



Acreditación Institucional
ALTA CALIDAD • MULTICAMPUS

Res. MEN No. 17228 del 24 de octubre de 2018 • 6 años

Vigilada Mineducación

ETAPA INICIAL DEL MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA ALTA GUAJIRA EN MODFLOW CON APORTES DE LAS COMUNIDADES WAYUU

AUTORES

**JULIETH DANIELA AYALA ANAYA
CRISTIAN FERNEY GÓMEZ LUNA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2021**



Acreditación Institucional
ALTA CALIDAD • MULTICAMPUS
Res. MEN No. 17228 del 24 de octubre de 2018 • 6 años
Vigilada Mineducación

ETAPA INICIAL DEL MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA ALTA GUAJIRA EN MODFLOW CON APORTES DE LAS COMUNIDADES WAYUU

AUTORES

JULIETH DANIELA AYALA ANAYA
CRISTIAN FERNEY GÓMEZ LUNA

Tesis presentada para optar al título de: Ingeniero(a) Civil

DIRECTOR

ING. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2021

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos, porque son nuestro apoyo y pilares fundamentales de todo lo que somos, sin su amor y entrega nada de esto sería posible.

Agradecemos profundamente al Ingeniero David Joseph Auresy Serrano Suárez por la motivación, guía y atención a nivel profesional e interpersonal que nos ha brindado durante todo el desarrollo de este trabajo; por su compromiso como docente y amigo, y por inculcarnos el interés por generar cambios sociales a partir de nuestra profesión.

A la Fundación Wayuuda y Comunidad Majayütpana, por la confianza puesta en nuestro proyecto y su entrega constante en el progreso del mismo.

A todos los profesores que han sido parte de nuestro proceso formativo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.	OBJETIVOS	12
2.1.	Objetivo General	12
2.2.	Objetivos Específicos	12
3.	JUSTIFICACIÓN	13
4.	ESTADO DEL ARTE	14
4.1.	Ciclo hidrológico.....	14
4.2.	Acuíferos.....	14
4.3.	Precipitación	15
4.4.	Vegetación	16
4.5.	Evapotranspiración	16
4.6.	Geología	16
4.7.	Modelos hidrológicos.....	18
4.8.	Geographic Information System (Quantum GIS)	19
4.9.	MODFLOW	20
4.10.	Python	21
5.	METODOLOGÍA.....	22
5.1.	Recopilación de datos.....	22
5.1.1.	Geología	22
5.1.2.	Precipitación	22
5.1.3.	Calidad del agua	25
5.1.4.	Topografía.....	25
5.1.5.	Recarga potencial vertical por precipitación	26
5.1.6.	Evapotranspiración	27
5.1.7.	Temperatura	27
5.1.8.	Vegetación.....	27
5.1.9.	Uso del recurso hídrico	28
5.2.	Selección de modelo	29
5.3.	Modelo	29
5.4.	Calibración, validación e incertidumbre del modelo	31
5.5.	Manejo integrado del recurso hídrico	31
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	32
6.1.	Recopilación de datos.....	32
6.1.1.	Geología	33

6.1.2.	Precipitación	36
6.1.3.	Calidad del agua	45
6.1.4.	Topografía.....	46
6.1.5.	Recarga potencial vertical por precipitación	48
6.1.6.	Evapotranspiración	49
6.1.7.	Temperatura	50
6.1.8.	Vegetación	51
6.1.9.	Uso del recurso hídrico	53
6.2.	Selección de modelo.....	55
6.3.	Modelo	55
6.4.	Calibración, validación e incertidumbre del modelo.....	72
6.5.	Manejo integrado del recurso hídrico	73
7.	DISCUSIÓN.....	74
8.	CONCLUSIONES.....	75
9.	RECOMENDACIONES.....	76
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
11.	ANEXOS.....	81

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Representación del Ciclo Hidrológico.....	14
Ilustración 2.	Estación Pluviométrica.....	15
Ilustración 3.	Discretización espacial de un acuífero con cuadrícula de celdas.....	19
Ilustración 4.	Complementos Qgis.....	23
Ilustración 5.	Environments Anaconda Navigator.....	30
Ilustración 6.	Localización de los pozos.....	32
Ilustración 7.	Localización de los pozos a más detalle.....	32
Ilustración 8.	Unidades Geológicas.....	33
Ilustración 9.	Leyenda Geológica.....	34
Ilustración 10.	Perfil litológico.....	34
Ilustración 11.	Fallas Inversas.....	35
Ilustración 12.	Fallas Normales.....	35
Ilustración 13.	Localización de los pozos y estaciones.....	37
Ilustración 14.	Modelo digital de elevación.....	39
Ilustración 15.	DEM combinado en mapa de sombras.....	40
Ilustración 16.	DEM recortado y exportado a GRASS.....	41
Ilustración 17.	Acumulación y dirección de flujo.....	41
Ilustración 18.	Cuencas.....	42
Ilustración 19.	Isoyetas de octubre.....	43
Ilustración 20.	Isoyetas de mayo.....	44
Ilustración 21.	Calidad del agua.....	45
Ilustración 22.	Puntaje de riesgo.....	46
Ilustración 23.	DEM recortado a 25 km ²	47

Ilustración 24. Capa vectorizada.	47
Ilustración 25. Sección de la nube de puntos.	48
Ilustración 26. Valores típicos del coeficiente de tipo de suelo.	48
Ilustración 27. Valores típicos del coeficiente de pendiente de suelo.....	49
Ilustración 28. Valores típicos del coeficiente de uso de suelo.	49
Ilustración 29. Temperatura media mensual.....	50
Ilustración 30. Índice de vegetación NDVI.	51
Ilustración 31. NDVI mayor o igual a 0.4.	52
Ilustración 32. NDVI menor a 0.4.....	53
Ilustración 33. Polígono ráster de 25km ² y puntos de la ubicación de los pozos.....	56
Ilustración 34. Extensión de 25 km ²	57
Ilustración 35. Ubicación de la zona de estudio.....	57
Ilustración 36. Filas y columnas: celdas.	60
Ilustración 37. Grilla ubicada geográficamente.	60
Ilustración 38. Topografía de la zona de estudio.	62
Ilustración 39. Perfil de la zona de estudio.	63
Ilustración 40. Perfil de la zona de estudio y diferencia de materiales.	63
Ilustración 41. Celdas y ubicación de los pozos.....	66
Ilustración 42. Celdas y condiciones de borde.....	67
Ilustración 43. Cargas hidráulicas vistas en planta.	69
Ilustración 44. Cargas hidráulicas vistas en perfil.	70
Ilustración 45. Modelo leído en MODELMOUSE.	70
Ilustración 46. Muestra de los resultados finales para el periodo 4 de la simulación.....	72

TABLAS

Tabla 1. Grupos de rocas.	17
Tabla 2. Librerías y funciones.....	29
Tabla 3. Estaciones cercanas a la zona de estudio.	36
Tabla 4. Coordenadas de las estaciones a usar.	37
Tabla 5. Leyenda de variación del índice de vegetación.....	52
Tabla 6. Datos de consumo.....	54
Tabla 7. Porcentajes de consumo.	54
Tabla 8. Muestra de datos de Longitud, Latitud y Altitud.	61

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Precipitación total promedio mensual.....	38
Gráfica 2. Variación mensual de la temperatura.	50
Gráfica 3. Porcentajes de discrepancia.	71

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de movimiento de agua subterránea en tres dimensiones.....	18
Ecuación 2. Ecuación de continuidad que expresa el equilibrio de flujo en una celda.	20
Ecuación 3. Método RAS.	26
Ecuación 4. Balance climático.	27
Ecuación 5. Coeficiente de infiltración.	27

Ecuación 6. Relación de las capas insertadas.....	28
---	----

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Santana Urraich.....	81
Anexo 2. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Irraipa.	82
Anexo 3. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Sillamana.....	83
Anexo 4. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Perpana.....	84
Anexo 5. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Orochon.....	85
Anexo 6. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Carrizal.	86
Anexo 7. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Ahuyama.	87
Anexo 8. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Jojoncito.	88
Anexo 9. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Jasay.....	89
Anexo 10. Precipitación total promedio por mes.....	90
Anexo 11. Valores medios multianuales de evaporación en mm	90
Anexo 12. Valores medios multianuales de evapotranspiración en mm	91
Anexo 13. Precipitación y evapotranspiración en mm/día.....	92
Anexo 14. Balance climático y recarga.....	94
Anexo 15. Salida de terminación de simulación.....	96

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ETAPA INICIAL DEL MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA ALTA GUAJIRA EN MODFLOW CON APORTES DE LAS COMUNIDADES WAYUU.

AUTOR(ES): Julieth Daniela Ayala Anaya
Cristian Ferney Gómez Luna

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

La extracción de agua subterránea se ha convertido en una alternativa cada vez más viable para la obtención del recurso debido a su escasez y demanda, especialmente en zonas áridas y semiáridas. En La Guajira, departamento perteneciente a Colombia, se encuentran ubicadas múltiples comunidades indígenas Wayuu que son afectadas por la precariedad del recurso hídrico debido a las condiciones propias de la zona y al abandono estatal. Un método de aporte para las comunidades anteriormente mencionadas, son los estudios que permitan entender las condiciones en las que se encuentran sus fuentes hídricas sin ser invasivos con sus creencias y cultura. Los modelos computacionales son un claro ejemplo de lo anteriormente mencionado, ya que facilitan el desarrollo de simulaciones que permiten comprender las propiedades y dinámicas de los acuíferos, y realizar acompañamiento a los procesos correspondientes a la extracción del agua con la finalidad de reducir los impactos ambientales y asegurar la duración del recurso. En este trabajo se desarrolla un modelo hidrogeológico teórico inicial en tres dimensiones haciendo uso de la herramienta MODFLOW, que permite analizar las propiedades características de la zona (geología, topografía, precipitación, evapotranspiración y extracción de pozos) con el propósito de conocer su interacción con el agua de dos pozos existentes en la Comunidad Majayütpana y proporcionar un registro histórico que aporte a la base informativa de la región y se emplee como eje de referencia para futuras investigaciones. Este modelo proporciona información sobre las cargas hidráulicas de la zona de estudio y permite visualizar datos de entrada y salida del recurso mediante la premisa del balance hídrico.

PALABRAS CLAVE:

Agua subterránea, Modelo hidrogeológico, MODFLOW, Acuíferos, Wayuu, Recarga, Evapotranspiración

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: INITIAL STAGE OF THE HYDROGEOLOGICAL MODELING OF THE ALTA GUAJIRA IN MODFLOW WITH CONTRIBUTIONS FROM THE WAYUU COMMUNITIES.

AUTHOR(S): Julieth Daniela Ayala Anaya
Cristian Ferney Gómez Luna

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

The extraction of groundwater has become an increasingly viable alternative to obtain the resource due to its scarcity and demand, especially in arid and semi-arid areas. In La Guajira, a department belonging to Colombia, there are multiple Wayuu indigenous communities that are affected by the water resource precariousness because of the conditions of the area and the state's abandonment. A contribution method for the communities described above are the studies that will understand the conditions in which their water sources are found without being invasive with their beliefs and culture. Computational models are a clear example of the aforementioned, they facilitate the development of simulations that allow understanding the properties and dynamics of aquifers, and monitor the processes corresponding to the extraction of water in order to reduce environmental impacts and ensure the duration of the resource. In this work an initial theoretical hydrogeological model in three dimensions is developed using the MODFLOW tool, which allows to analyze the characteristic properties of the area (geology, topography, precipitation, evapotranspiration and extraction of wells) in order to know its interaction with the water from two existing wells in the Majayütpana Community and provide a historical record that contributes to the information base of the region and is used as a reference axis for future research. This model provides information on the hydraulic loads of the study area and allows to visualize input and output data of the resource through the premise of the water balance.

KEYWORDS:

Groundwater, Hydrogeological model, MODFLOW, Aquifers, Wayuu, Recharge, Evapotranspiration

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

El recurso más importante para la subsistencia del ser humano es el hídrico, por esta razón es el más expuesto a sobreexplotación a causa de su gran requerimiento, y este factor agrava cada vez más su cantidad y calidad. El agua es un recurso multifuncional, que además de ser básico para la vida de los seres humanos, animales y plantas, es un recurso económico y social; en donde las zonas urbanas y rurales pueden apoyar su desarrollo (Schneider, 2017). La principal función del agua es biológica, pero de forma complementaria, participa directa o indirectamente en los procesos productivos tanto de alimentos como de otros bienes de manufactura para cubrir las necesidades de los seres humanos (Mateu, 1993). Estos usos tienen repercusiones ambientales que deben tenerse en cuenta para controlar el recurso y evitar el desbalance en su manejo.

Un tercio del agua establecida para riegos y abastecimiento de la población mundial, es el agua subterránea, que por factores económicos y de acceso, ha incrementado su utilización especialmente en zonas áridas y semiáridas en donde se han perforado millones de pozos sin control ni ayuda de técnicas amigables con el medio ambiente (Sahuquillo et al., 2009). Esta, corresponde al agua filtrada en el terreno a través de los vacíos presentes en las rocas y residuos del subsuelo, se caracteriza por estancarse en capas arenosas y este factor es lo que da paso a la formación de los acuíferos (Custódio & Llamas, 1996); por lo que se entiende que el agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que poseen poros o vacíos y su composición está ligada al tipo de suelo, características del agua infiltrada, y procesos microbiológicos y químicos del suelo (Vélez et al., 2011). El agua subterránea es un recurso importante para el ciclo hidrológico ya que, en los periodos secos (cuando no hay precipitaciones), el caudal que mantiene un flujo permanente en los ríos corresponde a la descarga de agua subterránea en los mismos (Ordoñez, 2011). Por ende, se hace necesario comprender cómo se genera el agua subterránea y qué factores se encuentran interrelacionados con su generación y afectan sus condiciones.

Debido a su gran importancia surgen los modelos hidrológicos e hidrogeológicos de agua subterránea, los cuales son una expresión esquemática de acuíferos y sus características (geometría, extensión, espesor, dirección de flujo, zonas de recarga y composición del agua); y su utilidad se basa en la capacidad y facilidad que poseen para describir propiedades, condiciones, procesos y en general el comportamiento del acuífero a modelar (Veloza, 2013). La construcción de estos modelos puede llegar a ser una tarea complicada dependiendo del tamaño, la geometría, dominio y variabilidad temporal de los procesos que se requiera simular; normalmente se construyen mediante interfaces gráficas de usuario (GUI) que son diseñadas con diferentes niveles de complejidad y sofisticación, consisten en entornos interactivos y visuales en donde para efectos de este tipo, se desarrolla una cuadrícula con propiedades hidráulicas y condiciones de contorno en donde se correrá el modelo (Bakker et al., 2016). Para la realización de estos procesos es importante caracterizar la zona a trabajar en cuanto a geología, precipitación, evapotranspiración, temperatura y consumo del recurso hídrico.

El departamento de la Guajira, ubicado hacia el Noreste de Colombia en una zona intertropical de altas temperaturas y de terrenos en su mayoría desérticos, vivencia escasez del recurso hídrico. En las zonas media y alta de este departamento las poblaciones sufren a gran escala este problema, especialmente las comunidades indígenas asentadas en el sector (comunidades Wayuu, entre ellas, la comunidad Majayütpana¹), quienes además de experimentar pocas precipitaciones, ausencia de escorrentías superficiales, recargas a los acuíferos reducidas, gran evaporación y alta salinidad en los suelos, se ven expuestas al abandono estatal; razón por la que sus principales fuentes de abastecimiento de agua se apoyan en sistemas simples como

¹ Comunidad Wayuu ubicada en el departamento de la Guajira, Colombia.

pozos o jagüeyes². Estas comunidades basan su consumo hídrico en actividades como ganadería, agricultura y consumo personal (lavado de ropa, baños y comida) aún cuando el agua no es completamente potable (Molano Campuzano, 1964) y los pozos de agua a los que tienen acceso y de donde satisfacen sus necesidades, en su mayoría poseen grandes porcentajes de salinidad. Estas comunidades poseen gran conocimiento sobre su territorio gracias a la interacción que han establecido con el medio ambiente, presentan interés por los recursos naturales, donde el agua se valora y se maneja según las costumbres adquiridas (A.R. Daza-Daza et al., 2018). La planificación y gestión que se le ha dado al recurso hídrico dentro de estos territorios no ha logrado mejorar la calidad de vida de las comunidades indígenas más necesitadas ubicadas en las zonas rurales del país, y requieren un cambio de enfoque en donde el agua sea entendida desde una perspectiva ecosistémica que permita controlar la cantidad y calidad, garantizando así su disponibilidad (Rodríguez & Carabalí, 2017) pero manteniendo los lineamientos importantes que les caracterizan como comunidad basándose en sus creencias.

² Pequeñas y medianas represas artificiales de agua, principalmente reservorios de agua lluvia (Botero et al., 2009)

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Construir un modelo hidrogeológico en una zona específica de la Alta Guajira, recolectando información de estaciones meteorológicas, fuentes locales y datos satelitales, para entender la dinámica del agua y su relación con las comunidades Wayuu de la región.

2.2. Objetivos Específicos

- 2.2.1.** Recopilar la información física y química del agua, correspondiente al ciclo hidrológico y caracterizar el terreno interpretando los datos geológicos, para proporcionar un registro histórico a la comunidad Wayuu.
- 2.2.2.** Simular el comportamiento del agua teniendo en cuenta la extracción en los pozos construidos, obteniendo un modelo inicial teórico.
- 2.2.3.** Analizar los resultados del modelo, proponiendo metodologías para completar y mejorar la calidad de datos, para facilitar el manejo del recurso hídrico en la comunidad.

3. JUSTIFICACIÓN

La Guajira se puede clasificar dentro de las zonas con terrenos áridos y semiáridos, en las cuales se presentan pocas precipitaciones, ausencia de escorrentías superficiales, gran evaporación, alta salinidad en los suelos, entre otros; instalar una red de acueducto representa una solución lógica y óptima, sin embargo, al ser este departamento el hogar de una de las poblaciones indígenas más representativas del caribe colombiano (Wayuu), las funciones estatales se ven limitadas debido a la importancia de estas comunidades como patrimonio de la humanidad y además, este hecho hace que el gobierno se olvide de las responsabilidades que posee con las mismas; por lo que, las fuentes principales de abastecimiento de agua se basan en sistemas simples como acuíferos (pozos) o jagüeyes.

Uno de los recursos naturales más importante para la subsistencia de todo ser humano es el agua; sin embargo, es uno de los más afectados debido a la sobreexplotación, agravando cada vez más sus condiciones. Por esto, es necesario comprender cómo se genera el agua subterránea y que factores afectan sus características, especialmente en sectores como la Guajira, en donde esta es su fuente hídrica principal.

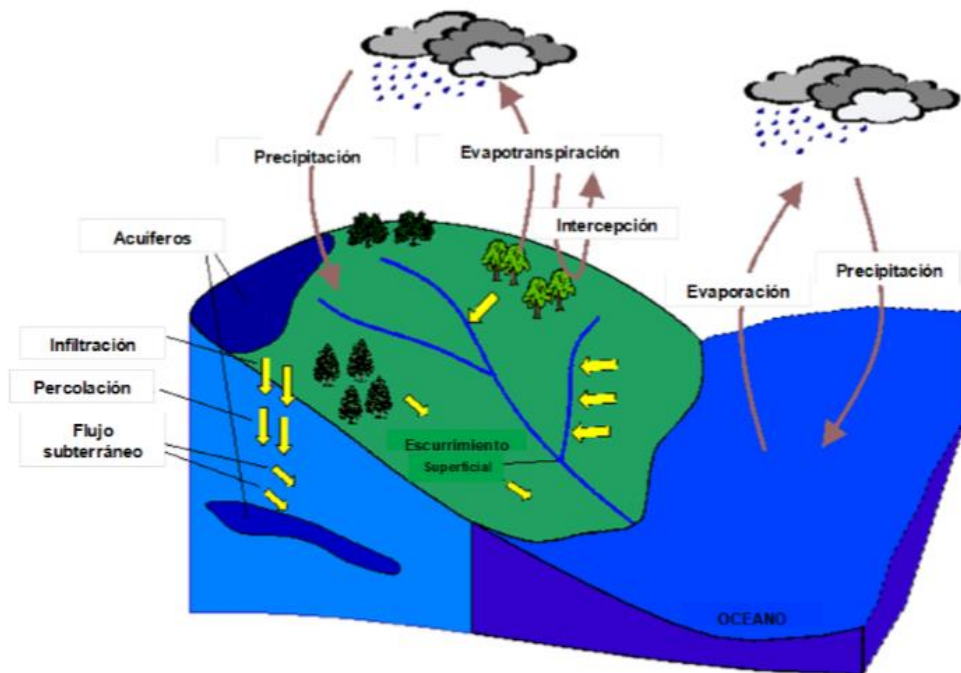
Se pretende incentivar el estudio de las zonas que presenten este tipo de vulnerabilidad afectando notablemente la calidad de vida de las personas, en este caso, las comunidades Wayuu. Por esto, es necesario brindar la información y herramientas adecuadas para que estas poblaciones puedan aprovechar al máximo sus recursos y tengan las habilidades necesarias para optimizarlo. Esto se logrará a partir de la generación de un modelo de agua subterránea, el cual permitirá acceder a un registro histórico e inventario hidrogeológico de la zona de estudio y, a partir de la simulación del comportamiento y extracción de aguas, brindará la información necesaria para el correcto manejo del recurso hídrico. Sin embargo, la inexistencia de material informativo de la zona, como caracterización geofísica y geológica, incidencia de fallas geológicas en el comportamiento de las aguas subterráneas, datos suministrados por tomografías axiales computarizadas del terreno (TAC), entre otros, pueden dificultar la realización de este tipo de estudios. Debido a ello, algunos de estos datos se asumirán en base a estudios que se hayan realizado en zonas similares. Por ello, se tiene como intención principal, aportar significativamente a la base informativa de la zona en caso de futuros estudios.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Ciclo hidrológico

Se entiende que “el ciclo hidrológico es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta, no tiene principio ni fin y suele describirse normalmente comenzando desde los océanos porque éstos constituyen la fuente principal del agua en circulación” (Ordoñez Galvez, 2011). La acción de la radiación solar hace que el agua de los océanos sea evaporada y que al ascender su resultado a la atmósfera se formen las nubes que, manteniendo características específicas, condensan su humedad y desciende a la superficie terrestre como lluvia, granizo o nieve (que corresponden a las diferentes formas de precipitación). La precipitación es la causante de casi la totalidad de agua dulce que está en la tierra y realiza un proceso de escurrimiento superficial (se transporta por la superficie terrestre hasta los cursos de agua) o de infiltración en el suelo. En ésta última, el agua que no queda retenida en las raíces de las plantas (en las cuales posee la posibilidad de regresar a la atmósfera a través de la evapotranspiración) percola descendiendo por fuerza de la gravedad hasta llegar a un reservorio de agua subterránea o acuíferos. En la Ilustración 1. se puede observar el ciclo anteriormente mencionado.

Ilustración 1. Representación del Ciclo Hidrológico (Musy et al., 2014).



4.2. Acuíferos

El agua subterránea es almacenada en acuíferos (que son volúmenes subterráneos de arena y roca) a diferentes niveles de profundidad. “Los acuíferos se clasifican según la presión hidrostática en acuíferos libres o freáticos, confinados o cautivos, y semiconfinados” (Senent Alonso, 1997). En los libres, el agua se encuentra en contacto con la formación permeable y ceden agua a través del drenaje de sus poros; los confinados se encuentran atrapados por una capa impermeable confinante; y en los semiconfinados existe la

posibilidad de que la capa confinante no sea de carácter completamente impermeable. Los acuíferos se pueden encontrar en cualquier tipo de zona: sea húmeda, árida o semiárida; que dependen de factores tales como precipitación, vegetación, evapotranspiración, geología, uso de la tierra, etc. Además, se pueden clasificar según su textura en acuíferos porosos, kársticos y fisurados. En los acuíferos porosos el agua circula a través de los espacios entre las capas del terreno (Solano Brito, 2018); en los kársticos presentan drenaje organizado y heterogéneo (Candela, 2015); y en los fisurados la circulación del agua se produce a través de las grietas provocadas por la fracturación del terreno (Solano Brito, 2018).

4.3. Precipitación

La precipitación es el resultado del vapor de agua atmosférico que se encuentra distribuido en la superficie de la Tierra, y se presenta cuando la atmósfera se satura con el mismo, dando paso a que el agua se condense y caiga en forma de lluvia, granizo o nieve (Blanquer, 2005). De allí surge la escorrentía superficial, que corresponde al flujo de la lluvia, granizo o nieve sobre la tierra y es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y da paso a la infiltración, proceso en el que el agua de la superficie entra en el suelo.

El IDEAM³ es el encargado de recopilar y organizar los datos de precipitación en Colombia, para ello utiliza estaciones pluviométricas ubicadas en diferentes zonas del país que se encargan de medir la cantidad de lluvia en un rango de tiempo, mediante el uso de un pluviómetro (mide la cantidad de agua que cae por metro cuadrado de suelo).

Ilustración 2. Estación Pluviométrica (IDIGER, 2019).



Existen análisis geoestadísticos que permiten conocer la distribución espacial de la precipitación como las isoyetas, que son isolíneas que unen puntos en un plano cartográfico y representan la precipitación en una determinada unidad de tiempo, ajustadas a los datos

³ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Colombia.

de topografía y lluvia de la zona mediante la interpolación espacial (Becerra-Soriano & Gutiérrez-López, 2006).

4.4. Vegetación

Se considera vegetación al resultado proveniente de la acción de los factores ambientales pertenecientes a un espacio donde cohabitan, existen e interactúan los diferentes organismos vivos. La vegetación puede dar un indicativo del clima, la naturaleza del suelo, la disponibilidad de agua y de nutrientes, y factores antrópicos y bióticos. De esta manera, es la encargada de modificar algunos de los factores del ambiente. Como los principales ejes, la vegetación y el ambiente evolucionan al unísono durante el tiempo, mostrando cambios rápidos y evidentes durante las primeras etapas de desarrollo, y otro más lentos a medida que se acercan a un estado estable (Matteucci, 2002).

4.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la suma del agua perteneciente a la evaporación desde la superficie del suelo, la obstruida por la vegetación y la transpiración de estas (por los estomas); a partir de esta es posible determinar las necesidades hídricas que requiere un determinado sistema de cultivos o una región (Jaramillo Robledo, 2006). La tasa de evapotranspiración generalmente se encuentra regulada por:

- La radiación solar.
- La temperatura.
- El déficit de presión de vapor.
- El intercambio de humedad.
- La cobertura vegetal.
- Las propiedades físicas y químicas del suelo.
- La sanidad del cultivo.
- Prácticas que alteran el microclima (cobertura vegetal, el sombrero, el riego, las barreras rompevientos y las distancias de siembra).

4.6. Geología

Se define la geología como la ciencia que busca una comprensión del planeta Tierra. Se divide en dos amplias áreas: la física y la histórica. La **geología física** es la encargada de estudiar los diferentes materiales que componen la tierra con la finalidad de comprender los procesos que se desarrollan en la superficie terrestre y en las profundidades de esta. La **geología histórica** busca comprender el origen y la evolución del planeta Tierra a lo largo del tiempo y así, organizar cronológicamente los diferentes cambios físicos y biológicos que se han presentado. Es de saberse que la Geología física es imperativa e indispensable para la Geología histórica debido a que, antes de comprender la evolución de la tierra y revelar su pasado, primero se debe comprender cómo es el funcionamiento la Tierra (Tarbuck et al., 2005). Si bien se pueden proponer muchas hipótesis, un estudio geofísico propone la opción ideal para una definición con mayor precisión. Una de las opciones más llamativas para la caracterización geofísica es la tomografía axial computarizada de rayos x (TAC) la cual *“permite evidenciar la estructura interna de un objeto a partir de la toma de imágenes en forma de cortes, lo que es conveniente, teniendo*

en cuenta que el poso de estudio se encuentra a una distancia relativamente cercana a una falla geológica inversa” (Ortiz Meneses et al., 2015). Las imágenes son generadas a partir de la exposición del objeto ante los rayos x, en donde cada material posee un comportamiento diferente cuando estos lo atraviesan; por lo que “el resultado no son más que imágenes con diferentes coeficientes de atenuación” (Ortiz Meneses et al., 2015). Algo similar sucede con los lentes de las cámaras; estas implementan la cantidad de luz que reflejan los objetos para captar la información de las formas y colores; sin embargo, un aspecto importante para la formación de la imagen son los píxeles (pequeñas unidades en donde se guarda una cantidad de información), entre más pequeños y mayor cantidad de píxeles pueda captar la cámara, mayor detalle tendrá la imagen. En el caso del TAC, las unidades de almacenamiento de información se denominan voxels y funcionan de la misma manera “cuanto más pequeños sean los voxels, el equipo podrá captar y mostrar estructuras más pequeñas” (Ortiz Meneses et al., 2015). Se debe tener en cuenta que es necesario realizar la emisión de los rayos x en diferentes lugares y ángulos de la zona de estudio. Para entender la interacción existente entre el agua y las rocas, es imperativo conocer algunos de los conceptos básicos y orígenes que, desde la geología, han sido el punto de partida de grandes estudios; logrando mejorar nuestra percepción sobre los ecosistemas y permitiendo que puedan ser aprovechados al máximo, sin generar un impacto ambiental abrupto. Dentro de los componentes básicos, se encuentra la clasificación de las rocas en tres grandes grupos:

Tabla 1. Grupos de rocas (Tarbuck et al., 2005).

Grupo	Definición
Ígneas	Comprende una parte considerablemente grande de la totalidad de la corteza terrestre. Su proceso de formación se desarrolla a partir del enfriamiento del magma, esto ocurre cuando el material magmático asciende hacia la superficie terrestre produciendo así, lo que conocemos con erupción volcánica. Cuando el magma entra en contacto con las condiciones ambientales de la superficie, se inicia su enfriamiento; este tipo de rocas se le conoce como ígneas extrusivas o volcánicas. Por otro lado, parte del magma que intenta ser expulsado pierde movilidad en el proceso y no logra alcanzar la superficie, sin embargo, este se cristaliza en el sitio donde quedó ubicado; este tipo de rocas se denominan ígneas intrusivas o plutónicas.
Sedimentarias	Se puede encontrar en casi la totalidad de la superficie terrestre y en el fondo marino. Su formación de basa en el depósito de materiales solidos con la ayuda de fluidos (agua o aire). Su origen son los restos meteorizados, los cuales, se encuentran en constante movimiento o traslado debido a la acción de un fluido para finalmente situarse en el fondo de los lagos, en ríos, valles, entre otros. Este material trasladado puede ser tanto grava como polvo. Su formación final se da cuando las capas inferiores en las pilas de los sedimentos empiezan a compactarse y por tanto a endurecerse, formando así una roca sólida.
Metamórficas	Se conforman a partir del cambio de rocas sedimentarias e incluso de otras rocas metamórficas; su formación se efectúa cuando una de las rocas madre se somete ante condiciones diferentes a las iniciales, por ejemplo, la temperatura o la presión. Estos cambios pueden variar según la intensidad de los factores a los que están

sometidos y se pueden evidenciar fácilmente si el metamorfismo es de alto grado, o no, si es de grado bajo.

4.7. Modelos hidrológicos

En general, los diferentes métodos numéricos conforman un conjunto de técnicas con las cuales se pueden formular problemas matemáticos que pueden ser resueltos a partir de operaciones aritméticas. A pesar de que existen muchos tipos de métodos numéricos, todos están relacionados debido a que requieren de grandes cantidades de cálculos aritméticos. Sin embargo, con el desarrollo de computadoras más eficientes y rápidas, los métodos numéricos manuales quedan en el pasado, debido a que la búsqueda de soluciones ante los diferentes problemas que se presentan en la ingeniería ha aumentado considerablemente y se han presentado de una manera más eficiente (Chapra & Canale, n.d.). *“Los modelos numéricos proporcionan una estructura para sistematizar la información de campo, para responder preguntas sobre el funcionamiento de un acuífero, y pueden ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional.”* (Betancur & Palacio, 2009).

A finales de los 80s, el USGS (United States Geological Survey) desarrolló un software de modelación tridimensional de flujo de aguas subterráneas. Este programa se denominó MODFLOW y actualmente es el sistema de modelamiento de aguas más utilizado, promocionado y documentado en todo el mundo; adicionalmente, cabe destacar que es totalmente gratuito, por lo que está a la mano de cualquier persona interesada en realizar estudios de aguas subterráneas en casi todos los niveles de complejidad debido a la recopilación de gran número de versiones desarrolladas al través del tiempo. *“Una de las funciones generales más llamativas es su capacidad de interpretar y mostrar el proceso de interacción existente entre el agua superficial y la subterránea”* (Molina Pérez et al., 2014); además, este sistema está conformado por una gran familia de programas adicionales que brindan una mayor experiencia y precisión en el modelamiento, incluyen flujos de densidad variable, transporte de solutos, compactación del sistema acuífero y hundimiento de la tierra, estimación de parámetro y gestión de aguas subterráneas.

