MODELO DE FLUJO Y CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA DETERMINAR LA DEPENDENCIA A LARGO PLAZO DE LAS SOLUCIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA MOJANA.

CONTRATO DE CONSULTORÍA N° 0000044735

INFORME FINAL

NOVIEMBRE DE 2022

Formato preliminar al documento

Título	Informe final
Fecha de elaboración	Noviembre 2022
Contrato de consultoría	N° 0000044735
Versión	001
Estado	Documento para revisión por parte del comité de supervisor del contrato.
Autor (es)	Equipo de trabajo Pontificia Universidad Javeriana-PUJ-IJA
Revisó	Nelson Obregón Neira

Control de Copias

Versión	Fecha	Responsable	Descripción
001	28/11/2022	Nelson Obregón	Informe final-Resumen ejecutivo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 5
1 METODOLOGÍA 6
2 DESCRIPCIÓN DE PRODUCTOS 13
2.1 Producto 1: Recolección de información secundaria y balance hídrico 13
2.1.1 Objetivos del producto 1 13
2.1.2 Descripción del producto 1 13
2.1.3 Resultados del producto 1 15
2.2 Producto 2: Inventario de pozos y Análisis GAP 20
2.2.1 Objetivos del producto 2 20
2.2.2 Descripción del producto 2 21
2.2.3 Resultados del producto 2 22
2.3 Producto 3: Trabajo de campo 27
2.3.1 Objetivos del producto 3 27
2.3.2 Descripción del producto 3 28
2.3.3 Resultados del producto 3 30
2.4 Producto 4: Modelo hidrogeológico conceptual y los mapas de vulnerabilidad 34
2.4.1 Objetivos del producto 4 34
2.4.2 Descripción del producto 4 35
2.4.3 Resultados del producto 4 36
2.5 Producto 5: Modelo hidrogeológico numérico 48
2.5.1 Objetivos del producto 5 48
2.5.2 Descripción del producto 5 48
2.5.3 Resultados del producto 5 49
2.6 Producto 6: Base de Datos SIG 54
2.6.1 Objetivos del producto 6 54
2.6.2 Descripción del producto 6 54
2.6.3 Resultados del producto 6 54

2.7 Producto 7,8 y 10: Talleres y memorias 56
2.7.1 Objetivos de los productos 7,8 y 10 56
2.7.2 Descripción de los productos 7,8 y 10 56
2.7.3 Resultados de los productos 7,8 y 10 57
2.8 Producto 9: Guía que indique cómo utilizar el modelo 62
2.8.1 Objetivos del producto 9 62
2.8.2 Descripción del producto 9 62
2.8.3 Resultados del producto 9 63
3 CONSIDERACIONES DE GÉNERO MOJANA CLIMA Y VIDA 64
4 CONCLUSIONES 66
5 RECOMENDACIONES 68

INTRODUCCIÓN

En la actualidad son varias las iniciativas, proyectos y estudios que son desarrollados y que impactan o tienen que ver en forma directa o indirecta con la región de La Mojana. Todos, en su alcance, resultados y productos, han generado información, conocimiento científico aplicado y direccionado no sólo al entendimiento de las dinámicas de tipo biogeofísico, social, cultural y económica en esta región sino también a soportar la toma de decisiones en pro de la sostenibilidad.

La Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) fue contratada a través del Instituto Javeriano del Agua (IJA) con el fin de "Desarrollar un modelo de flujo y calidad de aguas subterráneas para determinar la dependencia a largo plazo de las soluciones de aguas subterráneas en La Mojana". El alcance de este proyecto se enmarca en el componente uno del macroproyecto "Escalando las prácticas de gestión del agua resilientes al cambio climático para las comunidades vulnerables de La Mojana" que apoya al Gobierno de Colombia (GoC) en la mejora de prácticas de gestión integrada del recurso hídrico resilientes al cambio climático en La Mojana.

En el desarrollo de este proyecto (PUJ-PNUD) se entregaron diez productos, los cuales tienen como objetivo final proporcionar a los actores institucionales de orden nacional, lecciones aprendidas relevantes e instrumentos que contribuyan a la formulación de políticas públicas de adaptación al cambio climático y gestión de aguas subterráneas a nivel nacional.

Este documento corresponde al informe final en el cual se presenta la metodología empleada para el desarrollo del proyecto y la descripción de cada uno de los productos entregados.

1 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta de forma resumida el proceso metodológico llevado a cabo para alcanzar los objetivos del proyecto. Se inició con la recopilación de información de carácter secundario y primario. Del análisis espacial y de calidad de la información secundaria se planteó el diseño de la campaña de monitoreo para levantar información de tipo geoeléctrico, hidroquímico, isotópico e hidráulico subterráneo. Paralelo a este trabajo, se avanzó en la consolidación del modelo hidrológico e hidrodinámico, entendiendo que todas las formas en que se manifiesta el agua superficial interaccionan de alguna manera con el agua subterránea, y para conocer los aportes del agua subterránea a un río y/o viceversa es indispensable determinar el tipo de conexión hidráulica que hay entre ambos. Por otra parte, fue necesaria la construcción del modelo geológico 3D que requirió una armonización de las diferentes fuentes en cuanto a las unidades geológicas que componen la zona de estudio. En este estado de avance del proyecto, se contaba con información suficiente para que desde cada área se realizaran los aportes y/o hipótesis necesarias en la consolidación de un modelo hidrogeológico conceptual. Este, es el punto de partida para la construcción de un modelo hidrogeológico numérico, que a su vez y según los resultados de simulación preliminares, retroalimenta el conceptual. Adicionalmente, se incluyeron análisis de calidad de aguas según la normativa ambiental, evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, zonas de recarga potencial y escenarios de cambio climático. El proyecto finaliza con la socialización y difusión del conocimiento generado hacia los principales actores de la región. A continuación, se presenta brevemente la metodología y principales hallazgos obtenidos en cada una de las etapas mencionadas.

En el proceso de recopilación de información secundaria se consultaron fuentes como Servicio Geológico Colombiano (SGC), Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Corporaciones Autónomas Regionales (CAR’s), Universidades, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Fondo Adaptación (FA), alrededor de 203 documentos tipo informe de consultoría, artículo

científico, reporte institucional, tesis, mapa y/o memoria y libro. Sin embargo, se evidencio qué mucha de la información recopilada presentaba problemas de calidad, suficiencia y espacialidad. En este sentido, mediante un análisis GAP (identificación de vacíos de información) se diseñó la propuesta de recopilación de información primaria de tipo geoeléctrico, hidrogeoquímico, isotópico y pruebas de bombeo para 50 puntos estratégicamente espacializados. Esta campaña de monitoreo requirió un esfuerzo importante en la adecuación de los pozos previo a la realización de las pruebas de bombeo, en donde la participación y buena disposición de la comunidad fue indispensable para el éxito de la campaña.

Durante la modelación hidrológica y con el fin de estimar los volúmenes de agua que se infiltran de la superficie al subsuelo provenientes principalmente de la precipitación, se seleccionó el modelo basado en la física SWAT, que tiene en cuenta es sus cálculos el agua que se infiltra y el agua que se evapotranspira y que se extrae por efecto de las plantas del suelo para tener un balance de los volúmenes que permanecen en el subsuelo después de la infiltración. Mediante la información cartográfica (Modelo Digital de Elevación (DEM), coberturas y tipos de suelos) y climatológica (precipitación, temperatura, radiación solar y punto de roció) se logró calibrar el modelo usando como referencia coeficiente de eficiente de Nash-Sutcliffe (E) con resultados entre muy bueno y satisfactorio. La distribución espacial de la recarga estimada arrojó valores de recarga más bajos en la zona norte y zona media de La Mojana variando entre los 0 y 354 mm al año. Las zonas más lluviosas presentan los mayores valores de recarga con valores entre 1180 mm y 3503 mm al año. Al calcular el porcentaje de precipitación para cada una de estas cuencas que se transforma en recarga se observa que para el caso de las zonas con recarga más baja el porcentaje varía alrededor del 10% mientras que para la zona de recarga media y alta el valor oscila alrededor de 30%.

En la modelación hidrodinámica se definió un dominio que comprende el núcleo de La Mojana y como condiciones de frontera se adoptaron condiciones de entrada (río San Jorge, río Cauca, río Nechí, río Caribona, río Magdalena), de salida (estación Magangué y Palenquito en el Caño Chicagua), además de puntos denominados condición de frontera del modelamiento hidrológico, estos últimos corresponden a flujos importantes provenientes de

las cuencas aferentes al complejo cenagoso pero que no cuentan con mediciones de caudal que permitan la estimación de los flujos de masa que ingresan al dominio. Este dominio además incluyó el río Cauca por lo que los rompederos estaban implícitos en la modelación. Adicionalmente, se plantea retomar el DEM construido por el FA y mejorarlo a partir de la información satelital y de batimetría disponible. Como software libre de modelación se empleó TELEMAC, con una malla no estructura desde 6 a 200m, resultados a resolución diaria y un consumo de tiempo de cómputo de 2 semanas. Los resultados de espejo de la lámina de agua, profundidades y velocidades se generan para un año húmedo (2010), seco (2015) y neutro (2019).

De acuerdo con la integración y generalización de los mapas geológicos a escala 1:100.000 que requirió la armonización de las diferentes unidades a partir de imágenes de satélite, se construyó el modelo geológico 3D en donde se ubican los depósitos recientes diferenciados en la parte superior de la sección, hacia el Este adelgaza su espesor y reposan sobre rocas ígneo-metamórficas unidad denominada en este trabajo como Basamento Cristalino. Hacia el Oeste reposan sobre la Formación Betulia (Q1-l) que corresponde con rocas sedimentarias. Se observan intercalaciones de niveles de arenas y/o sedimentos gruesos con capas importantes de arcillas y estos con una muy probable continuidad latera. El basamento cristalino se encuentra muy accidentado con altos y bajos ocasionando algunas ventanas que emergen entre estos depósitos como se aprecia hacia el Este. Finalmente se observa que gran parte del complejo cenagoso de esta zona se ubica a lo largo del trazo de contacto entre la Formación Betulia y los depósitos más recientes.

En cuanto a la hidráulica subterránea se realizaron los siguientes análisis: i) interpretación de pruebas de bombeo y parámetros hidráulicos, ii) piezometría y líneas de flujo y iii) estimación de caudales de extracción. Los datos principales de las pruebas de bombeo (50) ejecutadas en el núcleo de La Mojana, arrojaron que las profundidades de los niveles estáticos varían entre 1.04 y 23.40 metros. El abatimiento varía entre 0.428 y 26.676 metros. La profundidad saturada varía entre 43.675 y 158.125 metros. Finalmente, los caudales de las pruebas de bombeo varían entre 0.83 y 29.5 litros por segundo (l/s). Los valores de la transmisividad media de las 50 pruebas de bombeo varían entre 37.69 m2/día y 1180.5 m2/día. El potencial

hidrogeológico en la zona de estudio es variable debido a las diferentes formaciones presentes, la heterogeneidad del medio poroso, sumado a que es un acuífero multicapa y sus diferentes zonas de recarga, hace muy difícil en generalizar la zona. En general el medio poroso presenta una buena capacidad de transmitir y almacenar agua. En cuanto a la conductividad hidráulica, los valores de este parámetro hidráulico en la formación Betulia y las formaciones cuaternarias varían entre 0.5 y 15 m/d, dando cuenta que son materiales de media a buena competencia hidráulica para la explotación de agua subterránea, constituyéndose las dos como acuíferos.

Bajo el análisis anterior se pueden intuir diferentes patrones de conductividad hidráulica. Hacia el centro de La Mojana donde afloran las formaciones cuaternarias (aluviales, abanicos antiguos, paludales) se presenta una tendencia general a presentar valores de conductividad hidráulica de entre 0.5 y 15 m/d, siendo esta formación bastante productiva y con buena capacidad hidráulica. Hacia los alrededores de la cuenca particularmente en la zona occidental de la zona de estudio donde aflora la Formación Betulia se observa una ligera disminución hacia la parte más alta de la conductividad hidráulica siendo esta de entre 0.1 y 10 m/d. En la zona donde aflora la Formación Sincelejo se evidencia aún más una disminución en la conductividad hidráulica reportada en las pruebas de bombeo de entre 0.01 a 0.5 m/d. Sin embargo, a partir de estos resultados las formaciones presentes en la zona de estudio y consecuentemente en el dominio de modelación presenta valores de medio a altos de conductividad hidráulica al menos en los primeros 200 m de profundidad, dando cuenta de materiales menos consolidados y con litología en su mayoría arenosa o conglomeráticas.

Respecto a la caracterización hidroquímica, realizada con el fin plantear hipótesis de flujo que aporten al modelo conceptual hidrogeológico, se analizaron registros secundarios de pH y conductividad eléctrica y registros primarios de iones principales. Mediante un análisis estadístico de componentes principales y clúster se identificaron tres regiones bien diferenciadas: la región C1 ubicada en centro y suroriente (río Cauca) que tiene un ambiente sedimentario fuertemente influenciado por el complejo ígneo-metamórfico de la Serranía de San Lucas, presenta un alto contenido de minerales reactivos con una diversidad relativa de iones solubles en agua (bicarbonato y calcio) por lo que la correspondiente meteorización.

La región C2 ubicada en el suroccidente de la zona de estudio tiene un ambiente de formación continental, con un contacto significativo con aguas provenientes de la precipitación atmosférica y menor disponibilidad de rocas meteorizables, genera perfiles químicos en el agua subterránea de menor carga iónica total, pH intermedios y mayor evolución. Finalmente, la región C3 ubicada en la región centro norte comprende el complejo cenagoso que es un ambiente sedimentario de baja energía es abastecida por aguas aluviales y subterráneas provenientes de la zona C1 y C2 que en su trayectoria han experimentado fenómenos de evolución química e intercambio iónico adquiriendo un perfil con mayor concentración de sólidos disueltos, pH intermedio-altos y concentración iónica variada pero ligeramente endurecida.

En la datación de agua subterránea con 14C, se observó edades mayores a mil años, atisbando con esto tiempos de tránsito largos en el agua subterránea captada por los pozos en donde se obtuvo la muestra. Se puede concluir que en la formación Betulia presenta un gradiente (edad vs profundidad total del pozo) menor en edad respecto a las formaciones cuaternarias, es decir que a profundidades mayores en Betulia se encuentran edades menores que en las formaciones Cuaternarias del centro de La Mojana. También, en la distribución espacial de los pozos con edad estimada de 14C, se observa que en el centro de La Mojana los tiempos de tránsito son mayores y así mismo un flujo desde las partes más altas (contornos) de la zona de estudio hacia el complejo cenagoso, tal y como se presentan en la piezometría y en análisis hidroquímico.

Se realizó un ejercicio de calcular la recarga potencial mediante la metodología propuesta por el IDEAM. Se observa que las zonas con mayor potencial de recarga se encuentran al norte de la cuenca geológica representado por la Formación Caucasia, en menor proporción al oeste de la zona donde a pesar de que su recarga potencial es baja representa una buena zona para la infiltración de agua al sistema hidrogeológico.

Respecto a la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero mediante la metodología FDRASTIC para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, se pudo evidenciar que la categoría predominante de la evaluación del riesgo por esta metodología corresponde al V5 “fácil de ser contaminada (V5)”. Los municipios que

presentan una mayor susceptibilidad a la contaminación son Ayapel, Majagual, Sucre, San Benito, Achí y Guaranda.

Con el anterior trabajo realizado, se implementó un modelo hidrogeológico numérico de las formaciones más recientes del VIM (Neógeno – Cuaternario) correspondientes a las unidades los depósitos cuaternarios (Paludales, Terrazas aluviales, Antiguo Abanico aluvial de La Mojana/Cauca, depósitos y abanicos aluviales recientes), la formación Betulia, la formación Sincelejo, la formación Caucasia y una unidad que agrupa las formaciones del Carmen, Porquera Cerrito y Tubará. Siendo el límite inferior hidrogeológico las unidades de roca Ígneo-metamórfico considerado como basamento hidrogeológico. Se construyó una malla estructurada de 1000 m de píxel (tamaño de celda), con lo cual para el dominio del modelo se obtiene un total de 220 filas y 131 columnas. La discretización vertical consta de cinco (5) capas en donde se realizó la zonificación paramétrica de acuerdo con las unidades geológicas cuya geometría se extrajo del modelo geológico 3D.

