas. En *Hojas Divulgadoras* (pp. 381–411). España: Ministerio de agricultura y pezca.
- Garzon, C. L. (2009). *Modelación matemática y experimental de los efectos gravitatorios en el desarrollo de un penacho de contaminante en medio poroso saturado*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA DEPARTAMENTO.
- Giese Pozos e Ingeniería S.A.S. (2016). *Informe final de Pozo Dpto. Bolívar - Proyecto Isla de Barú - Aguas de Cartagena*.
- Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). *User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow*. *USGS Techniques of Water Resources Investigations*.
- Hidrogeologic, W. (2017). An introduction to Groundwater Modeling. Recuperado a partir de <https://www.waterloohydrogeologic.com/resources/visual-modflow-flex-resources/introduction-groundwater-modeling-with-visual-modflow/>
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. *Nature* (Vol. 446). <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Konishi, K. (20017). *Numerical Simulation of Saltwater Intrusion Caused by Land-Use Change and Groundwater Pumping in a Salinity- Affected Coastal Aquifer, Japan*. Lund University.
- Kuan, W. K., Jin, G., Xin, P., Robinson, C., Gibbes, B., & Li, L. (2012). Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers, 48(March 2011), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2011WR010678>
- Lopez-geta, J. A., & Mena Ingles, J. M. (1988). II. PRINCIPIOS FISICOS QUE RIGEN EL PROBLEMA DE LA INTRUSION SALINA. En *Aspectos Metodologicos en el Estudio de la Intrusion Salina* (pp. 11–33).

- López-Geta, J., & Gómez-Gómez, J. (2007). Seawater intrusion and its incidence in the Spanish aquifers. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 15.3, 266–273.
- Málikov, Í. (2010). Análisis de las tendencias del nivel del mar a nivel local y su relación con las tendencias mostradas por los modelos internacionales. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1–38. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Pub. L. No. 1075 de 2015, 654 (2015). Colombia.
- Mollema, P. N., Antonellini, M., Minchio, A., & Gabbianelli, G. (2008). The Influence of Three-dimensional Dune Topography on Salt Water Intrusion in Marina Romea , Italy : A Numerical Modeling Study Using LIDAR Data, (10 m), 151–154.
- Moptma, & Miner. (1994). *Libro Blanco de las Aguas Subterráneas*. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Murillo Díaz, J., & Navarro Iañez, J. (1991). *Modelo para el cálculo de un índice del estado de intrusión de un acuífero costero. Aplicación a la Plana de Castellón*. Madrid.
- Nofal, E., Fekry, A., & El-Didy, S. (2014). Adaptation to the Impact of Sea Level Rise in the Nile Delta Coastal zone, Egypt. *Journal of American Science*, 10(9), 1–7. <https://doi.org/10.7537/marsjas100914.03>
- Paiva, A. L. R. De, Cavalcanti, G. L., & Scalia, E. (2010). Investigation of seawater intrusion in Recife coastal plain, 254–258.
- Praveena, S. M., Abdullah, M. H., Aris, A. Z., Yik, L. C., & Bidin, K. (2011). Numerical Modelling of Seawater Intrusion in Manukan Island ' s Aquifer Center of Marine Science , Universiti Putra Malaysia , Department of Environmental Sciences , Faculty of Environmental Studies , 14, 1–7.
- RAS. Título B: Sistemas de Acueducto, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico § (2010). Colombia. Recuperado a partir de <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOB030714.pdf>
- Reyes, G., Barbosa, G., & Gilberto, Z. (2008). Geología de la plancha 29-30 Arjona. *Servicio Geológico Colombiano*, 3215.

- Reyes, G., Guzmán, G., Barbosa, G., & Zapata, G. (2001). Cartografía de las Planchas 23 Cartagena y 29-30 Arjona. Memoria explicativa. *Ingeominas*, 69.
- Robinson, C., Gibbes, B., Carey, H., & Li, L. (2007). Salt-freshwater dynamics in a subterranean estuary over a spring-neap tidal cycle, *112*(June), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006JC003888>
- Robinson, C., Gibbes, B., & Li, L. (2006). Driving mechanisms for groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary. *Geophysical Research Letters*, *33*(3), 3–6. <https://doi.org/10.1029/2005GL025247>
- Robinson, C., Li, L., & Prommer, H. (2007). Tide-induced recirculation across the aquifer-ocean interface, *43*(March), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2006WR005679>
- Sun, R., & Xiao, H. (2016). CFD-DEM simulations of current-induced dune formation and morphological evolution. *Advances in Water Resources*, *92*, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.03.018>
- The USGS Water Science School. (2016). The World's Water. Recuperado 10 de agosto de 2017, a partir de <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>
- Torres, R., Gómez, J., & Afanador, F. (2006). Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, *24*(24), 64–72. Recuperado a partir de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Variación+del+nivel+medio+del+mar+en+el+caribe+colombiano#0>
- Trujillo Vélez, D. F. (2013). Plan De Desarrollo- Ahora Sí Cartagena- 2013 - 2015, 270.
- USGS. (2017a). La Ciencia del Agua para Escuelas: La distribución del agua de la tierra. Recuperado 14 de mayo de 2018, a partir de <https://water.usgs.gov/gotita/waterdistribution.html>
- USGS. (2017b). MODFLOW and Related Programs. Recuperado 10 de agosto de 2017, a partir de <https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>
- Vargas Quintero, M. C. (2010). Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. *Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial*, *1*(1021), 1–30. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

- Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20.
- Voudouris, K., Mandilaras, D., & Antonakos, A. (2004). Methods To Define the Areal Distribution of the Salt Intrusion : Examples From South Greece, 465–480.
- Waterloo Hidrogeologic. (2017). An Introduction to Groundwater Modeling Concepts. Recuperado 10 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.waterloohydrogeologic.com/resources/visual-modflow-flex-resources/introduction-groundwater-modeling-with-visual-modflow/>
- Zeng, X., Dong, J., Wang, D., Wu, J., Zhu, X., Xu, S., ... Xin, J. (2018). Identifying key factors of the seawater intrusion model of Dagu river basin, Jiaozhou Bay. *Environmental Research*, 165(October 2017), 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.039>

ANEXOS

ANEXO A: Parámetros medidas en la costa de Barú por el CIOH en octubre 20 de 2015

Parámetros	Metodología	Unidades	Limite	Varadero			Barú			Islas del Rosario		
				Detección	E2-S	E2-M	E2-F	E3-S	E3-M	E3-F	E4-S	E4-M
Hora	-	Hora	-	13:18	13:40	14:05	11:36	11:50	12:05	9:38	10:05	10:20
Profundidad	-	m	-	0.3	6	12	0.3	6	12	0.3	6	12
Temperatura	Electrométrico	°C	-	32	29.7	29.7	31.3	29.8	29.7	30.7	30.5	30.1
pH	Electrométrico	Unidades	-	8.29	8.18	8.19	8.14	8.19	8.19	8.12	8.15	8.15
Conductividad	Electrométrico	mS/cm	-	41.8	53.1	53.9	50.3	52.8	53.6	50.7	50.8	53.4
Salinidad	Electrométrico	UPS	-	27	35.4	35.8	33.4	35.1	35.6	33.4	33.6	35.5
Oxígeno Disuelto	Electrométrico	mg/L	-	7.2	6.45	6.4	6.83	6.46	6.43	6.87	6.67	6.53

Coordenadas:

Lugar de muestreo	Descripción sitio	Sitio	Localización
Mar Caribe	Varadero	Est. No. 2	10°18'22.40"N
			75°35'16.80"O
	Barú	Est. No. 3	10°16'33.30"N
			75°35'48.80"O
	Islas del Rosario	Est. No. 4	10°11'8.50"N
			75°43'41.60"O

ANEXO B: Parámetros medidas en la costa de Barú por el CIOH en enero 31 de 2011

Parámetros	Unidades	Límite de Detección	ESTACIONES		
			E1-S	E1-F	E2-S
Hora	Horas	-	9:29	9:40	12:05
Temperatura	°C	-	28.3	27.9	29.7
pH	Unidades	-	8.17	8.13	8.03
Conductividad	µS/cm	-	53.0	53.4	52.9
Salinidad	0%	-	35.2	35.5	35.1
Oxígeno Disuelto	mg/l	-	7.41	6.51	6.49
Transparencia	M	-	4.4	-	0.8