Se realizó un estudio en la provincia Granma, en la Habana (Cuba) con el fin de abarcar la diferencia entre el programan PMWIN (Processing Modflow for Windows) y AQÜIMPE, en él se expone: aun cuando los datos arrojados para el modelamiento hidrológico son en ambos casos similares, PMWIN (MODFLOW) presenta la posibilidad de recibir e interpretar una mayor cantidad de información, sobreponiéndolo ante AQÜIMPE en términos de precisión y confiabilidad de los datos. Sin embargo, a pesar de que la capacidad de AQÜIMPE es inferior a la de PMWIN, la información arrojada no presenta variaciones exorbitantes entre ambos sistemas, lo que indica que *“AQÜIMPE tiene la capacidad de brindar resultados aceptables, con poca información”* (Molina Pérez et al., 2014).

Para los modelos matemáticos, el movimiento en tres dimensiones del agua subterránea a través del material terrestre, se describe por la Ecuación 1.

Ecuación 1. Ecuación de movimiento de agua subterránea en tres dimensiones (Chung, 2013)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

En donde:

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} = Valores de conductividad hidráulica en los ejes x, y y z.

h = Carga hidráulica (longitud).

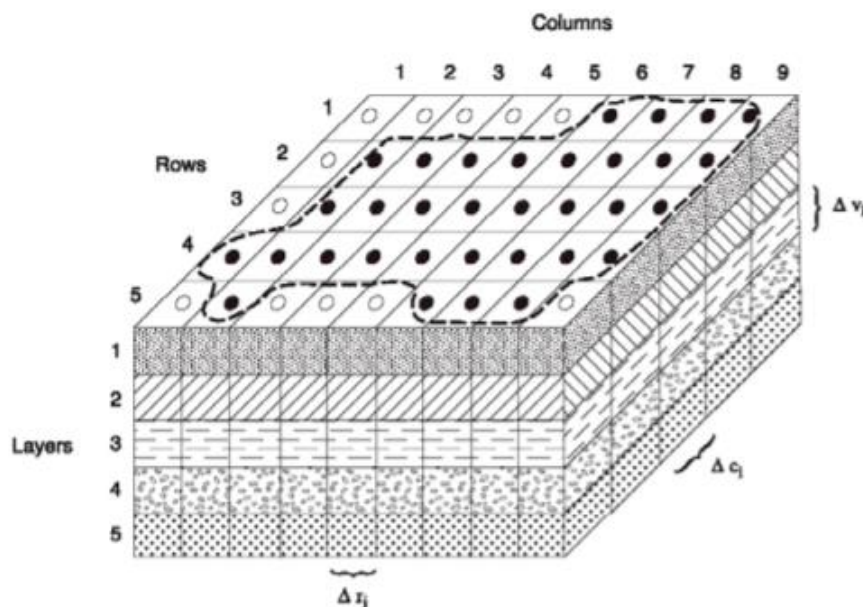
W = Flujo volumétrico por unidad de volumen que representa fuente o sumidero de agua.

S_s = Almacenamiento específico del material poroso (longitud^{-1}).

t = Tiempo.

Las soluciones analíticas de la Ecuación 1. son difíciles de encontrar, por ello se emplean métodos que permitan obtener resultados cercanos como el de diferencias finitas, en donde se reemplaza el sistema continuo descrito por la ecuación anteriormente mencionada por un conjunto de puntos definidos de forma espacial y temporal, y las derivadas parciales por términos obtenidos a partir de diferencias de los valores de carga hidráulica en esos puntos (Chung, 2013).

Ilustración 3. Discretización espacial de un acuífero con cuadrícula de celdas (Chung, 2013).



En la Ilustración 3. se observa la discretización espacial de un acuífero desconocido mediante celdas; las cuales se ubican a través de filas, columnas y capas (i, j, k sus índices respectivamente). Los sistemas constan de N_{filas} (N_{row}), N_{columnas} (N_{col}) y N_{capas} (N_{lay}); en este caso, se observan 5 filas, 9 columnas y 5 capas. El ancho de las celdas en la dirección de las filas para una columna j , se designa Δr_j ; el ancho de las celdas en la dirección de las columnas para una fila i , se designa Δc_i ; y el espesor de las celdas en una capa determinada k , se denomina Δv_k . Por ende, si la celda posee coordenadas $(i, j, k) = (2, 3, 1)$ se hallaría su volumen de la forma: $\Delta r^2 \Delta c^3 \Delta v^1$ (Chung, 2013).

4.8. Geographic Information System (Quantum GIS)

Un Geographic Information System (SIG) proporciona una visualización, análisis y almacenamiento de datos en relación con una zona geográfica específica, con la finalidad de relacionarlos con las diferentes situaciones geográficas, para representarlo en un mapa

(Universidad Veracruzana, 2013). Este tipo de herramientas es sumamente útil cuando se pretende analizar una zona tomando a consideración factores ambientales, culturales, económicos, sociales, espaciales, entre otros.

Algunas de las funciones que pueden realizar los SIG son:

- Análisis geográfico.
- Análisis estadístico.
- Procesamiento de imágenes.
- Manejo de base de datos.
- Despliegues cartográficos.
- Digitalización de mapas.

QGIS es un software que permite la construcción de un SIG a partir de una serie de aplicaciones que permiten crear datos, modelos, mapas y consultar datos geoespaciales (Universidad Veracruzana, 2013).

4.9. MODFLOW

MODFLOW es un software gratuito desarrollado por el United States Geological Survey (USGS) con el objetivo de facilitar el proceso de modelación del flujo de aguas subterráneas (Roman, 2008); específicamente la evolución de los niveles según las condiciones dadas:

- Bombeos
- Ríos
- Drenes
- Infiltración de precipitaciones.

Actualmente, la versión gratuita de MODFLOW no posee una interfaz gráfica como tal; sin embargo, MODELUSE puede suplir esto. Adicionalmente, existe una versión gráfica, pero no gratuita (Visual MODFLOW).

MODFLOW trabaja bajo el supuesto de que la carga de agua subterránea es constante, por ello el desarrollo de la ecuación de flujo para la misma en forma de diferencias finitas es propia de la ecuación de continuidad que expresa que la suma de todos los flujos de entrada y salida de la celda debe ser igual a la tasa de cambio en el almacenamiento de esta (Chung, 2013) como se observa en la Ecuación 2.

Ecuación 2. Ecuación de continuidad que expresa el equilibrio de flujo en una celda (Chung, 2013).

$$\sum Q_i = Ss \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

En donde:

Q_i = Tasa de flujo hacia la celda (longitud³/tiempo)

Ss = Almacenamiento específico del material poroso (longitud⁻¹).

ΔV = Volumen de la celda (longitud³)

Δh = Cambio de altura en un intervalo de tiempo de longitud Δt .

4.10. Python

Python es un lenguaje de programación que ha estado en desarrollo desde 1990, el cual es reconocido por facilitar el uso de códigos simples que desarrollan las mismas funciones que otros más complejos, razón por la cual ha incursionado de gran forma en la educación y en herramientas científicas que requieren ser puntuales y eficientes. Cuenta con librerías en amplias ramas de conocimiento, decenas de módulos que facilitan las necesidades básicas al momento de programar, y además, con un sistema de documentación que describe el uso de funciones, clases y parámetros (Challenger-Pérez et al., 2014). Para el uso de Python, desarrolladores han brindado la posibilidad de visualizar interfaces gráficas más agradables y sencillas de manejar como Jupyter Notebook, que es una red de código abierto perteneciente a Anaconda Navigator, y permite ejecutar líneas de código, plasmar imágenes y contenido descriptivo de las mismas (Abirami et al., 2021).

5. METODOLOGÍA

Se realizará la recopilación de datos que permitan caracterizar la zona de estudio mediante diferentes métodos, la selección del modelo que más se adecue a las condiciones que se plantean y la adecuación de los datos para que puedan ser utilizados en el modelo seleccionado.

5.1. Recopilación de datos

Este trabajo abarca diferentes ramas de conocimiento, por ende, los datos serán recopilados de diferentes fuentes, tales como: Comunidad Majayütpana con ayuda de la Fundación Wayuuda, IDEAM, EarthData Search, Lansat8, etc.

5.1.1. Geología

La recolección de los datos geológicos se basará en la información brindada por el Servicio Geológico Colombiano u otras fuentes oficiales, para comprender qué formaciones se encuentran en la zona de estudio, las fallas y las características del suelo.

5.1.2. Precipitación

La precipitación es una de las características más importantes al momento de analizar el movimiento de aguas subterráneas debido a que brinda información acerca de la cantidad de agua que cae al suelo en una zona específica. Además, junto a las características geológicas y topográficas, puede mostrar las posibles formaciones de ríos (permanentes o temporales) y la infiltración de esta en el suelo.

Para la caracterización de precipitaciones en la zona se deberán realizar los siguientes pasos:

- ✓ Ingresar a la página del IDEAM, específicamente a la sección de consulta y descarga de datos hidrometeorológicos.
- ✓ Se deben seleccionar las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio.
- ✓ Se deben descargar las memorias históricas de las anteriormente mencionadas.
- ✓ Se procede a abrir los datos de las estaciones en Excel⁴ (se debe tener en cuenta que estos archivos están originalmente en formato TXT, por lo cual es posible que al pasarlo a Excel se observen algunos errores).
- ✓ Se procede a organizar los datos de tal manera que se facilite su comprensión.
- ✓ Se promedian los datos históricos anuales de precipitación por mes y se crea una nueva tabla con estos datos por cada estación (*Únicamente se considerarán las estaciones con datos históricos anuales mayores a 20 años*).
- ✓ Se grafica esta última tabla y se verifica el comportamiento de las curvas generadas.

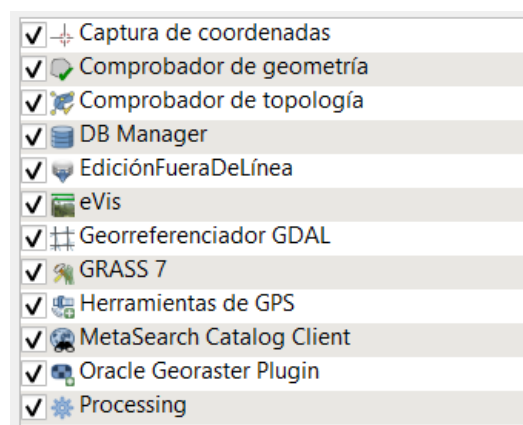
Dentro del proceso de análisis superficial de la zona de estudio, es importante conocer el comportamiento del agua (pluvial) con el terreno; de este modo, es recomendable

⁴ Programa informático conformado por columnas, filas y celdas que se comportan como una hoja de cálculo electrónico (Fernandez Muñoz, 2014).

realizar un mapa de isoyetas de la zona, con los datos anteriormente mencionados (estaciones pluviométricas IDEAM). En este caso, se sugiere implementar el sistema Quantum Gis (QGIS), una herramienta similar a ARCGIS, pero con la facilidad de descarga gratuita y una interfaz visualmente más agradable. De este modo, deberá proceder de la siguiente manera:

- ✓ Es necesario descargar los mapas de Digital Elevation Model (DEM) para trabajar en el sistema QGIS. Este tipo de mapa se puede encontrar en cualquier buscador que se encuentre en internet, sin embargo, se recomienda EarthData Search (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).
- ✓ Una vez ingresado al enlace se debe ubicar/seleccionar la zona de interés. El buscador arrojará los DEM que conformen la zona (estos serán los mapas por descargar).
- ✓ Se procede a abrir el programa QGIS.
- ✓ Una vez abierto se debe indicar el sistema de georreferenciación (Proyecto > Propiedades > SRC > selección del SRC); este variará según la ubicación de la zona de estudio. En este caso se implementará el MAGNA SIGRAS 4997, perteneciente al territorio colombiano.
- ✓ Se procede a abrir los mapas DEM (Capa > añadir capa > Añadir capa ráster), luego se deben seleccionar los DEM anteriormente descargados. En caso de que sean muchas capas, se pueden combinar de esta manera: Ráster > Miscelánea > Combinar.
- ✓ Una vez subidas las capas es importante verificar que también se encuentren en el SRC indicado anteriormente, para esto se debe dar clic derecho a la capa y en propiedades hay que dirigirse al apartado de fuente, allí se podrá ver una barra desplegable que debe contener el SRC correcto.
- ✓ Para separar el mapa en cuencas, QGIS trabaja en conjunto con una serie de complementos que deben ser descargados y activados (complementos > Administrar e instalar complementos); en la Ilustración 4. se indican los recomendados:

Ilustración 4. Complementos Qgis (Fuente propia).



- ✓ Una vez activados todos los complementos, se procederá a crear un directorio de mapas con ayuda de la extensión GRASS, para esto, se recomienda crear una carpeta y posteriormente crear el directorio dentro de esta (Complementos > Grass > Nuevo directorio de mapas). Allí se abrirá una ventana donde se debe seleccionar la ubicación de la carpeta previamente

creada; seguido a esto, se debe seleccionar la localización de GRASS (para este caso será "Colombia"); posteriormente se debe nombrar el directorio de mapa (para este caso será "LaGuajira"); como último paso se clikea el botón "finalizar".

- ✓ Ya creado el directorio de mapas, se deben abrir las herramientas de GRASS (Complementos > GRASS > Abrir herramientas de GRASS).
- ✓ En el apartado de Región se debe seleccionar el área de interés con coordenadas o con el botón "Seleccione la extensión arrastrando en el lienzo". Una vez seleccionada la zona, se clikea en el botón "Aplicar" (el área debe aparecer dentro de un recuadro rojo).
- ✓ Para llevar la capa ráster de QGIS a la carpeta creada de GRASS se localiza en el apartado de módulos la función "r.in.gdal.qgis". Se selecciona la capa del DEM y se le asigna el nombre de la nueva capa (se recomienda usar el mismo nombre seguido de "_GRASS" para diferenciar ambas capas). Se clikea en "Ejecutar" y, una vez cargada la capa, se clikea en "Ver salida".
- ✓ Seguido a esto se corrigen los errores de elevación del mapa generado, para esto se debe usar el módulo "r.fill.dir". Se selecciona la última capa creada y se clikea el cuadro pequeño ubicado a la derecha de la barra desplegable. Luego, se da el nombre tanto a la capa de elevación de salida sin depresiones y la de direcciones de flujo (nuevamente con la terminación _GRASS). Se ejecuta y se da en "Ver salida".
- ✓ Una vez hechas las correcciones, se procede a delimitar las cuencas de la zona a partir del módulo "r.watershed", allí se selecciona la capa de elevación de salida sin depresiones y se clikea nuevamente el recuadro al lado derecho. Adicionalmente, se digita el tamaño de cada cuenca (Número de celdas). Luego, se nombra cada ráster de salida (Acumulación, Dirección de drenaje, segmentos de arroyos y cuencas, seguido de la terminación "_TamañoDeLaCuenca"). Se ejecuta y se clikea "Ver salida".
- ✓ Ya creadas las cuencas, se procede a seleccionar la cuenca de interés a partir de la ubicación de los segmentos de arroyos; para esto es necesario hallar las coordenadas del punto de interés de la cuenca; por lo cual se debe ubicar el apartado "Vectorial" y seleccionar la opción "Captura de coordenadas".
- ✓ En la capa de Segmentos de arroyos, se ubica el cursor en el punto de interés y se clikea. En el recuadro de Captura de coordenadas aparecerá la ubicación del punto.
- ✓ Posteriormente se abrirá el módulo "r.water.outlet". En el menú desplegable se selecciona la capa de Dirección de drenaje creada por el módulo "r.watershed". Nuevamente se clikeará el botón con el recuadro. Después, se digitan las coordenadas halladas en el paso anterior y se nombra la capa de salida. Se ejecuta el módulo y se clikea "Ver salida".
- ✓ Se realiza una tabla en Excel que contenga la nomenclatura, coordenadas y precipitaciones promedio de las estaciones seleccionadas: N° Estación, Coordenada X, Coordenada Y, Nombre de estación, Altitud, Precipitación.
- ✓ Una vez hecha la tabla, debe exportarse en formato "Archivo de valores separados por comas".
- ✓ En la aplicación Qgis, se importa este archivo de la siguiente manera: Capa > Añadir Capa > Añadir capa de texto delimitado. Una vez allí, se selecciona el documento respectivo; en el apartado "definición de geometría" se relaciona el nombre de las celdas con el nombre de las columnas, se define el sistema de georreferencia y se clikea en añadir.

- ✓ Posteriormente se procede a reproyectar la capa de las estaciones por lo cual hay que dirigirse al menú en el apartado de Procesos > Caja de herramientas de procesos y se busca la opción “reproyectar capa”. Se selecciona la capa de los puntos anteriormente importada, se verifica el sistema de georreferencia, se nombra y busca una localización para guardar el archivo y finalmente se ejecuta.
- ✓ Luego, se debe exportar esta capa en formato shapefile, de este modo, se hace clic derecho sobre la capa reproyectada > Exportar > Guardar objetos como, se selecciona el tipo de archivo a guardar (Archivo shape ESRI), se nombra y busca nuevamente una localización para su guardado, se verifica el sistema de georreferencia y se da en aceptar.
- ✓ En la caja de herramientas se busca la función “Interpolación IDW”, se selecciona la capa tipo shapefile creada anteriormente, se selecciona como atributo de interpolación la opción de precipitación promedio (o como haya sido nombrada en la tabla inicial), se determina el tamaño del píxel a conveniencia, ya sea el píxel X o Y (entre más pequeño, habrá un mayor detalle), se nombra y se busca una localización para su guardado y finalmente se ejecuta. NOTA: no es necesario modificar la cantidad de filas o columnas ya que estas variarán automáticamente cuando se modifique el tamaño de cualquier píxel.
- ✓ Si se desea tener una mejor visualización de la capa interpolada, se abren las propiedades de la capa y en simbología se cambia el tipo de renderizador a “Pseudocolor monobanda” y se da en aceptar.
- ✓ Para formar las isolíneas de la capa creada, hay que ir al apartado Ráster > Extracción > Curvas de nivel, se selecciona la capa interpolada, se digita el intervalo entre curvas, se nombra y se determina la localización para su gradado y finalmente se ejecuta. NOTA: las curvas de nivel generadas hacen referencia a la precipitación en mm (o según las unidades que se estén manejando).
- ✓ Para visualizar el valor de cada curva se abre las propiedades de las curvas y en el apartado “Etiquetas” se selecciona la opción “Single Labels”. Finalmente cliquee en aceptar.
- ✓ Para exportar los datos se recomienda seguir los pasos de 7 al 12 de la sección 7.1.4 (topografía).

5.1.3. Calidad del agua

Para la obtención de este ítem, es necesario investigar sobre las propiedades que posea el agua de la zona de estudio; características tales como su porcentaje de salinidad, color aparente, pH, turbiedad, y demás factores que permitan comprender su estado.

5.1.4. Topografía

El programa QGIS brinda las herramientas necesarias para extraer datos pertenecientes del DEM anteriormente mencionado según las necesidades del trabajo que se quiera realizar. Para tener una noción sobre la topografía de la zona es posible determinar una nube de puntos en formato separado por coma (Excel) con coordenadas longitud, latitud y altitud de estos de la siguiente manera:

- ✓ Se determinan las coordenadas norte y este correspondientes al área de interés y se insertan en Google Earth con la finalidad de verificar la correcta localización.
- ✓ Se exportan los puntos ubicados en Google Earth.
- ✓ Con las imágenes del DEM previamente descargadas y unidas en la aplicación QGIS, se procede a seleccionar el área de interés.
- ✓ Se importan los puntos generados en Google Earth a Qgis.
- ✓ En el menú, se ubica el apartado Ráster > Extracción > Cortar ráster por extensión; se selecciona la capa del DEM, se usa la extensión de la capa correspondiente a los puntos del área de interés y finalmente se ejecuta.
- ✓ Seguido a esto volvemos al menú Ráster > Conversión > Poligonizar (Ráster a vectorial), se selecciona la capa previa y se ejecuta (este proceso puede tardar un poco).
- ✓ Para determinar las coordenadas de la nube de puntos, se debe ir al menú Vectorial > Herramientas de investigación > Puntos regulares. Allí se selecciona la capa vectorial generada en el anterior paso, y se determina la cantidad de puntos a generar. Finalmente se ejecuta.
- ✓ Posteriormente se debe analizar la capa vectorial y los puntos generados como uno solo, por lo cual hay que dirigirse al menú Complementos > Analyses > Point sampling tool. Se selecciona la capa de puntos, luego la capa vectorial y se procede a ejecutar.
- ✓ Al abrir la tabla de atributos, solo aparecen los datos de las alturas de los puntos, por tanto, se da clic (Ctrl+E) para editar los datos y se selecciona la calculadora de campos. Allí determinamos el nombre de las coordenadas que queremos hallar (Norte/Este, X/Y, Latitud/Longitud...) y se selecciona el número de salida como decimal (real).
- ✓ En la lupa, localizada en la parte inferior de la calculadora de campos, se debe buscar la opción \$X o \$Y según corresponda al nombre, se clikea dos veces y se da aceptar (se repite esto para la coordenada restante).
- ✓ Una vez halladas las coordenadas de los puntos, se desactiva el modo edición de datos y se da guardar.
- ✓ Una vez guardado este proceso, se procede a exportar esta nube de puntos en formato Separado por coma, por lo cual se da clic derecho sobre la capa > Exportar > Guardar objetos como (y se selecciona el formato).

5.1.5. Recarga potencial vertical por precipitación

Para el cálculo de la recarga potencial vertical por precipitación, se utilizará el método RAS (Recarga de aguas subterráneas), el cual hace referencia a un proceso teórico basado en los principios de Schonsinsky y Losilla (2000), y realiza una aproximación a la recarga hídrica real en las cuencas (Figueredo, 2019). Este método pretende relacionar clima, geología, vegetación, topografía y uso de suelo mediante la Ecuación 3.

Ecuación 3. Método RAS (Figueredo, 2019).

$$R = BC * C$$

En donde:

R = Recarga potencial vertical por precipitación.

BC = Balance climático.
C = Coeficiente de infiltración.

Y a su vez, el balance climático es expresado por la Ecuación 4. y el coeficiente de infiltración, por la Ecuación 5.

Ecuación 4. Balance climático (Figueredo, 2019).

$$BC = P - Evtr$$

En donde:

P = Precipitación en mm
Evtr = Evapotranspiración en mm

Ecuación 5. Coeficiente de infiltración (Figueredo, 2019).

$$C = KFC + KP + KV$$

En donde:

KFC = Coeficiente del tipo de suelo.
KP = Coeficiente de pendiente.
KV = Coeficiente del uso del suelo

Se requiere en el cálculo de la recarga utilizar los valores de precipitación medidos por las estaciones definidas, de la forma: se promediarán todos los datos de enero del 2010 en todas las estaciones, y así se procederá con los demás meses.

5.1.6. Evapotranspiración

Para la recolección de datos de evapotranspiración, se accederá a los registros históricos con acceso al público proporcionados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Para este modelo, solo se tendrán en cuenta los datos de evapotranspiración debido a que la librería de MODFLOW no considera el fenómeno de evaporación.

5.1.7. Temperatura

Para este análisis se requiere conocer la temperatura media mensual para la zona de estudio mediante investigación y graficar los datos obtenidos, con la finalidad de reconocer parámetros que faciliten la interpretación de los datos arrojados por el modelo y permitan realizar análisis más certeros.

5.1.8. Vegetación

Es necesario conocer el estado de la vegetación en la zona de estudio ya que es un factor determinante dentro de la dinámica del agua y su interacción con el movimiento de aguas subterráneas. En este caso, no se incluirá en el modelo, pero se utilizará para comprender factores físicos de la zona en la que se está realizando el proceso e

interpretar los resultados. Para el análisis de la vegetación se debe realizar lo siguiente:

- ✓ Se descargan las imágenes satelitales correspondientes a la vegetación en la zona de estudio, esto puede encontrarse en la página web del programa COPERNICUS (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), el cual es un proyecto de la Agencia Espacial Europea (ESA) que realiza procesos de observación terrestre con fines ambientales. Es importante conocer de cual satélite se descargará la imagen ya que la fórmula para hallar el índice de vegetación varía dependiendo de estos (se recomienda que el satélite sea el LANDSAT8).
- ✓ Una vez descargada la imagen satelital, se obtiene una serie de archivos que contienen 11 bandas o capas correspondientes a la vegetación. Se procede a importar las capas 4 y 5 al programa QGIS (debido a que en estas se encuentran los datos de índice de vegetación).
- ✓ Ya exportadas las capas de interés, se abre la calculadora ráster en la cual se introducirá la Ecuación 6.

Ecuación 6. Relación de las capas insertadas

$$\frac{\text{Capa 5} - \text{Capa 4}}{\text{Capa 5} + \text{Capa 4}}$$

- ✓ Cuando se digite la ecuación relacionando las capas insertadas, se procede a nombrar la capa generada y a buscar una ubicación en el escritorio para guardarla. Hecho esto, se da en Aceptar (puede que la nueva capa tarde un poco en cargar).
- ✓ Al final de este proceso se mostrará una capa en escala de grises en la cual tendremos el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) que oscila entre -1 y 1 según la cantidad de vegetación en la zona.
- ✓ Con la función “Cortar ráster por extensión” se selecciona el área de interés y se recorta.
- ✓ Para tener una mejor visualización de las zonas con vegetación sana y discretizarla de las que no tienen, se procede a vectorizar la capa en la pestaña Ráster > Extracción > Poligonizar.
- ✓ Para exportar los datos se recomienda seguir los pasos de 7 al 12 de la sección 7.1.4 (topografía).

5.1.9. Uso del recurso hídrico

Es necesario tener claridad de la zona en donde se realizará el análisis del recurso hídrico, así como (de ser habitada) de la comunidad que allí se encuentra, con la finalidad de reconocer el uso que le dan al agua, mejorar los resultados del modelo y analizarlos. Para ello, se recomienda obtener datos de consumo o extracción de los pozos mediante la implementación de medidores o sondeos a la población. En este modelo, se obtendrán los datos de consumo de agua mediante sondeos en la comunidad Majayütpana, utilizando el método cuantitativo de tobos (baldes que corresponden a 16.6 litros) en las diferentes actividades que realizan los habitantes tanto para temporada de lluvia como temporada seca. Además, mediante métodos de observación y recolección de los datos, la comunidad compartirá información sobre el porcentaje de agua que es extraído de los pozos.

5.2. Selección de modelo

En la actualidad existen múltiples maneras para realizar modelamiento hidrogeológico y es importante reconocer qué beneficios brinda cada herramienta para discernir la adecuada dependiendo de los requerimientos del modelo específico. Para la realización de este modelo se busca trabajar con herramientas gratuitas, que sean de fácil acceso y que posean documentación propia en donde se pueda encontrar la definición de las variables a utilizar según las librerías y funciones.

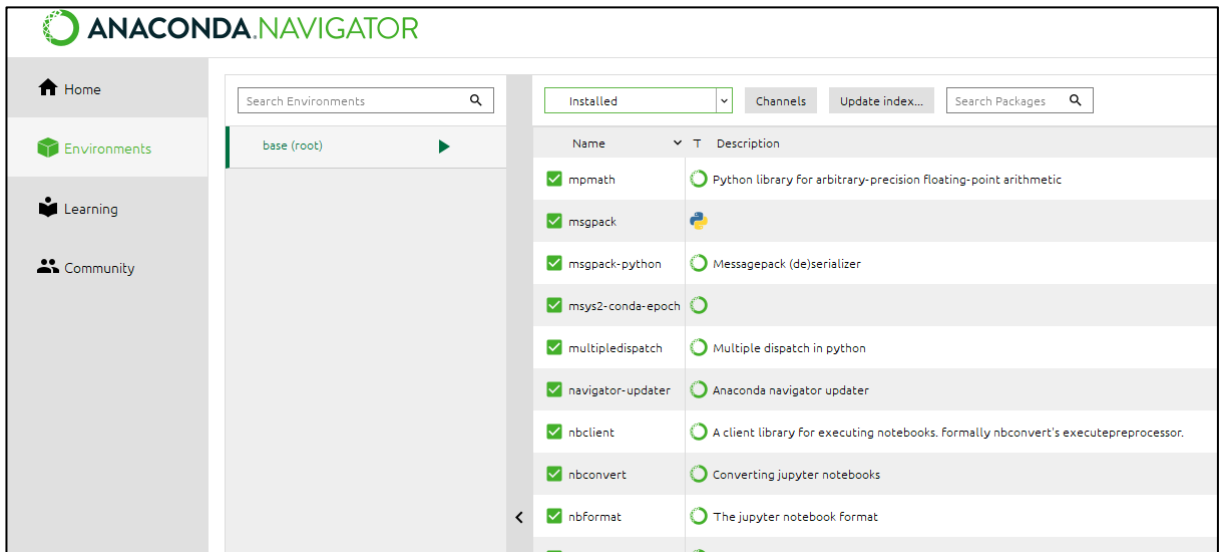
5.3. Modelo

Este modelo considerará el comportamiento del agua en tres dimensiones y permitirá visualizar las cargas hidráulicas a lo largo del periodo de tiempo a modelar. Para este, se requiere descargar Anaconda Navigator que permitirá el acceso a Jupyter Notebook, lugar en el que se desarrollarán las líneas de código. Necesita, a su vez, instalar Python, Gridgen 64 y MODFLOW NWT 64. Seguido de estos pasos, desde el lanzador de Anaconda Navigator, y en el espacio de Environments como se muestra en la Ilustración 5, se deben activar además de los instalados por defecto, los complementos especificados en la Tabla 2.

Tabla 2. Librerías y funciones (Fuente propia).

Librería	Función
Numpy	Da soporte para crear vectores y matrices grandes multidimensionales, junto con una gran colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con ellas.
Matplotlib	Es una biblioteca para la generación de gráficos a partir de datos contenidos en listas o arrays en el lenguaje de programación Python y su extensión matemática NumPy.
Flopy	El paquete FloPy consta de un conjunto de scripts de Python para ejecutar MODFLOW, MT3D, SEAWAT y otros programas de aguas subterráneas relacionados con MODFLOW.
PyShp (Gridgen)	La biblioteca de Python Shapefile (PyShp) proporciona soporte de lectura y escritura para el formato de Esri Shapefile.
Pandas	Es una biblioteca de software escrita como extensión de NumPy para manipulación y análisis de datos para el lenguaje de programación Python.
Scipy	Hace parte de la biblioteca científica de Python y dentro de sus funciones principales, facilita la realización de interpolaciones.
Mplleaflet	Permite la creación de mapas interactivos mediante georreferenciación.

Ilustración 5. Environments Anaconda Navigator (Fuente propia).



Además de habilitar las librerías desde Anaconda Navigator, las mismas se deben importar en el libro del modelo a realizar, y se procede de la siguiente manera:

- ✓ Se creará una carpeta que contenga a las demás, dentro de esta y por practicidad, existirán las siguientes: Exe, que contendrá los ejecutables del modelo (el complemento Gridgen y la aplicación MODFLOW NWT 64); Model, que contendrá los resultados del modelo a medida que se realicen las líneas de código; Rst, que contendrá la información de los ráster; Scripts, que contendrá la información sobre las líneas de código; y Shp, que contendrá los shapefile que se añadirán al modelo.
- ✓ Se debe definir el nombre del modelo y la carpeta en la que se ubicará.
- ✓ Se llamarán mediante la función PyShp los shapefile con los archivos de extensión de la zona de estudio y de la ubicación de los pozos. Estos shapefile se exportarán de QGIS y corresponden a datos de ubicación geográfica.
- ✓ Se generará una cuadrícula del tamaño de la zona a trabajar y otra que relacione la extensión de los pozos.
- ✓ Mediante la función Mplleaflet se ubicará la zona geográfica de estudio.
- ✓ El modelo leerá el shapefile y se podrán calcular las coordenadas y dimensiones de la zona de estudio.
- ✓ Se definirá una cantidad de filas y de columnas que permita discretizar la zona. En este caso el tamaño de refinamiento global y local será igual.
- ✓ Se añadirán los datos de número de capas, capa más alta, capa más baja, número de periodos, pasos, y tipo de periodos de estrés (estático o transiente).
- ✓ Se deben asignar los parámetros de discretización temporal y espacial utilizando el paquete DIS.
- ✓ Se añadirá el shapefile de condiciones de borde mediante la función PyShp.
- ✓ Se creará el DEM de la zona mediante los datos obtenidos en el ráster de topografía, lo cual permitirá reconocer el terreno y sus variaciones topográficas mediante los valores de Longitud, Latitud y Altitud.
- ✓ Se asignarán las elevaciones de cada capa y asimismo, los valores del coeficiente de permeabilidad (Kx) para el tipo de suelo correspondiente.
- ✓ Se añadirán los datos de evapotranspiración con la función EVT, recarga con la función RCH y extracción de los pozos con la función Wel; haciendo uso del

complemento Gridgen con la finalidad de que los valores se adhieran a la celda correspondiente.