De acuerdo con del dominio de modelación, el modelo se encuentra limitado por zonas de no flujo, en la mayor parte del modelo esto responde a zonas que por sus características litológicas o hidráulicas restringen el flujo al modelo. Sin embargo, para el área noroccidental se definió una zona de GHB (General Head Boundary) la cual define una carga constante distante de la zona de modelación, a pesar de representar el límite de la cuenca hidrológica, la geometría de la cuenca geológica sumado a los niveles del acuífero de Morroa se puede asumir que la divisoria de aguas superficial no coincide con la divisoria de aguas subterráneas y existe un flujo adicional a la recarga.

La metodología de calibración se basó en un análisis cuantitativo a través de las mediciones de niveles piezométricos en toda la zona de estudio y un análisis cualitativo a través de la salida de flujo base en la superficie del modelo y la comparación espacial con las manchas de agua de los cuerpos hídricos superficiales. A partir de los resultados arrojados por múltiples corridas del modelo en estado estacionario, y la evaluación del desempeño del modelo con los niveles piezométricos medidos en campo y recopilados de información secundaria, se obtuvo una calibración con un RNS de 10.94 y un NMRS de 8.17% lo que indica que a pesar de la incertidumbre tanto en la parametrización del modelo, como los datos

utilizados para calibrar, este es un resultado que indica un desempeño aceptable y más aún si se trata de un modelo regional.

En la fase de calibración las isopiezas o la distribución de carga hidráulica para cada capa del modelo presentan un gradiente de flujo regional que tiene como principal dirección el núcleo de La Mojana (zona más baja del dominio de modelación), es decir gradiente de flujo desde la parte alta de los afloramientos de las formaciones Betulia, Sincelejo y la unidad que agrupa las formaciones del Carmen, Cerrito y Porquera hacía los depósitos cuaternarios del núcleo, sin embargo, se observan pequeños flujos locales hacía los depósitos aluviales de algunos cauces menores. Al sur del dominio de modelación en la formación Caucasia se observa que la principal zona de descarga es el aluvial del río Cauca, que finalmente tiene dirección sur norte hacía la ciénaga de Ayapel y el núcleo de La Mojana. Estos comportamientos se mantienen en profundidad debido a que no existe algún sello regional (unidad hidrogeológica impermeable) que genere un cambio de este patrón. Debido a que los datos de niveles piezométricos corresponden a puntos de agua con profundidades menores a 150 m y los resultados del flujo a partir del tránsito en la zona NO saturada se realiza en la capa superficial, los valores de conductividad obtenidos son pertinentes para las formaciones que afloran y más someras del modelo.

Como última etapa del proyecto, se programaron y ejecutaron exitosamente dieciséis (16) talleres que tenían como fin la socialización de los resultados del proyecto. Cada uno de los talleres fue desarrollado bajo los intereses y/o misionalidad del público objetivo. El balance en la respuesta de los actores involucrados fue satisfactoria dada la participación de los asistentes, ya que su disposición en las diferentes etapas de los talleres dio lugar a profundizar temas generales o puntuales, propiciar procesos de retroalimentación, plantear futuras rutas de trabajo en pro de la gestión del recurso hídrico, buscar alternativas de difusión de esta información y llevarse un conocimiento adicional sobre el funcionamiento integral del sistema hídrico de La Mojana.

2 DESCRIPCIÓN DE PRODUCTOS

2.1 Producto 1: Recolección de información secundaria y balance hídrico

2.1.1 Objetivos del producto 1

Objetivo 1: Recopilación de información secundaria

Recopilar información proveniente de estudios previos, archivos e instituciones locales, regionales y nacionales. La información en cuestión incluye: inventario de pozos y piezómetros, mapas geológicos e hidrogeológicos, estudios hidrogeoquímicos e información hidrometeorológica. Los resultados de pruebas de bombeo, estudios geofísicos y columnas litológicas también serán de gran utilidad.

Objetivo 2: Cálculo del balance hídrico

Desarrollar un balance hídrico de las cuencas relacionadas con el acuífero regional de La Mojana. Esta actividad también incluirá la construcción de hidrogramas de flujo en las estaciones disponibles con el fin de investigar las interacciones superficie-subsuelo.

2.1.2 Descripción del producto 1

El producto uno se encuentra estructurado en dos tomos correspondientes a los resultados de dos actividades principales. El tomo uno corresponde a la recopilación de la información secundaria. El tomo dos presenta el cálculo del balance hídrico.

Como resultado de la primera actividad, se obtuvo un inventario de información suministrada por algunas entidades públicas y una base de datos que se alimentó de una revisión bibliográfica exhaustiva de los reportes institucionales, informes de consultoría, documentos de carácter académico y científico más relevantes, que reportan estudios y estrategias encaminadas a la conservación del recurso hídrico en La Mojana.

El resultado de la actividad dos, presenta un balance hídrico general de toda la región con el fin de entender la dinámica de las aguas superficiales en la región.

La recopilación de información se presenta en el Tomo 1. El documento se estructura de la siguiente forma: Este capítulo uno corresponde a una descripción general de la zona de estudio. El capítulo dos contiene los antecedentes que se deben tener en cuenta para el desarrollo del proyecto. El capítulo tres se orienta en presentar las actuaciones del Fondo Adaptación y de PNUD en La Mojana. El capítulo cuatro presenta la información recopilada en esta primera etapa del proyecto. El Capítulo cinco describe la información recopilada por cada componente del modelo hidrogeológico conceptual presentado en la Guía metodológica PMAA. Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones de esta primera etapa de recopilación de información.

En el Tomo 2 se presenta los resultados del balance hídrico realizado. En el capítulo uno se hace referencia a una delimitación para los análisis hidrológicos, el cual se basó en el estudio ya realizado por el Fondo Adaptación con la cual se busca abarcar no solo la región sino las zonas afluentes a esta. El capítulo dos se orienta en presentar la conectividad de La Mojana con las cuencas afluentes, lo cual permite entender la complejidad del hidrosistema e identificar la influencia que sobre esta tienen gran parte del territorio nacional. En el capítulo tres se presenta un inventario de la información disponible hidrológica y climatológica en cuanto a registros de mediciones realizado por el IDEAM en la región, esta información corresponde a la solicitada al IDEAM por medio del PNUD para su posterior análisis y uso en los modelos que se desarrollen en el proyecto.

2.1.3 Resultados del producto 1

2.1.3.1 Recopilación de información secundaria

Se recopilaron 203 documentos y archivos digitales con estudios técnicos y socioeconómicos relativos al recurso hídrico (con énfasis en aguas subterráneas) en la zona de La Mojana. A partir de un análisis de cantidad de documentos publicados con relación al estudio se puede concluir que existe un equilibrio aproximado en la producción de documentos entre las instituciones estatales (Corporaciones autónomas regionales, entes territoriales, IDEAM, SGC, etc.), la academia y la consultoría realizada a través de empresas privadas. Este análisis se refiere únicamente en cantidad y no discrimina por relevancia, alcance o extensión del estudio realizado.

La importancia de los depósitos cuaternarios en el área de La Mojana se debe al componente de la recarga directa por infiltración al acuífero y la explotación somera que se hace del mismo en la zona. Sin embargo, la información disponible se limita a geología superficial y geología del petróleo, siendo esta última con objetivos superiores a los 1000 metros de profundidad. Aunque son de utilidad para entender la evolución, emplazamiento y dinámica de la cuenca geológica que embebe la depresión Momposina, la información detallada de registros de pozo (registros eléctricos o descripciones de pozo) debe ser procesada y consultada, siendo está limitada a puntos discretos en el área de estudio.

En el inventario de puntos de agua se recopilaron 2700 puntos de observación subterránea consultados en SGC, IDEAM, Hidroceron, Universidad de Córdoba e INGEOMINAS. De este grupo de pozos, manantiales o aljibes solo 1700 se encuentran dentro del área de estudio. Con una mayor densidad de información en los departamentos de Sucre y Córdoba en relación a los departamentos de Bolívar y Antioquia.

A partir del año 2003 se han venido adelantando avances en el estudio de la caracterización fisicoquímica e isotópica del agua subterránea. Dentro de los principales autores se resaltan INGEOMINAS (2003), Betancur (2007), Hidroceron (2014) y Marrugo (209). Este último ha profundizado en la contaminación por mercurio resultado de las actividades mineras de la zona.

En relación a los proyectos y estudios hidrológicos ejecutados en la zona de estudio, solo hasta el *Plan De Acción Integral para la Reducción del Riesgo de Inundaciones y Adaptación al Cambio Climático en la Región de La Mojana*, elaborado por el Fondo de Adaptación en el año 2016, se cambia la visión de cómo intervenir la región en relación al riesgo por inundaciones y se incorpora a las soluciones técnicas otras dimensiones de tipo social, económico y ambiental. Debido a que en años atrás se pensaba en soluciones enfocadas en la construcción de obras de infraestructura que servían a corto plazo, pero que a lo largo del tiempo han modificado el régimen hidrológico, las dinámicas ecosistémicas y la vida de las personas.

Respecto a los parámetros hidráulicos de las formaciones acuíferas cono influencia en la zona de estudio solo se presentan valores deducidos a partir de descripciones relativas a la composición litológicas de dichas formaciones. No se encontraron reportes de pruebas de bombeo (datos crudos o interpretaciones).

Información relativa a niveles piezométricos en Hidroceron (2014) se cuenta con 37 puntos de agua subterránea (pozos) con profundidad de nivel estático y en Betancur and Palacio (2009) 52 puntos de agua subterránea con sus niveles piezométricos.

En cuanto al desarrollo de modelos hidrogeológicos conceptuales en la zona de estudio (La Mojana), se ha desarrollado el Modelo Hidrogeológico Conceptual del acuífero del Bajo Cauca Antioqueño (límite sur), el Servicio Geológico Colombiano ha generado los mapas hidrogeológicos de los departamentos de Sucre y Córdoba (a escala 1:250.000) donde se incluye el acuífero de La Mojana. Hidroceron Ltda (2014) realizó un estudio para la caracterización hidrogeológica conceptual de la región de La Mojana.

Únicamente se encontró un modelo hidrogeológico numérico realizado por Betancur and Palacio (2009) para el acuífero del Bajo Cauca Antioqueño.

2.1.3.2 Cálculo de balance hídrico

Al no contar con la información de registro del IDEAM a la fecha de edición de este informe, en el capítulo cuatro se realizó un balance hídrico con información climatológica obtenida de la recolección de estudios previos realizados en la región, de donde se logró extraer series hidroclimatológicas que permitieron la estimación de los procesos del ciclo hidrológico y hacer un balance hídrico distribuido de la región. En el último capítulo del documento se calculan los flujos base en las estaciones con mediciones caudal dentro de La Mojana, con el fin de analizar cómo es el comportamiento de la relación entre el agua superficial y los flujos subsuperficiales en la región. El balance hídrico final se presenta en el producto 5, el cual fue realizado mediante la modelación hidrológica de la zona de estudio utilizando la herramienta SWAT.

Al ser La Mojana una zona de confluencia entre los principales ríos de la cuenca Magdalena Cauca, la climatología y eventos antrópicos de esta cuenca a lo largo de su extensión tiene gran incidencia sobre los caudales presentes en la región, por tanto, el entendimiento del comportamiento de los caudales y su distribución en el territorio requiere el análisis de los caudales generados por fuera de La Mojana.

Debido a la topografía del territorio, la conectividad hidráulica entre los diferentes cuerpos de agua loticos y lenticos presentes en La Mojana no es constante, esta depende de la magnitud de los flujos de agua provenientes de zonas externas a la región y de los flujos internos, por lo tanto, la dinámica de esta conectividad está asociada a factores morfométricos del territorio y estacionales de los caudales de entrada a la zona.

La región por su extensión presenta una variación fuerte en el comportamiento climático, siendo la zona norte un territorio de mayores temperaturas lo que favorece un mayor nivel de evapotranspiración potencial, sin embargo por tener niveles más bajos de precipitaciones en el año la evapotranspiración real se disminuye, mientras que la zona sur, de donde vienen los principales afluentes a La Mojana se caracteriza por una pluviosidad alta, lo que favorece el incremento de agua disponible para el proceso de evapotranspiración.

La escorrentía generada dentro de la región resultante del balance hídrico climatológico muestra su comportamiento fuertemente ligado a la disponibilidad del agua proveniente de

la precipitación, sin embargo, la formación de lagunas y ciénagas está altamente influenciado por la topografía del terreno y por lo caudales externos que entran a La Mojana, por lo que se observa predominancia de cuerpos lenticos en el sector norte y occidental de la región, la cual son las áreas de menor altitud.

Debido a la complejidad que significa la variación temporal de la conectividad y los estudios hidrológicos de La Mojana se han enfocado en representar escenarios o situaciones puntuales de ocurrencia de algunos eventos en los cuales se tenga información que permita establecer una condición temporal de la región.

Teniendo en cuenta que La Mojana recibe en promedio 1.364 m3/s del río Cauca, 837 m3/s del río Nechí, 236 m3/s del río San Jorge, 2.820 del Brazo de Loba (río Magdalena) y que a su salida el caudal del brazo de Loba es de 5.524 m3/s, se calcula que en promedio se está generando una retención media de 265 m3/s de agua en la región, lo que puede indicar que esta zona es de gran importancia para la regulación de los caudales de excesos de estas cuencas disipando los grandes volúmenes de agua y sedimentos de estos ríos y reteniéndolos, incrementando así los espejos de agua y provocando inundaciones naturales pro medio de procesos ocurren de firma periódica y constante.

Al ser La Mojana una zona de confluencia entre los principales ríos de la cuenca Magdalena Cauca, la climatología y eventos antrópicos de esta cuenca a lo largo de su extensión tiene gran incidencia sobre los caudales presentes en la región, por tanto, el entendimiento del comportamiento de los caudales y su distribución en el territorio requiere el análisis de los caudales generados por fuera de La Mojana.

Debido a la topografía del territorio, la conectividad hidráulica entre los diferentes cuerpos de agua loticos y lenticos presentes en La Mojana no es constante, esta depende de la magnitud de los flujos de agua provenientes.

La conectividad de los cuerpos de agua con el subsuelo constituye un factor determinante en la dinámica hídrica que define los caudales y niveles de los sistemas hídricos en la región. La permanencia de los caudales de los grandes ríos que entran a la región de La Mojana depende principalmente de los flujos base que se generan en sus cuencas, estos mantienen los flujos de agua durante las épocas seca en La Mojana.

Los caudales base generados en el sector occidental de La Mojana, son bajos y no garantizan la permanencia de los ríos en esta zona, lo que les da aún más importancia a las aguas provenientes de cuencas externas como Nechí, Cauca y San Jorge.

La metodología analítica para determinar los flujos base en La Mojana, no representa fielmente lo que ocurre en los caños que conectan varios cuerpos de agua, ya que la curva de recesión de los caudales de estos cuerpos de agua está afectada por el comportamiento d ellos niveles de los sistemas hídricos con los cuales se tiene conectividad superficial.

2.2 Producto 2: Inventario de pozos y Análisis GAP

2.2.1 Objetivos del producto 2

Objetivo 1: Inventario de pozos de bombeo y monitoreo

Desarrollar un inventario de los pozos en La Mojana de acuerdo con el Formato Único Nacional de Inventario de Aguas Subterráneas. El inventario debe incluir la ubicación (coordenadas en el sistema Magna-Sirgas), la profundidad y las tasas de extracción. Se utilizará una sonda piezométrica para medir la profundidad de los niveles de agua considerando variabilidad climática en los puntos identificados como insumo para elaborar mapas de isohipsas. Esta actividad también incluye una identificación previa de los puntos de recolección de pruebas físicas y químicas, iones principales e isótopos estables. Como mínimo, se deben identificar cincuenta (50) puntos. También quedará establecida la necesidad de realizar pruebas de bombeo y los lugares en donde se llevarán a cabo.