Coordenadas:

Lugar de muestreo	Descripción sitio	Sitio	Localización
Mar Caribe	Playetas	Est. No. 1	10°11'29.20"N
			75°38'2.90"O
	Hotel Pta Iguana	Est. No. 2	10°11'30.90"N
			75°37'51.00"O

ANEXO C: Parámetros medidas en la costa de Barú por el CIOH en abril 4 de 2012

Parámetros	Unidades	BOTADERO 1							BOTADERO 2					
		PUNTO 4			PUNTO 4C				PUNTO 5			PUNTO 5C		
		E7-S	E7-M	E7-F	E8-S	E8-M	E8-F	E9-S	E9-M	E9-F	E10-S	E10-M	E10-F	
In Situ	Hora	Hora	14:30	14:10	13:45	11:20	11:43	11:12	9:54	9:4	9:27	8:35	8:20	8:00
	Profundidad	m	0.5	25	50	0.5	25	50	0.5	25	50	0.5	25	50
	Temperatura	°c	28.6	27.1	27	29.5	27.6	27.2	28.1	27.7	27.1	27.7	27.1	26:04:00
	pH	Unidades	8.12	8.12	8.09	8.14	8.11	8.1	8.1	8.09	8.11	8.13	8.12	8.1
	Conductividad	mS/cm	50.5	51.4	51.6	43.8	51.2	51.4	51	51	51.1	51.2	51.4	51.6
	Salinidad	‰	33.3	33.9	34.1	28.4	33.8	33.9	33.6	33.6	33.7	33.8	33.9	34
	O. Disuelto	mg/l	8.8	8.0	7.9	7.2	6.9	6.6	8.5	6.9	7.3	7.3	7.3	7.2
	Transparencia	m	13	-	-	13.4	-	-	25	-	-	25	-	-

Coordenadas:

Lugar de muestreo	Descripción sitio	Sitio	Localización
Mar Caribe	Barú	Est. No. 7	10°18'10.27"
			75°36'19.09"
	Barú	Est. No. 8	10°18'54.51"
			75°36'19.13"
	Barú	Est. No. 9	10°20'50.69"
			75°43'45.77"
	Barú	Est. No. 10	10°22'08.11"
			75°43'46.73"

ANEXO D: Resultados en bruto de la modelación de los nueve escenarios:

Escenario 1

Sin ascenso del nivel del mar, ni explotación.

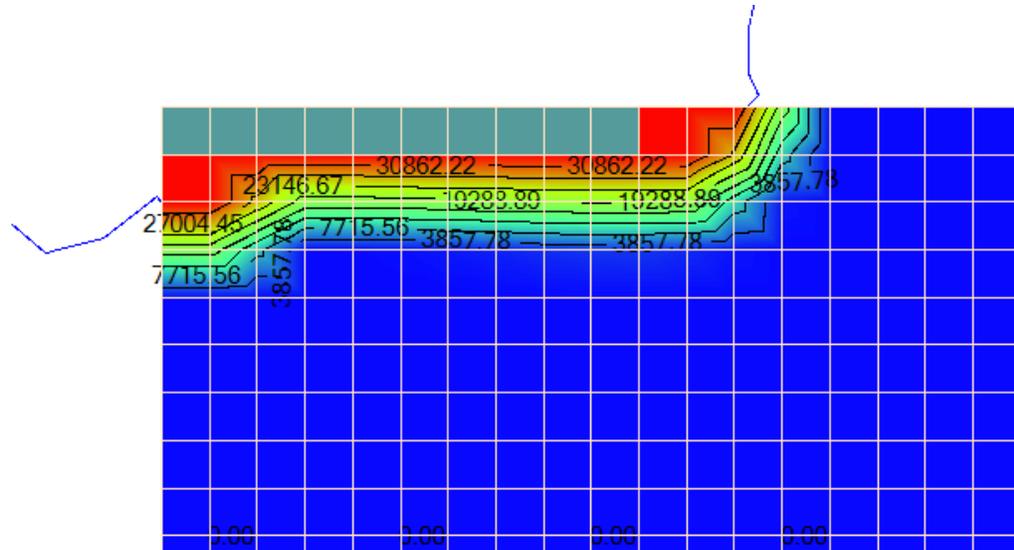


Figura 34: Escenario 1, concentración de sal a 1 año.

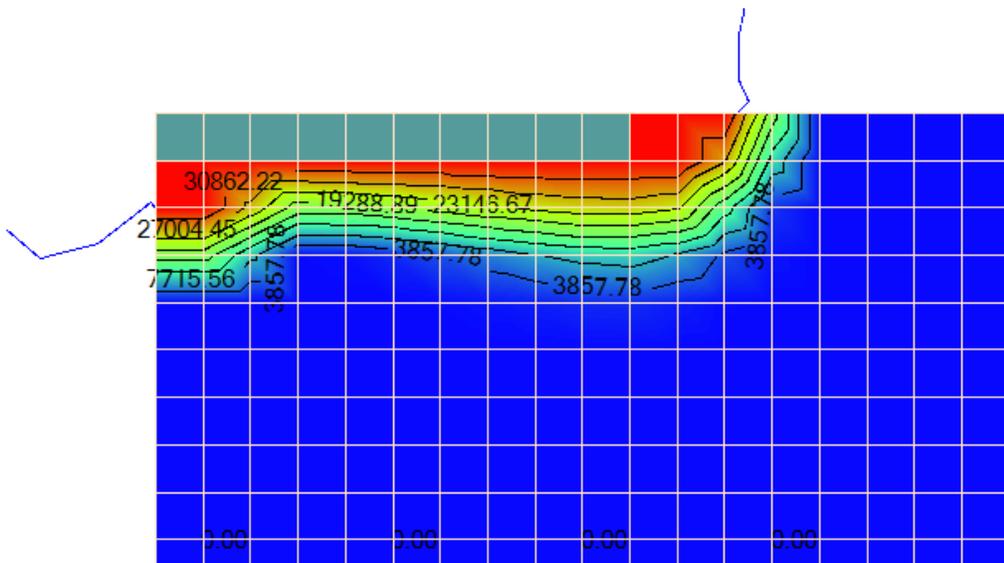


Figura 35: Escenario 1, concentración de sal a 5 años.

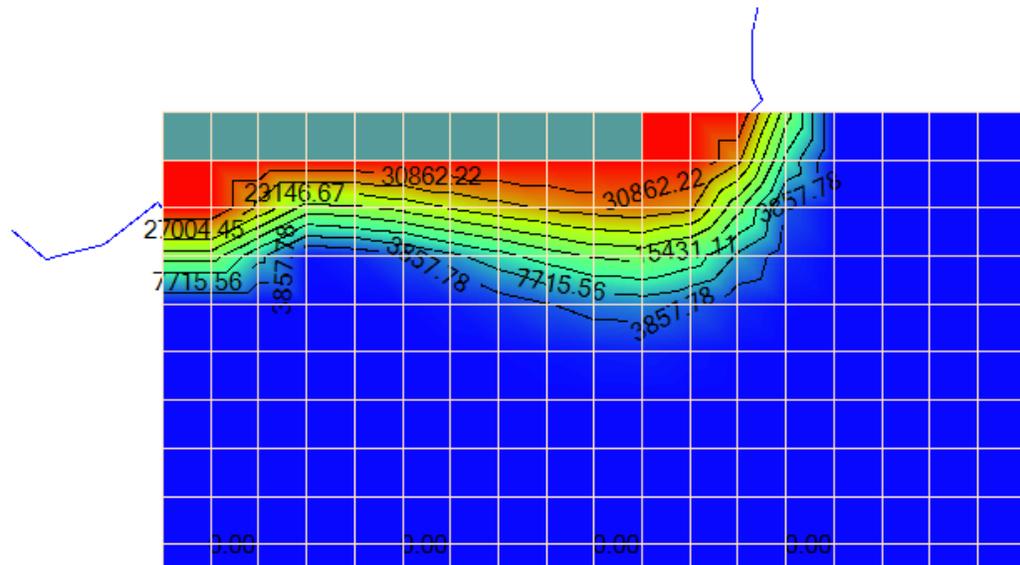


Figura 36: Escenario 1, concentración de sal a 10 años.