- ✓ Se correrá el modelo haciendo uso de la función OC_SPD para cada periodo y sus divisiones (pasos).
- ✓ Se escribirán los datos del modelo y se visualizarán las cabezas hidráulicas.

5.4. Calibración, validación e incertidumbre del modelo

Para validar que los datos arrojados por los modelos sean verídicos y cercanos a la realidad, es necesario realizar la calibración de los mismos. Este proceso requiere ajustar los datos simulados con los datos observados mediante métodos como prueba y error o calibración automática haciendo uso de cálculos numéricos (Cabrera & Eng, n.d.). En el caso de estudio, y por las condiciones propias de COVID-19, no se podrá realizar correctamente la calibración y ajuste de los datos. En este orden de ideas, la validación se realizará teniendo en cuenta la tendencia y lógica de los datos respecto a las características definidas de la zona de estudio.

5.5. Manejo integrado del recurso hídrico

Una vez obtenidos los resultados del modelo y de acuerdo con las necesidades de cada zona de trabajo, es necesario proponer metodologías que permitan manejar de forma adecuada el recurso hídrico, poder reconocer los periodos de sequía y tomar medidas específicas para optimizar el uso del agua para la zona de estudio que, en este caso, se encuentra ampliamente afectada por las formas de acceso al recurso y la ausencia del mismo. Con la finalidad de lograr lo planteado, se realizará una entrega del modelo a la Comunidad Majayütpana a través de la Fundación Wayuuda, en donde se explicará su uso y las condiciones que podrían variar con la finalidad de mejorarlo.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. Recopilación de datos

Los dos puntos de estudio que se muestran en la Ilustración 6. (el pozo 1, de agua con salinidad alta cerca al municipio de Uribia y el pozo 2, de agua con baja salinidad en la comunidad Majayütpana), pertenecen a zonas indígenas olvidadas de La Guajira en la costa Caribe de Colombia, de las que se tiene una cantidad limitada e incierta de datos hidrológicos y escaso acceso al recurso hídrico. Los pozos se encuentran a 1.05 km de distancia entre ellos.

Ilustración 6. Localización de los pozos (Google, 2021).

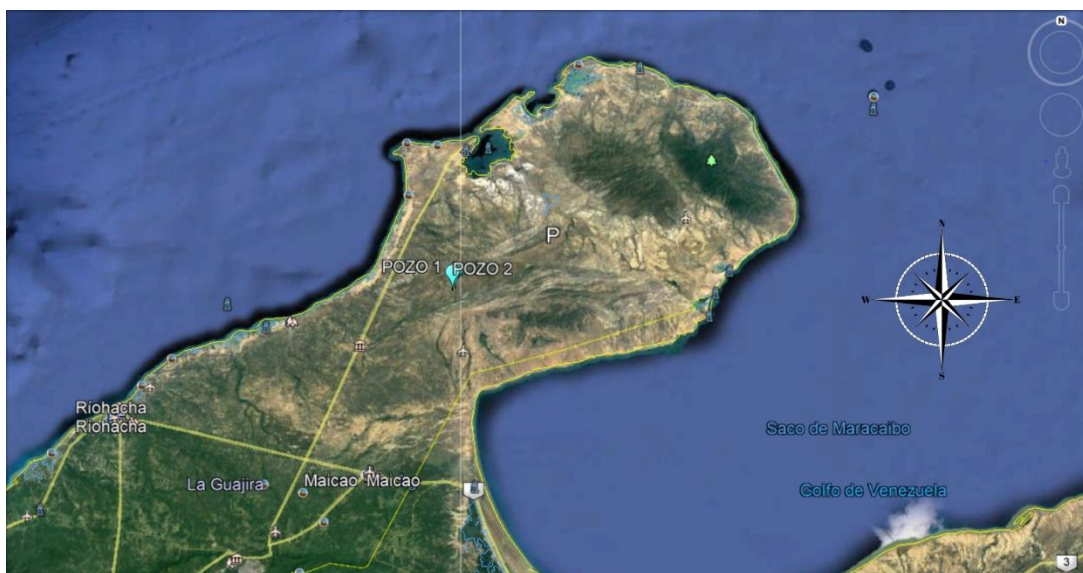
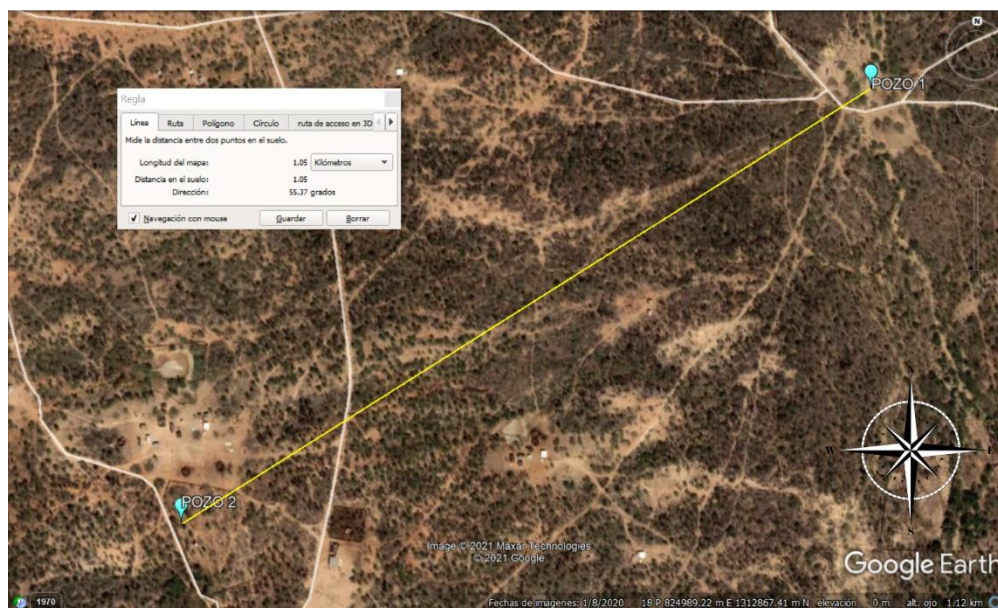


Ilustración 7. Localización de los pozos a más detalle (Google, 2021).



6.1.1. Geología

La geología es fundamental para reconocer y entender las formaciones hidrológicas de las zonas de estudio y facilita la comprensión de la relación existente entre el flujo de agua subterránea con las propiedades del suelo. Surge la hidrogeología como puente de interpretación del vínculo anteriormente mencionado, en donde para la estimación de movimiento de agua, se requiere considerar datos tanto de frecuencia de precipitación como de características geológicas del suelo (textura, porosidad, cobertura vegetal, uso, componentes rocosos, fracturas, etc.) (Servicio Geológico Colombiano, 2015). En la región de la Alta Guajira, se encuentran rocas con extensos rangos de edad que se ubican desde el Proterozoico hasta los tiempos recientes, formaciones metamórficas, ígneas y sedimentarias; en donde las más antiguas corresponden al Neis de Jojoncito (como se puede observar en la Ilustración 8. y 9.) con edades de 1260 millones de años que “se caracterizan por un tamaño de grano medio, localmente fino y esporádicamente grueso, la unidad está compuesta principalmente por granulitas con altos contenidos de feldespato potásico y ausencia de moscovita primaria; granulitas máficas y en menor proporción neises cuarzo feldespáticos, neises anfibólicos, pegmatitas y mármoles” (Ortiz-Vasquez, 1978).

Ilustración 8. Unidades Geológicas (SGC, 2020).

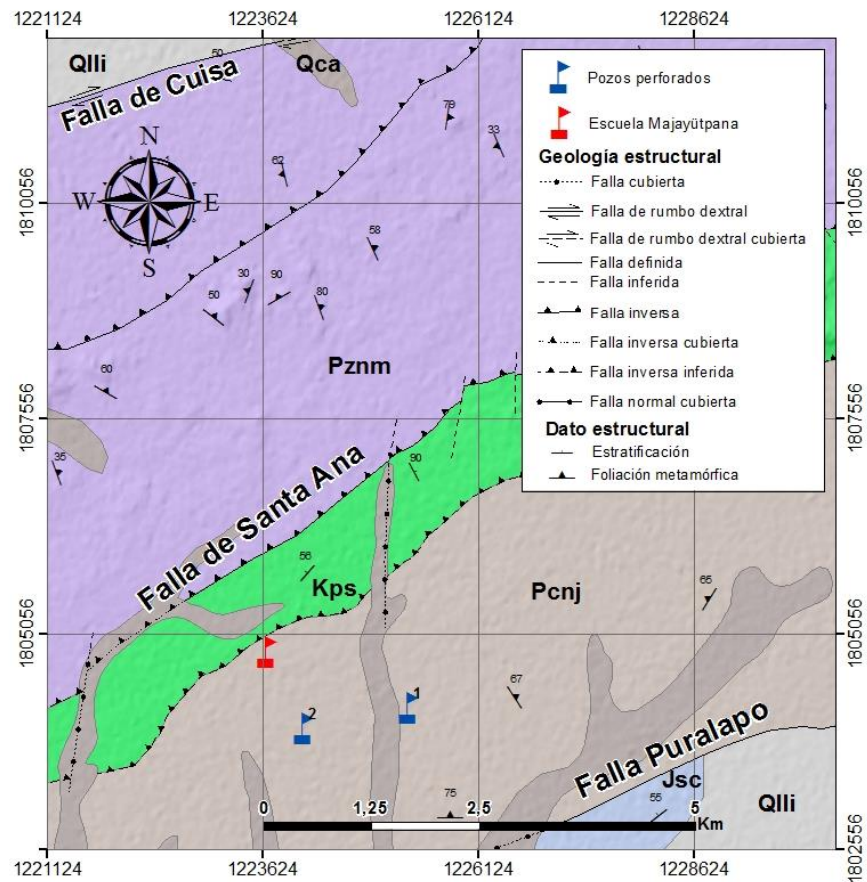
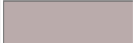
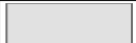




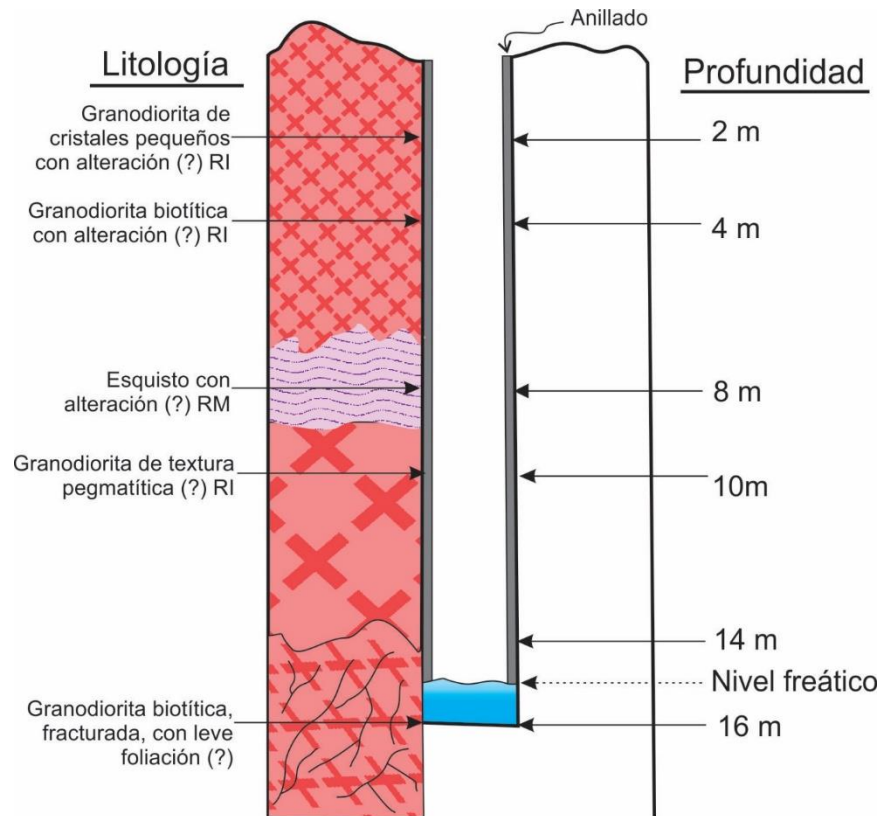


Ilustración 9. Leyenda Geológica (SGC, 2020).

ERA	SISTEMA	CÓDIGO	NOMBRE	COLOR
CENOZOICO	Cuaternario	Qca	Depósitos de cauce aluvial	
		Qlli	Depósitos de llanura de inundación	
MESOZOICO	Cretácico	Kps	Formación Poschachi	
	Jurásico	Jsc	Formación Cuisa	
PALEOZOICO		Pznm	Neis de Macuira	
PRECÁMBRICO		Pcnj	Neis de Jojoncito	

La Fundación Wayuuda realizó un estudio litológico para el pozo de agua más dulce en donde se pueden visualizar los materiales correspondientes a diferentes capas de suelo como se observa en la Ilustración 10. Esto nos permite comprender que las rocas encontradas en la zona de estudio son impermeables y el movimiento del agua probablemente se presenta a través de las fracturas de las mismas.

Ilustración 10. Perfil litológico (Fundación Wayuuda).



Es importante reconocer que la zona de estudio pertenece al Neis de Jojoncito y a su vez, a la era del precámbrico en donde se encuentra un cuerpo metamórfico (rocas duras, no permeables) contenido en rocas ígneas y cerca de sedimentarias, lo que

permite asociar los acuíferos con fracturamiento de las estas (es decir, porosidad secundaria) debido a fallas geológicas.

Se conoce del Neis de Jojoncito que gran parte de su formación rocosa es metamórfica perteneciente al precámbrico, y posee una permeabilidad casi nula (impermeable); lo que nos permite confirmar que la formación del acuífero se dio a partir de la existencia de fracturas o grietas y es un factor que se debe considerar como parte importante del análisis.

Se puede observar de la Ilustración 8 que existen en la región fallas inversas (el bloque colgante se eleva y generan montañas como se observa en la Ilustración 11) y fallas normales (el bloque colgante baja y genera cuencas representadas en la Ilustración 12).

Ilustración 11. Fallas Inversas (Tarbuck et al., 2005).

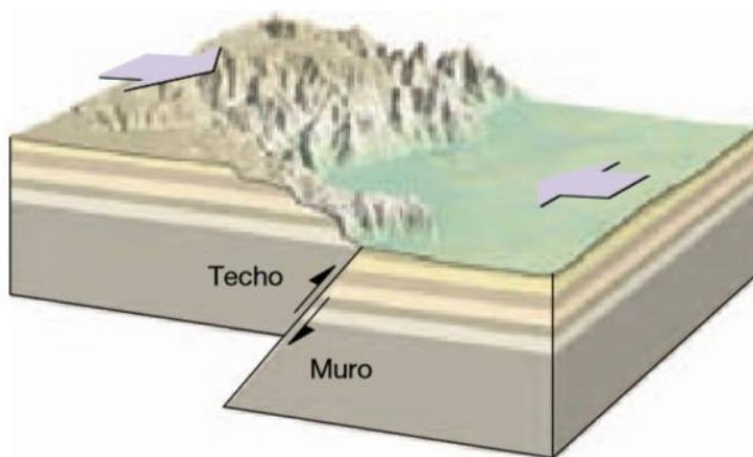
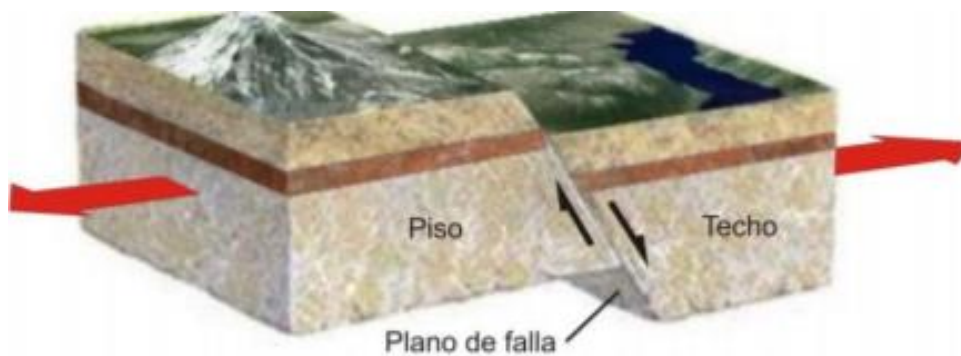


Ilustración 12. Fallas Normales (Tarbuck et al., 2005).



6.1.2. Precipitación

Al pertenecer a zonas áridas y semiáridas se puede afirmar, según un estudio realizado por José Salas sobre hidrología de zonas áridas y semiáridas en España, que “*la precipitación es esporádica e intermitente, y esto tiene implicaciones en el uso de modelos matemáticos para representar este fenómeno*” (Salas, 2000). Según la investigación realizada por INGEOMINAS⁵ y T.N.O⁶. en el año 1977, la zona de estudio refleja dos estaciones húmedas y dos secas, en donde el periodo más húmedo corresponde a los meses de septiembre, octubre y noviembre (cuando hay mayor precipitación) y el segundo en mayo y junio; mientras que las épocas con mayor sequía abarcan desde diciembre hasta abril y, en segundo lugar, en julio y agosto (Granados, 1988). Por su lado, el Plan de Gestión Ambiental Regional realizado por Corpoguajira⁷ que abarca hasta el 2019, menciona que los meses en los que se presentan más lluvias son octubre y noviembre, seguidos por marzo y junio; mientras que los más secos son enero, julio y diciembre. Lo que implica, como asume HIMAT⁸ en el Inventario de recursos hídricos superficiales del departamento de La Guajira en 1984, que durante el año la distribución temporal de la precipitación es de tipo bimodal: dos periodos húmedos definidos. “*La distribución espacial de la lluvia en la región presenta un aumento uniforme de esta, en el sentido noreste-suroeste*” (Niño, 1984). La precipitación también juega un papel muy importante en la distribución del brillo solar: en los periodos de mayores lluvias se evidencia que hay menor cantidad de horas de sol; mientras que en los periodos con menores precipitaciones hay una mayor cantidad de estas.

Haciendo uso de la información suministrada por el IDEAM y teniendo en cuenta que para el análisis de la precipitación y las isoyetas se abarca toda el área de La Guajira, se encontraron las siguientes estaciones:

Tabla 3. Estaciones cercanas a la zona de estudio (Fuente propia).

N°	Estación	Nombre
1	15070010	Santana Urraich
2	15070070	Irraipa
3	15080070	Sillamana
4	15070090	Perpana
5	15070240	Orochon
6	15070100	Carrizal
7	15070120	Ahuyama
8	15070110	Jojoncito
9	15080080	Jasay
10	15080030	Taparajin
11	15080050	Huimpecht

De las estaciones presentadas en la Tabla 3. se descartan las estaciones Taparajin y Huimpecht debido a que la cantidad de datos en años que poseen es menor a 20, y para realizar un modelamiento confiable, se sugiere un registro histórico mayor.

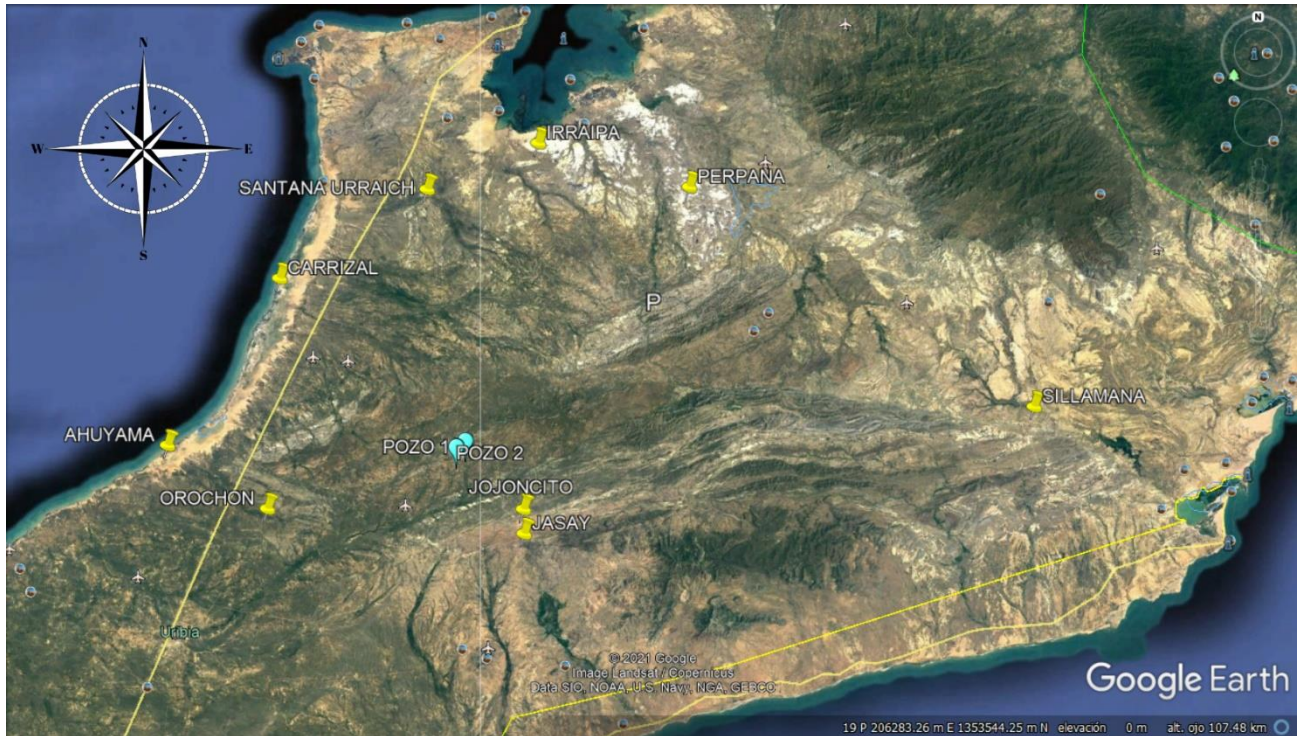
⁵ Actual Servicio Geológico Colombiano.

⁶ Instituto de Investigaciones de Aguas Subterráneas de Holanda.

⁷ Máxima autoridad ambiental del Departamento de La Guajira.

⁸ Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.

Ilustración 13. Localización de los pozos y estaciones (Google, 2021).



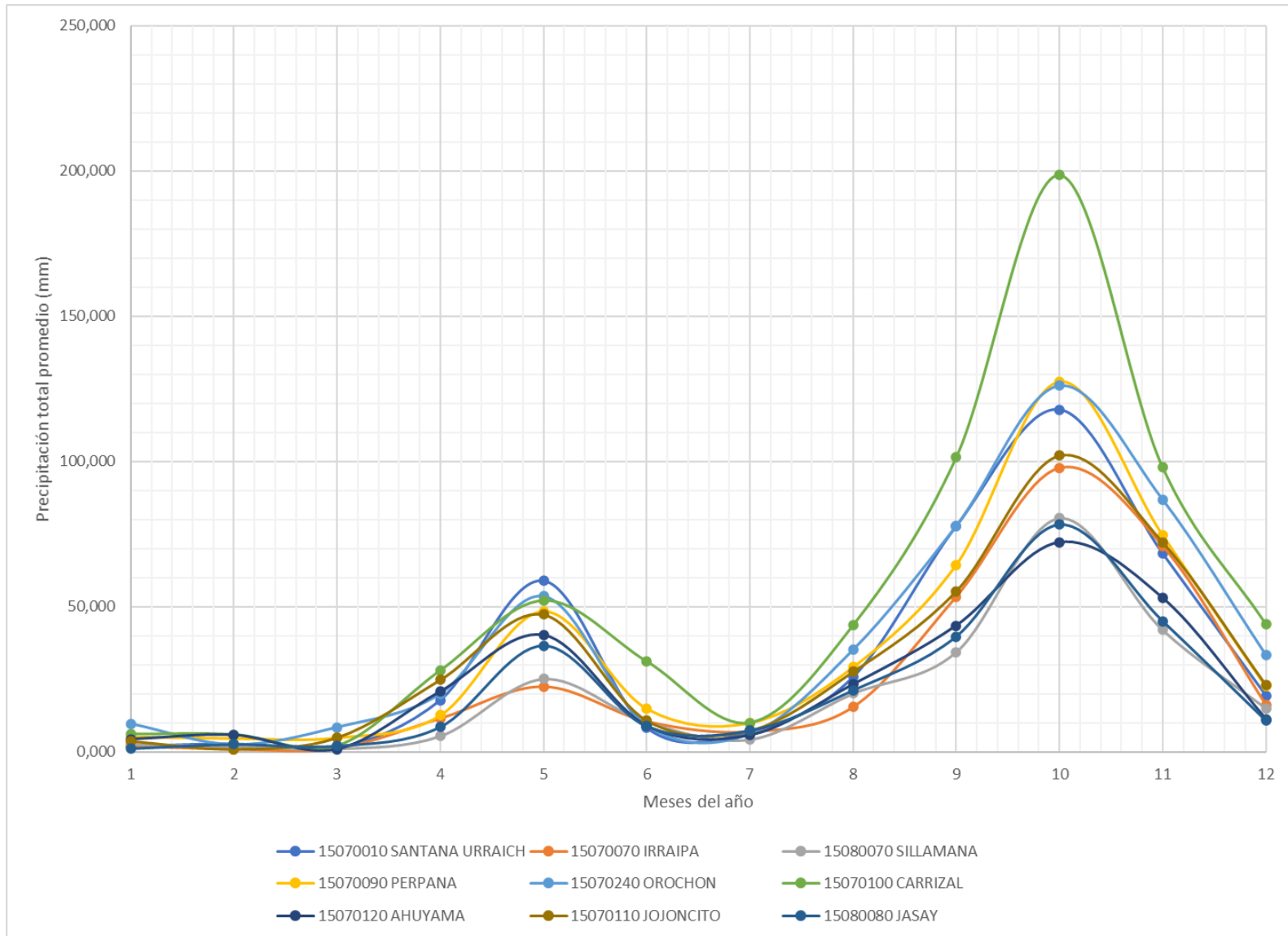
En la Ilustración 13. se observa la ubicación de las estaciones (marcas amarillas) en relación con los pozos 1 y 2 (marcas celestes).

Tabla 4. Coordenadas de las estaciones a usar (Fuente propia).

Nº	Longitud	Latitud	Nombre	Altitud (msnm)
1	-72,050194	12,086583	Santana Urraich	30
2	-71,952278	12,126361	Irraipa	65
3	-71,515889	11,899417	Sillamana	115
4	-71,819306	12,088556	Perpana	65
5	-71,190611	11,811639	Orochon	100
6	-72,180111	12,009889	Carrizal	5
7	-72,278833	11,866083	Ahuyama	5
8	-71,965306	11,811444	Jojoncito	120
9	-71,964722	11,790417	Jasay	35

Las estaciones suministradas en la Tabla 4. brindan información sobre la precipitación en diferentes periodos de tiempo, todas con datos mayores a 20 años tal y como se muestra del Anexo 1 al Anexo 9. Al reorganizar los datos de lluvia se halló la precipitación total promedio por mes para cada una de estas como se muestra en el Anexo 10, y se procedió a graficar los datos (Gráfica 1.) con la finalidad de hacer más visibles los meses que poseen mayor o menor precipitación y encontrar la relación de lluvia para toda la zona.

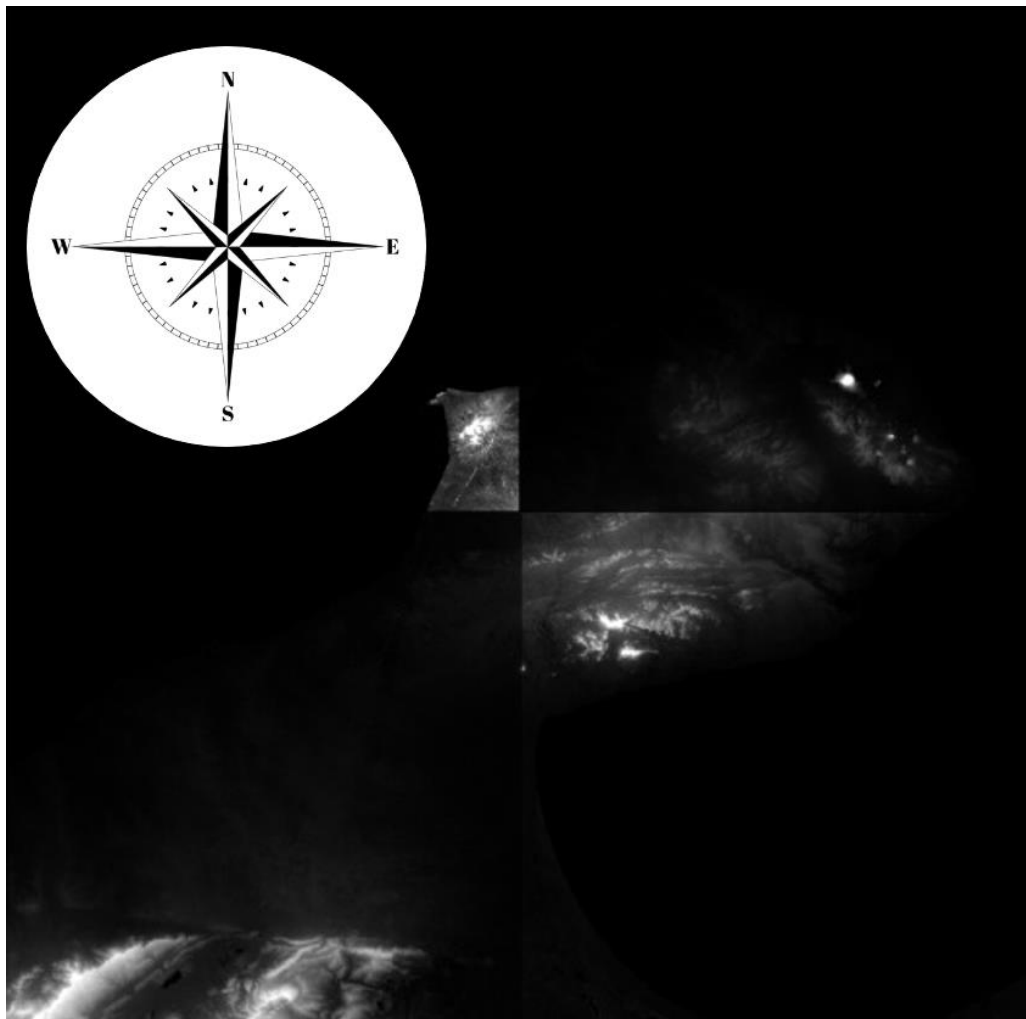
Gráfica 1. Precipitación total promedio mensual (Fuente propia).



De la anterior gráfica se puede observar que la cantidad de lluvia se comporta de la misma manera respecto a los meses en las diferentes estaciones y existen dos picos que representan aumento en las lluvias: el primero en mayo y junio, y el segundo en septiembre y octubre; además, los meses con menor valor de precipitación corresponden a enero, julio y diciembre, lo que permite corroborar la información anteriormente suministrada por otras fuentes.