Objetivo 2: Análisis GAP

Construcción de cortes geológicos correlacionados con las columnas estratigráficas, interpretaciones geofísicas y parámetros geoquímicos disponibles que fueron medidos y recolectados en estudios previos. Con lo anterior será posible llegar a identificar aquellas zonas en donde sea necesario realizar un estudio más profundo (p. ej., de naturaleza geofísica o de perforaciones). También quedará establecida la necesidad de realizar pruebas de bombeo y los lugares en donde se llevarán a cabo. Esto es, una vez realizado el plan de monitoreo, debe haber una metodología que explique el alcance y el orden en que se van a desarrollar las actividades en los pozos.

2.2.2 Descripción del producto 2

Este producto se encuentra estructurado de la siguiente manera: El capítulo uno hace referencia a la interrelación que se tiene entre las aguas superficiales y subterráneas en La Mojana. Esto de cara al acople que se desea tener entre los modelos numéricos hidrológico-hidrodinámico-hidrogeológico. Se presenta el modelo sintético en el que se quiere evaluar el acople.

El capítulo dos presenta el análisis de la información hidrológica donde se contextualiza el origen de los elementos geográficos referentes a suelos, coberturas vegetales, hidrografía y unidades mínimas de análisis hidrológico (cuencas), empleados como entradas base en la estructuración del modelo hidrológico superficial.

El capítulo tres describe la información relevante para el estudio de la dinámica del sistema desde la perspectiva hidrodinámica, incluyendo una revisión de la información relevante disponible para la región.

En el capítulo cuatro se presenta el contexto geológico regional y local a partir de la información recopilada principalmente en el Servicio Geológico Colombiano-SGC y las litologías descritas por pozos pertenecientes a empresas operadoras. Se presenta los lugares en donde se concentra la información litológica y se resalta la falta de este tipo de información en la zona de estudio.

El capítulo cinco despliega el análisis de la información geofísica recopilada, haciendo un importante énfasis en las líneas sísmicas 2D. Si bien estas líneas están bien distribuidas en la zona de estudio, la información proporcionada por estas es poca para el cuaternario.

El capítulo seis presenta dos perfiles geológicos 2D generados principalmente a partir de la información de las líneas sísmicas y de los registros de los pozos de las empresas operadoras.

El capítulo siete hace referencia al análisis de la información hidrogeológica recopilada. Se inicia con la descripción de la hidrogeología a escala regional y local. Luego se presenta el inventario de puntos de agua con su respectiva base de datos y se analiza la hidroquímica, isotopía y la hidráulica de los acuíferos presentes.

El capítulo ocho presenta las áreas seleccionadas para realizar las tomografías y la metodología usada para la selección de los puntos en donde se desarrollará el inventario de pozos, las pruebas de bombeo y el muestreo fisicoquímico e isotópico.

En el capítulo nueve se presenta una propuesta sobre una plataforma de manejo y gestión integrada de la información buscando propiciar un espacio de discusión de lo que se considera son las necesidades con relación al manejo de la información y presentación de resultados del proyecto.

Vale la pena mencionar que, la actividad de elaborar un inventario de puntos de bombeo y monitoreo propuesta como primer objetivo de este producto, no se llevó a cabo en su totalidad ya que, se debía realizar un trabajo de campo en la zona de estudio, pero debido a la emergencia sanitaria relacionada con el COVID-19 no se pudo realizar dicho trabajo. Este contratiempo fue expuesto en la reunión con el comité supervisor del contrato realizada y se determinó que las actividades de campo que no se realizaron para este producto se realizarán en simultaneo con las actividades de campo planteadas para el producto tres y sus resultados se presentarán en este mismo.

2.2.3 Resultados del producto 2

La recopilación de la información geológica indica que la cartografía geológica oficial disponible difiere tanto en nomenclatura como en el criterio geológico, lo que dificulta tener claridad sobre la secuencia litoestratigráfica y la distribución de las diferentes unidades a lo largo y ancho de la región. Esto complica la interpretación hidrogeológica relacionada con estas unidades formacionales. Por esta razón y por la extensión del área a analizar en este proyecto (PUJ-PNUD) se decidió trabajar a partir del Atlas Geológico de Colombia escala 1:500.000 del año 2015, en el cual el área de interés se encuentra cubierta por las planchas 5-04 y 5-06.

Por otra parte, en cuanto a la información del subsuelo, se tienen en total 75 perforaciones con información estratigráfica, litológica o geofísica. Sin embargo, es importante resaltar que esta información casi en su totalidad es de origen petrolero y por consiguiente sus objetivos no son precisamente los depósitos cuaternarios. Por esta razón, aún estas perforaciones son

útiles para analizar la estructura geológica a nivel regional, es indispensable realizar exploraciones específicamente en la secuencia cuaternaria para poder comprender mejor la distribución espacial de las unidades litológicas que la conforman y de esta manera mejorar las interpretaciones hidrogeológicas.

Se realizó una recopilación de la información geofísica disponible contenida en sondeos geoeléctricos, líneas sísmicas y registros de pozos. De los ensayos geoeléctricos en la región el 44% (79 de 178 de sondeos) está constituido entre SEVs y tomografías eléctricas que presentan información útil de interpretación teniendo en cuenta las limitaciones del método. Esto solo permite realizar una conceptualización general del medio geológico debido a la limitada información en el espacio y en profundidad, siendo mayor este vacío en el núcleo de La Mojana.

Las líneas sísmicas 2D representadas en imágenes sísmicas constituyen una información útil debido a que exhibe en la mayoría de los casos un buen detalle de la geometría de la cuenca. Sin embargo, es de tener en cuenta que estas imágenes sísmicas se encuentran en el dominio del tiempo por lo que la ubicación en profundidad puede no ser exacta, adicionalmente el método pierde resolución en los primeros cientos de metros por lo que para estudios someros se ve limitada.

Los registros de pozo presentan una información a una resolución detallada en profundidad, se evaluaron dos registros: Litología Interpretada y Gamma Ray, estos representan información litológica que a pesar de no ser usual de incluir en estudios hidrogeológicos contienen una información de detalle. Sin embargo, es de aclarar que el procesamiento, interpretación y evaluación de estos registros no hacen parte de los alcances de este estudio.

Para entender la hidrogeología regional del presente estudio, se revisó la información institucional disponible en los Estudios Nacionales del Agua, en sus versiones 2010, 2014 y 2018, donde se evidenció que la provincia hidrogeológica relevante para este estudio es la No. 14 Valle Bajo del Magdalena. En esta se encuentran ubicados los acuíferos de La Mojana, depósitos aluviales del río San Jorge, Acuífero Sincelejo, Acuífero Betulia Arenoso y Acuífero El Cerrito. Por otra parte, en la delimitación de las extensiones de los sistemas de acuíferos del Estudio Nacional del Agua (2014), se evidencia que se presentan ambigüedades

entre las continuidades de las unidades geológicas y la división política-administrativa de los departamentos de Sucre y Córdoba (acuífero Morroa) y Córdoba y Antioquia (acuífero del Bajo Cauca Antioqueño), esto influye en cómo interactúan estos acuíferos con el acuífero de La Mojana. De esta manera, se puede inferir que la conexión entre los acuíferos del bajo Cauca Antioqueño y Morroa con relación al acuífero de La Mojana, no es clara y necesita ser estudiada con más rigurosidad.

De igual manera, se revisó la información del Atlas de Aguas Subterráneas escala 1:500.000 en las planchas 5-04 y 5-06, donde se identificaron las provincias hidrogeológicas y los sistemas de acuíferos relevantes en este estudio. Las provincias hidrogeológicas son la Costera Vertiente Atlántica y Andina Vertiente Atlántica y los acuíferos cuaternarios más importantes ubicados en estas son: Acuífero Betulia Arenoso y Acuífero La Mojana. Adicionalmente, se menciona la vulnerabilidad de los mismos a la contaminación con categoría Alta, lo que se entiende como acuíferos vulnerables a muchos contaminantes, excepto aquellos que son rápida y fácilmente biodegradables.

Finalmente, para entender la hidrogeología local se revisaron principalmente tres fuentes de información secundaria de estudios realizados en el área de La Mojana y sus alrededores, los cuales son: 1) proyecto de evaluación de impactos de Hidro Ituango entre la Universidad Nacional y las Empresas Públicas de Medellín (2020), 2) Modelación Hidrodinámica de la región de La Mojana de HIDROCERON (2014) y 3) Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero del Bajo Cauca Antioqueño de CORANTIOQUIA (2014). Esto con el fin de estudiar los sistemas de acuíferos encontrados y definidos en estos estudios, y los parámetros hidráulicos y otra información relevante para este proyecto.

El inventario de puntos de agua (pozos, aljibes y manantiales) recopiló registros de los cuatro departamentos involucrados en el área de estudio, de los cuales solo una cuarta parte de los registros están ubicados en el núcleo de La Mojana (1777 registros). Esta recopilación incluyó temáticas asociadas a caudales, niveles, pruebas de bombeo, hidrogeoquímica e isótopos. Sin embargo, esta información temática está concentrada en zonas aledañas al núcleo de La Mojana. Según este inventario, los municipios de Guarandá, Nechí y San

Jacinto del Cauca son los municipios que cuentan con la menor densidad de registros recopilados.

Así mismo las muestras con iones mayoritarios que cumplen balances iónicos son sumamente escasas (5 puntos de monitoreo) por lo que un posible análisis de interacción agua-roca es inviable con tan pocas muestras. Por su parte, los registros de pH tienden a pasar de neutros a básicos a medida que se desplaza hacia el sector noroccidente y presentan una correlación moderada con la profundidad de los pozos. En contra parte, la conductividad eléctrica no responde de igual manera al no reconocerse una tendencia espacial ni en profundidad. Finalmente, la temperatura no cuenta con suficientes registros que permitan realizar una aproximación de tendencia espacial o en profundidad.

La recopilación de registros isotópicos reunió un total de 151 registros entre deuterio, oxigeno 18, tritio, carbono 13 y carbono 14, de los cuales en el núcleo de La Mojana 44 puntos de observación de agua cuentan con medición de deuterio y oxigeno 18 y solo 6 de estos puntos cuentan con mediciones de tritio. Adicionalmente, se referenciaron las diferentes líneas meteóricas tales como: global, Colombia, Alto Cauca, Morroa y Mojana. Donde las dos últimas (Morroa y Mojana) se desplazan por debajo de las líneas mundial y Colombia hasta en 5 unidades, mientras que la propuesta para río Cauca se encuentra desplazada por encima de estas mismas hasta en 2 unidades. En cuando a la concentración de oxígeno 18 y la elevación del punto de muestra se logró identificar un comportamiento general de la totalidad de los registros a un empobrecimiento de este isótopo al incrementar la altura.

Se realizó una superficie piezométrica con 635 puntos (18% de los puntos de agua productivos o de explotación) que cuentan con al menos un registro de profundidad de nivel, no se diferenció por fecha de la toma del dato, profundidades o formaciones geológicas. También se recurrió a un DEM de 25x25m para generar las cotas de superficie de los puntos generando un error medio 7metros. Sin embargo, debido a la carencia de información este es un análisis de carácter exploratorio.

Sin embargo, a partir de la superficie piezométrica generada se puede observar un gradiente de flujo hacía el núcleo de La Mojana, alimentado desde las zonas altas del cinturón plegado

de Sinú, también desde el bajo Cauca Antioqueño, teniendo salida de flujo en la zona del brazo de loba del río Magdalena. Sin embargo, es evidente que en la zona del núcleo de La Mojana hay un vacío de puntos para realizar la interpolación, y por consiguiente este resultado es más de carácter esquemático y preliminar.

Se registraron en la base de datos para el área de estudio un total de 52 pruebas de bombeo (ninguna reporta pozo de observación), todas a caudal constante. Sin embargo, únicamente 6 reportan los datos crudos, para realizar una posible reinterpretación o generar diagramas diagnósticos y evidenciar "otros" procesos. Los caudales extraídos en las pruebas son en promedio de 3.2 l/s. La conductividad hidráulica que se reporta a partir de la interpretación varia en 3 órdenes de magnitud (0.03 – 3.27) m/d.

Se cuentan con 534 con registros de caudales de extracción (15.4% de los puntos de agua subterránea registrados en la base de datos - 3450puntos) y a partir de estos datos el caudal de extracción en la zona de estudio es aproximadamente 1.7 m3/s (esto es una subestimación de la demanda de agua subterránea debido a los pocos datos con caudal comparado con el inventario de puntos).

El caudal promedio de extracción es de 4.6 l/s con un bombeo diario superior a las 12 horas. Además, la mayoría de los puntos reportan un uso de abastecimiento público o doméstico. Sin embargo, un alto porcentaje de puntos no registran la información del uso de agua.

A partir del análisis exploratorio (espacial y temporal) de los puntos que cuentan con algún tipo de información hidráulica (niveles piezométricos, caudales de extracción y pruebas de bombeo – parámetros hidráulicos) se puede concluir que existe un importante vacío de información en la zona centro y sur-oriental del núcleo de La Mojana, específicamente en los municipios de Majagual, Sucre, San Jacinto del Cauca, Ayapel, Nechí y la zona sur del municipio de San Benito de Abad.

Para mitigar los problemas de información y de manera contractual se seleccionaron unos puntos para realizar las pruebas de bombeo y muestreo hidroquímico. El criterio de selección se estableció a partir de la ubicación, accesibilidad (cercanía a una vía), certeza de que el punto este activo y sea productivo, y en la cantidad de información disponible de sus características (tipo de punto, profundidad, ubicación y tipo de bomba).

Debido a la emergencia sanitaria nacional relacionada con el COVID-19 se escogieron 18 puntos de manera prioritaria para los municipios de Ayapel, Majagual y Sucre. Posteriormente, se realizó una preselección de 88 puntos en los 8 municipios restantes en el área de estudio, de los cuales se escogieron 32, para un total de 50 puntos.

2.3 Producto 3: Trabajo de campo

2.3.1 Objetivos del producto 3

Objetivo 1: Pruebas de bombeo hidráulico

Realizar al menos 50 pruebas de bombeo con recuperación total (es decir, hasta 24 horas). La prueba de respuesta a pulsos de presión (Slug Test) se realizará cuando pueda esperarse una recuperación de corta duración y cuando la profundidad de los pozos sea inferior a los 6 m.

Objetivo 2: Prueba de isótopos, física y química

Esta actividad incluye pruebas físicas y químicas in situ (por ejemplo: pH, temperatura, conductividad eléctrica) en pozos subterráneos y aguas superficiales. También se realizarán pruebas de los principales iones (Ca, Mg, Na, K, HCO3, CO3, SO4) e isótopos (Deuterio, Oxígeno-18, C14 y C13) en lugares seleccionados. Se incluirán al menos 50 pruebas de los principales iones y 30 de los principales isótopos, además de pruebas fisicoquímicas.

Objetivo 3: Estudio geoeléctrico

Realizar al menos 20 tomografías geoeléctricas en 2D (AB/2=500 m). El lugar del estudio se definirá con base en el análisis GAP. La interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y de la tomografía eléctrica contribuirá a mejorar la construcción del Modelo Conceptual Hidrogeológico.

2.3.2 Descripción del producto 3

El producto tres se encuentra estructurado de la siguiente manera: Tomo 1. Trabajo en campo realizado en el segundo semestre del año 2020. Tomo 2. Análisis de resultados de la fase de trabajo de campo y estudio geoeléctrico y tomo 3 que presenta los avances realizados a la fecha del modelo hidrológico e hidrodinámico del proyecto.

El tomo 1 contiene los siguientes capítulos: Capítulo uno: Detalla el inventario de pozos de agua subterránea realizado durante la campaña de campo en los municipios de La Mojana. Este capítulo se realiza con el fin de complementar el inventario de pozos de agua presentado en el producto 2 de este proyecto. Capítulo dos: Referencia la metodología que se utilizó para realizar las pruebas de bombeo. Capítulo tres: Describe el protocolo general empleado para realizar el muestreo hidrogeoquímico e isotópico en los pozos de agua subterránea, aguas superficiales y manantiales. Capítulo cuatro: Presenta los compromisos cumplidos por parte de la PUJ en el monitoreo de salvaguardas sociales y ambientales.