Escenario 2

Sin ascenso del nivel del mar, con caudal de explotación de 864 m³/día.

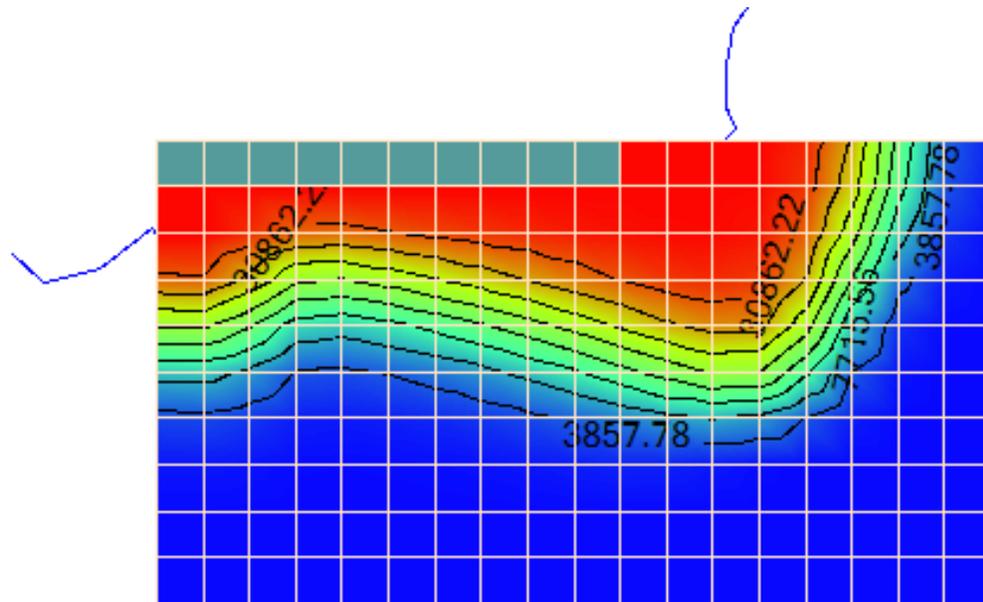


Figura 37: Escenario 2, concentración de sal a 1 año.

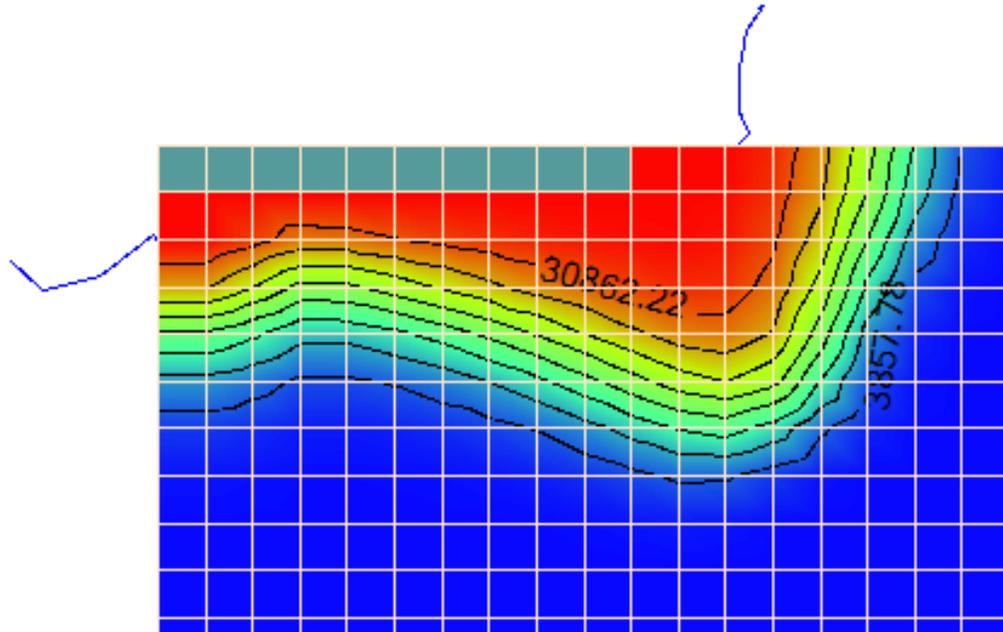


Figura 38: Escenario 2, concentración de sal a 5 años.

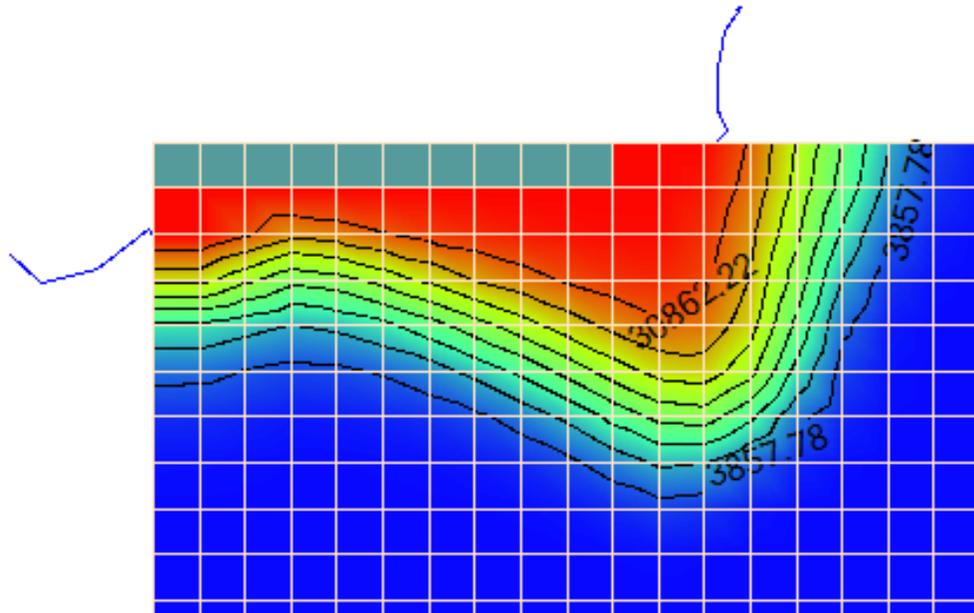


Figura 39: Escenario 2, concentración de sal a 10 años.

Escenario 3

Sin ascenso del nivel mar, con caudal de explotación de 260 m³/día.

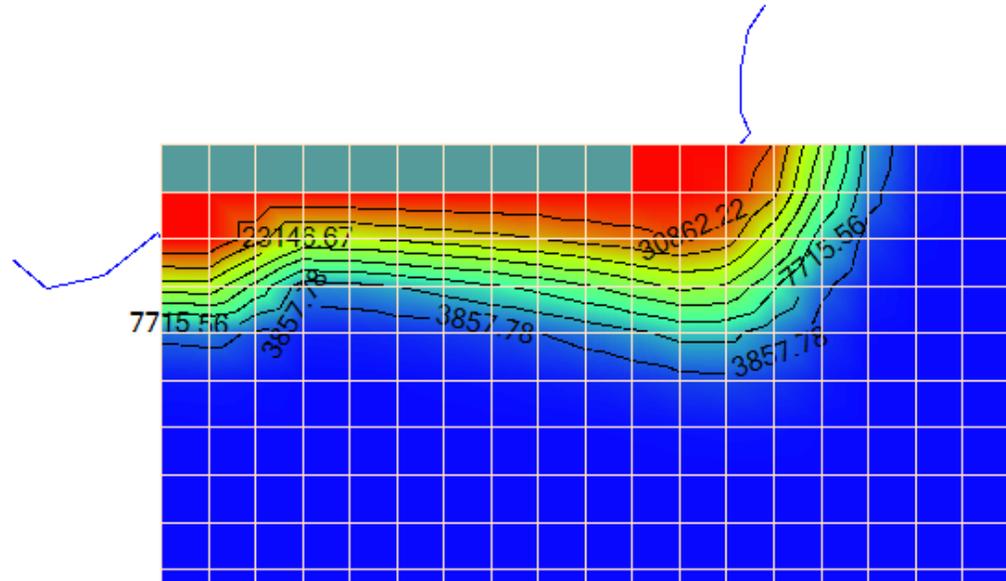


Figura 40: Escenario 3, concentración de sal a 1 año.