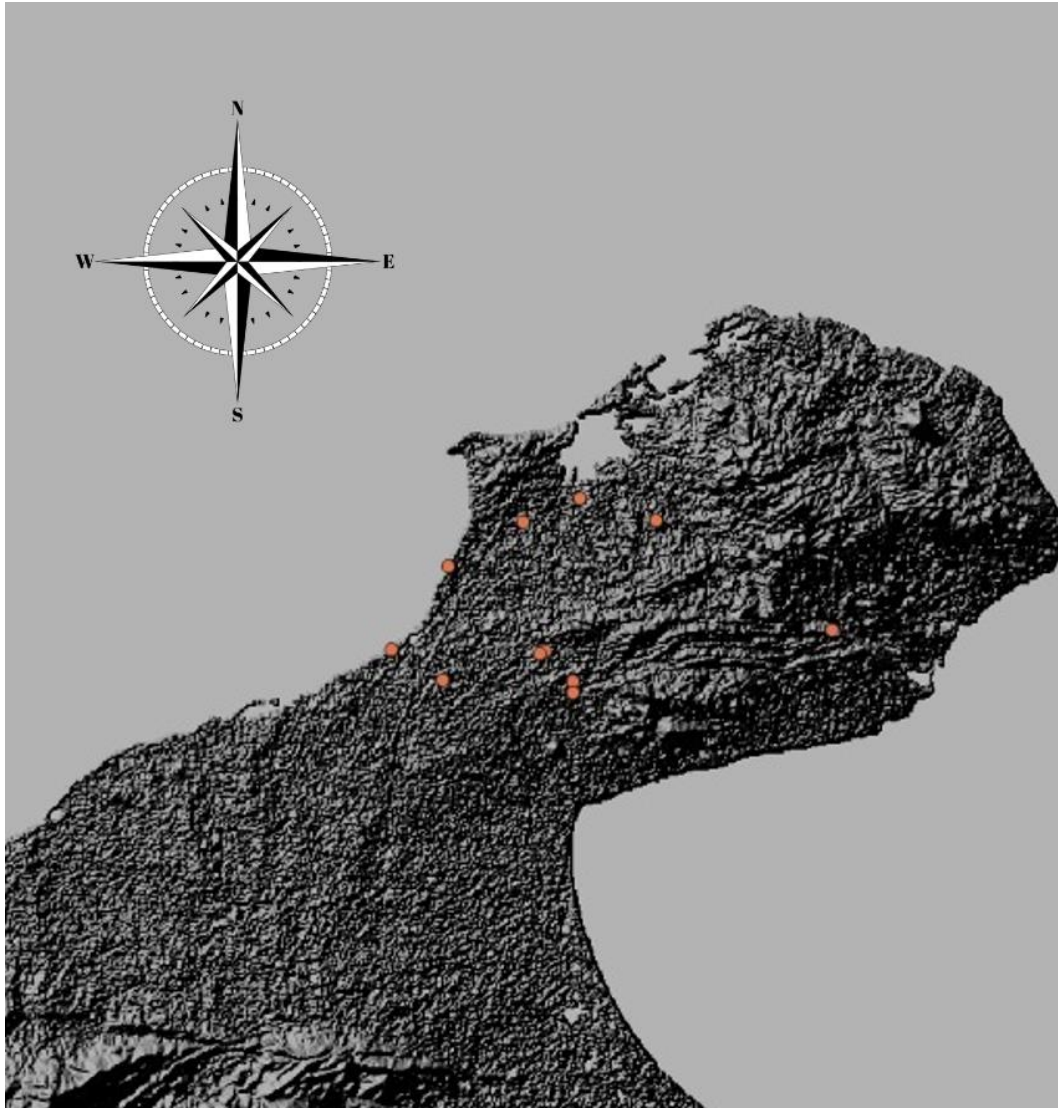
En el análisis superficial de la precipitación se implementó el sistema de información geográfica Quantum Gis (QGIS) con la finalidad de determinar la formación y comportamiento de posibles afluentes y cuencas. Para ello, es necesario hacer uso de un modelo digital de elevación (DEM), suministrado por EarthData Search.

Ilustración 14. Modelo digital de elevación (NASA, 2021).



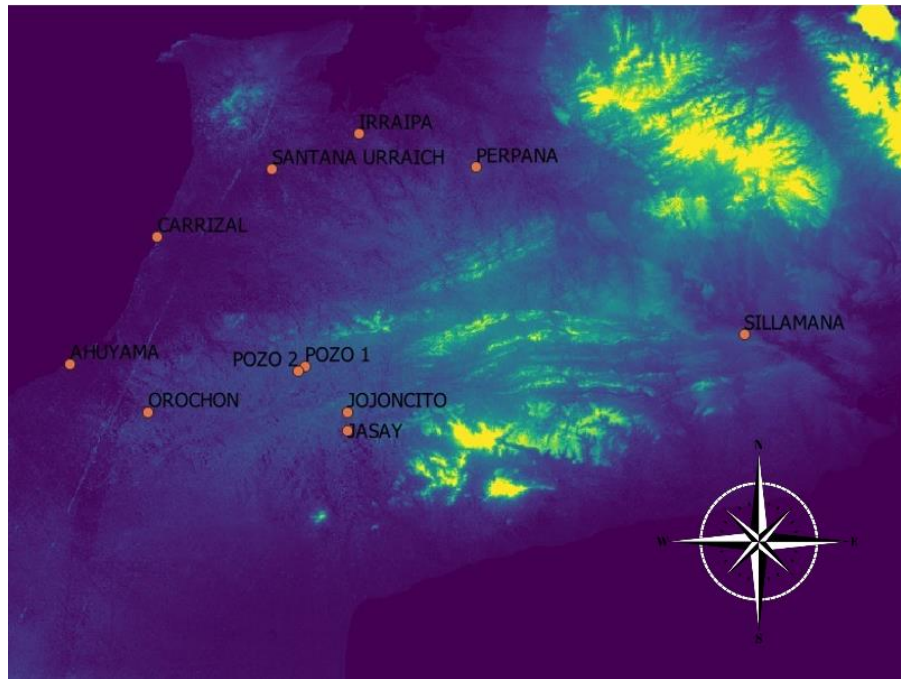
De EarthData Search se descargaron 4 imágenes correspondientes al modelo digital de elevación para la media y alta Guajira Colombiana como se muestra en la Ilustración 14. Al introducir este modelo en QGIS, el software brinda la posibilidad de combinar y editar las capas con la finalidad de facilitar la comprensión visual del mapa como se muestra en la Ilustración 15 en donde, además, los puntos naranjas representan la ubicación de las estaciones pluviométricas y los pozos.

Ilustración 15. DEM combinado en mapa de sombras (Fuente propia).



Para determinar la formación de las cuencas en la zona de interés se procedió a trabajar con el complemento GRASS, a partir del cual se generaron capas con información de la dirección del flujo, se rellenaron las áreas que no poseen datos y se separaron las cuencas según una cantidad de 500000 píxeles establecidos a criterio. Para la generación de las cuencas y de las isoyetas, se utiliza el DEM recortado con la finalidad de abarcar solamente las zonas de las que se posee información.

Ilustración 16. DEM recortado y exportado a GRASS (Fuente propia).



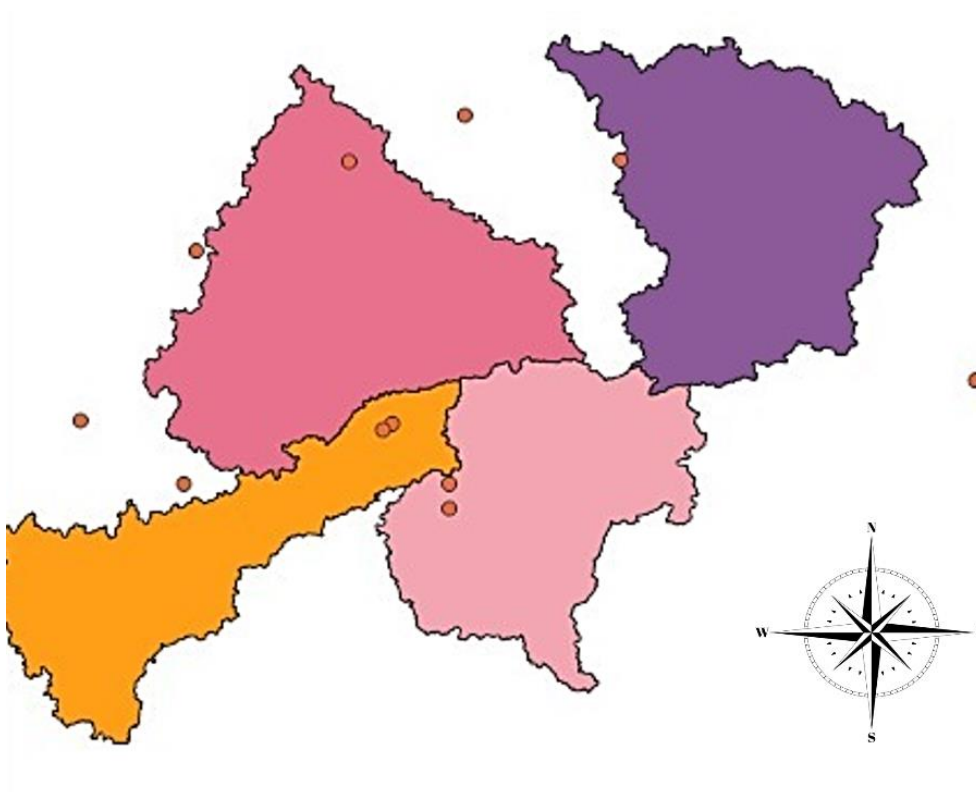
Las zonas más claras de la Ilustración 16. pertenecen a las partes altas del terreno y se puede observar que el mismo es en su mayoría plano (zonas oscuras) por lo que se puede entender que las corrientes que se generan en la Ilustración 17. son escasas y temporales, en donde las 4 corrientes amarillas simbolizan las principales.

Ilustración 17. Acumulación y dirección de flujo (Fuente propia).



Haciendo uso del punto de entrada para cada una de las corrientes principales mencionadas anteriormente, se generaron las posibles cuencas utilizando una cantidad de 500.000 píxeles (como se muestra en la Ilustración 18.) con la finalidad de abarcar la mayor cantidad de área posible de tal manera que el análisis entre la ubicación de los pozos y las estaciones sea más confiable. No se encuentra relevante el impacto de la información suministrada por la estación Sillamana debido a que está ubicada a gran distancia de los pozos de estudio, sin embargo, se tiene en cuenta en el análisis de las isoyetas con el fin de abarcar un panorama más amplio respecto a la precipitación de la zona.

Ilustración 18. Cuencas (Fuente propia).



Una vez determinadas las cuencas se procedió a realizar el análisis de las isoyetas para los dos meses que presentan los picos de las precipitaciones (octubre y mayo) según la Gráfica 1. La Ilustración 19. Corresponde al mes de octubre y la Ilustración 20. a mayo.

Ilustración 19. Isoyetas de octubre (Fuente propia).

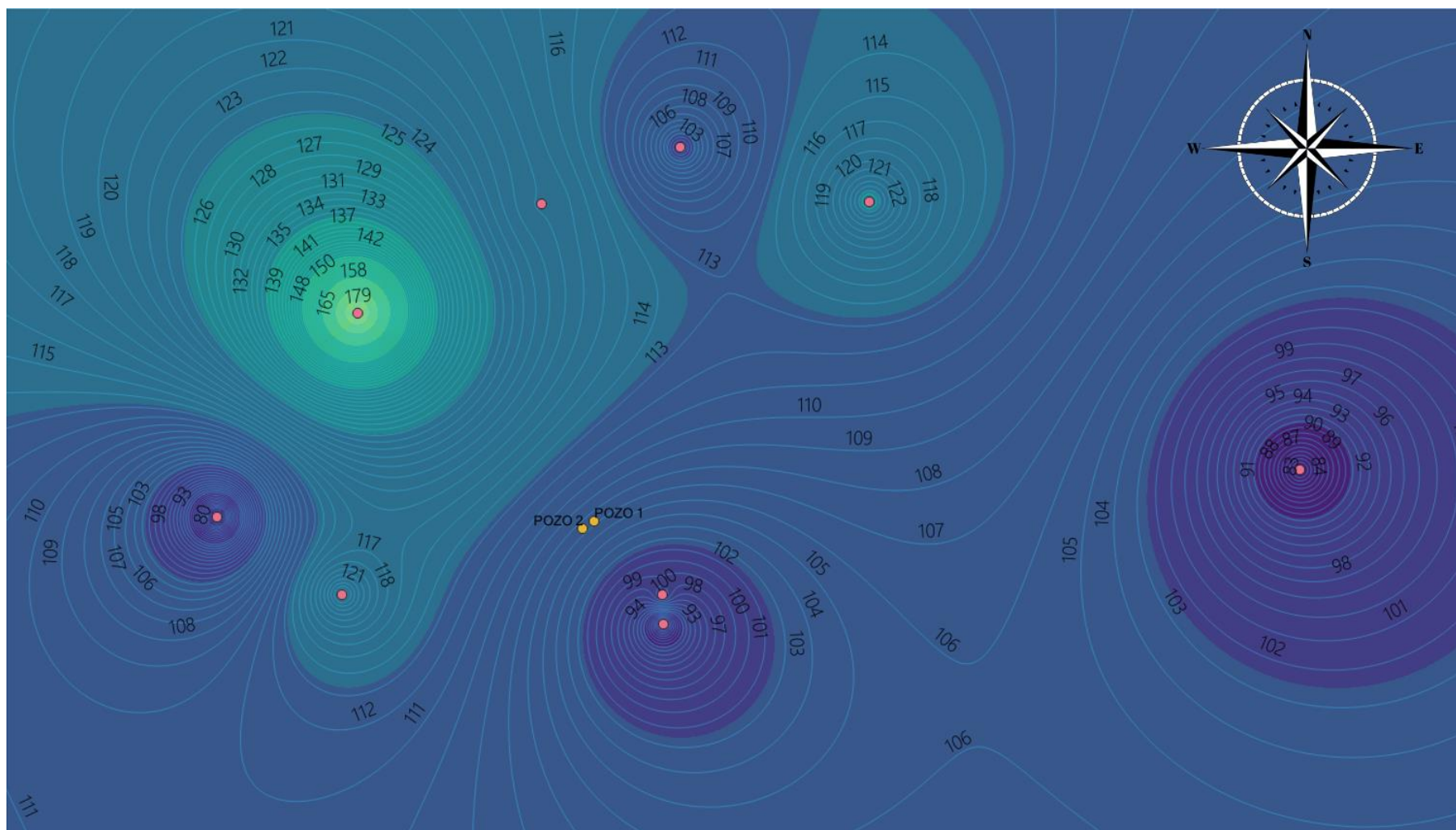
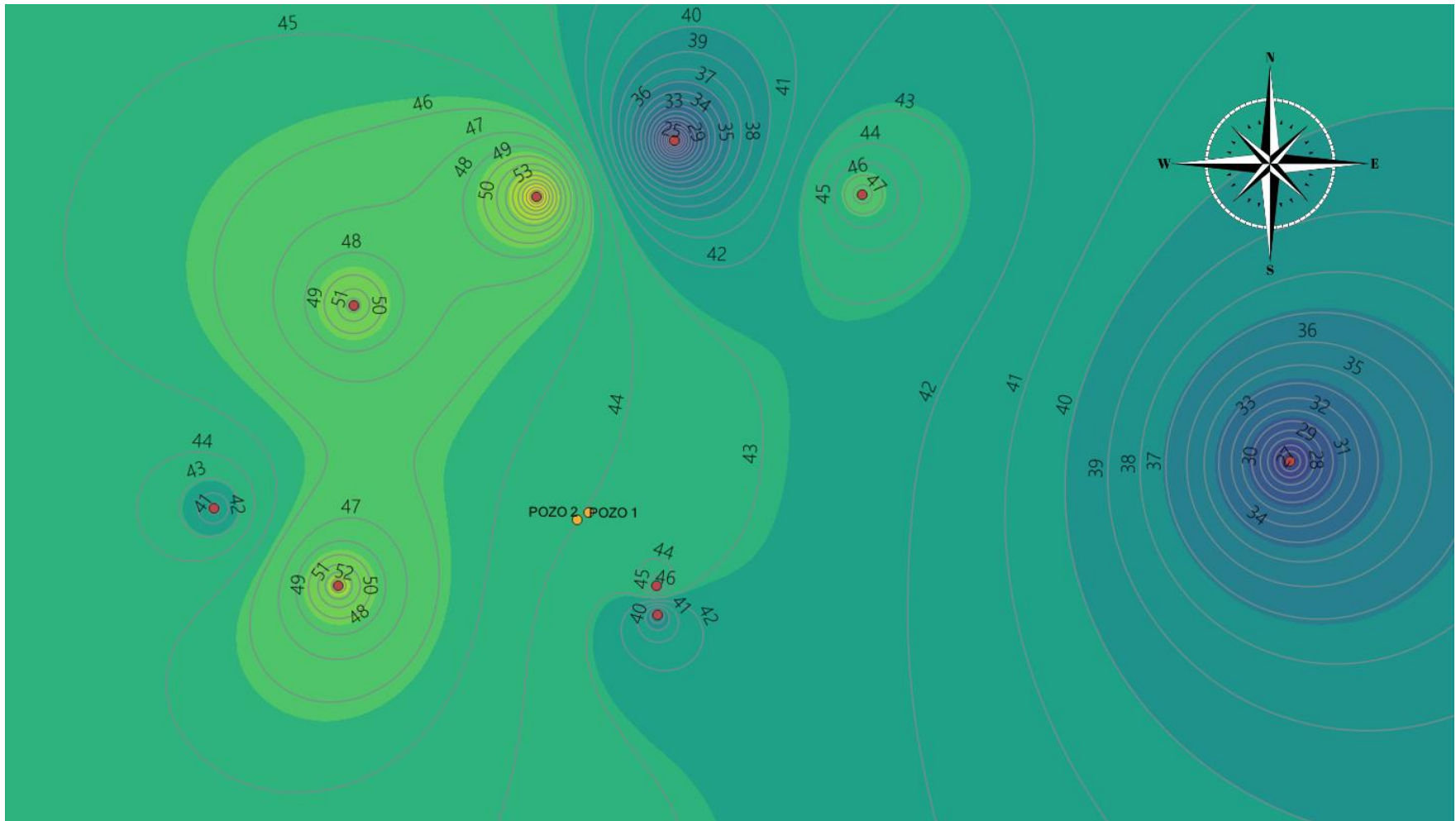


Ilustración 20. Isoyetas de mayo (Fuente propia).



Se puede observar una diferencia considerable entre la cantidad de lluvia que cae en la zona de interés (cerca a los pozos) durante ambos picos de precipitación; la cantidad de lluvia para el mes de mayo en dicha área oscila entre 43 y 45 mm de precipitación, mientras que en octubre varía entre 105 y 110 mm, lo cual coincide con la Gráfica 1.

6.1.3. Calidad del agua

En la zona de estudio se conoce que las fuentes hídricas más importantes son los pozos y los jagüeyes (en donde se almacena el agua de lluvia para las temporadas más secas); ninguna de las dos opciones es completamente potable. Las comunidades Wayuu que residen en la alta y media Guajira no realizan procedimientos de potabilización al agua que utilizan para consumo humano. Para el pozo 2, se realizó un muestreo de agua en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana con el apoyo de la fundación Wayuuda en donde se encontraron los resultados de la Ilustración 21.

Ilustración 21. Calidad del agua (Fundación WAYUUDA, 2019).

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LCM	FECHA DE ANALISIS	MÉTODO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE/ ACEPTABLE	IRCA si aplica
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	257	20,0	2019-12-10	SM 2320 B	200	1
Aluminio	mg Al/L	<5,00	5,00	2020-01-16	SM 3111 B / SM 3030 E	0,200	¿?
Calcio	mg Ca/L	300	2,40	2020-01-16	SM 3500 Ca B	60,0	1
Color aparente*	UPt-Co	19,7	15,0	2019-12-09	SM 2120 C	15,0	6
Coliformes Totales*	UFC/100mL	>200	No aplica	2019-12-10	SM 9222 J	0	15
Cloruros	mg Cl/L	>1000 ; (1107)	0,400	2019-12-16	SM 4110 B	250	1
Conductividad	μS/cm	4,52	0,100	2019-12-12	SM 2510 B	1000	0
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	759	8,00	2020-01-16	SM 2340 C – SM 3030 G	300	1
Escherichia coli*	UFC/100mL	0	No aplica	2019-12-10	SM 9222 J	0	0
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	<0,500	0,500	2019-12-09	SM 4110 B	0,500	0
Hierro Total	mg Fe/L	2,59	0,200	2020-01-16	SM 3111 B / SM 3030 E	0,300	1,5
Magnesio	mg Mg/L	2,47	0,500	2020-01-16	SM 3500 Mg B	36,0	0
Manganeso	mg Mn/L	<0,200	0,200	2020-01-16	SM 3111 B / SM 3030 E	0,100	¿?
Nitratos	mg NO ₃ /L	12,6	0,300	2019-12-09	SM 4110 B	10,0	1
Nitritos	mg NO ₂ /L	<0,300	0,300	2019-12-09	SM 4110 B	0,100	¿?

pH***	Unidades de pH	11,54	0,100	2019-12-09	SM 4500 H+ B	6,5 – 9,0	1,5
Salinidad**	% Salinidad	2,35	----	2019-12-12	SM 2520 B	N.A.	N.A.
Sulfatos	mg SO ₄ /L	71,5	0,700	2019-12-09	SM 4110 B	250	0
Turbiedad	NTU	194	0,100	2019-12-09	SM 2130 B	2,00	15
Zinc	mg Zn/L	<0,100	0,100	2020-01-24	SM 3111 B,D / SM 3030 E	3,00	0

LCM: Límite de cuantificación del método

IRCA: Índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano (solo aplica para agua potable).

*Parámetros Subcontratados.

** Parámetros No Acreditados

*** Parámetro acreditado sólo para mediciones in situ.

Ilustración 22. Puntaje de riesgo (Fundación WAYUUDA, 2019).

Característica	Puntaje de riesgo
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1.5
Cloro Residual Libre	15
Alcalinidad Total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza Total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1.5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio (Al ³⁺)	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes Totales	15
Escherichia Coli	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

Como se puede observar en la Ilustración 22. el agua del pozo 2 posee una salinidad de 2.35%, se encuentra entre 0.05% y 3%, lo que implica que se clasifique como agua salobre. Esta es aquella que posee pequeñas cantidades de sales disueltas en agua dulce, más que los ríos pero menor que los océanos (Lewis, 1980).

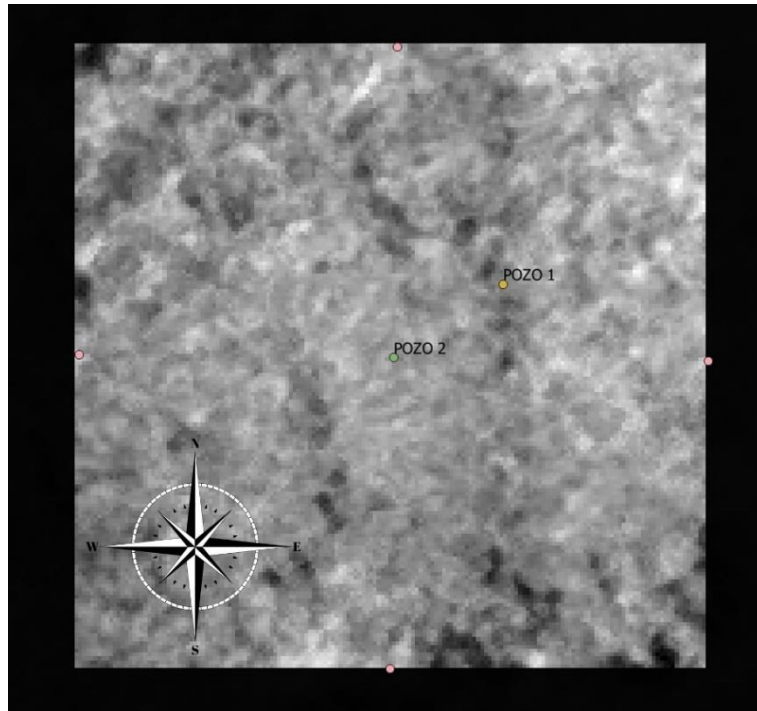
Según los resultados del estudio y los límites máximos permisibles para el consumo humano, se puede observar que no es apta debido a que gran cantidad de las variables evaluadas sobrepasan los límites aceptables, como es el caso del pH, alcalinidad, aluminio, calcio, color aparente, coliformes totales, cloruros, dureza, hierro total, manganeso, nitratos, nitritos, y turbiedad.

Respecto al pozo 1, se tiene conocimiento de que es agua con gran porcentaje de salinidad y no es apta para el consumo humano.

6.1.4. Topografía

A partir del pozo número dos (pozo de agua dulce), se hallaron las coordenadas de un cuadrado de 5 x 5 km tomando este punto como el centro de este. Se determinó un área de interés de 25 km² con la finalidad de abarcar a detalle el comportamiento de los pozos con los terrenos aledaños. De este modo, para el análisis de la geometría superficial, se realizó un recorte del mapa de elevación digital (DEM) con ayuda de la herramienta QGIS como se muestra en la Ilustración 23.

Ilustración 23. DEM recortado a 25 km² (Fuente propia).



Una vez generada la capa se procedió a vectorizarla como se observa en la Ilustración 24. y a crear un conjunto de puntos regulares (26896 unidades, correspondientes a la cantidad de celdas arrojadas por el vector), con el fin de vincular la información entre la capa vectorial y la nube de puntos, de tal manera que sea posible la extracción de las coordenadas (longitud, latitud y altitud) de manera organizada.

Ilustración 24. Capa vectorizada (Fuente propia).

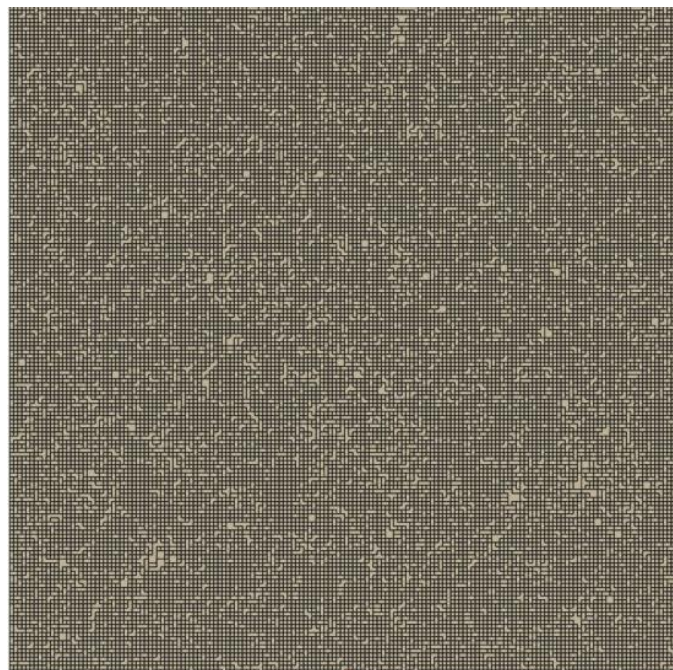
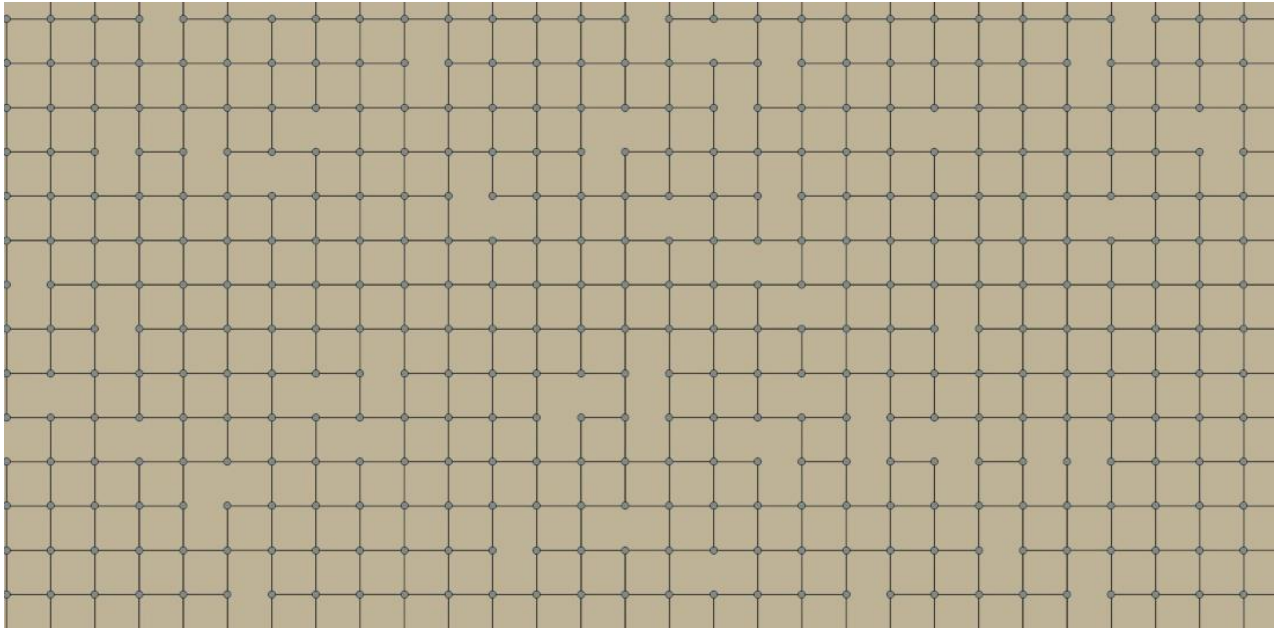


Ilustración 25. Sección de la nube de puntos (Fuente propia).



Obtenida la capa de puntos de la Ilustración 25. se procedió a exportarla a Excel en formato CSV UTF-8 (delimitado por comas).

6.1.5. Recarga potencial vertical por precipitación

La recarga se halló para 5 años (del 2010 al 2015) utilizando los valores de precipitación y evapotranspiración de los mismos. Los valores de mm de lluvia están expresados para un área de 1 m², y el área correspondiente a cada celda del modelo es de 2.5 m², por ende, cada valor se multiplicó por 2.5 hallando así los valores finales a utilizar encontrados en el Anexo 13.

Para hallar el coeficiente de infiltración, y teniendo en cuenta la variabilidad del suelo que poseemos junto con la dificultad de realizar mediciones reales, se asumieron los valores recuerdo a los datos típicos de coeficientes de tipo de suelo (Ilustración 26.), pendiente (Ilustración 27.), y uso de suelo (Ilustración 28.).

Ilustración 26. Valores típicos del coeficiente de tipo de suelo (Matus, 2007).

TIPO DE SUELO	K _{fc}
Suelos arcillosos, latosoles de altura, zonas urbanas, suelos o rocas compactas e impermeables.	0,10
Suelos de combinación de limo y arcilla, litosole y regosole de valle, zonas con fallas tectónicas.	0,15
Suelos arenosos, recientes, suelos de cause de ríos, suelos no muy compactos, zonas con muchas fallas.	0.20

Ilustración 27. Valores típicos del coeficiente de pendiente de suelo (Matus, 2007).

PENDIENTE	Kp
Muy plano	0.40
1 – 15%	0.10
15 – 30%	0.9
30 – 50%	0.7
50 – 70%	0.05
> 70%	0.01

Ilustración 28. Valores típicos del coeficiente de uso de suelo (Matus, 2007).

USO DEL SUELO	Kv	USO DEL SUELO	Kv
Vegetación espinosa	0,30	Hortalizas	0,15
Tejido urbano, zonas comerciales	0,30	Cultivos anuales	0,15
Cultivo de piña	0,30	Bosque de coníferas	0,15
Arboles frutales	0,20	Tierras sin bosque	0,15
Bosque de galería	0,20	Zonas verdes urbana	0,15
Bosque latí foliado	0,20	Pastos cultivados	0,10
Plantaciones de bosques mono específicos	0,20	Caña de azúcar	0,10
Sistemas agroforestales	0,20	Lagos, lagunas	0,00
Vegetación arbustiva baja	0,20	Praderas pantanosas	0,05

KV = 0.15 debido a que, en su mayoría, el terreno corresponde a tierras sin bosque.

KP = 0.10 debido a que el terreno posee pendientes pequeñas (entre 1% y 15%).

KFC = 0.10 debido a que los pozos pertenecientes a la zona de estudio están ubicados sobre rocas impermeables (como la granodiorita de cristales pequeños, granodiorita biótica de cristales grandes, granodiorita de textura pegmatítica y esquistos con alteración).

$$C = KV + KP + KFC$$

$$C = 0.15 + 0.10 + 0.10$$

Obteniendo así, C = 0.35

Se hallaron los valores del balance climático y de recarga como se muestra en el Anexo 14. Los valores de recarga negativos (debido a que la evapotranspiración era mayor que el valor de precipitación en ese mes), se asumieron como cero para efectos del modelo; y el primer valor (que en primera instancia era cero) se varió por el dato de recarga $8,03435E^{-7}$ m/s para simular que en el momento en el que empieza el modelamiento, existe agua en el pozo. El valor se halló mediante iteraciones hasta que el porcentaje de discrepancia (que representa la relación entre la cantidad de agua de entrada y la cantidad de agua de salida) al realizar la modelación, se encontrara dentro de los rangos admitidos (-1 y 1).