El tomo 2 contiene los siguientes capítulos: En el capítulo uno, se mencionan los principales insumos utilizados, el procedimiento realizado utilizando el software MAGNET Tools versión 4.2.0 y los resultados obtenidos de las alturas ortométricas y coordenadas definitivas (latitud-longitud) de las bocas de los pozos de bombeo en el área de influencia del proyecto. El capítulo dos, presenta el análisis de las 50 pruebas de bombeo realizadas en la campaña de campo. En el capítulo tres, se detallan los resultados del muestreo hidrogeoquímico correspondiente a 51 muestras de agua subterránea medidas en campo. Allí se especifican las variables obtenidas directamente en campo o en el laboratorio de estudios ambientales de la Universidad de Antioquia. Los resultados de las variables fisicoquímicas son espacializados junto con los principales estadísticos. Se incluyen los balances iónicos y la respectiva matriz de correlación entre estas variables. A partir de los iones mayoritarios se realiza un análisis de componentes principales y clustering los cuales son proyectados en un diagrama de Piper

con el fin de evaluar los tipos de agua. Finalmente se evalúan las mediciones con la normativa ambiental vigente.

En el capítulo cuatro, se presenta la localización del muestreo isotópico de ^{13}C, ^{14}C, 3H, 2H y ^{18}O y describe el porqué de la selección de puntos y el porqué del isótopo a medir según el punto.

En el capítulo cinco, se referencian los resultados del estudio geoeléctrico, el cual corresponde a 20 tomografías tomadas en la campaña de campo. En esta sección se realiza una descripción corta de la selección de puntos, adquisición, procesamiento de los datos y limitaciones del método.

El capítulo seis, resume el proceso de construcción, interpretación y avances del trabajo adelantado referente a la elaboración de un modelo geológico 3D para el núcleo de La Mojana

En el capítulo siete, se presenta el mapa hidrogeológico preliminar, construido a partir de información secundaria de la geología (mapa de las unidades aflorantes), litología y limitada información hidrogeológica de campo encontrada en la literatura. También se presentan los 20 cortes hidrogeológicos que cruzan el núcleo de La Mojana.

El tomo 3 contiene los avances en procesamiento de la información que sé que se utilizaría en la construcción de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

El primer capítulo del tomo 3 se presenta el procesamiento y análisis realizado a la información disponible de topografía, coberturas y suelos, las cuales constituyen el principal insumo cartográfico que define el comportamiento del agua en el modelo hidrológico. Para el caso de las coberturas se analizó el comportamiento en el tiempo de la variación de cada uno de los niveles de clasificación de la metodología Corine Land Cover y se homologó esta clasificación a los tipos con los que se cuenta en las bases de datos del SWAT. Debido a que la información proviene de diferentes fuentes se unificó en una capa única donde se estandarizaron los campos de las propiedades físicas y químicas de los diferentes tipos de suelo encontrados en un base de datos para su utilización en el modelo hidrológico.

En el segundo capítulo del tomo 3 se discuten los avances realizados de la generación de entradas de información del modelo hidrodinámico a ser aplicado en la región de La Mojana. La presente sección se divide en dos partes: la primera parte presenta las diferentes capas de

información creadas con el fin de establecer características físicas y condiciones iniciales del modelo, tales como la digitalización manual de los caños, ríos y ciénagas presentes en la zona de estudio. La segunda discute la metodología y los resultados obtenidos de la refinación del Modelo de Elevación Digital (DEM) que se tomó como base el elaborado por el Fondo Adaptación (2015), esta sección se constituye como el núcleo de este capítulo.

2.3.3 Resultados del producto 3

2.3.3.1 Inventario de pozos y pruebas de bombeo

El inventario de puntos de agua subterránea comprendió la integración de diferentes fuentes de información. En el producto 2 entregado por la PUJ se presentó la construcción de un inventario de puntos en donde se reunieron los registros provenientes de entidades como IDEAM, SGC, CARs, ANLA, investigaciones académicas y estudios de consultoría. Del analisis GAP realizado se pudo observar que existe un importante vacío de información en la zona centro y suroriental del núcleo de La Mojana, específicamente en los municipios de Majagual, Sucre, San Jacinto del Cauca, Ayapel, Nechí y la zona sur del municipio de San Benito de Abad.

Con el fin de identificar de primera mano los pozos de agua existentes en La Mojana y que al mismo tiempo brindaran información relevante de la zona para la caracterización hidrogeológica, se realizó una campaña de campo durante los meses de agosto a noviembre del año 2020.

Esta campaña de campo consistió inicialmente en visitar unos pozos de agua que se seleccionaron a partir del vacío de información que se encontró de la zona y de aspectos como la ubicación, accesibilidad, cantidad de información disponible según sus características (tipo de punto, profundidad, ubicación y Tipo de bomba) y posibilidad de realizar las pruebas de bombeo y muestreo fisicoquímico.

Para iniciar la campaña se suministró al equipo de trabajo de campo un listado por municipio de los pozos objeto, este listado fue resultado del análisis GAP que se realizó en el producto 2 del proyecto (PUJ-PNUD). Gracias a la información brindada por PNUD relacionada con

los números de contacto de los líderes de las comunidades, por medio de llamadas telefónicas los profesionales de PNUD y el equipo de trabajo de campo de la PUJ iniciaron la interacción con los líderes comunales para concertar la autorización de visita a los pozos y posteriormente realizar las pruebas de bombeo y el muestreo fisicoquímico.

Una vez se tuvo la autorización de entrada a las comunidades, el equipo de trabajo de campo se desplazó a cada pozo, socializó con los líderes comunales y administradores de los pozos el proyecto y explicó las actividades que se iban a realizar (pruebas de bombeo y muestreo fisicoquímico).

Como parte de los trabajos de campo se realizó el inventario de 52 pozos de agua subterránea en nueve de los once municipios que componen la región de La Mojana: Ayapel departamento de Córdoba. Majagual, Sucre-Sucre, Caimito, San Marcos, San Benito de Abad y Guaranda departamento de Sucre. Magangué y Achí departamento de Bolívar. Sin embargo, solo en 50 pozos de este inventario se realizó una prueba de bombeo, los resultados se presentan a continuación.

Los pozos para realizar las pruebas de bombeo se escogieron a partir del análisis GAP (realizado previamente – producto 2) y las condiciones logísticas de cada punto para garantizar la adecuada ejecución de la prueba, siempre ajustándose a los requerimientos de los usuarios tales como régimen de bombeo, capacidad de la bomba (caudal de extracción) y suministro de energía. De esta manera, se realizaron 50 pruebas de bombeo en nueve municipios de la zona de estudio. Para llevar a cabo las pruebas de bombeo, se realizaron adecuaciones en 50 pozos profundos, esto debido a que se encontraron pozos con diferentes características en la tubería (galvanizada o PVC). Se realizó el acondicionamiento a la tubería de descarga y a la platina de la boca del pozo en cada uno de ellos.

2.3.3.2 Prueba de isótopos, física y química

La identificación de las tendencias o evoluciones de las facies hidroquímicas del agua subterránea son un insumo clave en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual de La Mojana y con el fin de reducir los vacíos de información, y dando cumplimiento al objetivo de realizar las pruebas físicas y químicas in situ (pH, temperatura, conductividad eléctrica) principales iones (Ca, Mg, Na, K, HCO3, CO3, SO4) e isótopos (Deuterio, Oxígeno-18, C14 y C13) en lugares seleccionados.

Con el objetivo de recolectar o extraer muestras representativas de los diferentes puntos (pozos) de interés, se efectuaron procedimientos que permitieron garantizar la calidad de las muestras y la conservación de las mismas. Dichos procedimientos fueron instruidos por el laboratorio estudios ambientales de la Universidad de Antioquia el cual se encuentra certificado ante el IDEAM, igualmente este laboratorio fue el encargado de proveer los insumos como recipientes, reactivos y demás elementos necesarios para realizar la correcta toma de las muestras. El embalaje de las muestras se realizó en cavas de icopor con suficiente hielo con el objetivo de mantener una temperatura por debajo de los 4°C, finalmente, el envío de las muestras para análisis en laboratorio se realizó de forma terrestre teniendo en cuenta los tiempos máximos de análisis con el propósito de reducir las reacciones químicas no deseadas y procesos entre el recipiente y el agua de muestra.

La identificación de las tendencias o evoluciones de las facies hidroquímicas del agua subterránea son un insumo clave en la construcción del modelo conceptual hidrogeológico de La Mojana, entendiendo que cuando el agua subterránea entra en contacto con las rocas estas dejan una huella que permite la identificación de procesos que ayudan a entender el funcionamiento del sistema hidrogeológico. De acuerdo con el análisis GAP o análisis de vacíos de información, expuesto en el producto 2 (sección 7.7 Hidrogeoquímica) la información secundaria disponible es limitada, en especial registros completos con todos los iones mayoritarios, los cuales se reducen a solo 15 muestras en el núcleo de La Mojana.

El muestreo hidrogeoquímico fue tomado en 9 de los 11 municipios del núcleo de La Mojana ya que no se pudo ingresar a los municipios de Nechí y San Jacinto del Cauca debido a las alteraciones de orden público que se presentaron en las fechas en las que se tenían previstas las visitas. A partir del análisis exploratorio de los datos, a nivel temporal y espacial, buscando una espacialización adecuada y una representatividad por las diferentes unidades geológicas, se seleccionaron los puntos de aguas subterránea (pozos) según los siguientes criterios: la ubicación, accesibilidad (cercanía a una vía), certeza de que el punto este activo, que sea productivo y según la cantidad de información disponible de sus características.

Para la toma de las muestras se siguieron los protocolos establecidos que permitieran garantizar la calidad de las muestras y la conservación de estas, según los procedimientos instruidos por el laboratorio de estudios ambientales de la Universidad de Antioquia (laboratorio certificado por el IDEAM). El detalle de la toma de las muestras, actividades de comunicación a la comunidad, equipos y materiales de muestreo (calibración de equipos), método de registro en campo (cadena de custodia), recipientes, reactivos, almacenamiento y transporte, entre otros, se encuentran detallados en el Tomo 1. Trabajo de campo, capítulo 3. Muestreo hidroquímico.

2.3.3.3 Estudio geoeléctrico

Como parte de los objetivos del actual informe se realizaron 20 tomografías geoeléctricas en 2D con un AB/2 igual o mayor a 500 m realizadas por la empresa INGEOMAD SAS. Estos sondeos eléctricos tienen como fin estimar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, y a partir de esto, poder realizar correlaciones geológicas e hidrogeológicas que permitan ser un apoyo para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual.

Como resultado el informe de "E*xploración subsuelo para caracterización hidrogeológica adquisición procesamiento e interpretación de tomografías eléctricas de resistividad / proyecto PNUD – Mojana (departamentos de Bolívar, Córdoba, Antioquia y Sucre)* realizado por INGEOMAD SAS el cual puede ser consultado en formato .pdf en la carpeta de Anexos tomo 2 Análisis de resultados / 4 Anexos interpretación tomografías /Informe

Ingeomad. Adicionalmente se realiza un análisis interpretativo que enriquece la información geoeléctrica tomada en campo.

Por último, se presenta un análisis de la información primaria recolectada para este producto y la recopilada en el análisis de información secundaria (Producto 2), para generar un cuadro regional de la distribución de resistividades en la zona de estudio.

2.4 Producto 4: Modelo hidrogeológico conceptual y los mapas de vulnerabilidad

2.4.1 Objetivos del producto 4

El producto 4 es un informe que presenta la descripción detallada del modelo hidrogeológico conceptual y los mapas de vulnerabilidad a la contaminación en formato SIG, orientado a cumplir con los siguientes objetivos:

Objetivo 1: Modelo hidrogeológico conceptual

Construir un modelo conceptual de la hidrogeología asociada a La Mojana. Se definirán las zonas de recarga y descarga, escorrentía y de los cuerpos superficiales-aguas subterráneas. También se definirán los límites del modelo y la variabilidad espaciotemporal de los principales parámetros.

Objetivo 2: Vulnerabilidad integrada a los mapas de contaminación

Construir un mapa de vulnerabilidad intrínseco para La Mojana utilizando al menos tres metodologías distintas e incluyendo como mínimo a las metodologías GOD y DRASTIC. Se debe incluir una identificación de los puntos y las fuentes difusas de contaminantes en esta actividad. También se debe investigar la interacción de estas fuentes con los pozos circundantes.

2.4.2 Descripción del producto 4

El producto 4 consta de dos tomos, en el primero se presenta el modelo hidrogeológico conceptual describiendo la información y métodos implementados para su construcción, y el tomo 2 consiste en un informe en el cual se describe la construcción, calibración y resultados obtenidos del modelo hidrológico, el cual tenía como objetivo calcular la recarga del acuífero para utilizarla como insumo en la construcción del modelo hidrogeológico.

El tomo 1 del producto 4 se encuentra estructurado de la siguiente manera: El capítulo uno hace referencia a la selección del dominio de análisis hidrogeológico el cual en un principio está determinado por el dominio hidrológico. Se aclara que este dominio se define a detalle con la modelación numérica. El capítulo dos presenta un resumen de la configuración geológica de La Mojana, resultados de la modelación geológica 3D que ayudan a comprender mejor el sistema y su interacción con el entorno. Este modelo es el punto de partida para la construcción del modelo numérico. En el capítulo tres se presenta la recarga potencial estimada para el dominio hidrológico. Este capítulo es una síntesis del producto de la modelación hidrológica en donde se presenta la metodología a detalle para la obtención de la recarga. El capítulo cuatro presenta las diferentes actividades que permiten generar el modelo hidrogeológico conceptual. Este capítulo se inicia con la interpretación de las pruebas de bombeo las cuales permiten junto con la información secundaria, determinar las características hidráulicas de las formaciones presentes en el área de estudio. Posteriormente se presenta la piezometría, las líneas de flujo y la estimación de los caudales de explotación. Estos caudales de explotación provienen del inventario de puntos de agua más la información levantada durante la campaña de campo. Esta información se complementa con el análisis hidroquímico e isotópico el cual permitió realizar una clasificación para las aguas subterráneas, complementar las líneas de flujo y edades. Finalmente se presenta un método cualitativo para determinar las zonas potenciales de recarga lo que junto con la recarga potencial permite ajustar y analizar los valores de entrada al modelo numérico.

Finalmente se presenta la vulnerabilidad intrínseca de contaminación de los acuíferos por la metodología GOD y DRASTIC. Se evaluó una tercera metodología basada en aplicar la lógica difusa al DRASTIC con el fin de evaluar el riesgo ante contaminantes particulares.

El tomo 2 correspondiente al modelo hidrológico y escenarios de cambio climático, está estructurado de la siguiente forma: Capítulo uno. Presenta el modelo hidrológico construido para las cuencas que drenan sus aguas hacia la región de La Mojana. Se presenta un resumen de la información utilizada y los resultados que se obtuvieron para los principales componentes del ciclo hidrológico (precipitación, escorrentía, evapotranspiración y recarga). Capítulo dos. Describe los escenarios de cambio climático que se van a emplear en el proyecto. Presenta la metodología de regionalización estadística de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático y describe el avance en el desarrollo de la metodología centrándose en el análisis de la línea base y del análisis de métricas para la validación de la variable de precipitación.

2.4.3 Resultados del producto 4

2.4.3.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Se realizó la interpretación de 50 pruebas de bombeo a través del ajuste de las curvas de abatimiento en sus diferentes fases (bombeo y recuperación) y la posterior estimación de la transmisividad, se utilizó un código en Matlab HYTOOL (Renard, 2017) específicamente para la solución de Papadopulos and Cooper (1967) en fase de bombeo. Para las soluciones de Cooper-Jacob (1946) – fase de bombeo, Theis (1935) y Tartakovsky-Neuman (2007) – fase bombeo y recuperación se utilizó el software AQTESOLV 4.5.