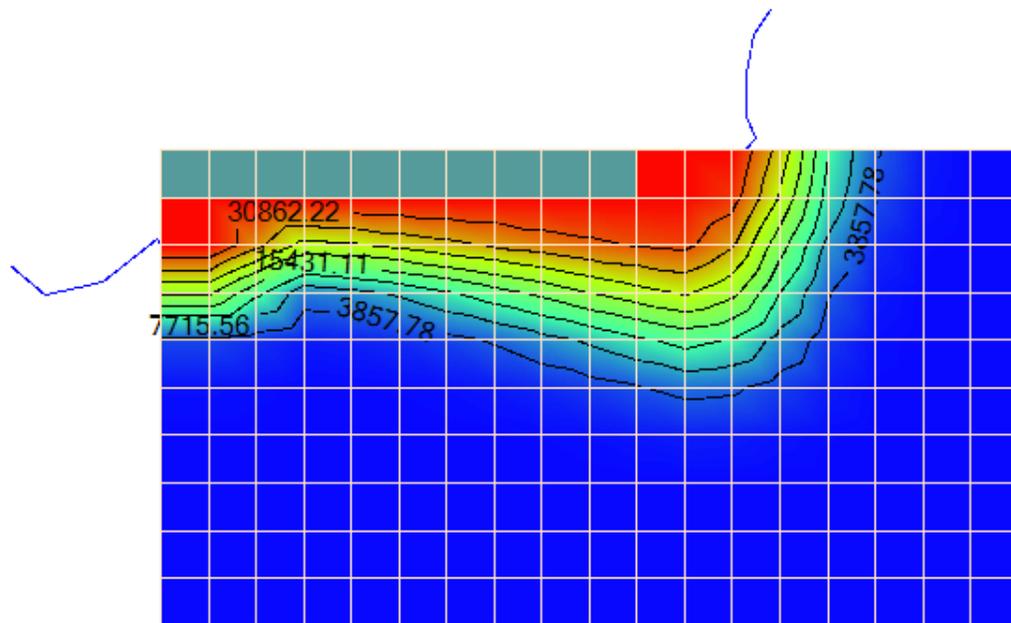


Figura 41: Escenario 3, concentración de sal a 5 años.

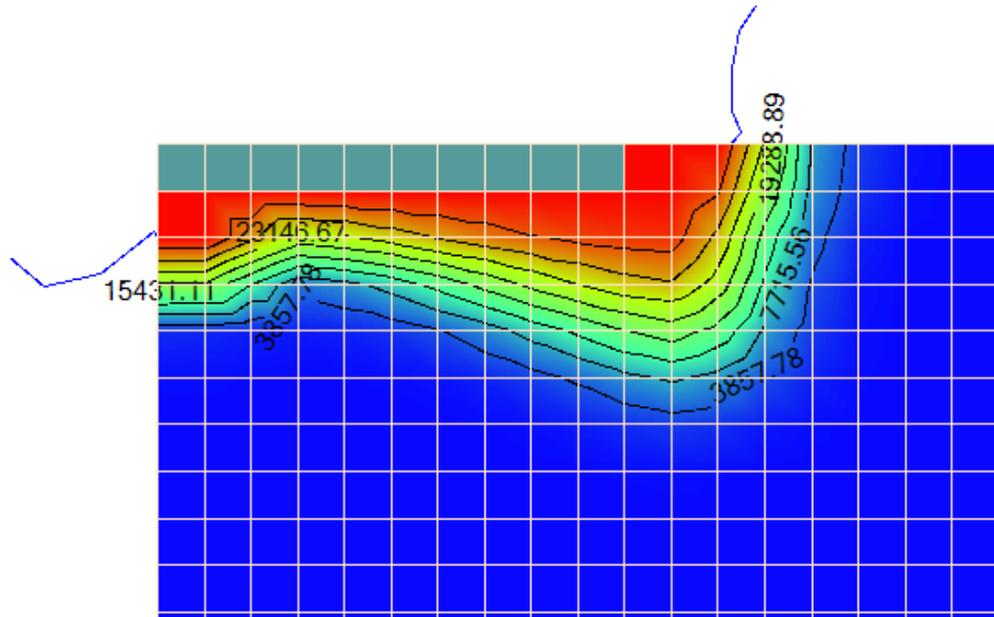


Figura 42: Escenario 3, concentración de sal a 10 años.

Escenario 4

Ascenso de nivel del mar de 2.01 cm, sin explotación.

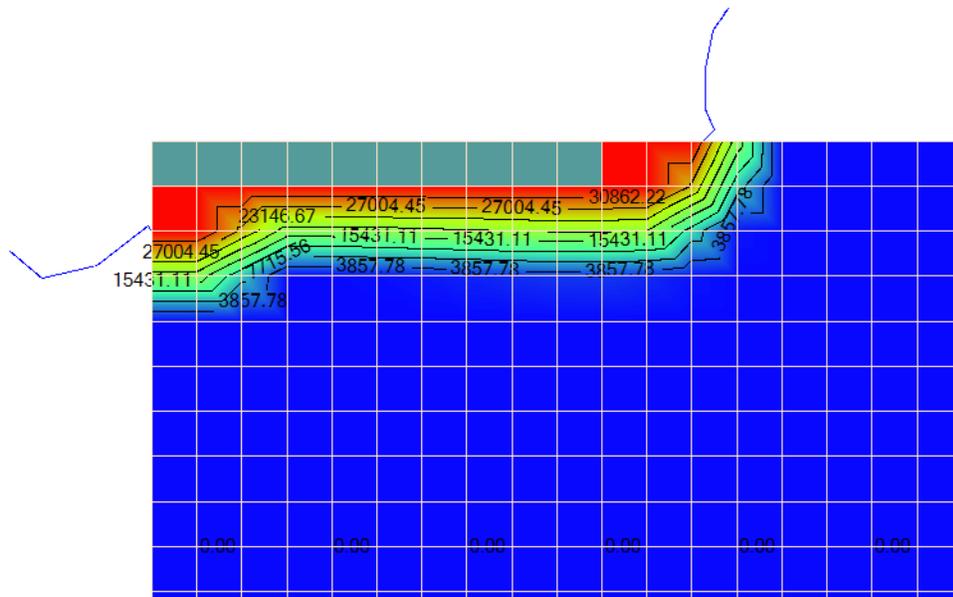


Figura 43: Escenario 4, concentración de sal a 1 año.

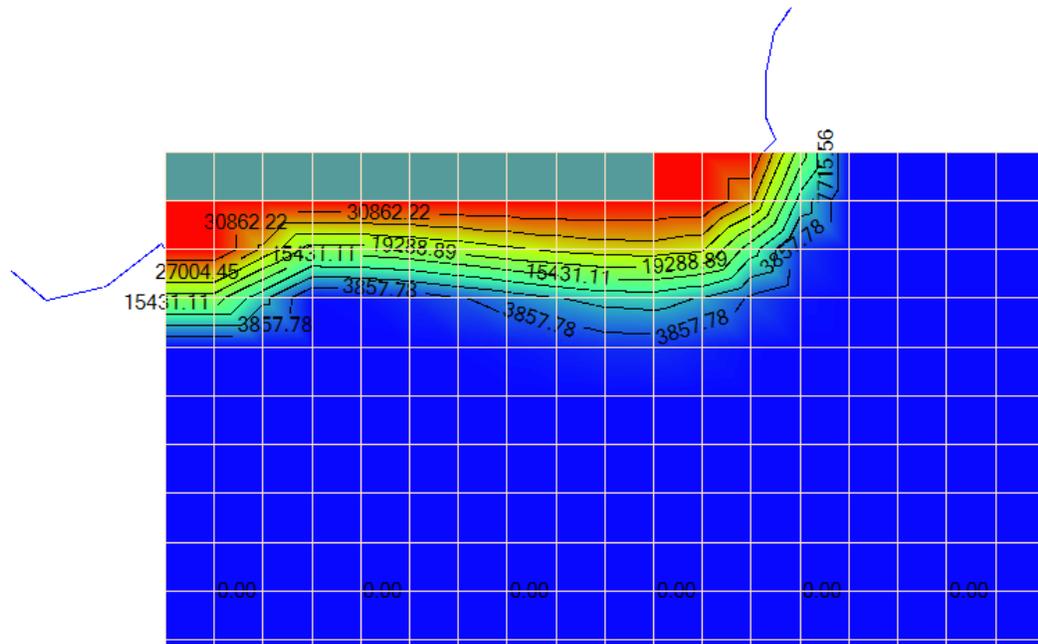


Figura 44: Escenario 4, concentración de sal a 5 años.