6.1.6. Evapotranspiración

En la página web del IDEAM se encontró un registro histórico para la evapotranspiración promedio multianual desde 1981 hasta el 2010 en donde se

pueden ver los datos respectivos a los departamentos del país (entre esos La Guajira). Se adjuntan las tablas en el Anexo 11 y Anexo 12.

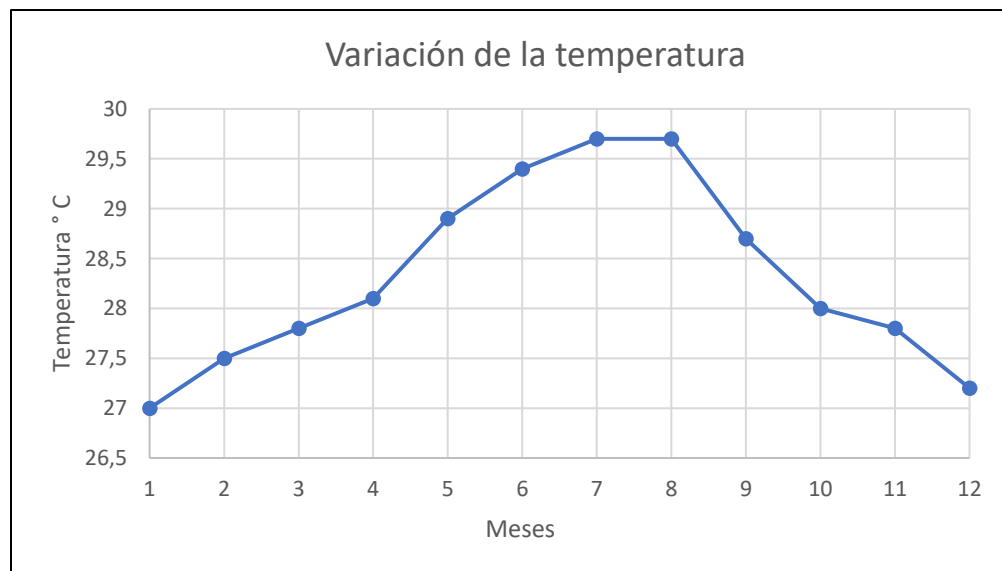
6.1.7. Temperatura

La Guajira es un departamento perteneciente a Colombia, que se caracteriza por poseer todos sus pisos térmicos en la zona intertropical (conocida por mantener, en términos generales, homogénea la temperatura) y dispone de una temperatura media anual de 28°C en zonas áridas y semiáridas. Se halló la Ilustración 29, correspondiente a los datos de la temperatura media mensual durante un seguimiento desde 1998 al 2020 y se graficaron los datos en la Gráfica 2.

Ilustración 29. Temperatura media mensual (Climate-Data.org, 2021)

Mes	Temperatura °C
Enero	27
Febrero	27,5
Marzo	27,8
Abril	28,1
Mayo	28,9
Junio	29,4
Julio	29,7
Agosto	29,7
Septiembre	28,7
Octubre	28
Noviembre	27,8
Diciembre	27,2

Gráfica 2. Variación mensual de la temperatura (Fuente propia).



6.1.8. Vegetación

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por mantener el recurso hídrico como factor limitante (debido a que la precipitación anual es baja y la evaporación es alta) y poseer suelos propensos a la salinización, alcalización, saturación con agua, y erosión por la acción del viento y del agua; en este tipo de regiones el medio es hostil para la vida y una gran cantidad de plantas necesitan mecanismos eficientes para adaptarse: *“a medida que aumenta la aridez, la biomasa se reduce y las plantas se distancian más entre sí para poder disponer del agua de más superficie. Ello da lugar a una cubierta de vegetación difusa”* (Soledad Duval et al., 2015). El departamento de La Guajira divide su territorio en tres regiones: Alta (al norte), Media (centro y suroeste) y Baja (al sur); en ellas, se localiza una gran variedad de ecosistemas como el desierto semiárido al norte, sabanas secas y húmedas, selva tropófila, selvas húmedas, la serranía de Perijá, la Macuira, etc.

Siguiendo los pasos de la metodología para la vegetación (Ítem 7.1.7.) y a partir de las imágenes satelitales del LANDSAT 8, se obtuvo la Ilustración 30. que hace referencia a un mapa de colores con la información correspondiente a los índices de vegetación (NDVI) de la zona de estudio. Adicionalmente, se adjunta la leyenda de clasificación del NDVI en la Tabla 5.

Ilustración 30. Índice de vegetación NDVI (Fuente propia).

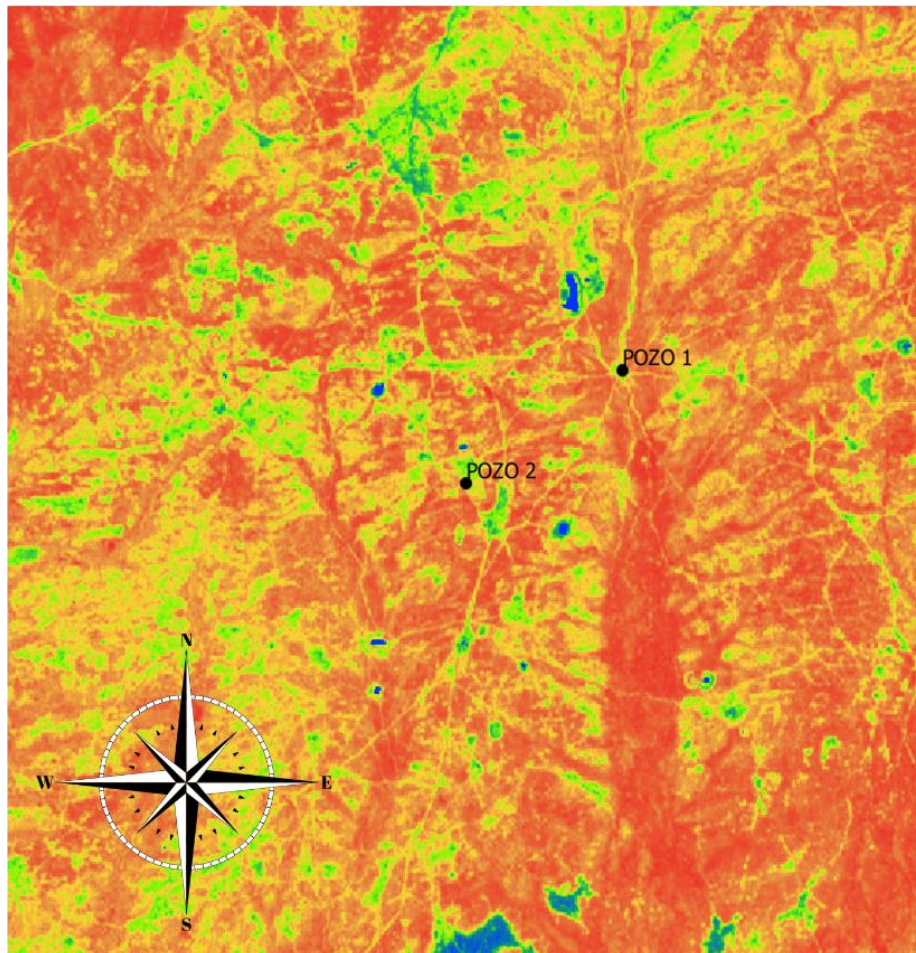








Tabla 5. Leyenda de variación del índice de vegetación (Fuente propia).

Leyenda de variación del Índice de vegetación (NDVI).	
	< 0.0 Nubes y agua
	0.0 - 0.1 Suelo sin vegetación
	0.1 - 0.2 Vegetación muerta o inanimada
	0.2 - 0.4 Vegetación ligera: Planta poco sana
	0.4 - 0.6 Vegetación media: planta medianamente sana
	> 0.6 Vegetación alta: planta completamente sana

Para relacionar los datos de evaporación y evapotranspiración en una misma capa, se vectorizó el mapa anterior y filtraron los datos de tal manera que las zonas con un Índice de vegetación (NDVI) mayores o iguales a 0.4 se considerarían como localidades donde ocurre evapotranspiración (Ilustración 31.). Del mismo modo, en las zonas donde el NDVI fuera menor a 0.4, se asumirían como zonas donde ocurre evaporación, como se muestra en la Ilustración 32.

Ilustración 31. NDVI mayor o igual a 0.4 (Fuente propia).

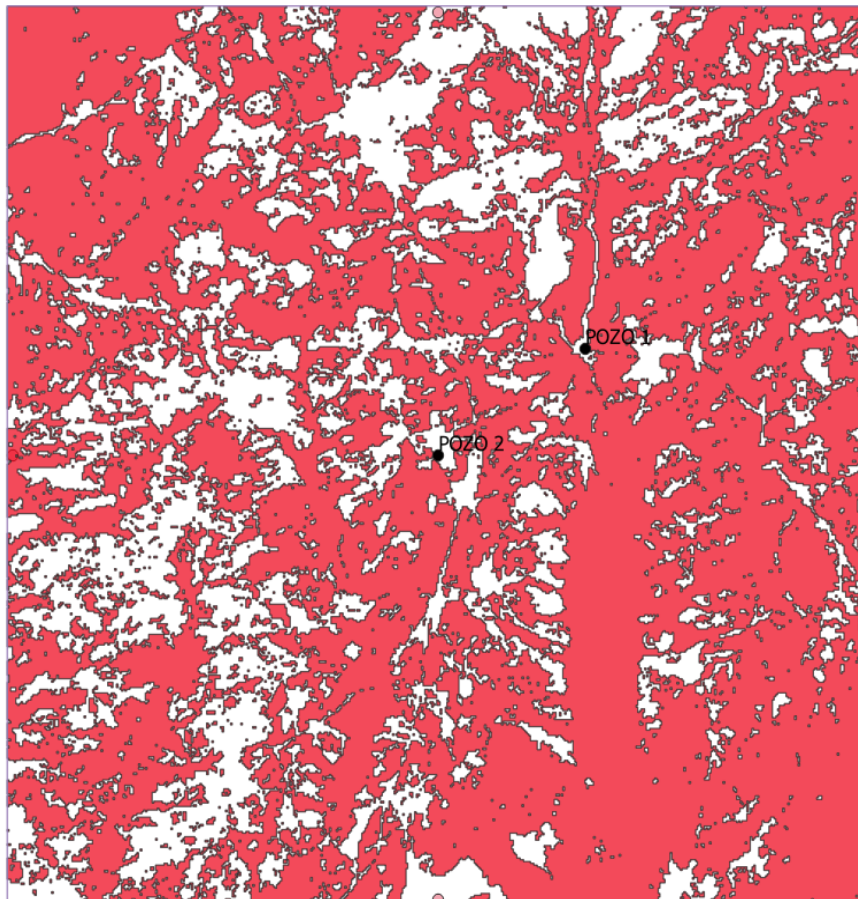
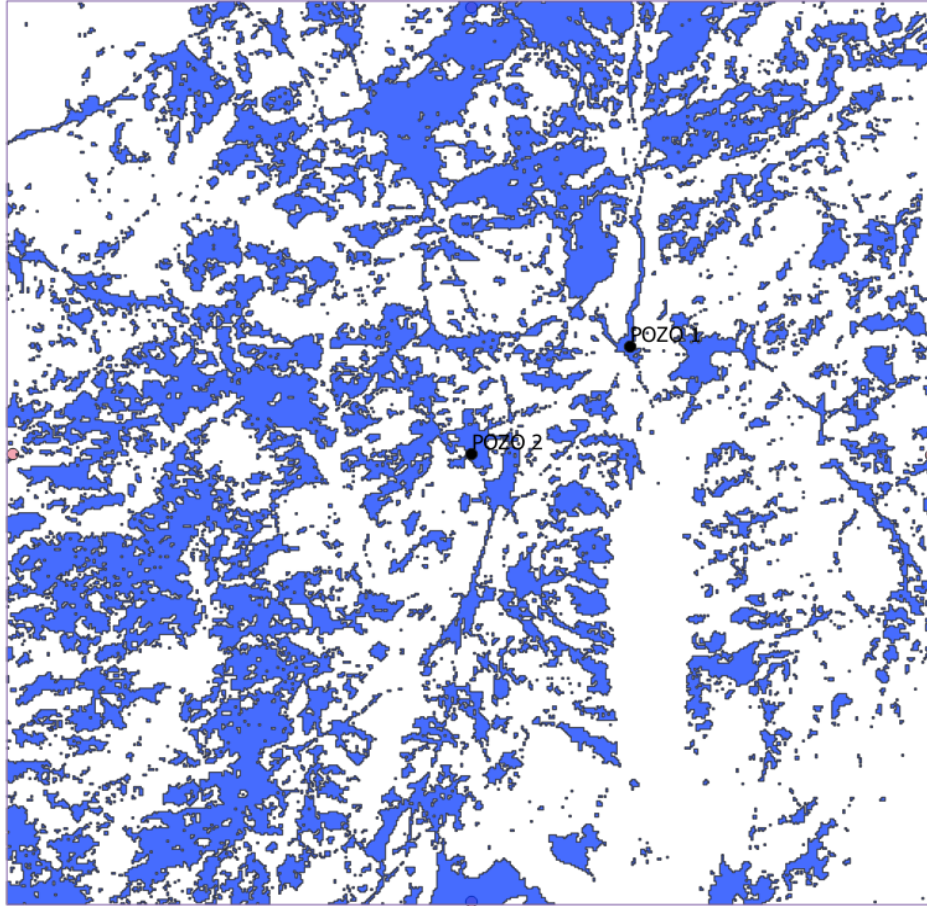


Ilustración 32. NDVI menor a 0.4 (Fuente propia).



En los 25 km² de estudio, se observa que existe gran proporción de vegetación en contraste a lo que es habitual en La Guajira. Principalmente se encuentran en mayor proporción arbustales abiertos, arbustales densos, y herbazales abiertos arenosos; compuestos por una gran variedad de especies xerofíticas de formación subtropical desértica. Los cuerpos de vegetación más reconocidos en Alta y Media Guajira son los cardonales, espinares y matorrales subxerófilos (Atlas, 2011).

6.1.9. Uso del recurso hídrico

Para las comunidades indígenas asentadas en esta región, el agua representa a un ser integrador que une y limita los territorios a través de las corrientes que se crean (Alcides R. Daza-Daza et al., 2018) y es un regalo de los dioses mitológicos que se debe respetar y proteger.

En La Guajira, a causa de la escasez del recurso hídrico, existe una gran cantidad de jagüeyes distribuidos a lo largo del terreno con la finalidad de suplir algunas de las necesidades de los Wayuu. Son depósitos de agua pluvial utilizados en zonas de largas sequías como medio como captación, almacenaje y administración. Es importante realizar un análisis del consumo hídrico generado por las población estudiada que, como menciona Joaquín Milano en un estudio sobre zonas áridas de

Colombia, los indígenas guajiros se ocupan principalmente con la agricultura y la ganadería, en donde la primera está directamente relacionada con la intensidad y frecuencia de la lluvia: a la que ellos denominan juya (Molano Campuzano, 1964). Estas prácticas son rudimentarias y de preferencia sus cultivos son: maíz millo, frijol, ahuyama, yuca, y algunas frutas tropicales como banano, melón y coco; y la ganadería es principalmente ovina y caprina.

La fundación Wayuuda de la mano con la comunidad Majayütpana compartió los datos que se encuentran en la Tabla 6. y la Tabla 7. en donde se observan los valores de consumo de la población y los porcentajes pertenecientes a sus fuentes de consumo (en donde se encuentra la extracción del pozo).

Tabla 6. Datos de consumo (Comunidad Majayütpana, 2021)

Datos de consumo (Comunidad Majayütpana)		
Actividad	Unidad	Cantidad
Alimentación de la comunidad	Tobo	10,5
Aseo personal	Tobo	4
Aseo de ropas	Tobo	2,5
Alimentación de animales	Tobo	1
Agricultura	Tobo	3
Almacenamiento	Sistema	1000L

Notas:

1. Comunidad adscrita a Majayütpana aproximadamente 200 personas.
2. Lavado de ropa 1 vez a la semana.
3. Datos tomados para periodos diarios.
4. Almacenamiento hace referencia a la capacidad en volumen por tanque que la comunidad tiene en promedio en sus hogares.
5. 1 tobo equivale a 16.6 litros.

Tabla 7. Porcentajes de consumo (Comunidad Majayütpana, 2021)

Fuentes de consumo	Porcentaje de consumo
Agua de Pozo Profundo	65
Agua de Jagüey - Recolección	10
Agua carrotanque Alcaldía Uribe	25

Para efectos del modelo, se tuvieron en cuenta los siguientes consumos: alimentación de la comunidad, aseo personal, aseo de ropas (1 vez por semana), alimentación de animales y agricultura, en donde se obtiene:

$$\text{Consumo} = \left(10.5 + 4 + \left(\frac{2.5}{7} \right) + 1 + 3 \right) * 16.6 \left[\frac{\text{litro}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Consumo} = 313.0285714 \left[\frac{\text{litro}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Consumo} = 3.62302E^{-6} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\text{Consumo de pozos} = 0.65 * 3.62302E^{-6} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\text{Consumo de pozos} = 2.35496E^{-6} \left[\frac{m}{s} \right]$$

6.2. Selección de modelo

En Latinoamérica existen varias entidades que realizan modelamientos hidrogeológicos en MODFLOW mediante código en Python, por esta razón, la cantidad de información acerca del tema en estas aplicaciones es más amplia y accesible en relación con las demás. Adicionalmente, MODFLOW posee gran extensión de herramientas para diferentes tipos de análisis y bibliotecas que facilitan la comprensión de las mismas; por este motivo, se eligió. A pesar de que MODFLOW posee una interfaz gráfica propia (MODFLOW Visual Flex) se decidió realizar el modelamiento a través de Python por temas de practicidad y economía. Debido a la dificultad para la obtención de datos completamente certeros y reales, y como etapa inicial, se plantea el desarrollo de un modelo geoespacial teórico base en tres dimensiones para futuras investigaciones en la zona de estudio o con características similares.

6.3. Modelo

Una vez recolectados, interpretados y tratados los datos de topografía, precipitación, evaporación y evapotranspiración, se procedió a desarrollar el modelo en MODFLOW a partir de Python por medio de la aplicación Jupyter Notebook. Como primer paso, se importaron los complementos y se llamaron las librerías necesarias para el desarrollo del modelo.

```
import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import flopy
import shapefile as sf
from flopy.utils.gridgen import Gridgen
from flopy.utils.reference import SpatialReference
import pandas as pd
from scipy.interpolate import griddata
```

Posteriormente, se definió el nombre del modelo y la carpeta en la que se ubicará. Además, se seleccionó el programa para ejecutar el modelo (MODFLOW NWT 64) y el número de iteraciones (Maxiterout) que en este caso fueron 500, el cambio de cabeza máximo de iteraciones (Headtol) que fue de 0.01 y el tipo de solucionador de matrices a utilizar (Linmeth).

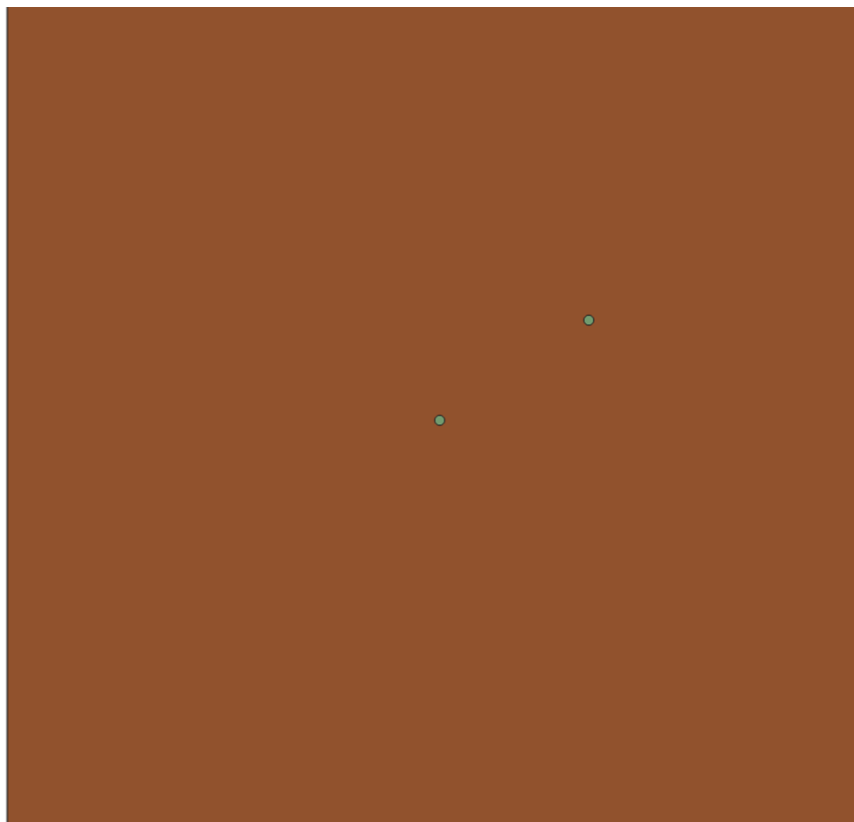
```
modelname='Model2'
model_ws= '../Model'
mf = flopy.modflow.Modflow(modelname, exe_name="../Exe/MODFLOW-NWT_64.exe", version="mfnwt", model_ws=model_ws)
nwt = flopy.modflow.ModflowNwt(mf, maxiterout=500, linmeth=2, headtol=0.01)
```

El número predeterminado de iteraciones es de 200 y varía de 0 a 1000, se escogió 500 debido a que, por la cantidad y tamaño de datos a modelar, 200 no eran suficientes para que el solucionador arrojara buena calidad de resultados.

Una vez hecho esto, se procedió a importar la extensión del área de estudio y la ubicación de los pozos, con la finalidad de definir los límites exteriores (25 km²) e interior (respectivas a la distancia entre los pozos).

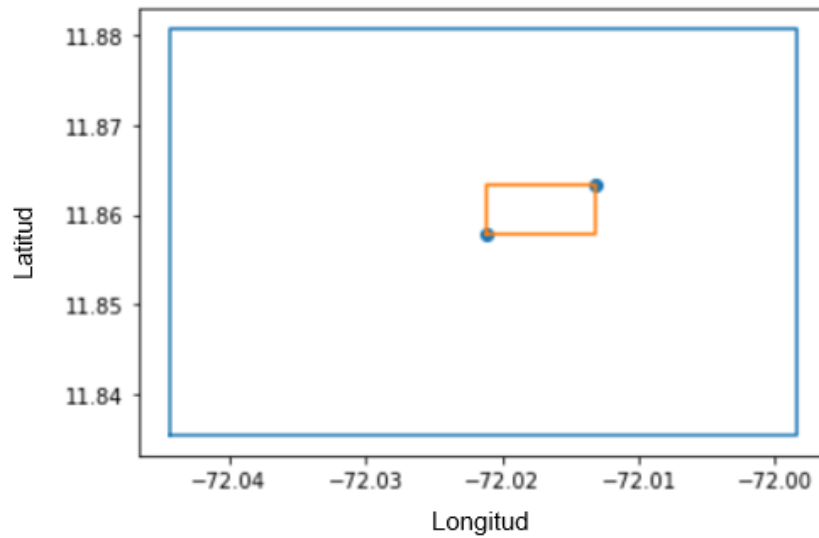
Para la extensión de los pozos, se añadió el ráster recortado con extensión de 25 km², como un polígono extraído de QGIS con la ubicación geográfica de la zona de estudio; mientras que la capa de los pozos se extrae como un conjunto de puntos, tal y como se observa en la Ilustración 33. El modelo arroja su interpretación de esos datos de la forma que se visualiza en la Ilustración 34.

Ilustración 33. Polígono ráster de 25km² y puntos de la ubicación de los pozos (Fuente propia)



```
modellimitShp = sf.Reader('../Shp/Extensión 5x5.shp')
modelwelShp = sf.Reader('../Shp/Pozos2.shp')
limitArray = np.array(modellimitShp.shapeRecords()[0].shape.points)
wellArray = np.array([point.shape.points[0] for point in modelwelShp.shapeRecords()])
WBB = modelwelShp.bbox
fig = plt.figure()
plt.plot(limitArray[:,0],limitArray[:,1])
plt.plot([WBB[0],WBB[0],WBB[2],WBB[2],WBB[0]], [WBB[1],WBB[3],WBB[3],WBB[1],WBB[1]])
plt.scatter(wellArray[:,0],wellArray[:,1])
plt.show()
```

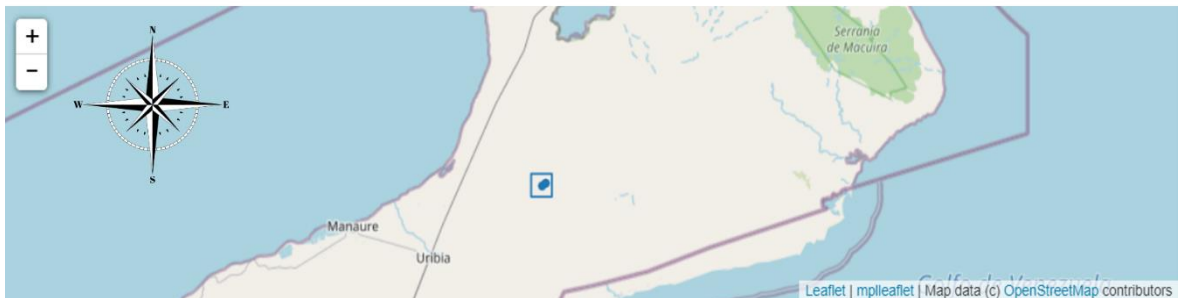
Ilustración 34. Extensión de 25 km² (Fuente propia).



Para verificar que todos los elementos se hayan insertado en la localización adecuada y con el sistema de coordenadas implementado (MAGNA SIGRAS epsg:4997), se procedió a verificar su ubicación en OpenStreetMap como se observa en la Ilustración 35. y a imprimir las coordenadas de los límites exteriores e interiores.

```
import mplleaflet  
  
crs = {'init' : 'epsg:4997'}  
mplleaflet.display(fig, crs=crs)
```

Ilustración 35. Ubicación de la zona de estudio (Fuente propia).



```
GloRefBox = modelLimitShp.bbox  
LocRefBox = modelWelShp.bbox  
  
print(GloRefBox)  
print(LocRefBox)
```

```
[-72.0443115234375, 11.83541488647461, -71.99846649169922, 11.880696296691895]  
[-72.02112900016571, 11.85789930016496, -72.01316666704338, 11.86325000134843]
```

Seguido a esto, se realizó el cálculo de las dimensiones del modelo global (Glo) y del refinamiento local (Loc).

```
GloLx = GloRefBox[2] - GloRefBox[0] #x_max - x_min
GloLy = GloRefBox[3] - GloRefBox[1]
print('Global Refinement Dimension. Easting Dimension: %8.6f, Northing Dimension: %8.6f' % (GloLx,GloLy))

LocLx = LocRefBox[2] - LocRefBox[0] #x_max - x_min
LocLy = LocRefBox[3] - LocRefBox[1]
print('Local Refinement Dimension. Easting Dimension: %8.6f, Northing Dimension: %8.6f' % (LocLx,LocLy))
```

```
Global Refinement Dimension. Easting Dimension: 0.045845, Northing Dimension: 0.045281
Local Refinement Dimension. Easting Dimension: 0.007962, Northing Dimension: 0.005351
```

Se definió el tamaño de las celdas teniendo en cuenta las dimensiones del modelo global y de refinamiento local, de tal manera que estas se ubicasen en el recuadro límite generado anteriormente. Para efectos del modelo, las dimensiones de las celdas serán igual en toda la longitud de la zona de estudio.

```
celGlo = 0.00045845
celRef = 0.00045845
```

Definidos los tamaños, se generaron las matrices de filas y columnas.

```
def arrayGeneratorCol(gloRef, locRef, gloSize, locSize):
    cellArray = np.array([])

    while cellArray.sum() + gloRef[0] < locRef[0] - celGlo:
        cellArray = np.append(cellArray,[gloSize])
    while cellArray.sum() + gloRef[0] > locRef[0] - celGlo and cellArray.sum() + gloRef[0] < locRef[2] + celGlo:
        cellArray = np.append(cellArray,[locSize])
    while cellArray.sum() + gloRef[0] > locRef[2] + celGlo and cellArray.sum() + gloRef[0] < gloRef[2]:
        cellArray = np.append(cellArray,[gloSize])

    return cellArray

delRArray = arrayGeneratorCol(GloRefBox, LocRefBox, celGlo, celRef)
delRArray
```

```
def arrayGeneratorRow(gloRef, locRef, gloSize, locSize):
    cellArray = np.array([])
    accumCoordinate = gloRef[3] - cellArray.sum()

    while gloRef[3] - cellArray.sum() > locRef[3] + celGlo:
        cellArray = np.append(cellArray,[gloSize])
    while gloRef[3] - cellArray.sum() < locRef[3] + celGlo and gloRef[3] - cellArray.sum() > locRef[1] - celGlo:
        cellArray = np.append(cellArray,[locSize])
    while gloRef[3] - cellArray.sum() < locRef[1] - celGlo and gloRef[3] - cellArray.sum() > gloRef[1]:
        cellArray = np.append(cellArray,[gloSize])

    return cellArray

delCArray = arrayGeneratorRow(GloRefBox, LocRefBox, celGlo, celRef)
delCArray
```

Posteriormente, se procedió a calcular la cantidad de columnas y filas generadas dependiendo de la discretización, y se imprimió los resultados correspondientes.

```
nrows = delCArray.shape[0]
ncols = delRArray.shape[0]
print('Number of rows: %d and number of cols: %d' % (nrows,ncols))
```

Number of rows: 99 and number of cols: 101

Una vez hallado el número de columnas y filas, se definieron los valores para la discretización espacial: se insertó el número de capas del terreno (6 capas) y a qué profundidad se encontraba cada una, la cantidad de periodos de estrés y de tiempo. En este modelo, se utilizaron 6 capas de suelo procedentes del estudio litológico realizado por la Fundación Wayuuda y presentado en la Ilustración 9. Se modelaron datos mensuales desde enero del 2010 hasta diciembre del 2014, lo que relaciona 60 datos; Python lee el primer dato como el número cero, por ende, se indicarán 59 periodos divididos en dos pasos. El primer periodo será estable y los demás, transientes.

```
#Número de capas y elevaciones
nlays = 6
mtop = 0
botm = [-2, -4, -8, -10, -14, -30]

#Número de periodos de estrés y tiempo
nper = 59
perlen = np.ones(nper)
perlen[0] = 1
perlen[1:] = 30 * 86400

nstp = np.ones(59)
nstp[0] = 1
nstp[1:] = 2

#Definición del tipo de periodo de estrés: transitorio o estable
periodType = np.zeros(59, dtype=bool)
periodType[0] = True
```

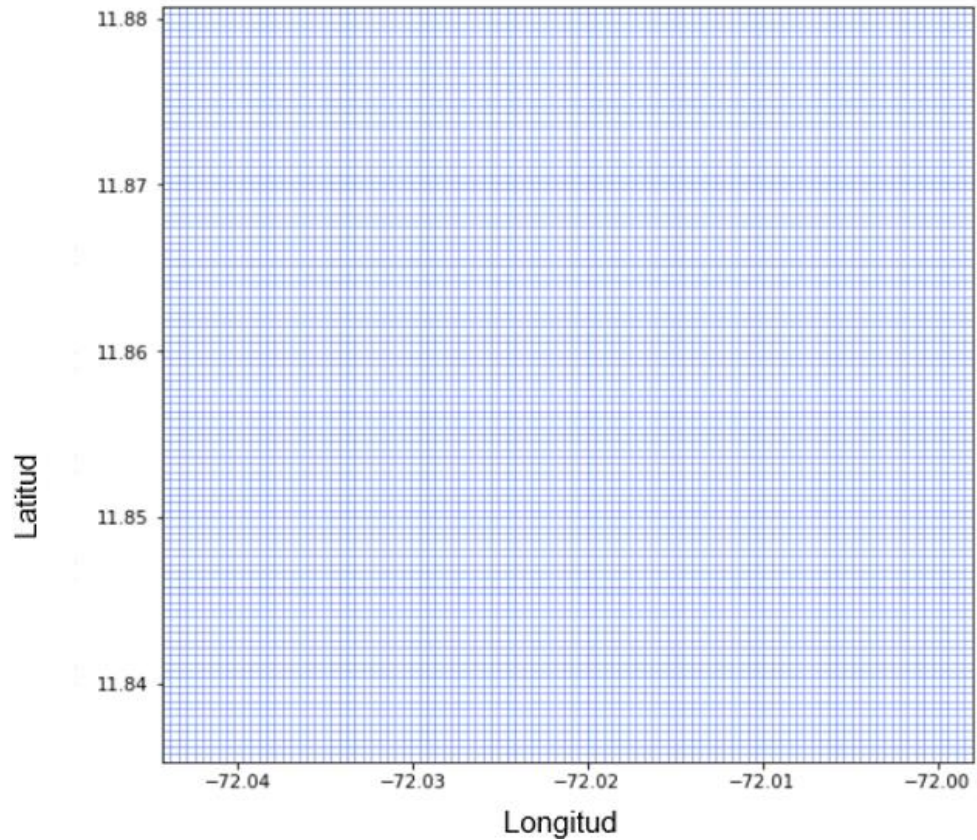
Seguido a esto, se aplicaron los parámetros del paquete de discretización y se asignó el sistema de coordenadas espaciales pre selecto (MAGNA SIGRAS epsg:4997).

```
dis = flopy.modflow.ModflowDis(mf, nlay=nlays,
                               nrow=delCArray.shape[0], ncol=delRArray.shape[0],
                               delr=delRArray, delc=delCArray,
                               top=mtop, botm=botm,
                               itmuni=1., nper=nper, perlen=perlen, nstp=nstp, steady=periodType)
mf.dis.sr = SpatialReference(delr=delRArray, delc=delCArray, xul=GloRefBox[0], yul= GloRefBox[3], epsg=4997)
mf.dis.sr.epsg
```

Finalizado este proceso, se imprimió la grilla correspondiente al área de interés como se muestra en la Ilustración 36.

```
mf.modelgrid.set_coord_info(xoff=GloRefBox[0], yoff=GloRefBox[3]-delCArray.sum(), angrot=0, epsg=4997)
fig = plt.figure(figsize=(8,8))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, aspect='equal')
modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf)
linecollection = modelmap.plot_grid(linewidth=0.5, color='royalblue')
```

Ilustración 36. Filas y columnas: celdas (Fuente propia).