A partir de la interpretación de las pruebas de bombeo se presentan variaciones en la estimación de la conductividad hidráulica, esto debido a que los datos se obtuvieron del mismo pozo de bombeo, obteniendo así efectos de almacenamiento en el pozo, también debido a la dificultad de mantener el caudal de bombeo constante. Sin embargo, estas variaciones nunca son mayores a un orden de magnitud y por lo tanto son tolerables.

A partir de esa distribución espacial y aunque los pozos con pruebas de bombeo no superan los 200 m, se observa que hacia el centro de La Mojana donde afloran las formaciones cuaternarias (aluviales, abanicos antiguos, paludales) se presenta una tendencia general a presentar valores de conductividad hidráulica de entre 0.5 y 15 m/d, siendo esta formación bastante productiva y con buena capacidad hidráulica. Hacia los alrededores de la cuenca particularmente en la zona occidental de la zona de estudio donde aflora la Formación Betulia se observa una ligera disminución hacia la parte más alta de la conductividad hidráulica siendo esta de entre 0.1 y 10 m/d. Y en la zona donde aflora la Formación Sincelejo se evidencia aún más una disminución en la conductividad hidráulica reportada en las pruebas de bombeo de entre 0.01 a 0.5 m/d. Sin embargo, a partir de estos resultados las formaciones presentes en la zona de estudio y consecuentemente en el dominio de modelación presenta valores de medio a altos de conductividad hidráulica al menos en los primeros 200 m de profundidad, dando cuenta de materiales menos consolidados y con litología en su mayoría arenosa o conglomeráticas.

Se realizó la actualización de la superficie piezométrica promedio multianual con la inclusión de los 52 puntos del inventario que se realizó para las pruebas de bombeo, donde se midió el nivel estático de los pozos. Obteniendo así 617 puntos con niveles piezométricos, siendo el 17.8 % de los puntos de agua subterránea registrados en la base de datos (3450puntos). En la zona sur oriental de la zona de estudio (serranía de San Lucas y municipio de Nechí) no existen registros de profundidad de nivel de los datos, por lo tanto, los resultados son producto de la extrapolación del método de interpolación utilizado (por eso deje claro en la figura). Sin embargo, en la superficie piezométrico se observa un gradiente de flujo hacía el núcleo de La Mojana, alimentado desde las zonas altas del cinturón plegado de Sinú, también desde el bajo Cauca Antioqueño. Además, es probable que desde el costado oriental desde el río Cauca y posiblemente desde los complejos ígneo-metamórfico de la Serranía de San Lucas exista un flujo hacía el centro de La Mojana.

Se realizó la actualización de los puntos con caudales de extracción con la inclusión de los 52 puntos del inventario que se realizó para las pruebas de bombeo, en los que se realizó un aforo del caudal de explotación en el contexto de la ejecución de las pruebas de bombeo.

Obteniendo así 586 puntos con niveles piezométricos, con siendo el 16.9 % de los puntos de agua subterránea registrados en la base de datos (3450puntos). A partir de estos datos el caudal de extracción en la zona de estudio es aproximadamente 2.7 m3/s (esto es una subestimación de la demanda de agua subterránea debido a los pocos datos con caudal comparado con el inventario de puntos). Existen caudales superiores a los 25 l/s, siendo estos pozos profundos utilizados para abastecimiento público o acueductos (ejemplo acueducto de Sucre 29l/s – Acueducto de San Benito de Abad 44 l/s). Sin embargo, además la mayoría de los puntos de agua extraen un caudal menor a 6 l/s, siendo 4.35 l/s el promedio. Teniendo en cuenta que ningún pozo inventariado supera los 250 metros de profundidad total.

A partir de la ubicación espacial de los puntos con registro de caudal de extracción, se puede observar que existe una fuerte explotación sobre todo en el costado Noroccidental de la zona de estudio correspondiente a la formación Sincelejo (Morroa) y la formación Betulia. Tema para evaluar con el modelo numérico debido a que estas zonas presentan menos recarga potencial.

De acuerdo a la información hidrogeoquímica primera y secundaria se encontró que la zona de estudio se divide en tres regiones de acuerdo con los perfiles químicos del agua subterránea, que es coincidente con los minerales presentes de las diferentes unidades cronoestratigráficas a escala regional y su respectiva meteorización.

La estimación de la recarga potencial y las zonas de recarga potencial son metodologías complementarias que se deben verificar con el balance de masas dado por un modelo hidrogeológico numérico. Se observa que las zonas con mayor potencial de recarga se encuentran al norte de la cuenca geológica representado por la Formación Caucasia, en menor proporción al oeste de la zona donde a pesar de que su recarga potencial es baja representa una buena zona para la infiltración de agua al sistema hidrogeológico.

Evaluando la relación de isótopos estables ^{2}H y ^{18}O de todos los puntos disponibles (tanto de información secundaria y los analizados en el proyecto) con las líneas meteóricas globales, se pueden ver procesos claros de evaporación en algunas ciénagas, lo cual se contrastará con el modelo hidrodinámico y la capacidad de renovación de las aguas allí almacenadas que a su vez depende de la conexión con caños y río de la zona. También, se evidencia en algunos

pozos algún proceso de interacción con roca, a través de la ubicación de dichos puntos alejándose de las líneas meteóricas, implicando tiempos de tránsito más largos y procesos limitados de recarga, sobre todo los pozos que captan de la formación Sincelejo (Morroa).

Con el análisis de exceso se observa que los pozos que están localizados en su mayoría en el núcleo de La Mojana (formación Betulia y cuaternario) pareciera que tuviera alguna evidencia de evaporación, esto concuerda con los niveles piezométricos más someros y se puede presentar este proceso en la zona No saturada, mientras que con todos los puntos de información secundaria el diagrama de cajas muestra un tendencia central a unos valores superiores al 10% de exceso de Deuterio, siendo coherente con la inclusión de pozos en la Formación Morroa y sus tiempos de tránsito más largos y proceso de recarga en zona semiárida.

Con el análisis de los resultados de Tritio, se observa que la muestra obtenida en el manantial Ventura muestra valores de Tritio (0.6 T.U.) lo que indica que este manantial está alimentado por agua de precipitación recientes. También en los pozos Candelaria y Tres esquinas se encontraron valores Tritio de 0.6 T.U y 0.4 T.U respectivamente. Tanto en el manantial como los dos pozos se encuentran ubicados en el costado occidental de la zona de estudio, identificada como una de las posibles zonas de recarga y de acuerdo con el análisis hidroquímico aguas con poco tiempo de tránsito debido a su contenido de iones mayoritarios. En los otros puntos se reporta que los valores de Tritio inferiores al límite de detección del laboratorio. En ese orden de ideas puede ser que contengan agua muy reciente o que el agua subterránea captada por estos puntos sea aguas con una edad superior a 70 u 80 años.

En la datación de agua subterránea con ^{14}C, se observa edades mayores a mil años, atisbando con esto tiempos de tránsito largos en el agua subterránea captada por los pozos en donde se obtuvo la muestra. Se puede concluir que en la formación Betulia presenta un gradiente (edad vs profundidad total del pozo) menor en edad respecto a las formaciones cuaternarias, es decir que a profundidades mayores en Betulia se encuentran edades menores que en las formaciones Cuaternarias del centro de La Mojana. También, en la distribución espacial de los pozos con edad estimada de ^{14}C, se observa que en el centro de La Mojana los tiempos de tránsito son mayores y así mismo un flujo desde las partes más altas (contornos) de la

zona de estudio hacia el complejo cenagoso, tal y como se presentan en la piezometría y en análisis hidroquímico.

Respecto a la metodología FDRASTIC para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, se puede evidenciar que la categoría predominante de la evaluación del riesgo por esta metodología corresponde al V_5 "fácil de ser contaminada (V_5)". Los municipios que presentan una mayor susceptibilidad a la contaminación son Ayapel, Majagual, Sucre, San Benito, Achí y Guaranda.

Los resultados obtenidos por los tres métodos GOD, DRASTIC y FDRASTIC para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en el periodo húmedo (fase más crítica), fueron comparados y se evidencia que estos coinciden en que las zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación, se encuentran ubicadas al este y sur-oeste del núcleo de La Mojana. Afectando principalmente a los municipios de Ayapel, Majagual, Achí y Guaranda. Por una parte, el método FDRASTIC es el método que arroja los resultados más extremos y adicionalmente, cada nivel de riesgo tiene asociada sus probabilidades. Por otra parte, el método GOD es el método que arroja los resultados menos extremos llegando solamente hasta categoría "Moderada", según las categorías establecidas.

La Mojana se encuentra hacia el sur de la provincia hidrogeológica valle inferior del Magdalena, en este sector de la provincia se encuentran en su mayor parte depósitos cuaternarios con algunos cientos de metros de espesor que reposan discordantemente sobre secuencia sedimentaria hacia el Oeste y sobre Basamento Cristalino hacia el Este. Mediante la integración de geología de superficie y de subsuelo se pudo establecer que las Formaciones Betulia y Sincelejo y parte de estos depósitos recientes, conforman las unidades de mayor interés hidrogeológico, que a su vez su anisotropía en la vertical dificulta establecer límites claros entres estas unidades y sugieren su consideración como una única unidad geológica conocida por su nombre operacional como Corpa.

2.4.3.2 Modelo hidrológico

La modelación hidrológica se realizó con SWAT ya que este modelo permite obtener resultados a dos escalas espaciales: Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) y cuencas. Temporalmente el SWAT realiza los cálculos a nivel diario sin embargo los reportes de resultados se pueden generar a escala mensual y anual.

La zona más seca de la región de La Mojana es el noroccidente ya que presenta valores de precipitación entre los 1071 mm y 1751 mm al año, en esta área predominan los arroyos no permanentes que escurren hacia el cauce del río San Jorge y las ciénagas de La Mojana. Las zonas más lluviosas corresponden a la cuenca alta el río San Jorge y la región de la confluencia del río Cauca y el río Nechí donde la precipitación anual varía entre 3500 mm y 6300 mm al año.

La evapotranspiración es uno de los componentes más importantes del balance hídrico de la cuenca y se define como la suma de la evaporación desde la tierra (superficies de agua, suelo) y la transpiración de las plantas. La Evapotranspiración Potencial (ETP) se refiere a la máxima evapotranspiración que se puede tener en función de la energía disponible en un sitio determinado, asumiendo que no hay restricciones de disponibilidad de humedad. La Evapotranspiración Real (ETR) representa la cantidad de agua saliente de la unidad hidrológica hacia la atmósfera en forma de vapor de agua, por una combinación de la evaporación y de la transpiración de la vegetación. Los valores más elevados de ETP se presentan donde las temperaturas son más altas, es decir en la zona norte de la región de La Mojana. En el caso de la ETR los valores más altos se generan donde hay mayor disponibilidad de agua para que se dé el proceso de evapotranspiración, esto corresponde a los cuerpos de agua lenticos y las cuencas donde la precipitación es mayor.

La escorrentía superficial varia proporcionalmente a la precipitación, esta depende de las condiciones de cobertura del suelo y de la permeabilidad de los suelos. Los mayores valores de escorrentía en las zonas de mayor precipitación.

Cuando ocurre la precipitación, el agua que se infiltra se acumula en los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado. Posteriormente, una vez terminado el aguacero, se lleva a cabo la evapotranspiración, tomando las raíces el agua que se encuentra en los poros del suelo. Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante del agua que se infiltra, percola para recargar al acuífero.

La recarga es entonces el volumen de agua que se infiltra desde la superficie y alcanza el nivel superior del acuífero somero. Este caudal de agua depende de la permeabilidad del suelo y de la precipitación que incide sobre la superficie.

Los cálculos de recarga se realizaron para las 9755 URH y las 371 cuencas del modelo, estos fueron los datos de entrada para la modelación hidrogeológica. La distribución espacial de la recarga estimada presenta los valores de recarga más bajos en la zona norte y zona media de La Mojana variando entre los 0 y 354 mm al año. Las zonas más lluviosas presentan los mayores valores de recarga con valores entre 1180 mm y 3503 mm al año.

Se seleccionaron 3 cuencas que representaran la variación espacial de la recarga para analizar su comportamiento temporal. Para ello se escogió la cuenca 173 como zona de recarga baja, la cuenca 13 como zona de recarga media y la cuenca 271 como zona de recarga alta.

Se observa que en las zonas de alta precipitación la recarga alcanza valores por encima de los 2000 mm al año (cuenca 271) presentando variaciones entre los 1500 mm y 2500 mm y en las zonas de baja precipitación esta alrededor de los 200 mm al año con variaciones que no alcanzan los 400 mm.

Al calcular el porcentaje de precipitación para cada una de estas cuencas que se transforma en recarga se observa que para el caso de las zonas con recarga más baja el porcentaje varía alrededor del 10% mientras que para la zona de recarga media y alta el valor oscila alrededor de 30%.

2.4.3.3 Modelo hidrodinámico

La modelación hidrodinámica estudia el comportamiento del agua superficial el complejo cenagoso a una escala más fina que la alcanzada mediante la modelación hidrológica. Permite estudiar el movimiento del agua dentro de las ciénagas, las interacciones río-ciénaga, transporte de escalares, trayectorias de flujo, transporte de sedimentos u otras cantidades que se transporten con el agua, además aporta en la construcción de un modelo de aguas subterráneas al funcionar la superficie libre del agua como una condición de frontera para un modelo de aguas subterráneas.

El modelo construido en este proyecto abre la oportunidad de estudiar sitios más detallados de la región de La Mojana al estar en capacidad de proveer condiciones de frontera para modelos más pequeños, que antes no eran posibles debido a las limitaciones en estaciones hidrométricas y la dificultad para obtener mediciones de caudal en la zona a partir de únicamente los niveles registrados, lo que es posible en zonas con hidráulica menos compleja.

El modelo hidrodinámico contó con cuatro condiciones de frontera, 3 de ellas ubicadas en la salida del complejo cenagoso hacia el río Magdalena, en estas fronteras se impusieron únicamente el valor de los niveles de río Magdalena, esta condición de frontera permite tanto salida como entrada de agua al complejo cenagoso, aunque como es de esperarse en la mayoría del tiempo se observó únicamente salida desde la Mojana hacía el río Magdalena.
También se estableció una condición de frontera en el río San Jorge a la altura de Montelíbano, en esta frontera los caudales de agua fueron prescritos y se emplearon los valores de caudal provenientes de la estación del IDEAM de Montelíbano, allí los niveles no son especificados y son estimados por el modelo y pueden ser ajustados mediante la modificación de los coeficientes de rugosidad.

Dadas las demandas computaciones en el dominio seleccionado la modelación hidrodinámica se limitó al estudio de tres años hidrológicos definidos de acuerdo con los criterios del comportamiento hidrológico observado en la cuenca, se han seleccionado los años: 2010, 2015 y 2019. Correspondiendo a niveles, altos, bajos y típicos (en ese orden).

Cada uno de los años modelados inició el primer día del mes de octubre del año inmediatamente anterior, correspondiendo estos tres meses adicionales al periodo de calentamiento de la modelación. Aunque se presentan estos resultados se entiende que estos tres meses podrían estar afectados por las condiciones iniciales empleadas para la modelación y en general deberán ser descartados de los análisis. Los resultados se presentan en el formato original del modelo que contiene todo el detalle de la malla de cómputo, a una resolución temporal aproximadamente diaria y también se generaron resultados agregando los resultados mensuales para obtener archivos más fáciles de visualizar y/o procesar. Por defecto Telemac genera los archivos en formato selafin, estos pueden ser visualizados en sistemas de información geográfica como QGIS (versiones 3.16 o superiores) o convertidos a formato VTK para ser visualizados en ParaView, dado el tamaño de los archivos se recomiendo su visualización en el software BlueKenue. También se han generado unas salidas gráficas de la velocidad y de la profundidad modeladas, usando para ello la estrategia de atlas, se ha empleado la convención de polígonos usada previamente para la presentación de los resultados del DEM, en el que cada polígono puede agrupar un conjunto de ciénagas.

Estos resultados se han generado para facilitar una rápida visualización de los resultados y comportamientos generales del complejo cenagoso, sin embargo, se invita a los usuarios a revisar las versiones completas en algún software adecuado como los que fueron previamente mencionados (todos de uso libre y código abierto).