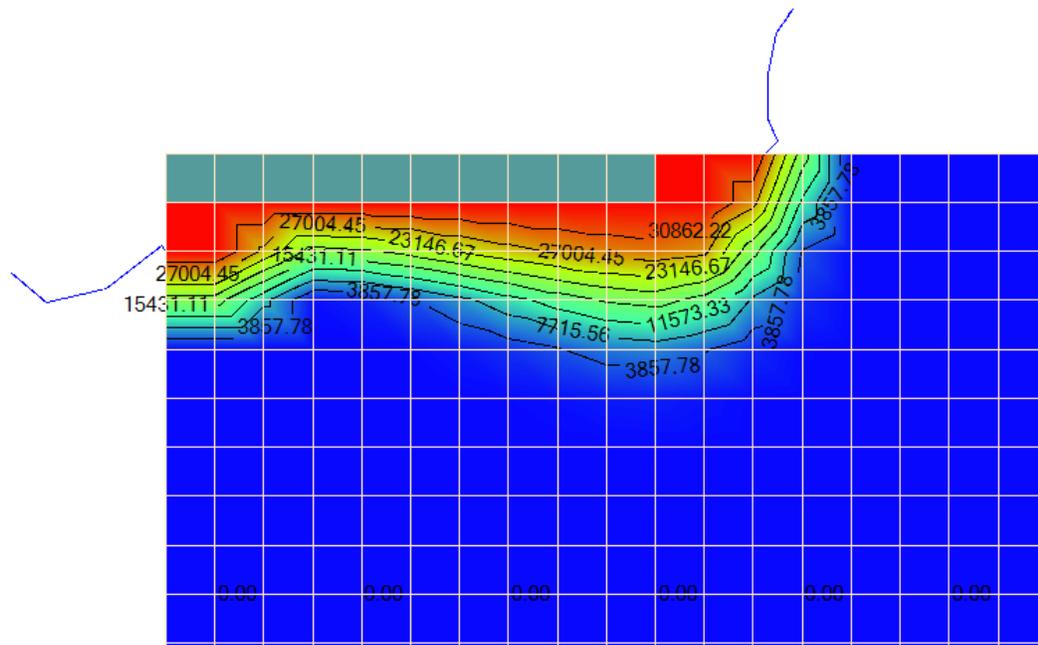


Figura 45: Escenario 4, concentración de sal a 10 años.

Escenario 5

Ascenso de nivel del mar de 2.01 cm, con caudal de explotación de 864 m³/día

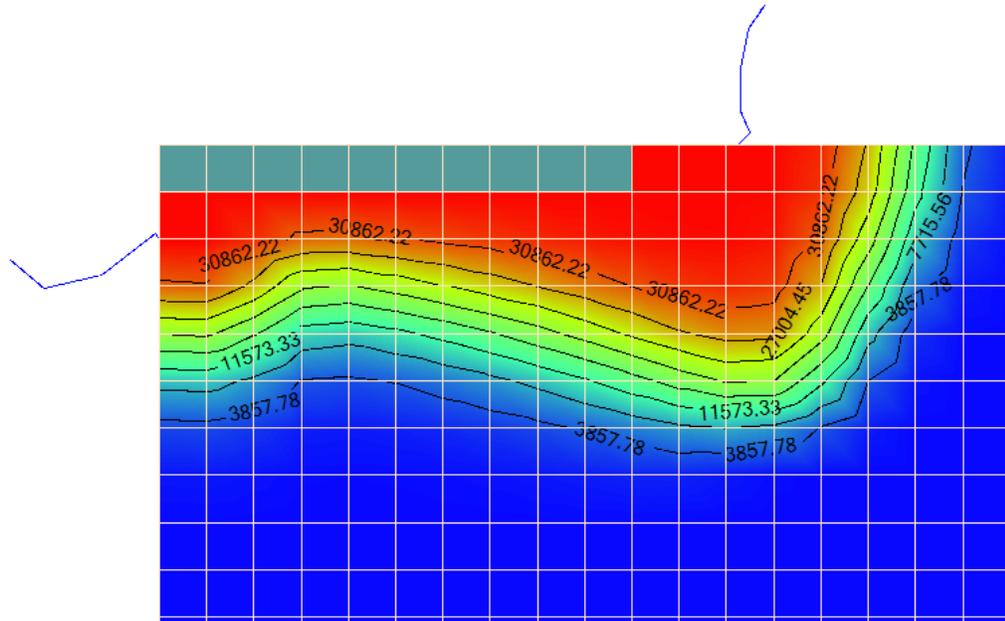


Figura 46: Escenario 5, concentración de sal a 1 año.

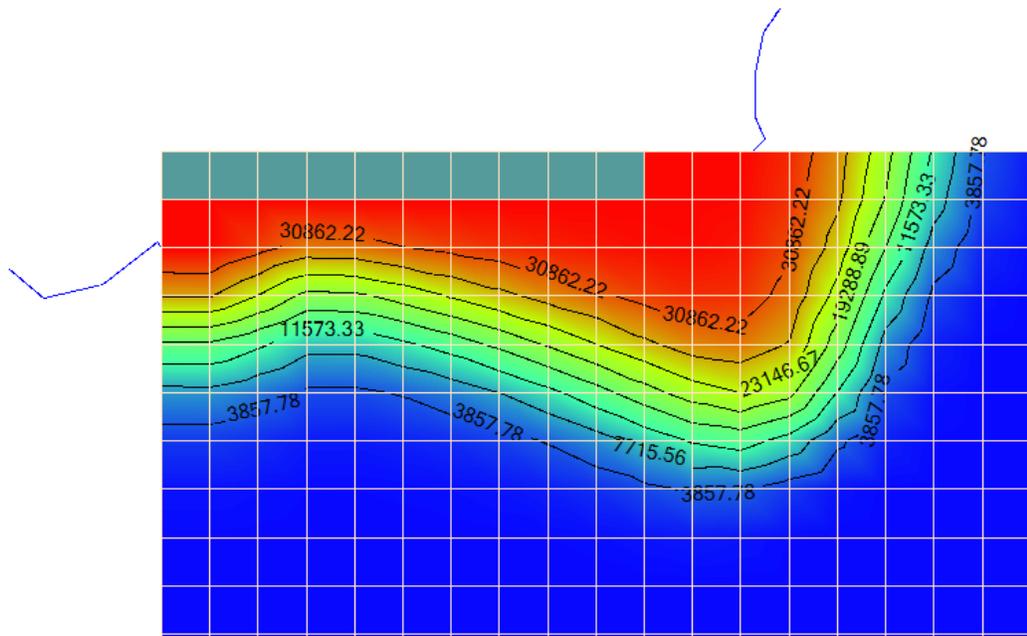


Figura 47: Escenario 5, concentración de sal a 5 años.