Finalmente, para verificar las coordenadas de la grilla, se utilizó nuevamente la herramienta OpenStreetMap en la Ilustración 37.

```
fig = plt.figure(figsize=(8,8))

modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf)
linecollection = modelmap.plot_grid(linewidth=0.5, color='cyan')
shpGHB = flopy.plot.plot_shapefile('../Shp/Frontera', facecolor='none')

plt.plot(limitArray[:,0],limitArray[:,1])
plt.scatter(wellArray[:,0],wellArray[:,1])

crs = {'init' : 'epsg:4997'}
mplleaflet.display(fig,crs=crs)
```

Ilustración 37. Grilla ubicada geográficamente (Fuente propia).



Luego de esto, se insertaron los datos de topografía del terreno extraídos del DEM (modelo de elevación digital) proporcionados por la plataforma EARTHDATA y previamente tratados en Quantum GIS (QGIS), mediante un archivo “CSV separado por coma” y se definieron los parámetros Longitud, Latitud y Altitud obteniendo el resultado de la Tabla 8.

```
dem = pd.read_csv('../Rst/Superficie dem txt.csv')
dem.head()
```

Tabla 8. Muestra de datos de Longitud, Latitud y Altitud (Fuente propia).

	Longitud	Latitud	Altitud
0	-72.001529	11.835973	27
1	-72.001251	11.835973	28
2	-72.000695	11.835418	28
3	-72.001806	11.836251	29
4	-72.042917	11.880139	31

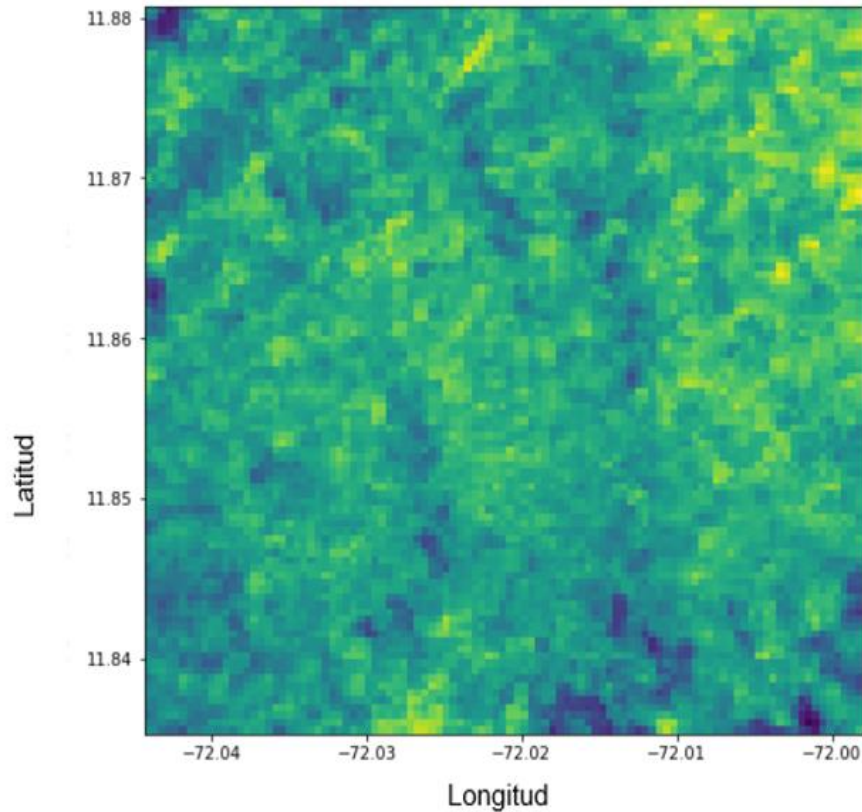
```
points = dem[['Longitud', 'Latitud']].values
values = dem['Altitud'].values
grid_x = mf.modelgrid.xcellcenters
grid_y = mf.modelgrid.ycellcenters
mtop = griddata(points, values, (grid_x, grid_y), method='nearest')
mtop[:5, :5]
```

Para tener una mejor visualización de estos datos, se imprimió una imagen del terreno acorde a la grilla antes generada y a los datos insertados.

```
fig = plt.figure(figsize=(8, 8))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax.set_aspect('equal')
modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf, ax=ax)
quadmesh = modelmap.plot_array(mtop)
```

Al ingresar estos datos y visualizarlos en la Ilustración 38, se puede notar que, a pesar de ser una zona en su mayoría plana, el terreno es poco uniforme lo que indica una gran variabilidad topográfica. En este caso, los puntos más altos corresponden a los colores más claros.

Ilustración 38. Topografía de la zona de estudio (Fuente propia).



A continuación, se insertaron las profundidades de las capas de los estratos de suelo acorde a la topografía del terreno (en total 6 estratos o capas) mediante porcentajes y se imprimió un corte transversal del área de interés plasmado en la Ilustración 39.

```
mf.dis.top = mtop
AcuifInf_Bottom = -3
AcuifMed1_Bottom = AcuifInf_Bottom + (0.934 * (mtop - AcuifInf_Bottom))
AcuifMed2_Bottom = AcuifInf_Bottom + (0.867 * (mtop - AcuifInf_Bottom))
AcuifMed3_Bottom = AcuifInf_Bottom + (0.734 * (mtop - AcuifInf_Bottom))
AcuifMed4_Bottom = AcuifInf_Bottom + (0.667 * (mtop - AcuifInf_Bottom))
AcuifMed5_Bottom = AcuifInf_Bottom + (0.534 * (mtop - AcuifInf_Bottom))

zbot = np.zeros((nlays,nrows,ncols))

zbot[0,:,:] = AcuifMed1_Bottom
zbot[1,:,:] = AcuifMed2_Bottom
zbot[2,:,:] = AcuifMed3_Bottom
zbot[3,:,:] = AcuifMed4_Bottom
zbot[4,:,:] = AcuifMed5_Bottom
zbot[5,:,:] = AcuifInf_Bottom

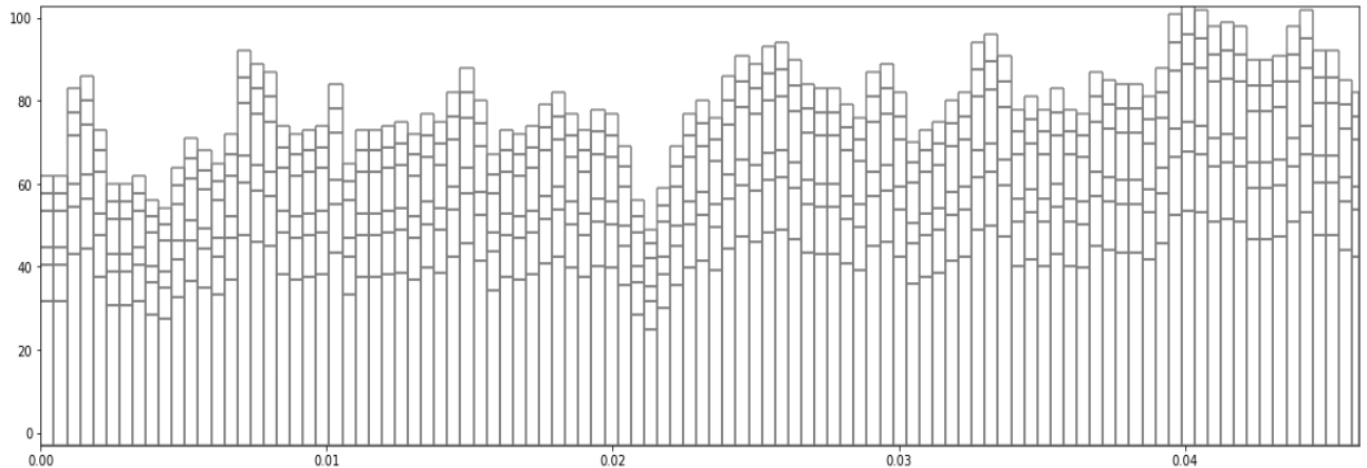
mf.dis.botm = zbot
```

```

fig = plt.figure(figsize=(20, 6))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
modelxsect = flopy.plot.PlotCrossSection(model=mf, line={'Row': 20})
linecollection = modelxsect.plot_grid()

```

Ilustración 39. Perfil de la zona de estudio (Fuente propia).



Luego, se insertaron los coeficientes de permeabilidad en cada una de las seis capas generadas anteriormente y se imprimió la Ilustración 40, con las diferencias de material entendidas por el modelo. Los coeficientes de permeabilidad de la granodiorita y del esquisto fueron tomados del “Análisis de los movimientos del terreno producidos por la excavación mecánica del túnel de la L9 en la zona de Santa Coloma Gramenet” (Ramos, 2006); y son bastante pequeños, lo que permite analizar que son rocas muy impermeables y corroborar una vez más que el movimiento del agua se distribuye a través de las fracturas de las mismas.

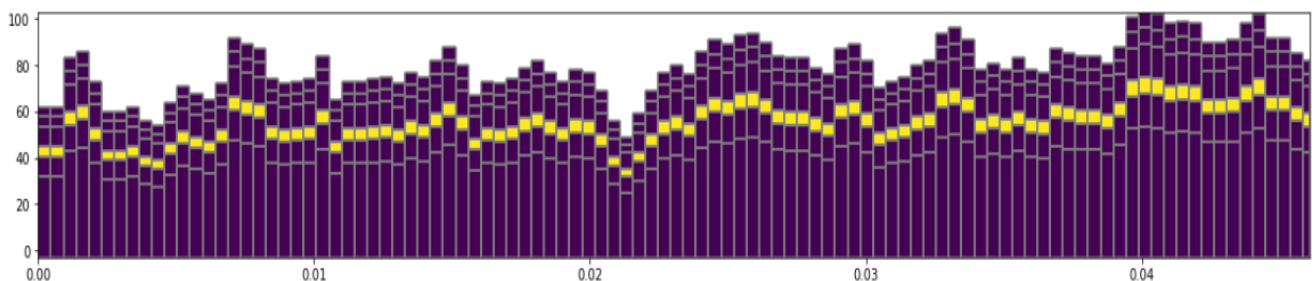
```

Kx = np.zeros((nlays,nrows,ncols))
Kx[0,:,:] = 3E-9 #primera capa de granodiorita de cristales pequeños
Kx[1,:,:] = 3E-9 #segunda capa de granodiorita de cristales pequeños
Kx[2,:,:] = 3E-8 #tercera capa de granodiorita biótica de cristales grandes
Kx[3,:,:] = 5E-4 #cuarta capa de esquisto con alteración
Kx[4,:,:] = 3E-7 #quinta capa de granodiorita de textura pegmatítica
Kx[5,:,:] = 3E-7 #sexta capa de granodiorita biótica fracturada

fig = plt.figure(figsize=(20, 3))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
modelxsect = flopy.plot.PlotCrossSection(model=mf, line={'Row': 20})
linecollection = modelxsect.plot_grid()
modelxsect.plot_array(Kx)
print(Kx[:,10,10])

```

Ilustración 40. Perfil de la zona de estudio y diferencia de materiales (Fuente propia).



La función LAYTYP se encarga de definir propiedades de cada una de las capas según se requiera para el modelo, en este caso se consideraron las dos primeras capas como convertibles.

```
laytyp = [1,1,0,0,0,0]
upw = flopy.modflow.ModflowUpw(mf, laytyp = laytyp, hk = Kx,
                               ss=1e-05, sy=0.15)
```

```
ibound = np.ones([nlays,nrows,ncols])
bas = flopy.modflow.ModflowBas(mf, ibound=ibound,strt=mtop)
```

Se procedió con la función Gridgen, la cual está encargada de intersecar las celdas creadas con los valores que se vayan a introducir. De este modo, se ingresaron y relacionaron los datos mensuales de evapotranspiración y recarga correspondientes a un periodo de 5 años (2010-2015).

```
g = Gridgen(mf.dis, model_ws=model_ws,exe_name='./Exe/gridgen_x64.exe',surface_interpolation='replicate')
g.build(verbose=False)
```

```
evtr = {}
evtr[0]=1.60012E-07
evtr[1]=1.55093E-07
evtr[2]=1.7448E-07
evtr[3]=1.62327E-07
evtr[4]=1.67149E-07
evtr[5]=1.84414E-07
evtr[6]=2.07176E-07
evtr[7]=1.88368E-07
evtr[8]=1.50656E-07
evtr[9]=1.38021E-07
evtr[10]=1.28183E-07
evtr[11]=1.42651E-07
evtr[12]=1.60012E-07
evtr[13]=1.55093E-07
evtr[14]=1.7448E-07
evtr[15]=1.62327E-07
evtr[16]=1.67149E-07
evtr[17]=1.84414E-07
evtr[18]=2.07176E-07
evtr[19]=1.88368E-07
evtr[20]=1.50656E-07
evtr[21]=1.38021E-07
evtr[22]=1.28183E-07
evtr[23]=1.42651E-07
evtr[24]=1.60012E-07
evtr[25]=1.55093E-07
evtr[26]=1.7448E-07
evtr[27]=1.62327E-07
evtr[28]=1.67149E-07
evtr[29]=1.84414E-07
evtr[30]=2.07176E-07
evtr[31]=1.88368E-07
evtr[32]=1.50656E-07
evtr[33]=1.38021E-07
evtr[34]=1.28183E-07
evtr[35]=1.42651E-07
evtr[36]=1.60012E-07
evtr[37]=1.55093E-07
evtr[38]=1.7448E-07
evtr[39]=1.62327E-07
evtr[40]=1.67149E-07
evtr[41]=1.84414E-07
evtr[42]=2.07176E-07
evtr[43]=1.88368E-07
evtr[44]=1.50656E-07
evtr[45]=1.38021E-07
evtr[46]=1.28183E-07
evtr[47]=1.42651E-07
evtr[48]=1.60012E-07
evtr[49]=1.55093E-07
evtr[50]=1.7448E-07
evtr[51]=1.62327E-07
evtr[52]=1.67149E-07
evtr[53]=1.84414E-07
evtr[54]=2.07176E-07
evtr[55]=1.88368E-07
evtr[56]=1.50656E-07
evtr[57]=1.38021E-07
evtr[58]=1.28183E-07
evtr[59]=1.42651E-07
evt = flopy.modflow.ModflowEvt(mf,evtr=evtr, surf=mtop, exdp=0.5, nevtop=1)
```

```

rech={ }
rech[0]=9.03445E-08
rech[1]=4.69908E-08
rech[2]=4.18934E-08
rech[3]=1.17038E-07
rech[4]=1.39983E-06
rech[5]=3.42236E-07
rech[6]=6.46529E-07
rech[7]=1.4768E-06
rech[8]=2.61245E-06
rech[9]=1.13997E-06
rech[10]=2.88025E-06
rech[11]=9.2736E-07
rech[12]=4.75985E-09
rech[13]=4.36151E-08
rech[14]=5.03329E-08
rech[15]=2.60509E-07
rech[16]=8.07385E-07
rech[17]=4.46886E-07
rech[18]=3.62964E-07
rech[19]=4.50565E-07
rech[20]=5.61662E-07
rech[21]=1.43197E-06
rech[22]=1.68016E-06
rech[23]=6.69113E-07
rech[24]=3.51419E-08
rech[25]=0
rech[26]=3.00782E-08
rech[27]=3.43215E-07
rech[28]=5.28883E-07
rech[29]=4.01313E-07
rech[30]=1.86343E-08
rech[31]=1.11299E-07
rech[32]=7.04863E-08
rech[33]=1.61764E-06
rech[34]=4.27745E-07
rech[35]=2.28574E-07
rech[36]=0
rech[37]=0
rech[38]=3.00782E-08
rech[39]=3.43317E-08
rech[40]=4.52928E-07
rech[41]=2.66011E-08
rech[42]=1.86343E-08
rech[43]=1.01172E-07
rech[44]=1.06803E-06
rech[45]=3.16277E-07
rech[46]=4.42936E-07
rech[47]=2.33638E-07
rech[48]=0
rech[49]=0
rech[50]=0
rech[51]=3.43317E-08
rech[52]=1.18726E-07
rech[53]=0
rech[54]=0
rech[55]=1.82191E-07
rech[56]=5.00898E-07
rech[57]=8.56401E-07
rech[58]=4.64879E-07
rech[59]=4.12183E-08
rec = fcopy.modflow.ModflowRch(mf, nrchop=3, rech=rech)

```

Una vez insertadas las condiciones de recarga y evapotranspiración, se procedió a relacionar estas con los datos de extracción de los pozos. Cabe aclarar que los pozos no son bombeados de manera homogénea, sin embargo, se consideró una única tasa de bombeo que corresponde con la información recolectada por la fundación Wayuuda y la

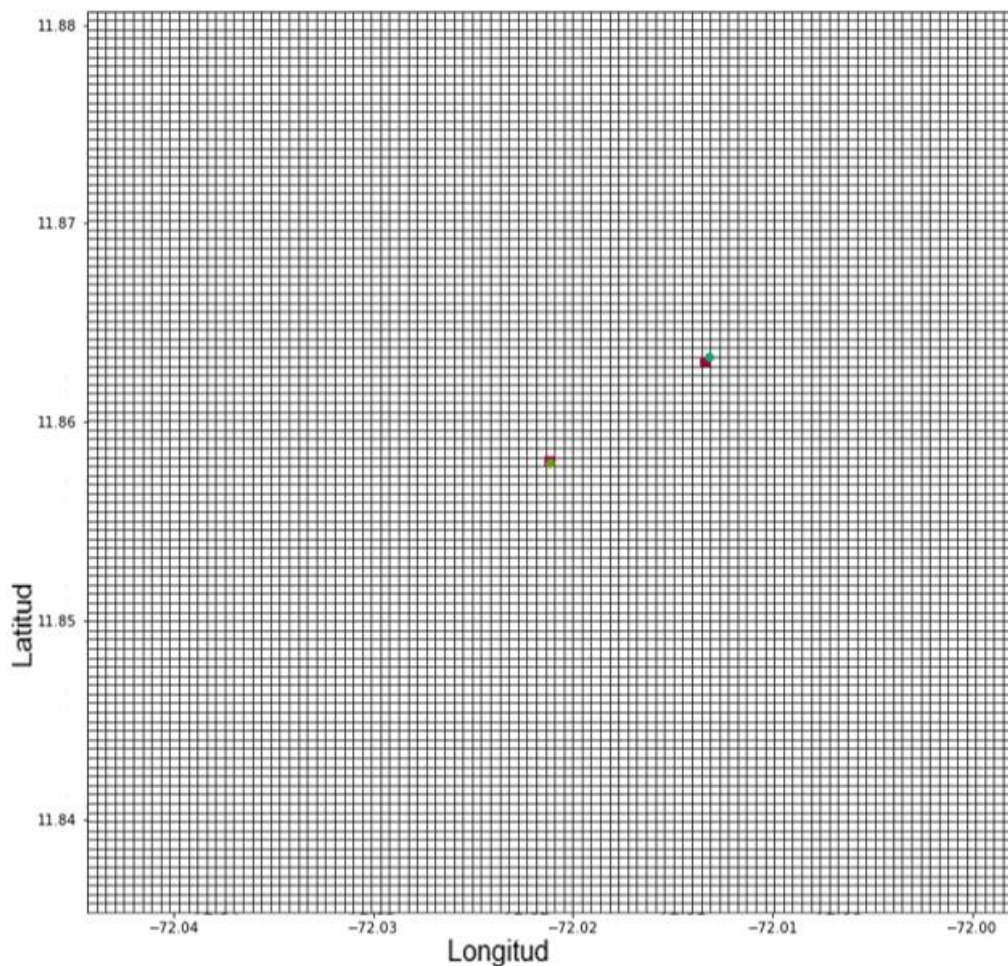
comunidad Majayütpana. Los datos de extracción incluyen información de consumo para alimentación, aseo personal, aseo de ropas, alimentación de animales y agricultura. Finalmente, se graficó la ubicación de los pozos y las celdas con las que estaban relacionados en la Ilustración 41.

```
wel_intersect = g.intersect('./Shp/Pozos2','point',0)
wel_spd = {}
wel_spd[0] = [0,0,0,0]
wel_spd[1] = []
wel_unique = np.unique(wel_intersect.nodenumbr)
for i in np.arange(wel_unique.shape[0]):
    x,y = g.get_center(wel_unique[i])
    i,j = mf.sr.get_ij(x,y)
    wel_spd[1].append([5,i,j,-2.35496E-06])

wel = flopy.modflow.ModflowWel(mf,stress_period_data=wel_spd)

fig = plt.figure(figsize=(12, 12))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, aspect='equal')
modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf)
g.plot(ax, linewidth=0.5)
quadmesh = modelmap.plot_array(mf.wel.stress_period_data.array['flux'][-1,5,:,:], cmap='Spectral', ax=ax)
shp = flopy.plot.plot_shapefile('./Shp/Pozos2', ax=ax, radius=0.0002)
```

Ilustración 41. Celdas y ubicación de los pozos (Fuente propia).



Al igual que los pozos, se llevó a cabo la intersección de las líneas de condición de borde con la grilla del área de interés.

```
ghb_intersect = g.intersect('../Shp/Intento2', 'line', 0)
ghb_spd = {}
ghb_spd[0] = []
ghb_unique = np.unique(ghb_intersect.nodenumbr)
ghb_unique
```

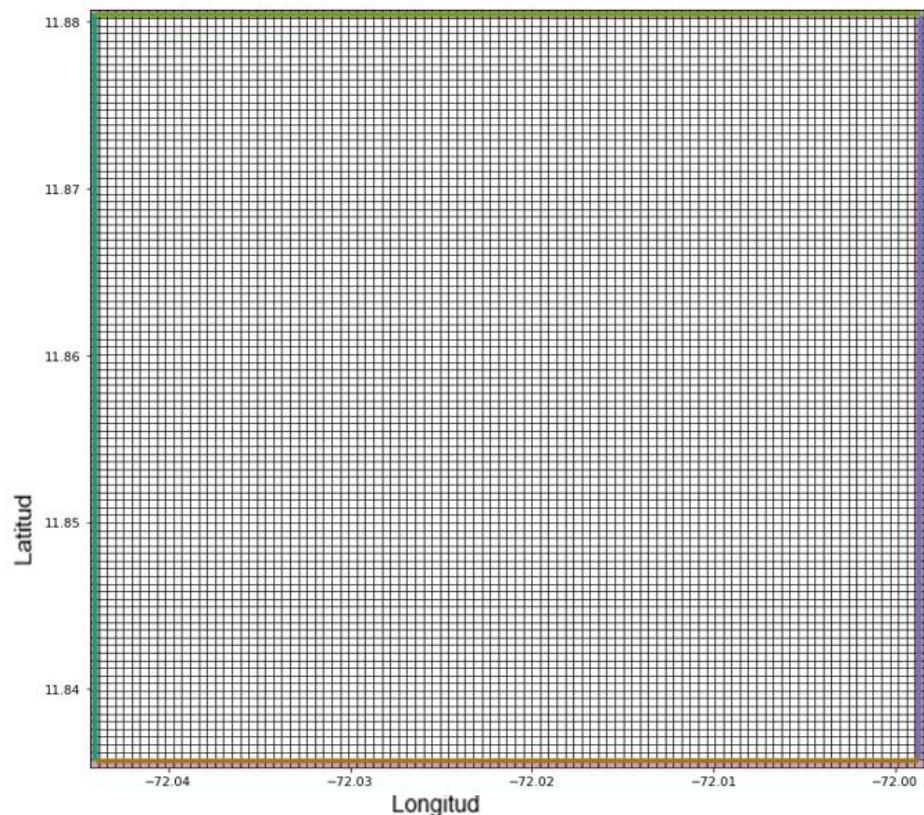
Seguido a esto, se introdujeron las propiedades de la condición de borde asumiendo que la zona de estudio interactúa en todos los sentidos con su entorno, considerando su aplicación según el estrato, las celdas según su fila y columna, elevación y su respectiva condición. Del mismo modo, se procedió a graficar lo anterior en la Ilustración 42.

```
for i in np.arange(ghb_unique.shape[0]):
    x,y = g.get_center(ghb_unique[i])
    i,j = mf.sr.get_ij(x, y)
    ghb_spd[0].append([5,i,j,8,-0.000001])

ghb = flopy.modflow.ModflowGhb(mf, stress_period_data=ghb_spd)

fig = plt.figure(figsize=(12, 12))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, aspect='equal')
modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf)
g.plot(ax, linewidth=0.5)
quadmesh = modelmap.plot_array(mf.ghb.stress_period_data.array['cond'][-1,5,:,:), cmap='RdGy',ax=ax, alpha=0.2)
shp = flopy.plot.plot_shapefile('../Shp/Intento2', ax=ax,linewidth=4)
```

Ilustración 42. Celdas y condiciones de borde (Fuente propia).



Una vez ingresados todos los datos necesarios, se procede a configurar los datos y gráficas de salida, y finalmente se ejecuta el modelo.

```
oc_spd = {(0, 0): ['save head']}

for i in range(mf.dis.nstp.shape[0]):
    oc_spd[(i,mf.dis.nstp.array[3]-1)] = ['save head']
oc_spd

oc = flopy.modflow.ModflowOc(mf, stress_period_data=oc_spd)

mf.write_input()
mf.run_model()
```

Al correr el modelo, se debe verificar que, en la parte inferior de la salida, se indique la normal terminación de la simulación y que aparezca el texto (True []) como se muestra en el Anexo 15.

Se define el nombre del archivo para grabar las cargas hidráulicas. Adicionalmente se genera un gráfico que integra la localización de los pozos, las condiciones de frontera, las cargas hidráulicas y su ubicación en las celdas de la grilla. Nuevamente se ubica geográficamente esta imagen con ayuda de OpenStreetMap.

```
mfheads = flopy.utils.HeadFile('../Model/Model2.hds')
mfheads.get_times()

head = mfheads.get_data()
head.shape

fig = plt.figure(figsize=(36, 24))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, aspect='equal')
modelmap = flopy.plot.PlotMapView(model=mf)
g.plot(ax, linewidth=0.5, alpha=0.4)
contour = modelmap.contour_array(head[1],ax=ax)

cellhead = modelmap.plot_array(head[1],ax=ax, cmap='Blues', alpha=0.2)
ax.clabel(contour)

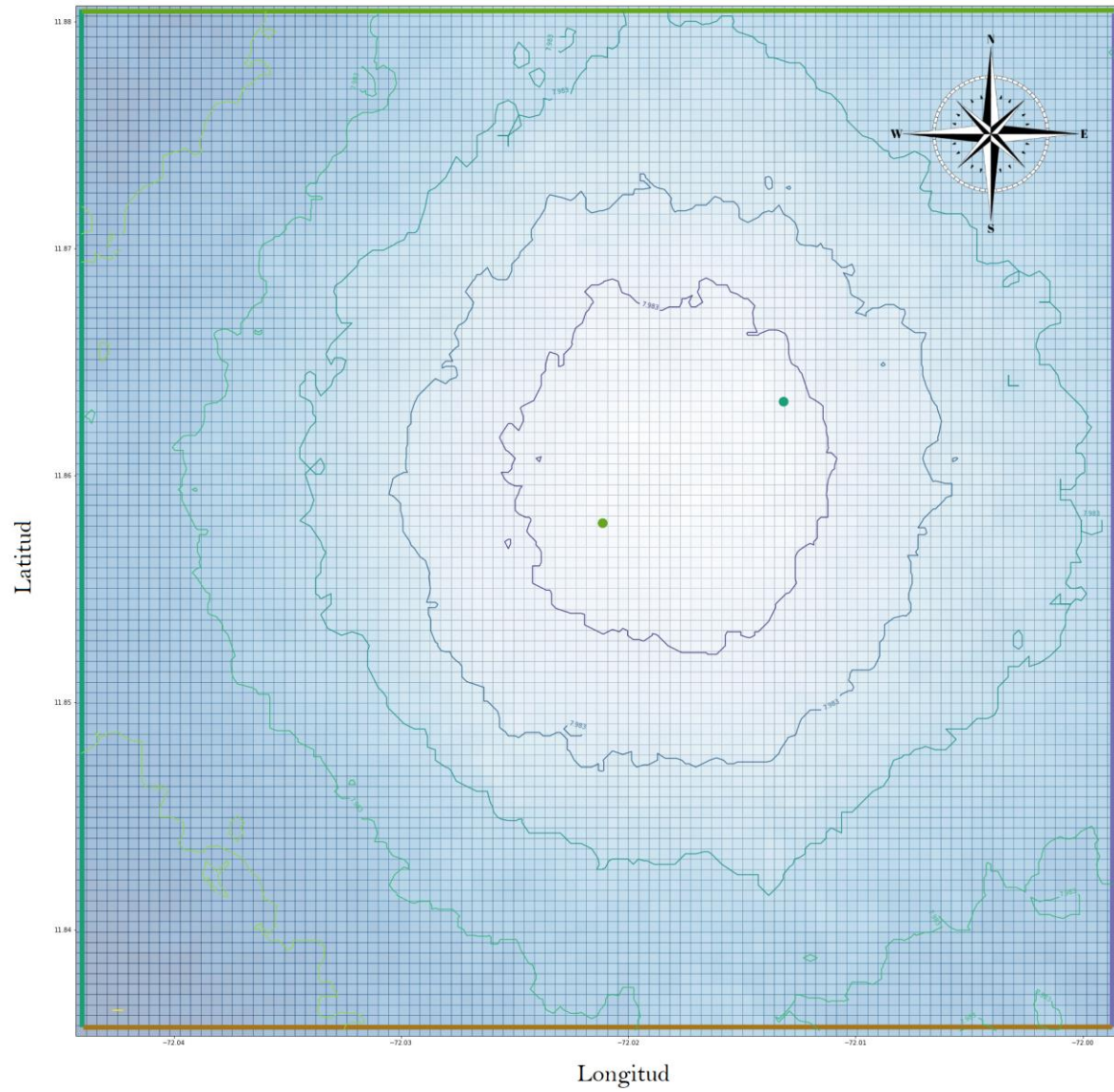
plt.tight_layout()

shpGHB = flopy.plot.plot_shapefile('../Shp/Intento2', ax=ax,linewidth=8)
shpWel = flopy.plot.plot_shapefile('../Shp/Pozos2', ax=ax,radius=0.00020)

contourShp = mfheads.to_shapefile(filename='../Shp/ModelHeadsLay2',kstpker=(0,0),mflay=1)
fig.savefig('infahatari.png')
```

MODFLOW permite visualizar los datos obtenidos después de correr el modelo mediante líneas de contorno de carga o cabeza hidráulica que proporcionan niveles y abatimientos piezométricos (Garzón, 2002) como la Ilustración 43. e Ilustración 44.