2.4.3.4 Cambio climático

La aplicación del índice de precipitación estandarizado SPI (por sus siglas en inglés, Stándar Precipitation Index*)* constituye un importante avance en el seguimiento de las sequias en La Mojana. El índice al construirse solo con la precipitación tiene sus ventajas y desventajas. Al usar una sola variable, constituye un método simple y fácil de usar. Las desventajas que tiene el método es que no tiene en cuenta el balance hídrico en el seguimiento de la sequía, y concretamente con el almacenamiento de agua en el suelo. El SPI tiene ventajas por permitir hacer análisis multitemporal. Si se tiene más información hidrometeorológica, se puede comparar los diferentes métodos para el cálculo de índices.

La regionalización de variables climáticas proyectadas a futuro bajo los escenarios de cambio climático RCP4,5 y RCP8,5 (por sus siglas en inglés, *Representative Concentration Pathways*) para la región de La Mojana se llevó a cabo para la humedad relativa, precipitación, radiación solar, temperatura media, máxima y mínima, y velocidad del viento, que servirán como insumo para el cálculo de la recarga, a través de la modelación hidrológica con SWAT. La metodología de *downscaling* estadístico empleada permitió obtener series a futuro a resolución diaria para el periodo 2020-2100.

Dado que la metodología de *downscaling* estadístico se basa en establecer relaciones empíricas entre las series observadas históricas para regionalizar las series de las variables climáticas a futuro, fue necesario definir un periodo de referencia histórico. Debido a las limitaciones de longitud de series y parámetros de las estaciones disponibles en la región de La Mojana, se utilizó el periodo 1976-2005.

Posteriormente, se llevó a cabo la validación de la precipitación para la región de La Mojana con el fin de identificar cuál de los 10 modelos climáticos globales GCM, analizados, representaba de mejor manera el comportamiento de dicho parámetro. Encontrando que el modelo CMCC-CMS fue el que tuvo mejor desempeño para el análisis de métricas de comparación y el de variabilidad climática.

La proyección de las series de las variables hidroclimáticas analizadas para los escenarios de cambio climático RCP4,5 y RCP8,5, bajo el modelo climático global CMCC-CMS, sugieren

posibles cambios para la región de La Mojana.; que analizados con los valores totales promedio para cada variable muestran una tendencia al aumento para parámetros como temperatura y velocidad del viento. En contraste, los parámetros de precipitación, humedad relativa y radiación solar muestran una tendencia de disminución. Sin embargo, al hacer el análisis de cambio a escala mensual se pudo observar cómo en algunos meses hay disminuciones puntuales para algunas de las variables analizadas.

Los resultados de las series de precipitación proyectadas sugieren que, para los volúmenes totales, habría disminuciones, especialmente para el RCP4,5 llegando hasta un -13,3% para el periodo 2071-2100. En contraste, para el RCP8,5 se esperaría una tendencia de decreciente más marcada para el periodo 2020-2040 de hasta -11,7% en promedio para toda la región de La Mojana.

El análisis a escala mensual de los posibles cambios de la precipitación muestra mayores déficits para los meses de enero y diciembre entre -73,5% y -93,1% para el RCP4,5, mientras que, para el RCP8,5 estarían entre -72% y -97,3%. En contraste, los meses de marzo y noviembre podrían presentar los mayores aumentos, siendo para este último el que más cambios proyecta, especialmente bajo el RCP8,5 con 123,9% de más milímetros de precipitación.

Con el fin de identificar periodos donde pudiesen presentarse eventos de déficit hídrico asociados al evento de sequía, se utilizó el índice estandarizado de precipitación SPI para los periodos de 3 meses, 6 meses y 12 meses. El comportamiento del SPI fue específico para cada RCP, encontrando que habría una mayor probabilidad de sequía moderada a extremadamente seca hacia finales del periodo 2071-2100 para el RCP4,5, mientras que, para el RCP8,5 estos eventos se podrían ser más probables para el periodo 2041-2070.

Los cambios proyectados para la temperatura muestran una tendencia general de aumento para la temperatura media, máxima y mínima en ambos escenarios de cambio climático, con cambios promedio de 5ºC, 7,5ºC y 5,4ºC de más, respectivamente bajo el escenario RCP8,5 para finales de 2100. En contraste, bajo el escenario RCP4,5 se esperarían cambios para el 2100 de la temperatura media de 3ºC, máxima de 5,6ºC y mínima de 3,1ºC, respecto a los valores promedios del periodo de referencia para cada variable de temperatura. El

comportamiento espacial de los posibles valores futuros de temperatura indica que la zona nororiental de la región de La Mojana presentaría los valores más altos, mientras la zona sur tendría los más bajos.

El comportamiento de los cambios proyectados para la humedad relativa muestra una tendencia a la disminución, especialmente para el RCP8,5. Para ambos escenarios los valores promedio más bajos serían de -0,8 (unidad de humedad relativa), donde para el RCP4,5 se podría dar para el periodo 2071-2100, mientras que, para el RCP8,5 sería para el de 2041-2070.

La radiación solar muestra cambios con tendencia a la disminución más marcada para el escenario RCP8,5, sin embargo, dicha tendencia no es progresiva. Para este escenario se esperarían los mayores cambios para los periodos 2020-2040 y 2071-2100 de -6,5 W/m^2 y -11,8 W/m^2, respectivamente; mientras que para el periodo 2041-2070 se esperaría disminuciones de -2,1 W/m^2. En contraste, para el RCP4,5 se esperarían cambios de -10,7 W/m^2 y -10,4 W/m^2, para 2020-2040 y 2041-2070 respectivamente, mientras que para el 2071-2100 se esperan aumentos de 2,6 W/m^2. En contraste, para el RCP8,5 se esperarían los mayores cambios para los periodos 2020-2040 y 2071-2100 de -6,5 W/m^2 y -11,8 W/m^2, respectivamente; mientras que para el periodo 2041-2070 se esperaría disminuciones de -2,1 W/m^2.

Finalmente, de las variables climáticas analizadas, la velocidad del viento fue la que mostró menos cambios respecto a las series del periodo de referencia. Para ambos escenarios de cambio climático se observó que para el trimestre diciembre-enero-febrero se presentaron los valores más bajos de cambio, mientras que los valores más altos variaban en los demás meses del año. En general, los cambios que se podrían esperar para la velocidad del viento muestran una tendencia de aumento a lo largo del periodo de tiempo analizado.

2.5 Producto 5: Modelo hidrogeológico numérico

2.5.1 Objetivos del producto 5

Objetivo 1: Modelo hidrogeológico numérico

Desarrollar una representación matemática de flujo y calidad del agua en el acuífero de La Mojana. El modelo distribuido se calibrará y validará para que puedan hacerse predicciones.

2.5.2 Descripción del producto 5

El documento del producto 5 se encuentra estructurado de la siguiente manera:

El capítulo uno presenta el modelo hidrogeológico conceptual con las características geológicas regionales del área de estudio de acuerdo con la geología de superficie a escala 1:500.000 (planchas 5-04 y 5-06) del Atlas Geológico de Colombia del año 2015 desarrollado por Servicio Geológico Colombiano (SGC) así como los detalles importantes obtenidos de la modelación geológica 3D. Adicionalmente, se integran los resultados más relevantes, y que aportaron a la construcción del modelo conceptual, en los análisis previos hechos en los temas hidráulica, hidroquímica, isotopía, sistemas de flujo y caudales de extracción.

El capítulo dos describe el desarrollo del modelo hidrogeológico numérico iniciando por la selección del software hasta los resultados de las simulaciones planteadas. El capítulo tres consiste en presentar un complemento a los resultados obtenidos en el producto 3 respecto a la revisión del estado de salud pública en temas asociados a la calidad del agua y el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación a los acuíferos, así como los parámetros de calidad del agua subterránea medidos en campo y recopilados en la información secundaria.

2.5.3 Resultados del producto 5

Se implementó un modelo hidrogeológico numérico de las formaciones más recientes del VIM (Neógeno – Cuaternario) correspondientes a las unidades los depósitos cuaternarios (Paludales, Terrazas aluviales, antiguo abanico aluvial de La Mojana/Cauca, depósitos y abanicos aluviales recientes), la formación Betulia, la formación Sincelejo, la formación Caucasia y una unidad que agrupa las formaciones del Carmen, Porquera Cerrito y Tubará. Siendo el límite inferior hidrogeológico las unidades de roca Ígneo-metamórfico considerado como basamento hidrogeológico.

Se construyó una malla estructurada de 1000 metros de píxel (tamaño de celda), con lo cual para el dominio del modelo se obtiene un total de 220 filas y 131 columnas. La discretización vertical consta de cinco (5) capas en donde se realizó la zonificación paramétrica de acuerdo con las unidades geológicas cuya geometría se extrajo del modelo geológico 3D.

La capa 1-2 es coincidente con el mapa geológico de superficie, la formación Betulia se consideró un medio homogéneo dado su continuidad y espesor. En contraparte la evidencia estructural sugiere que la formación Sincelejo aflorante al occidente y la Formación Caucasia aflorante al sur corresponde a la misma unidad cronoestatigráfica, sin embargo, se implementaron como dos zonas de conductividad diferentes.

De acuerdo con del dominio de modelación, el modelo se encuentra limitado por zonas de no flujo, en la mayor parte del modelo esto responde a zonas que por sus características litológicas o hidráulicas restringen el flujo al modelo. Sin embargo, para el área noroccidental se definió una zona de GHB (General Head Boundary) la cual define una carga constante distante de la zona de modelación, a pesar de representar el límite de la cuenca hidrológica, la geometría de la cuenca geológica sumado a los niveles del acuífero de Morroa se puede asumir que la divisoria de aguas superficial no coincide con la divisoria de aguas subterráneas y existe un flujo adicional a la recarga.

La metodología de calibración consta de un análisis cuantitativo a través de las mediciones de niveles piezométricos en toda la zona de estudio y un análisis cualitativo a través de la salida de flujo base en la superficie del modelo y la comparación espacial con las manchas de agua de los cuerpos hídricos superficiales.

A partir de los resultados arrojados por múltiples corridas del modelo en estado estacionario, y la evaluación del desempeño del modelo con los niveles piezométricos medidos en campo y recopilados de información secundaria, se obtuvo una calibración con un RNS de 10.94 y un NMRS de 8.17% lo que indica que a pesar de la incertidumbre tanto en la parametrización del modelo, como los datos utilizados para calibrar, este es un resultado que indica un desempeño aceptable y más aún si se trata de un modelo regional.

En la fase de calibración las isopiezas o la distribución de carga hidráulica para cada capa del modelo presentan un gradiente de flujo regional que tiene como principal dirección el núcleo de La Mojana (zona más baja del dominio de modelación), es decir gradiente de flujo desde la parte alta de los afloramientos de las formaciones Betulia, Sincelejo y la unidad que agrupa las formaciones del Carmen, Cerrito y Porquera hacía los depósitos cuaternarios del núcleo, sin embargo, se observan pequeños flujos locales hacía los depósitos aluviales de algunos cauces menores.

Al sur del dominio de modelación en la formación Caucasia se observa que la principal zona de descarga es el aluvial del río Cauca, que finalmente tiene dirección sur norte hacía la ciénaga de Ayapel y el núcleo de La Mojana. Estos comportamientos se mantienen en profundidad debido a que no existe algún sello regional (unidad hidrogeológica impermeable) que genere un cambio de este patrón.

Debido a que los datos de niveles piezométricos corresponden a puntos de agua con profundidades menores a 150 m y los resultados del flujo a partir del tránsito en la zona NO saturada se realiza en la capa superficial, los valores de conductividad obtenidos son pertinentes para las formaciones que afloran y más someras del modelo.

Adicionalmente, se realizaron simulaciones para dos escenarios de modelación con el objeto de evaluar el comportamiento del hidrosistema subterránea en un periodo seco (año Niño) y en un período húmedo (año Niña).

Para la simulación del periodo seco (año Niño) se pudo observar una disminución drástica (60%) del agua que ingresa al modelo debido a la recarga, tomando relevancia en el balance de masa los caudales de extracción, considerando la gran subestimación que se tiene de estos registros, esto puede tener un efecto importante. Es pertinente revisar de manera local para estos periodos de estrés hídricos los regímenes de explotación de los pozos.

Para la simulación del período húmedo (año Niña) el balance de masa del modelo en donde presenta un aumento significativo (40%) del agua que ingresa al modelo debido a la recarga.

Para los diferentes escenarios de simulación las manchas de agua generada por las celdas que presentan un flujo de salida en el modelo presentan clara evidencia del impacto en el cambio de la recarga efectiva en el modelo, siendo esta la principal fuente de agua. Sin embargo, en los diferentes escenarios las salidas se asemejan a los cuerpos hídricos superficiales (ciénagas, ríos y drenajes menores).

Respecto a la revisión del estado de la salud pública y su relación con la calidad del agua subterránea se concluyeron los siguientes puntos:

- La calidad de agua para los cascos urbanos es mucho mejor que la calidad de agua de las zonas rurales. Esto puede traducirse que las personas localizadas en áreas rurales están consumiendo una menor calidad de agua y están más expuestas a enfermedades vehiculizadas por el agua de consumo.
- Los municipios que tienen un riesgo alto del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) en el año 2018, fueron Achí y Guaranda y los municipios que tienen un riesgo medio del IRCA en el mismo año, son San Jacinto del Cauca, Caimito y Majagual. Esto se traduce en que el agua suministrada en estos municipios no es apta para consumo humano, y se debe realizar gestión directa de acuerdo con su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
- Con base a la información consultada se evidenció que los municipios de Achí, San Jacinto del Cauca, Caimito y Majagual presentan IRCAs entre nivel de riesgo medio, alto e inviable sanitariamente, estos municipios necesitan tomar acciones en el corto, mediano y largo plazo para mejorar los índices de riesgo de calidad de agua. Otro

municipio a tener en cuenta es Guaranda y Sucre (IRCA rural), en donde se evidencian IRCAs a través de los años en nivel de riesgo Alto.

- Los municipios de Ayapel y Nechí manifiestan que la primera causa de mortalidad de niños menores de cinco años son las Enfermedades Diarreicas Agudas (EDA) y las afecciones abdominales o gastroenteritis. Para los municipios de Magangué, San Marcos y Sucre. Las EDA son la segunda mayor causa de muerte de niños en menores de cinco años.
- En las tasas de mortalidad en menores de cinco años por EDA encontradas, se presentan valores considerablemente altos en comparación con las cifras departamentales y nacionales, para todos los municipios de la región de La Mojana, en especial en Nechí, San Jacinto del Cauca, Caimito, Guaranda y Sucre. A partir del año 2013 en adelante, se presenta una disminución en la tasa de mortalidad, excepto para el municipio de San Jacinto del Cauca. Sin embargo, no es posible generar conclusiones más específicas debido a la falta de información y la continuidad de la misma.
- La tasa de incidencia cruda por 1000 habitantes de morbilidad por EDA, pone en evidencia que algunos municipios de la región de La Mojana poseen una probabilidad de media a alta de que una persona de una cierta población resulte afectada por EDA. En especial, el municipio de Achí presenta la mayor tasa de incidencia cruda por 1000 habitantes de morbilidad por EDA. Seguida de los municipios de Sucre, Guaranda y Nechí, que presentan una tasa media y Magangué presenta una tasa baja.
- Respecto a las Enfermedades Vehiculizadas por Agua (EVA), los mayores registros encontrados en La Mojana, se relacionan con las enfermedades de origen vectorial como son: Dengue, Dengue grave, Malaria y Leishmaniasis cutánea. Es posible evidenciar que los municipios que presentan altos registros en EVA son Nechí, Sucre, San Marcos, Achí, Magangué y San Benito Abad.