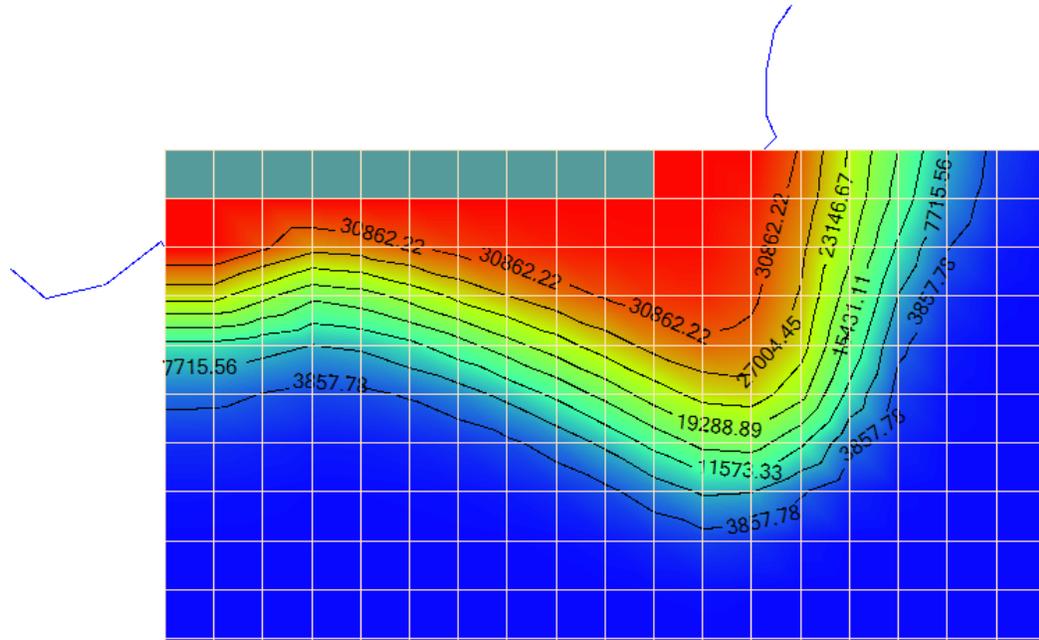


Figura 48: Escenario 5, concentración de sal a 10 años.

Escenario 6

Ascenso de nivel del mar de 2.01 cm, con caudal de explotación de 260 m³/día.

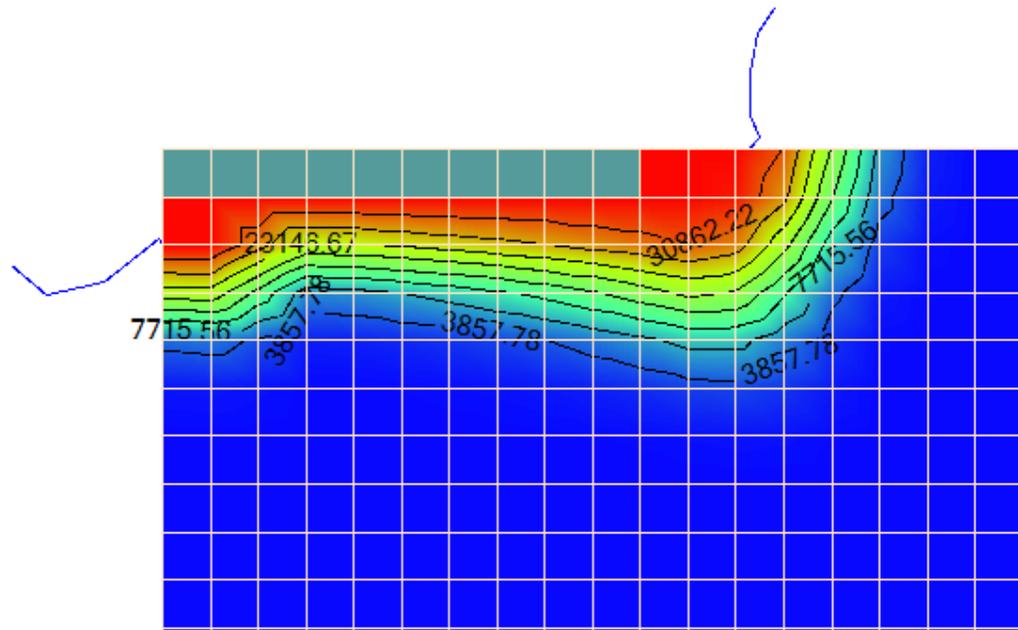


Figura 49: Escenario 6, concentración de sal a 1 año.

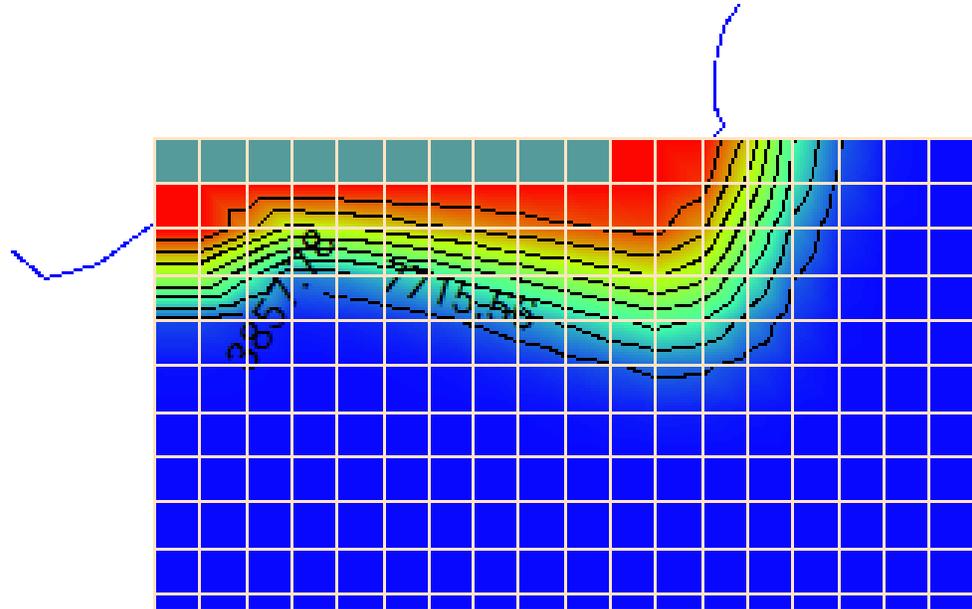


Figura 50: Escenario 6, concentración de sal a 5 años.

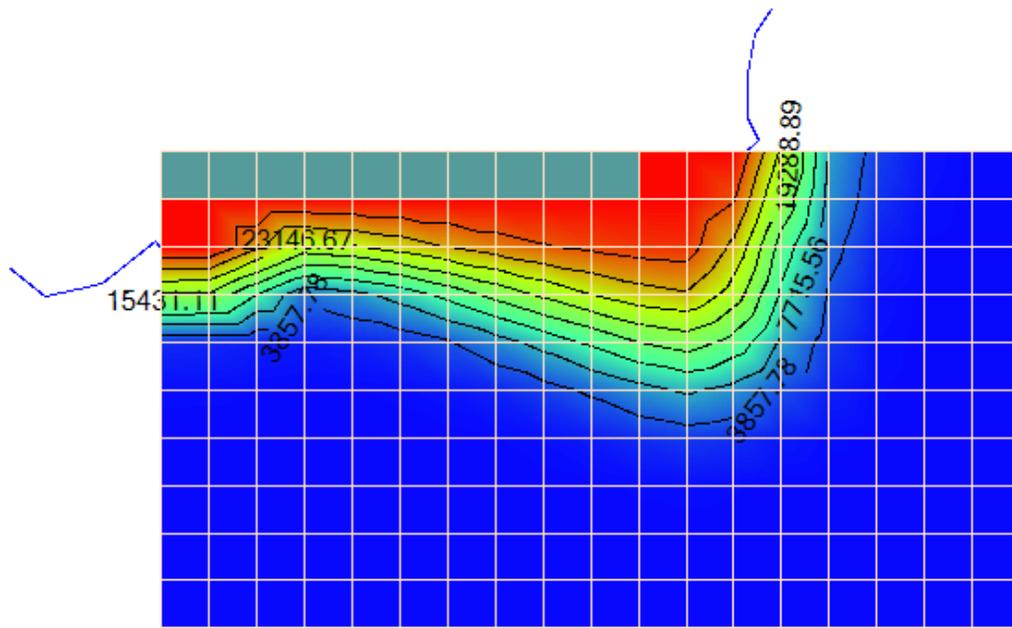


Figura 51: Escenario 6, concentración de sal a 10 años.