Ilustración 43. Cargas hidráulicas vistas en planta (Fuente propia).

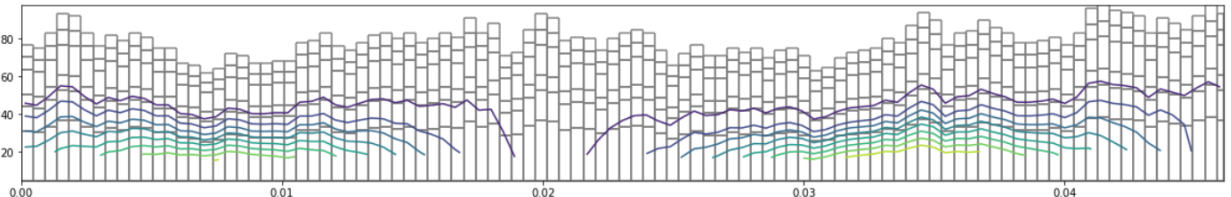


```

fig = plt.figure(figsize=(20, 3))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
modelxsect = flopy.plot.PlotCrossSection(model=mf, line={'Row': 10})
linecollection = modelxsect.plot_grid()
modelxsect.contour_array(head)

```

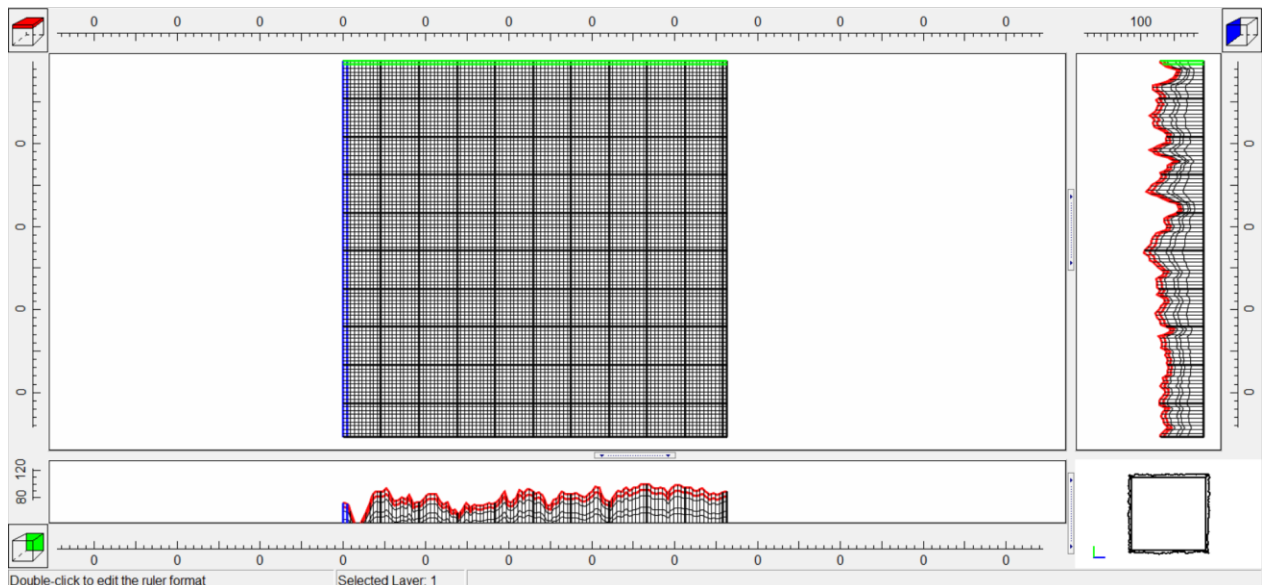
Ilustración 44. Cargas hidráulicas vistas en perfil (Fuente propia).



De la Ilustración 44. se observa que los valores de carga hidráulica disminuyen a medida que estos se acercan al área de ubicación de los pozos, esto se debe a la extracción continua del recurso hídrico que se realiza en esta zona del modelo.

Una vez ejecutado y guardado el modelo, se importaron los datos al programa MODEL MUSE (como se observa en la Ilustración 45.), el cual permite la visualización de algunos elementos de código (como la grilla, perfiles topográficos, límites del área, entre otros). Contiguo a esto, se realizó nuevamente la ejecución del modelo para extraer los resultados respectivos a todos los periodos de estrés introducidos anteriormente en Jupyter Notebook. Adicionalmente, se graficó una curva de discrepancia de los datos como se observa en la Gráfica 3, esto con la finalidad de verificar que se estuviese cumpliendo los requisitos de balance hídrico (para que un modelo se considere bien realizado, la discrepancia no puede superar el rango -1 y 1).

Ilustración 45. Modelo leído en MODEL MUSE (Fuente propia).



Gráfica 3. Porcentajes de discrepancia (Fuente propia).

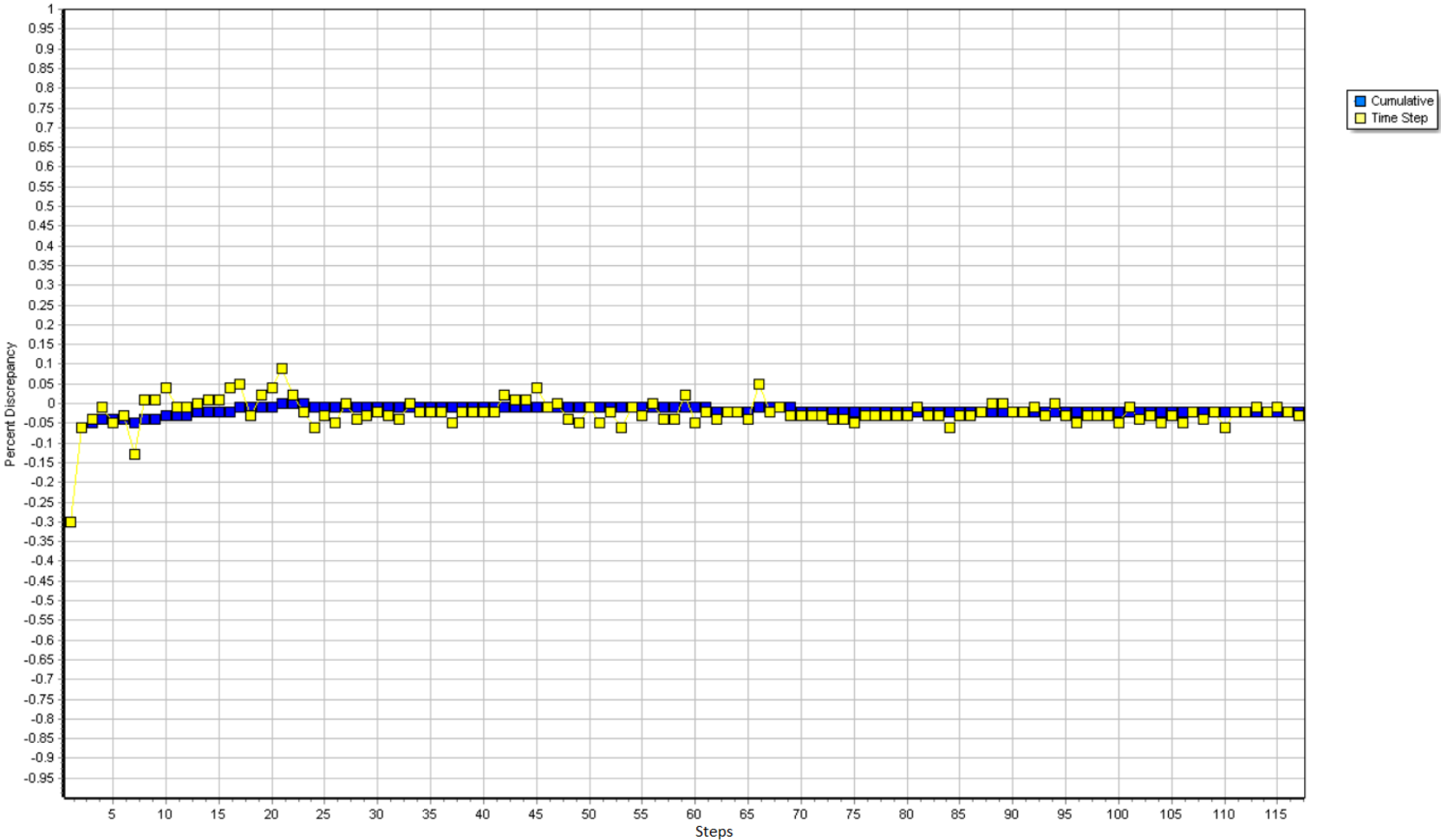


Ilustración 46. Muestra de los resultados finales para el periodo 4 de la simulación (Fuente propia).

HEAD WILL BE SAVED ON UNIT 37 AT END OF TIME STEP 2, STRESS PERIOD 4			
DRAWDOWN WILL BE SAVED ON UNIT 38 AT END OF TIME STEP 2, STRESS PERIOD 4			
1 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 2, STRESS PERIOD 4			

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T

IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	2.5339E-08	STORAGE =	9.6353E-18
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
ET =	0.0000	ET =	0.0000
HEAD DEP BOUNDS =	47.6957	HEAD DEP BOUNDS =	6.1009E-06
RECHARGE =	1.1217E-03	RECHARGE =	2.4596E-10
TOTAL IN =	47.6968	TOTAL IN =	6.1012E-06
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	2.9428E-09	STORAGE =	1.1206E-17
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	36.6243	WELLS =	4.7099E-06
ET =	2.36145E-07	ET =	1.67149E-07
HEAD DEP BOUNDS =	11.0983	HEAD DEP BOUNDS =	1.3994E-06
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	47.7227	TOTAL OUT =	6.1093E-06
IN - OUT =	-2.5875E-02	IN - OUT =	-8.1495E-09
PERCENT DISCREPANCY =	-0.05	PERCENT DISCREPANCY =	-0.13

Los resultados observados de la Ilustración 46. permiten comprender el balance hídrico que realiza MODFLOW con los valores de entrada (recarga) y salida (evapotranspiración y extracción de los pozos).

6.4. Calibración, validación e incertidumbre del modelo

Las condiciones propias del COVID-19, limitaron la posibilidad de realizar visitas de campo en la zona de estudio (con la finalidad de hacer inspecciones visuales o ensayos); de este modo, fue imposible ajustar los datos según los factores reales y actuales del lugar. Sin embargo, como metodología provisional y durante todo el proceso de modelado, se realizaron ajustes manuales teniendo en cuenta la tendencia global de los datos principalmente en dos secciones:

6.4.1. Calibración de la recarga potencial vertical por precipitación

Durante el proceso para determinar la recarga potencial vertical por precipitación, se puede observar que los registros históricos de precipitación de las estaciones eran, en muchos meses, equivalente a cero (0) como se puede visualizar de los anexos 1 al 9; y a la hora de aplicar el método RAS, algunos de los valores resultantes de recarga eran negativos, por lo cual y por efectos del modelo, se decidió asumir estos valores como cero (0) y así mantener la tendencia de lluvia.

6.4.2. Calibración de gráfica de discrepancia

Al correr el modelo por medio de la interfaz visual MODEL MUSE se genera una gráfica que indica la discrepancia de los datos (Gráfica 4), la cual basa su funcionamiento bajo la premisa de que cada gota de agua que ingresa en el modelo también debe salir (balance hídrico). En este orden de ideas, si los valores de recarga son muy grandes o pequeños en contraste a los de extracción (pozos, evapotranspiración y condiciones de borde), la discrepancia saldrá del rango admisible para modelos (entre 1 y -1).

En este modelo se puede observar que los únicos periodos de estrés con datos de discrepancia superiores a los límites eran los dos primeros y, teniendo en cuenta que el valor de recarga inicial según los datos de precipitación era cero (0), se realizó un proceso iterativo con el fin de hallar un valor superior con mayor grado de correlación con el modelo, el cual representaría una equivalencia de almacenamiento. Esto permitió simular una continuidad lógica según lo mencionado en el párrafo anterior.

6.5. Manejo integrado del recurso hídrico

Mediante este proyecto es posible que la Comunidad Majayütpana tenga acceso a información sobre la forma en la que se recargan los pozos y los niveles en el que el recurso hídrico se encuentra en ellos. Por este motivo, se hace entrega del modelo junto con las recomendaciones que se deben tener en cuenta para mejorarlo y que así, las personas encargadas de tomar las decisiones en la comunidad y quienes se interesen por el ámbito investigativo en la misma, puedan discernir de qué forma actuar para cuidar el agua especialmente en las épocas de largas sequías y así optimizar su uso. Es importante que las comunidades tengan conocimiento de las diferentes fuentes de procedencia del agua que consumen, para así comprender factores relacionados con su calidad y propiedades con la finalidad de implementar metodologías de potabilización.

7. DISCUSIÓN

Se puede afirmar que, en cuestión de datos, el desarrollo del modelo superó las expectativas planteadas, teniendo en cuenta las dificultades que se presentaron debido a la pandemia del COVID-19. Pese a esto, las fuentes informativas oficiales como el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano SGC, CorpoGuajira, EARTH DATA y demás, ofrecieron una cantidad considerable de datos útiles, ayudando a la comprensión de la zona de estudio a nivel social, geográfico, climático, biológico, hidrológico e hidrogeológico. No obstante, hay que considerar que mucha de esta información es obsoleta (como es el caso de la precipitación, la cual tiene registros históricos anteriores al año 2017) y no se tiene certeza si los instrumentos de medición se encontraban correctamente calibrados. Adicionalmente, es imperativo realizar ensayos de campo ya que estos brindarán argumentos sólidos y actualizados para que la simulación sea cada vez más cercana a la realidad.

Una de las herramientas que promovieron la interpretación de datos fue Quantum GIS (QGIS) por medio de la obtención de gráficas (como isoyetas, formación de cuencas hidrológicas, formación de corrientes superficiales, vegetación, entre otras) y datos (como topografía) en cuestión de aspectos físicos del terreno. Además, la fundación WAYUUDA fue determinante para la comprensión de factores como el consumo de la comunidad, aspectos litológicos de los pozos e información química del agua.

Todo lo mencionado fue necesario para la construcción del modelo inicial teórico ya que, gracias a esto, se pudo simular el comportamiento del agua bajo condiciones similares a las reales y permitió analizar qué aspectos son necesarios a considerar para completarlo en futuras investigaciones.

Es importante mencionar que los datos obtenidos en el modelo nos permiten tener dos hipótesis principales sobre lo que puede estar sucediendo en el acuífero al que el pozo pertenece: hay factores que recargan el pozo mucho más grande que la precipitación y permiten que el balance hídrico en el mismo se mantenga o que el pozo esté disminuyendo a medida del tiempo el nivel de agua en el que se encuentra. Para confirmar estas afirmaciones es necesario realizar ensayos de campo que puedan asegurar en qué zonas se encuentra agua y la dirección de la misma.

El impacto social de este trabajo es grande, debido a que la finalidad del mismo es orientar y animar a la Comunidad Majayütpana y las demás colindantes en el ámbito de la investigación que les permita conocer los recursos que poseen y optimizarlos.

8. CONCLUSIONES

- ✓ Tanto la comunidad Wayuu, como la gran cantidad de parques naturales ubicados en la Guajira, al ser considerados patrimonio de la humanidad, hacen más complejo a las entidades gubernamentales realizar intervenciones en la zona. No obstante, al ser una región con muchas necesidades a nivel social, económico y de salud, es importante promover su investigación con el fin de aportar a la base informativa del país y mejorar las condiciones y calidad de vida de su población sin llegar a afectar aspectos como su paisaje natural o su patrimonio cultural.
- ✓ Como se pudo observar en los perfiles litológicos y en las formaciones geológicas, la zona posee estratos de suelo de épocas muy antiguas (precámbrico y cenozoico) existiendo formaciones rocosas como granodiorita y esquistos, los cuales presentan permeabilidades muy bajas, es decir, los estratos son considerados en general impermeables. Esto impulsa la suposición inicial de que la existencia de un acuífero es debida a el paso de agua a partir de fracturas, las cuales pueden ser debidas por la presencia de fallas geológicas normales e inversas. Sin embargo, se recomienda realizar sondeos en la zona con el fin de verificar esta afirmación.
- ✓ Según los datos arrojados por MODEL MUSE, los valores acumulados de discrepancia tienden a ser en su mayoría negativos; debido a ello se puede afirmar que, en el modelo, está ingresando una menor cantidad de agua de la que esta siendo extraída, esto bajo la premisa de que la discrepancia es calculada a partir de la ecuación “RecargaTotal – ExtracciónTotal”. De estos resultados se puede plantear que existen otras fuentes que recargan el acuífero al cual pertenece el pozo y que la cantidad de agua del mismo podría estar en decadencia.
- ✓ Los perfiles de cabeza de agua son inferiores a medida que se acercan al área de localización de los pozos. Este comportamiento es lógico si se tiene en cuenta que hay una extracción constante de estos para abastecer a la comunidad, por lo cual se afirma que a medida que el agua se acerca a los pozos, disminuirá su potencial hidráulico.
- ✓ Teniendo en cuenta que el pozo N°1 es de agua completamente salada y el pozo N°2 es de agua salobre, existe la posibilidad de que la presencia de fracturas en los estratos mas inferiores del suelo esté promoviendo el paso de partículas entre los mencionados. En este orden de ideas, puede que la composición del agua del pozo N°2 tenga niveles de salinidad muy altos en el futuro, siendo un gran problema para los beneficiarios de este, debido a que parte de su extracción se encuentra destinada para consumo humano y animal.
- ✓ Según los resultados obtenidos en el ensayo de calidad del agua para el pozo N°2, gran parte de las características de la muestra ensayada superan los límites máximos admisibles, como es el caso del PH, la dureza total, el color aparente, la cantidad de nitratos, entre otros. A partir de esto, se afirma que la extracción de líquido del pozo mencionado no es recomendable para consumo humano, ya que podría evolucionar en una afectación para la salud de quien la ingiera.

9. RECOMENDACIONES

Tal y como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el recurso hídrico es el más importante para la subsistencia de los seres humanos, por ende, es primordial que se comprendan sus funciones y los procesos que se desarrollan para su obtención con el fin de optimizarlo. Es necesario que se implementen metodologías de caracterización y modelamiento de los recursos hídricos, principalmente en las regiones en donde es tan difícil el acceso al mismo (como lo es La Guajira); ya que estos procesos brindan la posibilidad de visualizar los niveles hidráulicos y asimismo tomar decisiones acerca de su correcto uso.

En este trabajo se asumieron datos que por la condición generada debido al COVID-19 fueron imposibles de medir; por ello, para la Comunidad Majayütpana y quienes continúen con interés de seguir trabajando sobre esta zona, es primordial que se realice recolección de datos en sitio que brinden la posibilidad de calibrar el modelo (inspecciones visuales de vegetación, análisis de tipo de suelo, y niveles piezométricos del estado actual de los pozos) junto con estudios geológicos tales como tomografía computarizada (TAC) y otros tipos de sondeos que permitan corroborar los resultados y tener en cuenta otros parámetros de recarga como la interacción con acuíferos cercanos al punto de estudio.

Si se desean obtener resultados del estado actual, se requiere realizar un modelamiento con datos de precipitación y evapotranspiración más cercanos al año 2021, debido a que los resultados de las estaciones que se recolectaron para este modelo son de 6 años atrás y las condiciones podrían ya no ser las mismas. Para nuevos modelos se recomienda que se analicen de 3 a 5 años seguidos, con el fin de calibrar los datos y brindar la posibilidad a los resultados de ser más certeros y analíticos.

Adicionalmente, es recomendable realizar ensayos para determinar la precipitación directamente en la zona de estudio, debido a que las estaciones se encuentran a más de 1 kilómetro de distancia respecto a la localización de los pozos. Este tipo de ensayos pueden realizarse con pluviómetros o, en caso de ausencia de presupuesto, se puede determinar a partir del llenado de cualquier recipiente en un lapso determinado. Respecto al consumo, es importante mantener un registro constante de la cantidad de agua que se extrae del pozo, a partir de este es posible determinar una curva de tendencia que, al relacionarse con el abastecimiento natural del pozo en el tiempo, se puedan proponer medidas de racionamiento de agua por familias, esto con el fin de optimizar el agua y, en caso de sequías extremas, la comunidad posea el recurso.

En la actualidad, MODFLOW posee un gran número de herramientas adicionales para introducir diferentes funciones y datos (transportes de contaminantes, diferentes tipos de flujo, características del agua, características de la vegetación, etc). Es por esto que la búsqueda constante de información referente al ecosistema de la zona y realizar un gran número de simulaciones bajo diferentes condiciones, es clave para alcanzar una calibración más acertada del modelo. Cualquier tipo de conocimiento, por absurdo que parezca, puede ser válido si se interpreta de la manera correcta; es por eso que se deben considerar los saberes ancestrales que pueden proporcionar las comunidades e implementarlos de una u otra manera en este tipo de investigaciones.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abirami, P., Darshan, K. M., Kirubha, S. P. A., Latha, S., & Muthu, P. (2021). Use of Anaconda Navigator and Jupyter Notebook in science. *Materials Today: Proceedings*.
- Atlas, U. T. (2011). *Atlas Ambiental del Departamento de La Guajira*. MPX y Corpoguajira, Riohacha.
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, 54(5), 733–739. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>
- Becerra-Soriano, R., & Gutiérrez-López, A. (2006). Modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística. *IAHS-AISH Publication*, 308, 62–67.
- Betancur, T., & Palacio, C. (2009). La modelacion numerica como herramienta para la exploracion hidrogeológica y construccion de modelos conceptuales (caso de aplicación: Bajo cauca antioqueño). *DYNA (Colombia)*, 76(160), 39–49.
- Blanquer, D. (2005). *La iniciativa privada y el ciclo integral del agua*. Tirant lo Blanch.
- Botero, L., De La Ossa, V., J., Espitia, A., & De La Ossa-Lacayo, A. (2009). Importancia de los jagüeyes en las sabanas del caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 1(1), 71. <https://doi.org/10.24188/recia.v1.n1.2009.413>
- Cabrera, J., & Eng, C. (n.d.). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. 1.
- Candela, L. (2015). *Actualización en diseño de redes de monitoreo de aguas subterráneas: Acuíferos Kársticos*. Departamento de Ingeniería Del Terreno, Cartografía y Grofísica de La Universidad Politécnica de Catalunya. [http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/encuentro2/Ponencias/PDF_AS/4.1 Monitoreo en acuiferos karsticos.pdf](http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/encuentro2/Ponencias/PDF_AS/4.1%20Monitoreo%20en%20acuiferos%20karsticos.pdf)
- Challenger-Pérez, I., Díaz-Ricardo, Y., & Becerra-García, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holguín*, 20(2), 1–13.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (n.d.). *Métodos numéricos*.
- Chung, T. J. (2013). Derivation of Finite Difference Equations. *Computational Fluid Dynamics*, 45–62. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511780066.007>
- Climate-Data.org. (2021). *La Guajira: Tiempo y clima*. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/la-guajira-102/r/enero-1/>
- Custódio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hidrologia subterranea, 2.ª edição. *Tomo I e II, Ediciones Omega, Barcelona*, 2350.
- Daza-Daza, A.R., Rodríguez-Valencia, N., & Carabalí-Angola, A. (2018). The water resource in the wayuu indigenous communities of la guajira colombiana. Part 1: A look from the ancestral knowledge and practices | El recurso agua en las comunidades indígenas wayuu de la Guajira colombiana. Parte 1: Una Mirada desde los Saberes. *Informacion Tecnologica*, 29(6), 13–24.
- Daza-Daza, Alcides R., Serna-Mendoza, C. A., & Carabalí-Angola, A. (2018). El Recurso Agua en las Comunidades Indígenas Wayuu de La Guajira Colombiana. Parte 2: Estudio Cualitativo de las Condiciones de Higiene, Aseo y Disponibilidad de Agua. *Información*

Tecnológica, 29(6), 25–32. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000600025>

- Fernandez Muñoz, R. (2014). *Microsoft Excel en educación*. AreaTic. [https://blog.uclm.es/ricardofdez/2014/01/28/microsoft-excel-en-educacion/#:~:text=Se trata de una hoja, las filas son las celdas](https://blog.uclm.es/ricardofdez/2014/01/28/microsoft-excel-en-educacion/#:~:text=Se%20trata%20de%20una%20hoja,las%20filas%20son%20las%20celdas)
- Figueredo, J. (2019). *Metodología Para Determinar Zonas De Recarga Hídrica En Municipios O Comunidades Con Recursos Financieros Limitados*. 1–24.
- Fundación WAYUUDA. (2019). *Aspectos Geológicos del área de estudio: Majayütpana, alta Guajira*.
- Garzón, L. D. D. (2002). Aplicación de Visual MODFLOW para el modelamiento numérico del flujo de agua subterránea en el Acuífero Morroa (Sucre–Córdoba). *VI Congreso Colombiano de Elementos Finitos y Modelamiento Numérico, Bogota-Colombia*.
- Google. (2021). *Google Earth*. <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- Granados, A. H. (1988). Resumen del estudio hidrogeológico de la media y baja Guajira. *Boletín Geológico*, 29(1), 45–83.
- IDEAM. (2020). *Estaciones Pluviométricas*. http://www.ideam.gov.co/inicio?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=72098741&_101_type=content&_101_urlTitle=descarga-datos-hidrometeorologicos
- IDIGER. (2019). *Tipos de estaciones con que cuenta la Red Hidrometeorológica en Usme, Bogotá*. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica>
- Jaramillo Robledo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 288–298.
- Lewis, E. (1980). The practical salinity scale 1978 and its antecedents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 5(1), 3–8.
- Mateu, J. (1993). Hidrología. *Geografía General, I. Introducción a La Geografía Física, Madrid, Taurus Universitaria*, 250–294.
- Matteucci, S. D. (2002). *Meteorología para el estudio de la vegetación*.
- Matus, O. (2007). Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. *Escuela de Posgrado Programa de Educación Para El Desarrollo y La Conservación Del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Magister S*, 121. http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5392/Participatory_devlopment_of_a_methodology.pdf;jsessionid=C76CC5E2FFFD8EBE36B483EB5BC0F6B2?sequence=1
- Molano Campuzano, J. (1964). Zonas aridas de colombia - La Guajira. *Boletín de La Sociedad Geográfica de Colombia*, XXII(83 y 84), 1–32.
- Molina Pérez, D., Cabrera Estupiñán, E., & Ramos Arzola, L. (2014). MODFLOW y AQÜIMPE: dos aproximaciones a la realidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35(2), 107–122.
- Musy, A., Hingray, B., & Picouet, C. (2014). *Hydrology: a science for engineers*. CRC press.

- NASA. (2021). *Earthdata Search*. <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- Niño, H. (1984). *Inventario de Recursos Hídricos Superficiales. Evaluación del rendimiento hídrico medio del Departameto de La Guajira*.
- Ordoñez Galvez, J. J. (2011). Cartilla técnica: aguas subterráneas–acuíferos. *Global Water Partnership, South América. Sociedad Geográfica de Lima. Perú*.
- Ordoñez, J. . (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geografica de Lima*, 2–44.
- Ortiz-Vasquez, F. (1978). Aplicación de la curva de flujo en la prospección de aguas subterráneas en La Guajira-Colombia. *Boletín de Geología*, 12(26), 39–62.
- Ortiz Meneses, A. F., Plata Chaves, J. M., Herrera Otero, E., & Santos Santos, N. (2015). Caracterización estática de rocas por medio de tomografía computarizada de rayos-X tac. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 12(2), 57–63. <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n1-2015005>
- Ramos, C. (2006). *Análisis de los movimientos del terreno producidos por la excavación mecánica del túnel de la L9 en la zona de Santa Coloma de Gramenet*.
- Rodríguez, N., & Carabalí, A. (2017). Agua, Desarrollo, Escasez y Sustentabilidad: una Mirada desde las Comunidades Rurales de La Guajira Colombiana. [2017] *Congreso Internacional de Ciencias Sociales*.
- Roman, F. J. S. S. (2008). *Introducción a Visual Modflow Conceptos básicos*. 1–19.
- Sahuquillo, A., Custodio, E., & Llamas, M. R. (2009). La gestión de las aguas subterráneas (Segunda parte). *Tecnología Del Agua*, 29(306), 54–67.
- Salas, J. D. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería Del Agua*, 7(4), 409–429.
- Schneider, H. (2017). El agua como factor de desarrollo local. *Revista Derecho Administrativo Económico*, XI(8), 123–131. <https://doi.org/10.7764/redae.8.9>
- Senent Alonso, M. (1997). La gestión de acuíferos en regiones áridas y semiáridas. *Areas: Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 17, 169–178.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa : escala detallada*.
- SGC, S. G. (2020). *Plancha No. 5 del Estado de la Cartografía*. Obtenido de Plancha No. 5 Del Estado de La Cartografía. https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/
- Solano Brito, Y. N. (2018). Desarrollo de pruebas a escala de laboratorio a un sistema en dos dimensiones para el transporte de aguas subterráneas. In *Universidad Pontificia Bolivariana* (Vol. 2).
- Soledad Duval, V., María Benedetti, G., & María Campo, A. (2015). Relación clima-vegetación: adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina. *Investigaciones Geograficas*, 2015(88), 33–44. <https://doi.org/10.14350/rig.48033>
- Tarbutck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. In *Pearson Educación S. A*.

Universidad Veracruzana. (2013). *Manual operativo para la utilización del sistema de información geográfica Quantum GIS 1* . 8. 45.

Vélez, M., Ortiz, C., & Vargas, M. (2011). Las aguas subterráneas: un enfoque práctico. In *Instituto Colombiano de Geología y Minería*.

Veloza, J. (2013). *Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá*. 50(5).