- Los resultados de la metodología FDRASTIC indican que las zonas donde se presenta mayor vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas son la zona centro y algunas zonas al este, oeste y nor-oeste del núcleo de La Mojana, con base a los factores de pendiente, recarga, profundidad del nivel freático, geología y litología de la zona de estudio. En estas zonas predominan las categorías V4 con categoría de "relativamente fácil de ser contaminada" y V5 con categoría de "fácil de ser contaminada". En estas zonas se encuentran ubicados los municipios de Majagual, Guaranda, Achí y Sucre. En los municipios de Ayapel, San Marcos y San Benito Abad se encuentran algunas zonas localizadas de vulnerabilidad V4 y V5, sin que estas sean predominantes.
- De acuerdo con los dos parámetros evaluados (pH y coliformes totales), se concluye que con la información disponible no es posible identificar asociaciones o patrones evidentes entre su evaluación con la normativa ambiental y los valores de IRCA, EDA y la sectorización de la vulnerabilidad a los acuíferos. En términos generales todo el núcleo de La Mojana cuenta con pH que sobrepasan los límites permisibles (superiores e inferiores), y si bien estas magnitudes de pH son un indicador de posibles problemas de contaminación, no tiene efectos directos sobre la salud, pero sí obstaculizan los procesos de desinfección. Esto mismo ocurre con la evaluación de coliformes totales, las cuales no se encuentran sectorizadas, sino que abarcan toda el área de La Mojana.
- Según la información estudiada y las correlaciones encontradas, se proponen los siguientes municipios para priorizar acciones respecto a la calidad de aguas subterráneas y enfermedades vehiculizadas por el agua y vectores: Achí, Sucre, San Jacinto del Cauca, Caimito, Majagual, Guaranda y Nechí. Con esta información, se pretende sugerir a los tomadores de decisión, la implementación de las acciones de control para prevenir y mitigar los daños a la salud de la población derivados del consumo del agua.

2.6 Producto 6: Base de Datos SIG

2.6.1 Objetivos del producto 6

Objetivo 1: Base de datos geográfica

Armar una base de datos basada en SIG con toda la información recopilada y generada en el sistema Magna-Sirgas.

2.6.2 Descripción del producto 6

Con el fin de documentar el producto 6, se presenta un informe con la descripción de la geodatabase (GDB) que contiene las capas geográficas utilizadas y generadas en el proyecto. Se describe la documentación complementaria como los diccionarios de datos para brindar al lector una guía para su consulta. Finalmente, se describen los archivos asociados a las salidas cartográficas.

2.6.3 Resultados del producto 6

A continuación, se describen los anexos incluidos en este producto. En primer lugar, se adjunta la base de datos geográfica con los datos vectoriales en formato GDB generada con la herramienta ArcCatalog 10.8 la cual contiene los datos vectoriales y raster del proyecto. Tal como se mencionó antes se incluyen las plantillas en formato MXD (exportadas para ser compatibles desde ArcMap 10.5) las cuales conservan la estructura de las rutas de las capas con el fin preservar la conexión a cada una de las capas desplegadas, a lo anterior se suman las salidas cartográficas en formato PDF. Por último, para ampliar la documentación asociada a los datos cartográficos se incluyen los diccionarios de datos, incluyendo la descripción de los datasets (en formato XLSX y HTML), dominios y diccionario de datos.

Esta se encuentra compuesta de manera global en dos conjuntos: GDB con información vectorial y raster, sobre la GDB es importante tener en cuenta que, aunque en el momento en que se dio inicio al proyecto, el sistema de referencia de coordenadas acogido para la zona de estudio era Magna-SIRGAS/Colombia Zona Bogotá (Código EPSG:3116); sin embargo, en la actualidad en el país se ha acogido el sistema Magna-SIRGAS/ Origen Nacional – CTM12 (EPSG: 9377). Es por lo anterior que se presenta una réplica de la GDB con este último sistema de referencia de coordenadas.

Con el fin de ampliar la descripción de la geodatabase y brindar un mapa detallado de la misma, se incluye la estructura de la geodatabase en un archivo HTM con una descripción descendente que va desde los datasets, pasando por las tablas y/o capas junto con los campos que compone cada una. Para ello, en primer lugar, se presenta el contenido general de la GDB donde se lista el contenido, se debe tener en cuenta que todos los contenidos disponibles cuentan con hipervínculos a cada uno de los recursos.

Por último, se incluyen las salidas cartográficas en formato PDF, las cuales han sido construidas a partir de los MXD adjuntos. Los archivos con las plantillas han sido exportados en una versión compatible con ArcMap desde la versión 10.5 en adelante teniendo en cuenta las múltiples versiones disponibles en la actualidad. Estas plantillas no solo incluyen los formatos con los rótulos y la configuración de etiquetas y simbología de las capas, sino también incluyen la ruta a la GDB a partir de la estructura de la carpeta incluida, por lo que esta debe ser preservada. Es necesario tener en cuenta que estas salidas han sido generadas con el sistema de referencia de coordenadas con código EPSG: 3116 (MagnaSIRGAS/ Zona Bogotá) por lo que las capas allí desplegadas son consumidas desde la geodatabase con este mismo sistema

2.7 Productos 7, 8 y 10: Talleres y memorias

2.7.1 Objetivos de los productos 7,8 y 10

Objetivo producto 7 y 8: Talleres

Realizar dieciséis (16) talleres con partes interesadas acerca de cómo respaldar la toma de decisiones.

Objetivo producto 10:

Elaboración de la memoria de los talleres.

2.7.2 Descripción de los productos 7,8 y 10

Se realizaron dieciséis (16) talleres que tenían como objetivos: 1. Socializar las metodologías empleadas y los resultados del proyecto. 2 Presentar la utilidad del modelo hidrogeológico en los planes de desarrollo de La Mojana. 3. Capacitar a personal técnico en el manejo del modelo hidrogeológico y 4. Transferir de conocimiento sobre temas relacionados con agua subterránea, gestión del recurso hídrico, causas de la contaminación de las aguas subterráneas y las alternativas de solución.

Durante el desarrollo del proyecto se identificó los actores que tendían interés en el proyecto (institución, corporación, academia y comunidad). Con base en esta identificación se estructuraron los talleres estableciendo para cada uno los temas en los que se debería hacer mayor énfasis de acuerdo al público objetivo y como deberían ser presentados los resultados del proyecto y sus potencialidades.

En los talleres con las instituciones y las corporaciones, el modelo desarrollado se presentó como una herramienta de gestión de aguas subterráneas en la Mojana. Se resaltó la utilidad que tiene la información generada y cómo podría contribuir en los planes de desarrollo que se están llevando a cabo en la región.

En los talleres con la academia se hizo mayor énfasis en las metodologías empleadas para la construcción del modelo y los resultados que se pueden obtener.

Los talleres con la comunidad estuvieron direccionados principalmente en explicar el concepto de las Aguas Invisibles de La Mojana, la importancia del agua subterránea y que objetivo tiene realizar este proyecto y como contribuye a la comunidad.

2.7.3 Resultados de los productos 7, 8 y 10

El balance en la respuesta de los actores involucrados fue satisfactoria dada la participación de los asistentes, su disposición en las diferentes etapas de los talleres dio lugar a profundizar temas generales o puntuales, propiciar procesos de retroalimentación, plantear líneas de trabajo en pro de la gestión del recurso hídrico, buscar alternativas de difusión de esta información y llevarse un conocimiento adicional sobre el funcionamiento integral del sistema hídrico de La Mojana.

En la Tabla 2-1 se referencian los talleres realizados.

Tabla 2-1. Talleres productos 7, 8

# Taller	Tipo de Actor	Público	Fecha	Lugar	Número de asistentes
1	Institucional	Profesionales técnicos de la Gobernación de Sucre y de la universidad de Córdoba	30 de marzo	Sincelejo, museo Zenú	18 personas: 8 mujeres, 10 hombres
2	Institucional	Profesionales técnicos que pertenecen a la mesa técnica del PNUD	19 de mayo	Bogotá, Club Colombo Libanés	18 personas: 9 mujeres, 9 hombres
3	Comunidad	Comunitario	30 de junio	Magangué	35 personas: 15 mujeres, 20 hombres

# Taller	Tipo de Actor	Público	Fecha	Lugar	Número de asistentes
4	Institucional	Profesionales técnicos que pertenecen al convenio PNUD-Universidad de los Andes- y RIMISP (Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural Colombia)	25 de julio	Bogotá, PUJ	11 personas: 6 mujeres, 5 hombres
5	Institucional	Profesionales técnicos del Fondo Adaptación	5 de agosto	Bogotá, FA	12 personas: 6 mujeres, 6 hombres
6	Institucional	Profesionales técnicos del Ministerio de Ambiente	10 de agosto	Bogotá, PUJ	10 personas: 7 mujeres, 3 hombres
7	Comunidad	Encuentro Nacional de Acueductos Comunitarios	13 de agosto	Páramo, Santander	19 personas: 10 mujeres, 9 hombres
8	Academia	Docentes y estudiantes de investigación Universidad de Córdoba	25 de agosto	Montería, Universidad de Córdoba	17 personas: 3 mujeres, 14 hombres
9	Academia	Docentes y estudiantes de investigación de la Universidad de Sucre	26 de agosto	Sincelejo, Universidad de Sucre	16 personas: 5 mujeres, 11 hombres
10	Corporaciones	Profesionales técnicos de las Corporaciones (CVS, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA)	30 de agosto	Sincelejo, Universidad de Sucre	14 personas: 6 mujeres, 8 hombres
11	Comunidad	Estudiantes del programa Revitalización de la Madre Tierra ofertado por la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA INDÍGENA INTERCULTURAL-UAIIN	27 y 28 de septiembre	San Marcos, Cabildo indígena	24 personas : 14 mujeres, 10 hombres

# Taller	Tipo de Actor	Público	Fecha	Lugar	Número de asistentes
12	Institucional	Alcaldes de Caimito, San Benito Abad y Magangué. Profesionales técnicos de Aguas de Sucre, gobernación de Sucre y Bolívar y Empresa de acueducto – EMCOOG de Guaranda.	29 de septiembre	Sincelejo, Aguas de Sucre	15 personas: 5 mujeres, 10 hombres
13	Institucional	Profesionales técnicos del Centro Regional de pronósticos y Alertas tempranas de La Mojana	4 de octubre	San Marcos-CorpoMojana	10 personas: 3 mujeres, 7 hombres
14	Comunidad	Promotores y promotoras (módulos de aprendizaje) Comunidad Puerta Azul	26 de octubre	Guaranda, comunidad Puerta azul	23 personas: 13 mujeres, 10 hombres
15	Comunidad	Promotores y promotoras (módulos de aprendizaje) Comunidad Mama Raya	27 de octubre	Guaranda, comunidad Mama Raya	13 personas. 7 mujeres, 6 hombres
16	Institucional	Profesionales técnicos del IDEAM	18 de noviembre	Bogotá, PUJ	6 personas: 2 mujeres, 4 hombres

En el producto 10: Memoria de los talleres se presenta una síntesis de toda la fase de socialización del proyecto.

A continuación, se presentan algunos de los principales aportes recibidos por parte de actores que participaron en los talleres:

- “Es un trabajo que aporta a las diferentes entidades encargadas de la gestión que por temas presupuestales no pueden generar este tipo de conocimiento. Es información de calidad que con el manejo adecuado puede ser útil y encaminarse a la toma de decisiones”

- “Es importante darle continuidad al monitoreo desarrollado en el marco del proyecto. Estos monitoreos deben realizarse de manera regular ya que permite reducir la incertidumbre en el entendimiento del sistema y aprovechar la herramienta de gestión construida”
- “La comunidad es muy escéptica respecto al agua subterránea porque no la ve directamente y no es completamente consciente de su disponibilidad y calidad”
- “El monitoreo participativo es fundamental en cualquier tipo de proyecto o iniciativa asociada a la gestión del recurso hídrico, de las comunidades depende en gran parte el éxito o fracaso de la ejecución de las políticas del agua”
- “También es importante estudiar la reincidencia de la contaminación en los modelos, sobre todo a medida que aumenta la contaminación, por ejemplo, del mercurio. Porque es un tema de como integramos al modelo el estudio transporte conservativo y reactivo”
- “Nuestros hijos se enferman continuamente de enfermedades estomacales, ¿esto tendrá que ver el pozo de abastecimiento ubicado a pocos metros del criadero de cerdos (porqueriza) y pozo séptico?”
- “Mientras no se implementen plantas de tratamiento es muy difícil gestionar correctamente el recurso hídrico (el 80% del municipio no cuenta con este servicio)”

- “Particularmente en Córdoba se hacen campañas de concientización para la formalización de las extracciones. Se pasó de tener 20 licencias activas a tener 110 en un solo año”

- “Uno de los principales problemas de la informalidad es que la gente no siente la necesidad de cuidar el recurso y lo usa indiscriminadamente”

- “Es un modelo coherente que ayuda a la región, porque actualmente se ejecutan muchos proyectos donde no se deben, se podrían evitar proyectos innecesarios, y con este modelo podemos saber si se puede o no se puede”

- “Por primera vez se va a tener un punto de partida para posteriores proyectos e investigaciones que se desarrollen en La Mojana. Esto porque conceptualmente hay buenas herramientas, sin embargo, la investigación siempre es muy limitada”

- “Los resultados obtenidos en el proyecto tienen muchos usos adicionales a los presentados por ustedes, por ejemplo, la Universidad de Córdoba se encuentra desarrollando la modelación del desplazamiento de las aves acuáticas, justo este año tuvimos un problema en el arroz de dos especies de aves atacan el arroz porque no tenían dónde posarse. Con la información generada el proyecto se podría soportar en este tipo de investigación”

- “Ojalá no se hiciera solo el ejercicio de los talleres con las corporaciones de la zona sino otras corporaciones y de esta menara vieran cómo se pueden hacer este tipo de procesos”

- “Es importante recoger la percepción que tiene la comunidad respecto al acuífero y respecto al agua”

2.8 Producto 9: Guía que indique cómo utilizar el modelo

2.8.1 Objetivos del producto 9

Objetivo 1: Guía del modelo hidrogeológico

Desarrollar una guía para las partes interesadas de la región con el fin de brindar acompañamiento en el uso de este modelo, en la planeación a futuro y para respaldar la toma de decisiones.

2.8.2 Descripción del producto 9

El producto 9 corresponde a la "Guía para el manejo del modelo hidrogeológico" y se estructura de la siguiente manera: El primer capítulo presenta las generalidades de la guía tales como alcance, limitaciones y usuarios. El capítulo dos describe de manera general algunos conceptos básicos de modelación y una síntesis del modelo hidrogeológico, conceptual y numérico. Así mismo incluye estado del arte de la modelación y descripción de los paquetes computacionales utilizados en el modelo. En el capítulo tres se describe el uso de la interfaz gráfica ModelMuse para visualizar, editar y ejecutar el modelo numérico. Se describen aspectos como mapa base utilizado, las condiciones de frontera del modelo y la visualización de resultados. Finalmente, el capítulo cuatro presenta posibles aplicaciones prácticas del modelo hidrogeológico resultante del estudio realizado.

2.8.3 Resultados del producto 9

La guía es un documento de carácter técnico que contiene información específica relacionada a la modelación conceptual y numérica de aguas subterráneas. Aunque se presenta de forma sencilla y ofrece indicaciones claras para el uso del modelo se espera que el usuario cuente con una formación base en ingeniería o ciencias básicas, conocimiento básico de hidrogeología, hidráulica, el uso de algoritmos y de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los usuarios potenciales de este modelo son los grupos de recurso hídrico o aguas subterráneas de las Corporaciones autónomas, IDEAM, SCG, ANLA y demás instituciones que tienen como función la gestión del recurso hídrico subterráneo.

En el marco de este proyecto, la Pontificia Universidad Javeriana construyo el modelo numérico hidrogeológico de la región de La Mojana. El dominio de modelación no solo cubrió los 11 municipios de La Mojana, si no que se extendió hasta el dominio hidrogeológico el cual tiene aproximadamente 22000 Km2. La guía busca permitir que el usuario técnico acceda, interactúe y analice el modelo numérico hidrogeológico facilitando la evolución progresiva del conocimiento, la retroalimentación del modelo y los procesos de transferencia, asimilación y disponibilidad oportuna de la información en la toma de decisiones a nivel político, económico y social. Esta guía en el margen de sus limitaciones no pretende explicar los procesos físicos, matemáticos o teóricos de la modelación.