Escenario 7

Ascenso de nivel del mar de 3.58 cm, sin explotación.

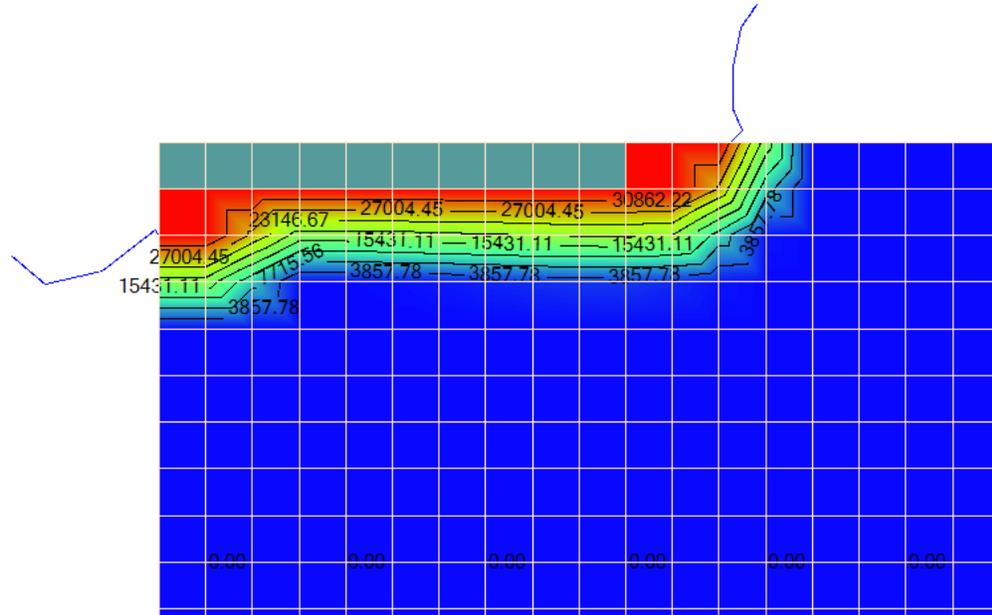


Figura 52: Escenario 7, concentración de sal a 1 año.

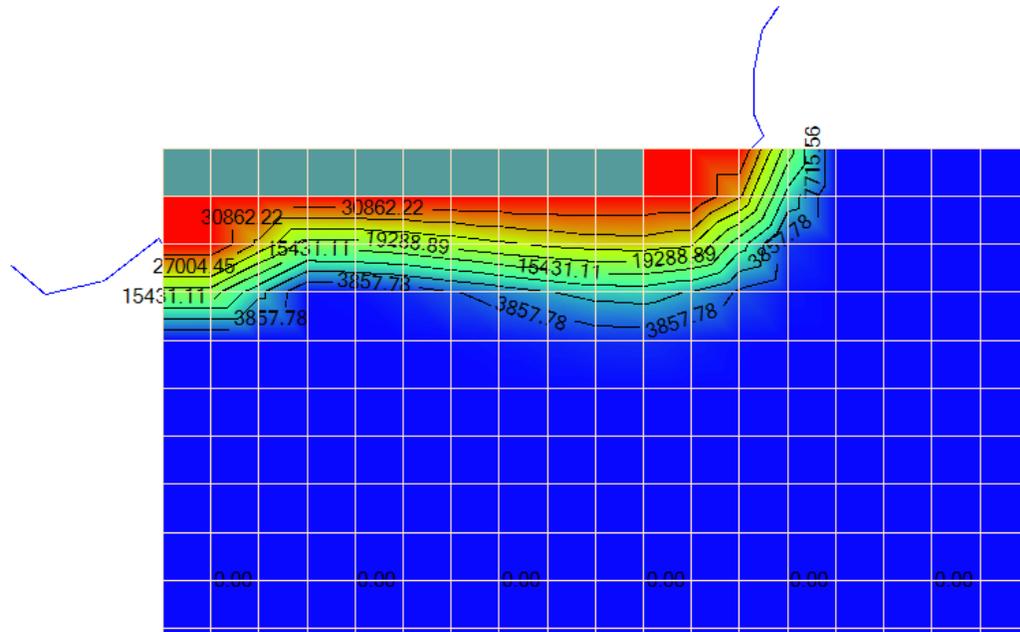


Figura 53: Escenario 7, concentración de sal a 5 años.

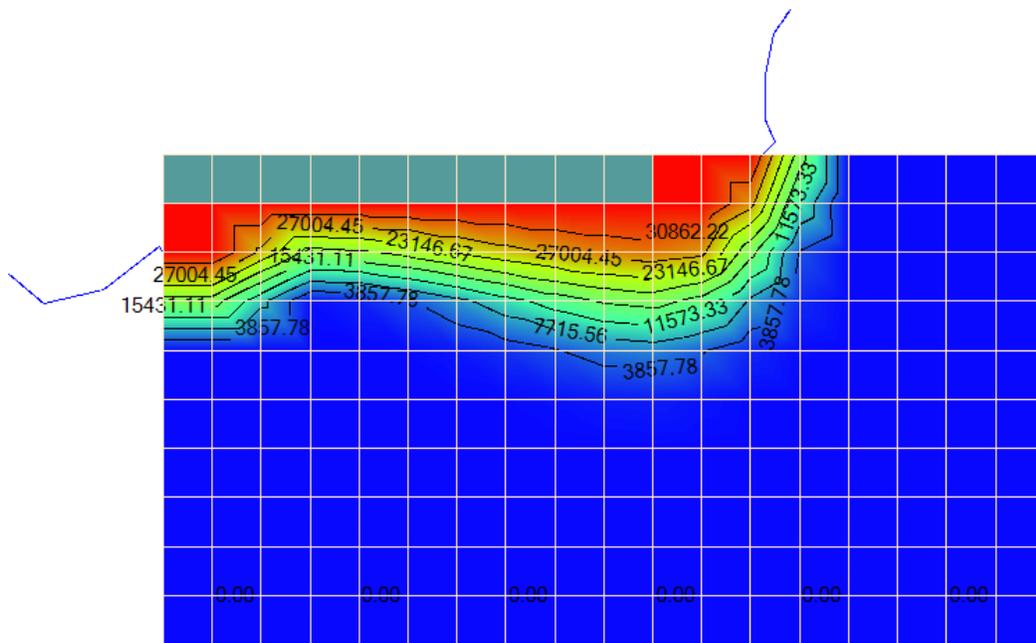


Figura 54: Escenario 7, concentración de sal a 10 años.

Escenario 8

Ascenso de nivel del mar de 3.58 cm, con caudal de explotación de 864 m³/día.

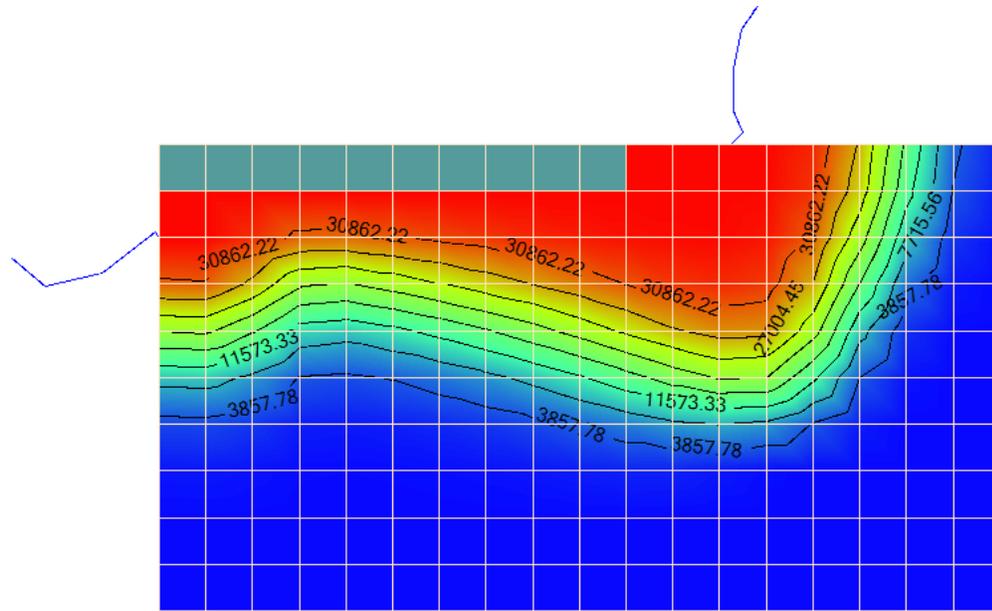


Figura 55: Escenario 8, concentración de sal a 1 año.

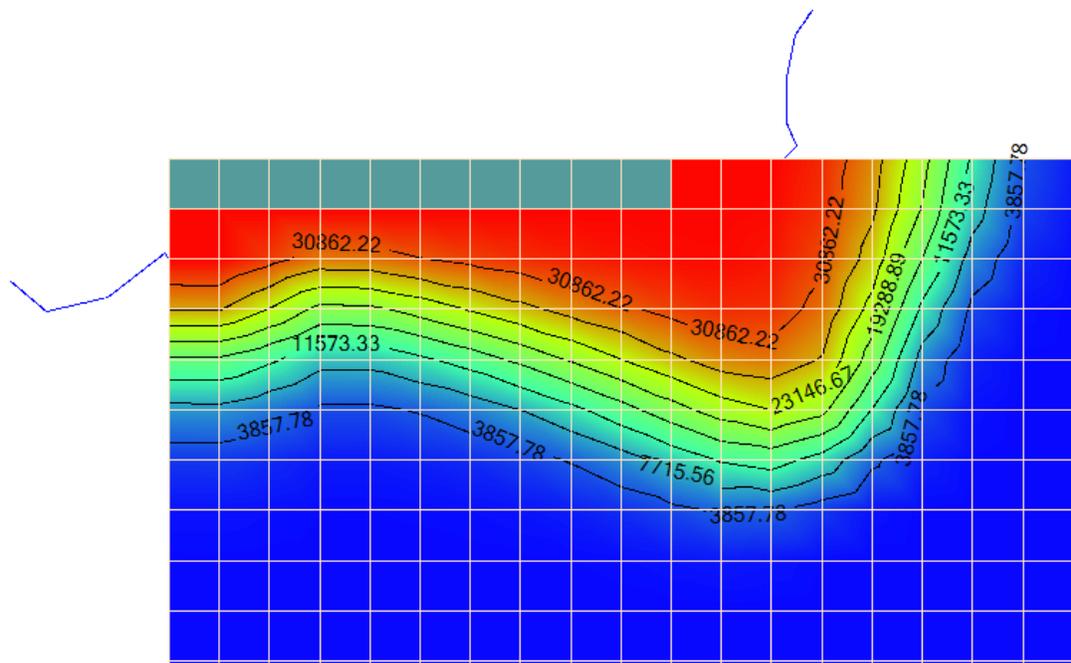


Figura 56: Escenario 8, concentración de sal a 5 años.

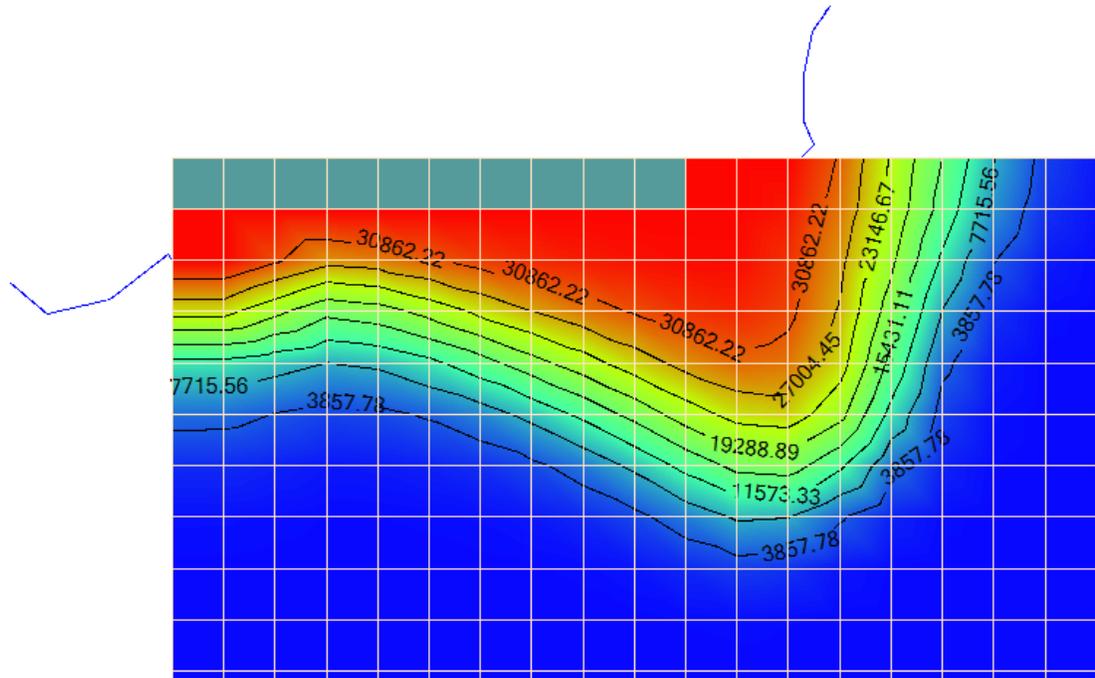


Figura 57: Escenario 8, concentración de sal a 10 años.

Escenario 9

Ascenso de nivel del mar de 3.58 cm, con caudal de explotación de 260 m³/día.

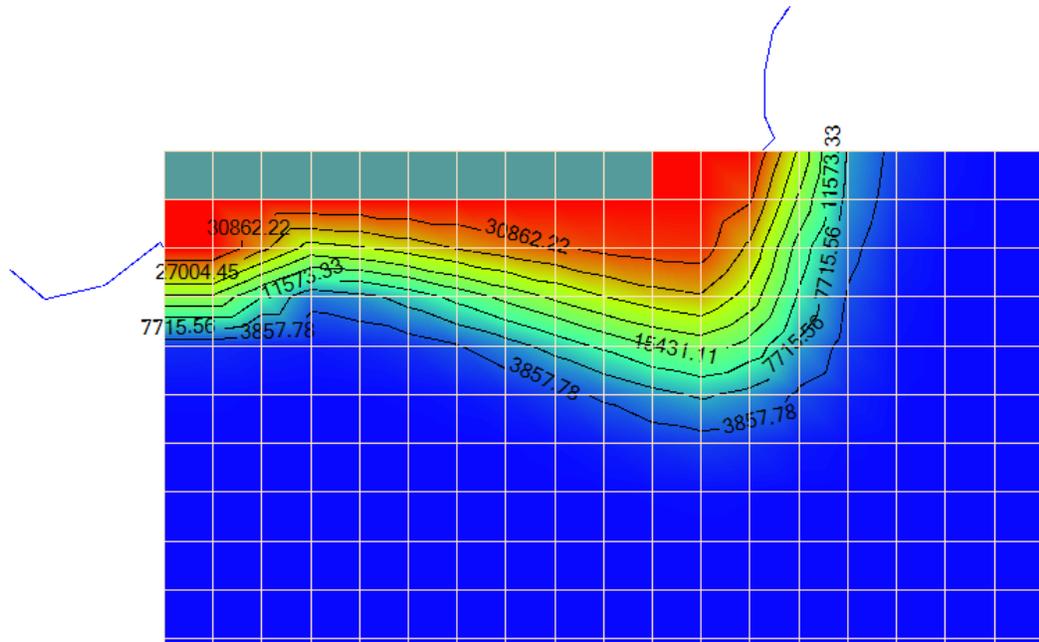


Figura 60: Escenario 10, concentración de sal a 10 años.