3 CONSIDERACIONES DE GÉNERO MOJANA CLIMA Y VIDA

Colombia avanza hacia la igualdad de género en el marco de la gestión del cambio climático y responde al llamado por parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para aumentar la integración de enfoque de género en las políticas, planes, programas y proyectos orientados hacia la gestión del cambio climático. Si bien existe expresiones que demuestran interés en integrar la igualdad de género y la autonomía de las mujeres en los procesos asociados con el cambio climático, se reconoce que hasta ahora se está iniciando un camino largo en el diseño para la puesta en marcha de políticas públicas e implementación de acciones en proyectos que promuevan la igualdad de género.

El enfoque de género no significa simplemente diseñar proyectos que beneficien a las mujeres, sino integrar una comprensión de las relaciones sociales y de las dinámicas de cada territorio para adaptar las políticas públicas. Por los tanto, cambiar el rumbo de las desigualdades de género en la adaptación al cambio climático requiere de objetivos claros y acciones concretas de todos los actores institucionales, académicos y comunitarios relevantes en este proceso.

Es por ello que el programa Mojana Clima y Vida lleva a cabo la implementación de un plan de género que busca garantizar la participación igualitaria de hombres y mujeres en las medidas de adaptación al cambio climático y en consecuencia promover acciones de empoderamiento femenino en su implementación.

El Programa cuenta con 201,707 participantes directos, de los cuales 49% son mujeres. Las acciones que se promueven se basan en una comunicación sensible al género, que no refuerza los estereotipos y visibiliza de manera diferenciada las capacidades, conocimientos y sueños de las y los mojaneros.

Este programa busca la incorporación de la perspectiva de género en las diferentes actividades que se desarrollan implementado las siguientes estrategias:

- **La gestión del recurso hídrico:** comprometer a los hombres en la corresponsabilidad del aprovisionamiento familiar y por otro, en empoderar a las mujeres en los espacios de gobernanza y toma de decisiones.

- **La implementación de agroecosistemas:** recogiendo y analizando la información sobre roles, conocimientos y formas en que mujeres y hombres desarrollan sus actividades productivas, como base para el diseño de acciones diferenciadas en la implementación de los agroecosistemas y otras prácticas productivas resilientes.

- **La rehabilitación de ecosistemas:** impulsando la participación y equidad de las mujeres en las acciones de restauración de ecosistemas, bajo la premisa que estas ofrecen la oportunidad de reducir brechas históricas, frente al acceso a ciertos servicios ecosistémicos.

- **Uso de información climática y sistemas de alerta temprana:** permitiendo a las mujeres reforzar su capacidad de resiliencia y, de este modo, facilitar que las comunidades, por un lado: a) usen la información climática para la toma de decisiones diarias asociadas a la agricultura, el agua, etc, y b) estén mejor preparadas en caso de una emergencia.

4 CONCLUSIONES

El “Modelo de flujo y calidad de aguas subterráneas para determinar la dependencia a largo plazo de las soluciones de aguas subterráneas en la Mojana” es un punto de partida que contribuye en la evaluación de diferentes opciones para el abastecimiento de agua en la región ya que desarrolla una perspectiva del comportamiento hidráulico subterráneo en el núcleo de La Mojana en términos de zonas de recarga, direcciones de flujo, nivel freático, caudales, manchas de inundación y zonas de descarga.

Como principal resultado se tiene el modelo hidrogeológico que fue construido a partir de la integración de la información geológica, hidráulica e hidroquímica disponible. Este modelo por su carácter regional ha sido construido abarcando un área de aproximadamente 22.000 km^2, con resolución en el tamaño de celda de 1 km^2, razón que condiciona la naturaleza de los resultados. De acuerdo con lo anterior, se debe tener en cuenta que los resultados aportados por este modelo deben interpretarse desde la perspectiva regional con las restricciones asociadas a la escala y a la cantidad y calidad de la información base. Es importante resaltar que para el desarrollo del modelo numérico hidrogeológico fue necesario construir un modelo hidrológico y uno hidrodinámico que sirvieron para obtener las condiciones de contorno.

El modelo hidrogeológico fue construido con la información disponible y levantada en campo durante el proyecto, sin embargo, este es susceptible de ser actualizado con información nueva, lo cual permitirá mejorar la confiabilidad de los resultados que este proporciona.

Los usuarios potenciales de este modelo son los profesionales técnicos de recurso hídrico o aguas subterráneas que pertenecen a las Corporaciones autónomas, al IDEAM, SCG, ANLA y demás instituciones que tienen como función la gestión del recurso hídrico subterráneo.

A continuación, se procede a dar un listado de los posibles usos del modelo asociado a las funcionalidades operativas de las entidades antes mencionadas.

- El modelo hidrogeológico puede ser usado para estimar el balance de masas de todo el sistema o de áreas específicas.
- Se pueden usar los niveles estimados por el modelo numérico como condición de contorno para la construcción de modelos locales.
- El modelo puede ser usado para evaluar los efectos que tiene sobre el balance de masas del sistema las demandas actuales de los caudales explotados en los pozos de la región. Es importante resaltar que, en el momento de hacer la construcción del modelo, no se tenía un registro consistente por parte de las corporaciones de los pozos que existen en la región.
- Con cada actualización de los registros se puede actualizar el modelo y evaluar no solo los efectos en el balance de masas si no también los efectos en los descensos de niveles.
- Actualmente se evalúan diferentes opciones para el abastecimiento de agua en la región de La Mojana. Una de las posibles soluciones es la construcción de pozos de bombeo complementados con la cosecha de agua. El modelo puede ser usado para evaluar el efecto que tendría sobre los niveles freáticos el ingreso de una batería de pozos.
- El modelo puede ser usado para evaluar los perímetros de protección para los pozos.
- El modelo puede ser usado para determinar las líneas de flujo usando particle tracking. Esto puede ser de gran ayuda para evaluar la dirección de contaminantes y los tiempos de tránsito de estos.

5 RECOMENDACIONES

- Debido a la complejidad del modelo numérico hidrogeológico se recomienda que su manejo sea realizado por una persona con conocimientos en hidrogeología y con experiencia en software de modelación hidrogeológica, lo cual permitirá su operación de forma adecuada y eficiente, manteniendo la calidad y confiabilidad de la información que este genere.

- Las autoridades ambientales de la región si bien reconocen la importancia y el gran aporte de contar con el modelo hidrogeológico, manifiestan la dificultad que se tendría en su adopción debido a las capacidades técnicas necesarias que se requerirían para el manejo del modelo, por lo que se recomienda que este sea adoptado por una entidad que cuente con dichas capacidades y que trabaje de forma articulada con las corporaciones e instituciones interesadas en la información que el modelo puede suministrar. De acuerdo con lo anterior se considera que el Centro Regional de pronósticos y Alertas tempranas de La Mojana es la entidad que podría estar a cargo del manejo del modelo hidrogeológico y de la información asociada a este ya que cuenta con el personal técnico y capacidades computacionales necesarias para su manejo y administración.

- Con el fin de que el modelo sea aprovechado de forma adecuada para la gestión del recurso hídrico de la región, se recomienda generar espacios de socialización de este de tal forma que los usuarios (CAR´s, comunidad, Gobernaciones, Alcaldía, etc.) conozcan sus usos y se puedan planear escenarios de simulación que den respuesta a sus inquietudes, apoyando así las funciones misionales de cada entidad asociadas al recurso hídrico subterráneo.

- Se recomienda construir una mesa técnica entre las entidades con presencia en la región (CAR´s. Gobernaciones, Alcaldías, IDEAM, SGC) con el objetivo de que cada institución presenté la nueva información hidrogeológica que se genere en la zona, con el fin que pueda ser adicionada al modelo. Con esto se mantendrá el modelo actualizado y se contará con una base de datos centralizada.

- Se recomienda realizar capacitaciones especificas al personal técnico que va a manejar el modelo con el objetivo de orientarlos en cómo podrían incluir la información nueva que se genere en la región y en cómo podrían evaluar diferentes escenarios que contribuyan en los planes de desarrollo de La Mojana.

- Se recomienda la construcción de una plataforma de integración de información. Consiste en una herramienta informática que permite llevar a cabo una gestión adecuada de los datos tanto espaciales como alfanuméricos que se generaron en el proyecto y que podría incluir información de otros proyectos que se estén ejecutando en la Mojana. Esta herramienta debería contemplar un aplicativo web con el que se pueda tener acceso a los datos actualizados y proporcionar algunos análisis de manera rápida mediante el uso de herramientas como diagramas y mapas dinámicos. Esto le permitirá a las diferentes entidades o usuarios acceder de manera rápida y eficaz a la información que se esté generando en la región.

- Gracias a la interacción que se tuvo con cada actor en la fase de socialización se pudo identificar como podría contribuir la información generada en el proyecto. En la Tabla 5-1 se relaciona la información que se generó y como podría ser de utilidad.

Tabla 5-1 utilidad del la información generada en el proyecto

Actor	Información generada en el proyecto	Utilidad
Corporaciones	Modelo hidrogeológico conceptual	Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA)
	Modelo hidrogeológico numérico	PMAA
	Inventario de puntos	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), Reglamentación de Aguas subterráneas y PMAA.
	Modelo geológico 3D	PMAA
	Modelos conceptual y numérico	Asignación de concesiones
	Hidrogeoquímica y microbiológicos	PMAA, Gestión del Acuífero
	Mapas de vulnerabilidad del acuífero	PMAA, Gestión del Acuífero
	Identificación de zonas de recarga	PMAA, POMCA
	Modelo hidrodinámico	Rondas hídricas, mapas de inundación, POMCA
	Modelo hidrológico	Rondad hídricas, POMCA
Alcaldías	Mapas de vulnerabilidad del Acuífero	Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Gestión del riesgo
	Hidrogeoquímica y microbiológicos	Abastecimiento de agua a población
	Modelo hidrodinámico	Generación de mapas de inundación para POT
Gobernaciones	Mapas de vulnerabilidad del Acuífero	Plan de Ordenamiento Departamental (POD), Gestión del riesgo
	Hidrogeoquímica y microbiológicos	Abastecimiento de agua a población
	Modelo hidrodinámico	Generación de mapas de inundación para POD
Academia	Bases de datos	proyectos de investigación y extensión
	Información primaria	proyectos de investigación y extensión
	Modelo hidrogeológico conceptual	proyectos de investigación y extensión
	Modelo hidrogeológico numérico	proyectos de investigación y extensión
	Modelo hidrológico	proyectos de investigación y extensión
	Modelo hidrodinámico	proyectos de investigación y extensión
	Geodatabase	proyectos de investigación y extensión
	Modelo geológico 3D	proyectos de investigación y extensión

Actor	Información generada en el proyecto	Utilidad
	Modelo digital de Terreno-MDT ajustado (1m)	proyectos de investigación y extensión
Comunidad	Resultados de hidrogeoquímica y microbiológicos	Gestión de microacueductos y pozos particulares
	Modelo hidrogeológico conceptual	Capacitación en aguas subterráneas
Instituciones (IDEAM, FA, Servicio Geológico, MADS)	Bases de datos	Convenios, proyectos, políticas
	Información primaria	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo hidrogeológico conceptual	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo hidrogeológico numérico	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo hidrológico	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo hidrodinámico	Convenios, proyectos, políticas
	Geodatabase	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo geológico 3D	Convenios, proyectos, políticas
	Modelo digital de Terreno–MDT ajustado (1m)	Convenios, proyectos, políticas

A continuación, se presentan las especificaciones y/o requerimientos técnicos de los equipos y del software que debe ser instalado para el manejo de cada modelo realizado en el proyecto.

- **MODELO HIDROLÓGICO**

➢ **Software:** SWAT QSWAT3_64

➢ **Link de descarga:** https://swat.tamu.edu/software/qswat/

Requerimientos de Software:

➢ Microsoft Windows (10 o superior)

➢ QGis Desktop 3.10.14 (https://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html)

➢ Editor de texto

➢ Software para abrir archivos .zip

- Microsoft .Net Framework 3.5

Recomendaciones de hardware:

- 2 GB de memoria Ram o superior
- 20 GB libres en disco duro o superior
- Tarjeta de video dedicada (opcional)
-

- **MODELO HIDROGEOLÓGICO**

- **Software:** ModelMus
- **Link de descarga:** https://water.usgs.gov/waterresources/software/ModelMuse/index5_0.htm

Requerimientos de Software:

- Windows 10 Pro or Enterprise o Windows 11 Pro or Enterprise

Recomendaciones de hardware

- **Procesador:** 32-bit or 64-bit
- **Disco duro:** 500 MB espacio libre para ejecutar el modelo
- **RAM:** 8GB recomendado*

- **MODELO HIDRODINÁMICO**

Requisitos de software

Para la ejecución de un modelo en OpenTELEMAC se requiere un conjunto de diferentes herramientas como compiladores, librerías de Python, cómputo en paralelo, todas disponibles (o con alternativas equivalente) para entornos GNU/Linux o Windows y que no requieren licencia. Se listan algunas de ellas:

- Python 3.7+
- Numpy 1.8+

- Un compilador de Fortran (GFortran 4.6.3 mínimo), también es posible usar un compilador de Intel, si se dispone de una licencia.
- OpenMPI (si se desea ejecutar el código en paralelo, lo cual es muy deseable dada la extensión del modelo)
- METIS Library
- Scipy, Matplotlib (Librerías de Python)
- GIT o Subversion para la descarga del código fuente

Aunque se recomienda que la ejecución en sistemas operativos GNU/Linux por motivos de estabilidad, si se desea hacer la ejecución del modelo en Windows, existe un instalador que descarga y configura todas las librerías necesarias. Los modelos fueron ejecutados en la versión v8p1r2 de OpenTELEMAC, si se desea usar una versión más reciente, algunos archivos podrían requerir leves ajustes. En el siguiente enlace se encuentra una descripción detallada de los requisitos y proceso de instalación en Linux: http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=installation_on_linux. En su totalidad todas las herramientas requeridas son de uso libre, se recomienda que en el proceso de compilación se generen las versiones en paralelo.

Requisitos de hardware

Si bien los requisitos mínimos para la ejecución del modelo no son muy elevados, la extensión del dominio implica el uso de recursos computacionales importantes, en donde la capacidad de cómputo determinará los tiempos de ejecución requeridos, como referencia se presentan las especificaciones de los equipos empleados y los tiempos de modelación aproximados.

Se usaron instancias del servicio EC2 (Elastic Computing) de AWS (Amazon Web Services) del tipo c6i, particularmente las instancias de tipo c6i.24xlarge, que constan con procesadores Intel Xeon de última (tercera) generación con 96 núcleos y 192GB de memoria RAM. Para esta configuración se manejaron tiempos de cómputo de relación 1:30, esto es decir que 1 mes modelado tomaría 1 día de cómputo usando todos los núcleos o un año modelado tomaría 12 días (en cualquier caso, se recomienda agregar por lo menos 3 meses de calentamiento del

modelo). Computadores con especificaciones inferiores también serán capaces de ejecutar el modelo, pero a costa de la relación presentada, es decir tener respuestas para el mismo mes, tomarían más de un día (en el caso de procesadores Xeon Platinum se ha encontrado una relación aproximadamente lineal entre el número de número de núcleos y la relación de los tiempos, entonces para la ejecución del modelo usando 48 núcleos se esperaría una relación 1:15). En el caso de EC2, son viables instancias C5, C4, teniendo en cuenta la configuración individual de cada tipo de instancia. Se recomienda como mínimo 32 vCPUS (con precesadores Intel Xeon de segunda generación o superiores), 64GB de memoria RAM y capacidad suficiente para el almacenamiento de los resultados (80GB por año modelado a resolución temporal diaria). Se aclara que, aunque el modelamiento se adelantó y se presentan alternativas de servicios en la nube suministrados por Amazon (AWS), existen otras alternativas como son: Google Cloud, Microsoft Azure, IBM Cloud u otras que ofrezcan instancias adecuadas para High Performance Computing (Cómputo de alto rendimiento), como también es posible la adquisición de un equipo local, siempre y cuando se cumpla con los requerimientos mencionados.