11. ANEXOS

Anexo 1. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Santana Urraich (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020				ESTACIÓN:				15070010 SANTANA URRACH				
LATITUD	1204 N		TIPO EST	PM		DEPARTAMENTO	LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN	AGOSTO DE 1971					
LONGITUD	7203 W		ENTIDAD	01 IDEAM		MUNICIPIO	URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN	-					
ELEVACIÓN	30 msnm		REGIONAL	05 MAGDALENA		CORRIENTE	AY PURARAPU								
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1								7	98	192	35	3	335
1972	2	1	8	0	3	3	43	0	0	0	5	32	4	0	98
1973	2	1	0	0	0	11	0	0	0	0	91	196	57	0	355
1974	2	1	0	4	0	2	64	0	0	0	247	10	122	0	449
1975	2	1	1	0	0	0	0	0	1	7	113	81	103	65	371
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	25	62	111	59	18	275
1977	2	1	0	0	0	0	60	0	0	0	80	10	10	0	160
1978	2	1	0	5	0	55	0	0	0	0	0	104	0	0	164
1979	2	1	0	0	0	75	230	15	0	49	42	80	60	10	561
1980	2	1	0	0	0	0	0	0	7	10	0	55	0	20	92
1981	2	1	20	30	0	64	200	0	0	70	0	10	90	0	484
1982	2	1	0	0	0	0	40	0	0	0	120	70	0	0	230
1983	2	1	0	0	0	0	0	0	0	20	18	67	20	0	125
1984	2	1	8	0	0	0	0	0	8	3	189	111	33	3	355
1985	2	1	0	0	0	111	134	0	10	5	14	152	70	0	496
1986	2	1	0	39	0	0	106	6	0	0	18	57	35	0	261
1987	2	1	0	0	0	12	160	30	0	20	10	218	140	0	590
1988	2	1	0	0	0	0	0	0	0	117	93	160	107	0	477
1989	2	1	0	40	0	0	0	0	0	0	132	0	31	0	203
1990	2	1	0	0	0	0	3	0	5	80	36	220	155	0	499
1991	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	46	36	98
1992	2	1	0	0	0	14	43	0	0	0	18	162	32	0	269
1993	2	1	0	0	0	0	334	0	0	0	20	0	0	0	354
1994	2	1	1,4	4,3	0	13,2	46,1	2,6	2,7	19,6	58,3	100,4	54,2	10,3	313,1
1995	2	1	0	0	0	20	0	0	27	186	30	474	0	0	737
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	15	0	35	125	128	30	333
1997	2	1	0	0	0	23	0	85	0	0	58	55	29	0	250
1998	2	1	0	0	0	20	54	0	7	9	99	24	43	72	328
1999	2	1	5	0	0	0	0	0	0	137	110	320	20	0	592
2000	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	26	72	0	0	98
2001	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	54	99	60	60	273
2002	2	1	0	0	0	0	30	80	0	0	19	48	0	0	177
2003	1	1	0	0	0	0	0	0	10	4	50	189	0	162	415
2004	1	1	0	0	0	0	105	0	0	0	236	139	315	2	797
2005	1	1	38	3	0	0	303	101	5	0	219	366	55	15	1105
2006	1	1	2	0	0	11	34	0	0	0	34	218	0	0	299
2007	1	1	0	0	22	42	54	0	0	58	111	146	81	0	514
2008	1	1	0	0	0	20	20	0	4	104	202	211	111	18	690
2009	1	1	0	0	9	0	111	9	0	0	50	5	51	0	235
2010	1	1	0	0	21	29	169	15	84	202	405	40	459	177	1601
2011	1	1	0	0	0	53	109	25	120	10	82	241	108	73	821
2012	1	1	0	0	0	90	155	0	0	0	18	199	40	53	555
2013	1	1	0	0	0	0	32	0	0	30	135	29	99	31	356
2014	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	135	174	129	24	462
2015	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
2016	1	1	0	0	0	130	9	0	0	9	0	32	149	0	329
2017	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PROMEDIO			1,813	2,724	1,222	17,738	58,847	8,191	6,793	25,687	77,659	117,835	68,265	19,398	395,555

Anexo 2. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Irraipa (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020					ESTACIÓN:				15070070 IRRAIPIA			
LATITUD	1207 N		TIPO EST	PM		DEPARTAMENTO	LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN	AGOSTO DE 1971					
LONGITUD	7157 W		ENTIDAD	01 IDEAM		MUNICIPIO	URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN	-					
ELEVACIÓN	65 msnm		REGIONAL	05 MAGDALENA		CORRIENTE	AY MOCHOHOPA								
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1								15	57	50	17	0	139
1972	2	1	0	0	0	7	0	0	0	0	0	17	3	0	27
1973	2	1	0	0	0	0	0	24	10	12	15	40	43	0	144
1974	2	1	0	0	0	0	0	0	0	58	1	23	119	0	201
1975	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	148	51,4	40,5	239,9
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	18,5	55,8	30,3	0	104,6
1977	2	1	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	0	63
1978	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	2	1	0	3	0	26	43	38	10,1	11,4	0	106	188	11	436,5
1980	2	1	0	10	0	0	0	0	13	0	0	70	11	9	113
1981	2	1	0	22	0	93	83	0	4,2	8	22,7	64,8	73	16	386,7
1982	2	1	12	0	0	7	0	0	0	0	0	84	0	0	103
1983	2	1	0	0	0	19	0	0	0	0	0	27	6	0	52
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	137	110	15	2	264
1985	2	1	0	0	0	72	58	0	0	0	0	197	160	40	527
1986	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	55
1987	2	1	0	0	1	11,7	10	6	7,2	8,4	26,2	59,2	32,3	11,8	173,8
1988	2	1	0	0	0	0	0	0	50	40	0	190	50	0	330
1989	2	1	0	0	40	0	0	0	0	0	72	36	29	34	211
1990	2	1	0	0	0	4	13	4	3	15	32	142	49	18	280
1991	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	70	30	15	116
1992	2	1	0	0	0	0	42	0	0	0	61	45	102	0	250
1993	2	1	0	0	0	6	175	0	0	0	42	0	12	0	235
1994	2	1	0	0	1	4	2	0	0	20	0	72	90	0	189
1995	2	1	0	0	1	10	0	0	18	161	24	189	8	1	412
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	70	30	82	141	17	44	384
1997	2	1	5	0	0	0	0	17	0	0	27	48	25,9	0	122,9
1998	2	1	0	0	0	100	15	0	4	5	132	46	45	94	441
1999	2	1	10	0	0	5	22	0	0	50	283	265	155	95	885
2000	2	1	9	0	0	0	0	0	0	0	65	45	25	0	144
2001	2	1	0	0	0	0	9	0	0	0	66	47	66	27	215
2002	2	1	0	0	0	0	0	72	0	0	140	28	0	0	240
2003	1	1	0	0	0	0	0	15	0	0	15	210	0	33	273
2004	1	1	15	0	0	31	32	0	0	0	80	175	265	0	598
2005	1	1	39	0	0	0	144	46	5	0	128	346	0	8,3	716,3
2006	1	1	0	7	0	28	42	0	0	0	17	166	0	0	260
2007	1	1		0	0	38	23	35	0	45	82	58	36	23	340
2008	1	1	0	0	0	0	11	0	5	67	65		0	0	148
2009	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25	18	131	0	174
2010	1	1	0	0	10	35	78	21	83	92	378	181	417	139	1434
2011	1	1	0	0	0	10	60	85	30	1	58	207	472	0	923
2012	1	1	0	0	0	10	13	45	0	10	0	198	48	0	324
2013	1	1	0	0	0	0	80	0	0	25	209	0	70	35	419
2014	1	1	0	0	0	0	0	0	0	35	0	70	65	0	170
2015	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15
2016	1	1	0	0	0	0	55	0	0	0	95	295	288	51	784
2017	1	1	0	0	0										0
PROMEDIO			2,000	0,935	1,178	11,482	22,444	10,467	6,944	15,409	53,378	97,662	70,867	16,252	299,206

Anexo 3. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Sillamana (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES																
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL																
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS																
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020				ESTACIÓN:					15080070 SILLAMANA				
LATITUD		1153 N		TIPO EST		PM		DEPARTAMENTO		LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN		JULIO DE 1971		
LONGITUD		7131 W		ENTIDAD		01 IDEAM		MUNICIPIO		URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN		-		
ELEVACIÓN			115 msnm			REGIONAL		05 MAGDALENA		CORRIENTE		AY JUIRIYU				
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE	VR ANUAL	
1971	2	1							0	8	15	9	7	8	47	
1972	2	1	0	4	7	0	0	0	0	0	4	30	0	0	45	
1973	2	1	0	0	0	0	0	0	0	17	27	61	43	0	148	
1974	2	1	0	0	3	25	0	0	0	0	36	13	133	0	210	
1975	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	35	67	45	20	167	
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	102	0	0	103	
1977	2	1	0	0	0	0	0	0	0	13	28	40	32	0	113	
1978	2	1	0	0	0	0	5	0	0	0	16	147	0	0	168	
1979	2	1	0	0	0	0	65	124	7	50	151	94	82	30	603	
1980	2	1	0	16	0	3	0	0	0	0	17	41	36	0	113	
1981	2	1	0	57	0	26	75	0	18	110	45	68	34	0	433	
1982	2	1	0	3	0	0	31	0	0	0	9	125	0	0	168	
1983	2	1	0	0	0	37	0	0	0	0	0	13	13	0	63	
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	44	66	104	7	221	
1985	2	1	0	0	0	0	8	18	0	0	7	183	103	30	349	
1986	2	1	0	0	0	0	33	0	0	1	5	115	5	0	159	
1987	2	1	0	0	0	10	8	0	0	10	0	48	187	0	263	
1988	2	1	0	4	0	0	0	30	0	102	55	257,4	0	23,5	471,9	
1989	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	20	21	5	0	46	
1990	2	1	0	0	0	0	15	0	0	22	35	130	31	2	235	
1991	2	1	0	0	0	0	0	0	20	0	0	20	18	23	81	
1992	2	1	0	0	0	0	65	0	0	0	37	5	10	0	117	
1993	2	1	0	0	0	0	129	0	0	2	60	0	32	0	223	
1994	2	1	0	0	0	1,8	14	3,5	1,1	8,8	27,5	51	21,2	5,7	134,6	
1995	2	1	0	0	0	0	0	23	0	160	47	211	0	0	441	
1996	2	1	14	0	10	0	0	0	110	18	0	38	27	33	250	
1997	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	91	0	0	93	
1998	2	1	0	0	0	0	21	0	0	15	92	12	19	14	173	
1999	2	1	0	0	3	0	27	0	0	2	71	171	114	137	525	
2000	2	1	38	2	0	0	0	0	2	0	70	31	65	9	217	
2001	2	1	0	0	0	0	79	0	0	0	3	80	14	16	192	
2002	2	1	24	0	0	0	9	56	0	10	0	76	0	0	175	
2003	1	1	0	0	0	54	0	0	15	0	0	83	0	56	208	
2004	1	1	0	0	0	27	33	0	0	0	68	133	269	0	530	
2005	1	1	12	0	0	11	45	94	0	0	46	115	39	0	362	
2006	1	1	0	0	0	30	0	0	0	0	43	108	6	0	187	
2007	1	1	0	0	0	0	0	20	0	138	60	170	71	12	471	
2008	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	106	130	72	43	351	
2009	1	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	22	14	47		
2010	1	1	0	0	24	0	337	35	24	119	128	97	147	115	1026	
2011	1	1	20	0	0	0	36	60	0	86	52	106	29	76	465	
2012	1	1	0	0	0	20	39	0	0	3	0	81	27	0	170	
2013	1	1	0	0	0	0	44	0	0	0	41	0	30	3	118	
2014	1	1	0	0	0	0	0	0	0	30	34	165	0	0	229	
2015	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	17	0	0	26	
2016	1	1	0	0	0	0	13	0	0	0					13	
PROMEDIO			2,644	1,911	1,044	5,440	25,133	10,300	4,285	20,104	34,367	80,476	42,049	15,049	238,054	

Anexo 4. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Perpana (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020					ESTACIÓN:				15070090 PERPANA			
LATITUD	1205 N		TIPO EST	PM		DEPARTAMENTO	LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN	JULIO DE 1971					
LONGITUD	7149 W		ENTIDAD	01 IDEAM		MUNICIPIO	URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN	-					
ELEVACIÓN	65 msnm		REGIONAL	05 MAGDALENA		CORRIENTE	AY URESH								
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1974	2	1										32	76	0	108
1975	2	1	0	0	0	0	0	0	4	1	42	108	70	96	321
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	186	43	6	238
1977	2	1	0	0	0	0	11	0	0	0	0	33	19	0	63
1978	2	1	0	0	0	47	0	0	0	0	0	188	0	0	235
1979	2	1	0	0	0	0	64	60	0	13	197	137	39	45	555
1980	2	1	0	20	0	0	0	0	0	0	0	131	0	15	166
1981	2	1	0	74	0	50	180	0	5	67	73	15	113	0	577
1982	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	15
1983	2	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	78	55	0	138
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	73	163	50	0	286
1985	2	1	0	0	0	15	42	0	6	0	0	144	47	12	266
1986	2	1	0	0	0	0	71	10	0	0	0	97	28	0	206
1987	2	1	0	0	0	35	55	0	0	30	75	227	194	123	739
1988	2	1	0	0	0	0	31	5	0	10	31	180	67	25	349
1989	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	65	28	5	0	98
1990	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	211	89	12	322
1991	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1992	2	1	0	0	0	10	240	0	0	20	50	70	279	0	669
1993	2	1	0	0	0	20	567	0	0	0	0	0	0	0	587
1994	2	1	0	0	0	0	12	0	0	0	22,1	68,8	38,7	23,3	164,9
1995	2	1	0	11	14	22,1	0	0	47	171,5	0	378,2	0	0	643,8
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	105	96	73	260	172,5	25	731,5
1997	2	1	0	0	0	0	0	14	0	0	24	146	90	0	274
1998	2	1	0	0	0	52	0	15	0	66	64	65	16	62	340
1999	2	1	0	0	0	0	20	0	0	30	111	244	196	94	695
2000	2	1	76	0	0	0	0	0	0	0	28	135,3	0	0	239,3
2001	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	247	34	18	299
2002	2	1	0	0	0	0	0	58	0	0	103	18	0	0	179
2003	1	1	0	0	0	9	0	0	13	4	41	69	87		223
2004	1	1	48	25	0	0	27	0	0	25	210	97	121	12	565
2005	1	1	43	0	0	15	189	63	0	34	139	195	71,5	15	764,5
2006	1	1	0	0	0	9	11	0	0	8	5	37	24	0	94
2007	1	1	0	0	25	31	21	3	0	66	162	309	244	47	908
2008	1	1	0	2	0	35	48	16	48	140	348				637
2009	1	1	29	37	75	0	37	23	0	6	20	42	17	0	286
2010	1	1	0	0	6	22	45	118	102	204	346	154	210	122	1329
2011	1	1	6	33	47	26	90	75	50	56	93	180	172	75	903
2012	1	1	19	0	11	59	63	169	25	65	39	180	117	37	784
2013	1	1	0	0	28	13	88	0	16	32	85	33	0	43	338
2014	1	1	0	0	0	0	73	0	0	70	90	58	13	0	304
2015	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	1	1	0	0	0	54	47	0	0	10	82	390	335	18	936
2017	1	1	6	0											6
PROMEDIO			5,279	4,698	4,905	12,598	48,381	14,976	10,024	29,155	64,383	127,364	74,588	22,568	399,591

Anexo 5. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Orochon (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020				ESTACIÓN:				15070240 OROCHON				
LATITUD		1148 N		TIPO EST		PM		DEPARTAMENTO		LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN		JUNIO DE 1976	
LONGITUD		7211 W		ENTIDAD		01 IDEAM		MUNICIPIO		URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN		-	
ELEVACIÓN		100 msnm		REGIONAL		05 MAGDALENA		CORRIENTE		JOJONCITO					
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1976	2	1						0	0	0	0	148	55	30	233
1977	2	1	0	0	0	40	75	0	0	10	35	50	99	0	309
1978	2	1	0	0	0	61	32	0	0	0	20	100	0	0	213
1979	2	1	10	0	10	10	216	55	0	27	90	233	227	190	1068
1980	2	1	60	0	0	0	30	0	0	30	55	15	15	50	255
1981	2	1	20	5	0	0	165	5	0	87	52	132	45	0	511
1982	2	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	70
1983	2	1	0	0	0	10	0	0	0	10	20	43	15	0	98
1984	2	1	22	0	0	44	0	0	10	0	103	125	48	15	367
1985	2	1	0	0	0	10	86	0	0	90	36	63	112	37	434
1986	2	1	0	0	0	0	100	0	0	0	25	30	44	0	199
1987	2	1	7	0	9	20	111	0	0	0	128	217	202	58	752
1988	2	1	0	25	0	0	0	114	0	80	90	281	70	28	688
1989	2	1	0	0	50	0	10	0	0	37	172	83	53	0	405
1990	2	1	0	0	0	110	5	0	0	22	0	207	0	0	344
1991	2	1	0	0	30	0	15	0	0	0	0	20	135	22,1	222,1
1992	2	1	0	0	0	15	130	0	0	0	118	98	100	0	461
1993	2	1	0	0	0	45	215	0	0	0	27	0	102	0	389
1994	2	1	2,4	0	7,5	15,7	41,4	7	1,2	19,7	53,5	94	63,1	18,1	323,6
1995	2	1	0	0	52	0	0	0	0	130	200	255	100	0	737
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	20	0	60	197	70	5	352
1997	2	1	25	0	0	0	0	0	0	0	55	255	0	0	335
1998	2	1	0	0	0	0	85	0	0	63	70	110	145	105	578
1999	2	1	0	0	0	105	34	0	0	202	200	232	293	150	1216
2000	2	1	142	0	0	0	0	0	0	80	125	71,5	22,7	0	441,2
2001	2	1	0	0	0	0	100	0	25	0	0	175	115	70	485
2002	2	1	0	0	130	0	37	50	0	0	75	125	0	35	452
2003	1	1	0	0	0	59	0	0	0	0	115	105	105	169	553
2004	1	1	0	0	0	35	105	0	50	0	100	133,3	210	115	748,3
2005	1	1	35	45	0	0	0	0	0	0	160	230	0	0	470
2006	1	1	0	0	0	50	0	0	0	50	60	152	0	0	312
2007	1	1	0	0	25	0	167	0	0	30	142	243	115	43	765
2008	1	1	5	0	0	0	40	0	20	120	170	60	55	70	540
2009	1	1	0	0	0	0	12	20	0	0	88	59	81	0	260
2010	1	1	0	0	0	15	104	35	108	194	197	126	295	0	1074
2011	1	1	10	25	0	85	80	35	10	97	52	57	168	72	691
2012	1	1	0	0	23	57	30	35	5	25	13	192	30	75	485
2013	1	1	0	0	0	0	0	17	0	12	188	75	45	10	347
2014	1	1	0	0	0	10	32	0	0	12	34	27	95	0	210
2015	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107	32	0	139
2016	1	1	32	0	0	0	85	0	0	10	62	200	201	0	590
2017	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PROMEDIO			9,644	2,439	8,413	19,918	53,560	9,098	6,078	35,066	77,817	126,117	86,898	33,346	455,290

Anexo 6. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Carrizal (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020				ESTACIÓN:				15070100 CARRIZAL				
LATITUD		1200 N		TIPO EST		PM		DEPARTAMENTO		LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN		JULIO DE 1971	
LONGITUD		7211 W		ENTIDAD		01 IDEAM		MUNICIPIO		URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN		-	
ELEVACIÓN			5 msnm			REGIONAL		05 MAGDALENA		CORRIENTE		MAR CARIBE			
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1								113	69	224	30	0	436
1972	2	1	40	0	10	0	124	0	0	0	180	170	170	10	704
1973	2	1	0	0	0	140	0	110	0	80	250	230	190	0	1000
1974	2	1	0	0	0	40	110	0	0	0	162	57,5	100	0	469,5
1975	2	1	10	0	0	0	0	0	0	0	71	160,5	120	130	491,5
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	45	86	48	7	186
1977	2	1	0	0	0	0	140	0	0	0	120	0	0	0	260
1978	2	1	0	0	0	100	0	0	0	0	35	81	60,1	0	276,1
1979	2	1	0	0	0	0	92	129	0	0	48	125	176	55	625
1980	2	1	0	0	0	0	80	20	0	110	0	32	0	25	267
1981	2	1	0	0	0	137	50	0	0	0	48	175	40	0	450
1982	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	13	17	0	0	30
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	92	97	130	5	324
1985	2	1	0	0	0	95	0	0	3	87	78	22	29	0	314
1986	2	1	0	0	11	0	68	0	0	0	84	64	29	0	256
1987	2	1	0	0	0	100	70	0	0	20	48	307	54	44	643
1988	2	1	0	7	0	0	0	40	0	293	7	416	31	0	794
1989	2	1	0	0	0	0	14	0	0	0	100	15	93	0	222
1990	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	78	205	44	0	327
1991	2	1	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	7	135	154
1992	2	1	53	0	0	0	19	0	0	0	62	59	99	31	323
1993	2	1	0	8	18	18	250	0	0	0	54	0	67	0	415
1994	2	1	5,9	90	7,4	21	28,5	0	0	0	0,3	93,8	300	0	546,9
1995	2	1	0	0	24	70	0	0	100	81	100	300	70	0	745
1996	2	1	0	0	0	0	50	50	20	30	90	300	70	90	700
1997	2	1	20	0	0	0	0	100	0	0	130	330	20	0	600
1998	2	1	0	0	0	60	110	0	40	50	70	440	159	110	1039
1999	2	1	0	0	0	48	28	33	0	124	130	217	247	164	991
2000	2	1	67	10	0	0	91	62	0	22	135	184	165	7	743
2001	2	1	0	0	0	0	81	90	24	46	118	290	191	0	840
2002	2	1	0	0	0	0	101	146	0	18	43	4	0	81	393
2003	1	1	0	0											0
2004	1	1	0	0	0	0	89	4	9	23	7	46	29	137	344
2005	1	1	34	133	0	28	83	50	0	9	20	152	91	45	645
2006	1	1	23	0	0	9	11	0	0	8	5	86,8	0	0	142,8
2007	1	1	0	0	0	6	4	0	12	57	81	241	181	65	647
2008	1	1	0	0	0	51	96	20	28	202	220	727	55	20	1419
2009	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	60	320	0	0	380
2010	1	1	0	0	0	0	0	210	137,1	411	818	880	494	470	3420,1
2011	1	1	0	0	0	22	0	50	25	0	257	338	408	170	1270
2012	1	1	0	0	0	200	346	130	0	0	228	656	18	0	1578
2013	1	1	0	0	0	0	0								0
PROMEDIO			6,021	5,905	2,010	27,927	52,085	31,100	9,953	43,512	101,373	198,746	97,929	43,927	590,951

Anexo 7. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Ahuyama (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020				ESTACIÓN:				15070120 AHUYAMA				
LATITUD		1152 N		TIPO EST		PM		DEPARTAMENTO		LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN		AGOSTO DE 1971	
LONGITUD		7217 W		ENTIDAD		01 IDEAM		MUNICIPIO		URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN		OCTUBRE DE 2010	
ELEVACIÓN			5 msnm			REGIONAL		05 MAGDALENA		CORRIENTE		AY ERRURETUHU			
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1								116	75	42	25	8	266
1972	2	1	3	0	0	68	42	15	0	0	37	35	17	0	217
1973	2	1	0	0	0	5	0	40	0	49	63	147	87	16	407
1974	2	1	25	0	2,7	0	0	0	0	53	23	100	162	23	388,7
1975	2	1	14	0	0	0	0	0	15	24	34	38	204	72	401
1976	2	1	0	5	0	5,5	0	0	0	0	11	41	0	0	62,5
1977	2	1	0	0	0	0	19	0	0	0	35	38	64	0	156
1978	2	1	0	0	0	76	0	0	10	0	35	23	0	0	144
1979	2	1	0	0	0	8	165	24	0	51	35	159	125	0	567,03
1980	2	1	41	4	0	0	29	5	0	2,5	0	83	9	0	173,5
1981	2	1	0	45	0	131	99	0	37	74	40	122	32	0	580
1982	2	1	0	0	0	0	40	0	0	0	8	40	10	0	98
1983	2	1	15	0	0	1,2	0	0	0	0	0	36	0	0	52,2
1984	2	1	0	0	0	0	46	0	8	0	85	46	54	0	239
1985	2	1	0	0	0	14	11	0	0	0	69	71	108	0	273
1986	2	1	0	0	0	0	0	12	0	0	30	5	12	0	59
1987	2	1	0	0	14	0	112	0	0	0	15	65	130	25	361
1988	2	1	0	0	0	0	0	71	0	66	18	193	72	2	422
1989	2	1	0	0	0	0	0	0	0	13	248	21	49	4	335
1990	2	1	0	0	0	145	12,7	6,1	0	9,3	22	35,1	69	0	299,2
1991	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	39,5	1,5	58
1992	2	1	0	0	0	27	62	0	0	0	122	5	25	0	241
1993	2	1	0	0	0	0	223	0	0	0	45	0	0	0	268
1994	2	1	0	0	0	0	0	0	0	9,2	30	165	0	0	204,2
1995	2	1	0	8	0	2	0	0	0	115	61	169	28	0	383
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	9	0	12	23	43	0	87
1997	2	1	0	0	0	0	18	0	0	29	27	59	12	0	145
1998	2	1	0	0	0	13	59	0	0	3	18	39	26	45	203
1999	2	1	0	0											0
2003	1	1			0	7	0	5	29	5	19	18	70	20	173
2004	1	1	8	0	0	10	125	0	5	10	6	44	23	71	302
2005	1	1	22	128	0	60	123	67	14	15	37	267	46	34	813
2006	1	1	14	0	0	10	5	1	0	8	6	31	46	0	121
2007	1	1	0	0	12	45	53	30	0	81	119	205	162	50	757
2008	1	1	0	0	0	57	83	18	61	56	93				
PROMEDIO			4,303	5,758	0,870	20,748	40,203	8,912	5,697	23,206	43,471	72,185	53,015	11,258	272,245

Anexo 8. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Jojoncito (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020					ESTACIÓN:				15070110 JOJONCITO			
LATITUD	1148 N		TIPO EST	PM		DEPARTAMENTO	LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN	AGOSTO DE 1971					
LONGITUD	7158 W		ENTIDAD	01 IDEAM		MUNICIPIO	URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN						
ELEVACIÓN	120 msnm		REGIONAL	05 MAGDALENA		CORRIENTE	AY JOJONCITO								
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1								81	70	100	12	0	263
1972	2	1	0	0	0	0	92	30	0	0	70	50	50	0	292
1973	2	1	0	0	50	130	0	0	0	0	60	248	220	228	936
1974	2	1	0	0	0	0	150	0	0	0	130	140	120	190	730
1975	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	350	174	140	673
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11	54	20	0	85
1977	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	2	1	0	0	0	60	0	0	0	0	40	30	50	0	180
1979	2	1	0	0	12	0	0	0	56	36	51	130	200	30	515
1980	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	37,2	0	0	0	37,2
1981	2	1	0	0	0	0	15,6	0	0	1	40,8	80,2	44	0,7	182,3
1982	2	1	0	0	0	5,7	29,8	0	5,4	15	54,8	94,2	0	0	204,9
1983	2	1	0	0	0	90	0	0	0	0	0	30	0	0	120
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	239	204	128	4	575
1985	2	1	0	0	0	395	137	0	0	84	142	268	147	36	1209
1986	2	1	0	0	9	0	128	55	0	0	37	51	19	0	299
1987	2	1	0	0	0	7,4	33,3	0	9,6	20,6	61	101,7	66,5	23,7	323,8
1988	2	1	0	36	0	0	0	50	0	138	33	91,1	44	9	401,1
1989	2	1	0	5	20	0	0	0	0	39	97	70	23	0	254
1990	2	1	0	0	0	0	10	10	0	10	0	110,6	60	17	217,6
1991	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	39	0	40,6
1992	2	1	0	0	0	0	99	0	0	0	74	0	114	0	287
1993	2	1	0	0	0	3	54	28	0	0	0	0	95	0	180
1994	2	1	0	0	0	0	31,5	0	0	5,1	5	68	35	67	211,6
1995	2	1	0	0	12	0	0	0	39	180	110	150	0	0	491
1996	2	1	0	0	50	0	0	0	108	77	52	96	32	7	422
1997	2	1	135	0	0	9	0	75	0	0	71	67	38	0	395
1998	2	1	0	0	0	95	118,5	0	0	0	59	64	95	0	431,5
1999	2	1	0	0	0	0	57	0	0	0	101	252	243	106	759
2000	2	1	28	0	0	0	0	0	0	30	32	76	73	0	239
2001	2	1	0	0	0	0	131	0	0	0	0	75	16	0	222
2002	2	1	0	0	0	56	54	0	0	0	55	59	3	0	227
2003	1	1	0	0	0	63	36	0	0	0	6	0	38	12	155
2004	1	1	0	0	18	12	90	0	25	0	73	209	254	0	681
2005	1	1	0	0	0	25	167	135	4	93	40	128	99	0	691
2006	1	1	0	0	0	77	103	26	0	6	17	97	49	0	375
2007	1	1	0	0	25	19	62	0	0	43	44	205	94	0	492
2008	1	1	0	0	0	16	26	0	0	221	130	230	52,5	49	724,5
2009	1	1	0	0	0	0	10	0	0	0	147	81	75	0	313
2010	1	1	0	0	0	2	131	17	25	103	125	106	205	26	740
2011	1	1	0	0	19	14	138	23	48	56	27	86	73	26	510
2012	1	1	0	0	0	1	48	27	2	2	3	137	18	0	238
2013	1	1	0	0	0	0	59	0	0	0	6	79	45	46	235
2014	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	35	42	0	0	77
2016	1	1	0	0	0	10	69	0	0	0	95	80	87	0	341
PROMEDIO			3,705	0,932	4,886	24,775	47,266	10,818	7,318	27,571	55,329	102,031	72,222	23,123	377,247

Anexo 9. Valores mensuales totales de precipitación para la estación Jasay (IDEAM, 2020).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) EN 24 HORAS															
FECHA DE PROCESO:			13/03/2020					ESTACIÓN:				15080080 JASAY			
LATITUD	1140 N		TIPO EST	PM		DEPARTAMENTO	LA GUAJIRA		FECHA INSTALACIÓN	JULIO DE 1971					
LONGITUD	7155 W		ENTIDAD	01 IDEAM		MUNICIPIO	URIBIA		FECHA SUSPENSIÓN	-					
ELEVACIÓN	35 msnm		REGIONAL	05 MAGDALENA		CORRIENTE	AY JASALUHU								
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR ANUAL
1971	2	1							*	26	54	101	1	0	182
1972	2	1	0	0	0	0	0	57	0	0	3	50	19	0	129
1973	2	1	0	0	0	33	1	0	0	15	80	272	57	0	458
1974	2	1	0	0	0	33	22	0	0	0	12	113	256	0	436
1975	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	75	63	101	73	312
1976	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	60	195	0	10,3	265,3
1977	2	1	0	0	0	0	42	0	0	0	0	8	44	0	94
1978	2	1	0	0	40	0	0	0	0	0	10	50	0	0	100
1979	2	1	0	0	0	0	90	110	0	20	60	120	71	95	566
1980	2	1	0	10	0	0	12	0	0	31	14	81	0	0	148
1981	2	1	0	68	0	135	199	11	0	13	49	197	47	0	719
1982	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	35	0	93
1983	2	1	0	0	0	34	0	15	0	0	1	103	0	0	153
1984	2	1	0	0	0	0	0	0	7	0	28	170	60	0	265
1985	2	1	0	0	0	18	22	10	0	41	105	200	62	49	507
1986	2	1	0	5	0	0	109	80	0	20	66	23	6	0	309
1987	2	1	0	0	0	0	4,7	6,1	0	10	19,7	57,8	22,1	3,4	123,8
1988	2	1	0	10	0	2,6	7,3	9	0	52,5	6,7	47,7	6,2	11	153
1989	2	1	0	2	2	0	0	0	0	12	68	66	11	0	161
1990	2	1	0	0	0	0	0	22	0	42	32	119	89	0	304
1991	2	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	32	0	7	43
1992	2	1	0	0	0	0	135	0	0	0	15	0	10	0	160
1993	2	1	0	0	0	5	116	20	0	0	35	0	40	0	216
1994	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	110	0	160
1995	2	1	0	0	20	0	0	0	90	172	70	108	0	0	460
1996	2	1	0	0	0	0	0	0	39	29	138	79	17	0	302
1997	2	1	10	0	0	0	0	18	0	0	6,3	11,5	2	0	47,8
1998	2	1	0	0	0	0	5,6	1,1	0	1,4	16,7	5,6	0	3,1	33,5
1999	2	1	0	0	0	0	3,6	0	0	1,6	9,3	17,2	11	8,8	51,5
2000	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2,3	4,4	4	26,2	0	37,9
2001	2	1	0	0	0	0	5,8	0	0	0	1,7	5,3	2,4	0	15,2
2002	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4,5	4,9	0	0	9,4
2003	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3,7	16,9	5,1	117,2	142,9
2004	1	1	0	0	0	17	122,5	0	12	0	93,4	87,3	201,2	0	533,4
2005	1	1	27	0	0	0	145	11	0	0	100	196,1	154,6	0	633,7
2006	1	1	0	0	0	77	0	0	0	0	17	0	57,9	0	151,9
2007	1	1	0	0	25	13	113	0	0	182	86	158,9	211,3	0	789,2
2008	1	1	0	0	0	0	11	0	0	74	138,7	68	21	0	312,7
2009	1	1	0	15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	16
2010	1	1	0	0	0	0	121,7	0	83	127,1	157	153,3	116,5	54	812,6
2011	1	1	10	0	0	0	218,4	0	77	26	47,1	87,8	0	34	500,3
2012	1	1	0	0	0	0	25	0	0	13	0	113,8	7	0	158,8
2013	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	20	68	57	0	145
2014	1	1	0	0	0	0	0								0
PROMEDIO			1,116	2,558	2,023	8,549	36,562	8,814	7,333	21,184	39,702	78,212	45,058	10,833	254,793

Anexo 10. Precipitación total promedio por mes (Fuente propia).

PRECIPITACIÓN TOTAL PROMEDIO (mm) POR MES												
ESTACIÓN	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
15070010 SANTANA URRACH	1,813	2,724	1,222	17,738	58,847	8,191	6,793	25,687	77,659	117,835	68,265	19,398
15070070 IRRRAIPA	2,000	0,935	1,178	11,482	22,444	10,467	6,944	15,409	53,378	97,662	70,867	16,252
15080070 SILLAMANA	2,644	1,911	1,044	5,440	25,133	10,300	4,285	20,104	34,367	80,476	42,049	15,049
15070090 PERPANA	5,279	4,698	4,905	12,598	48,381	14,976	10,024	29,155	64,383	127,364	74,588	22,568
15070240 OROCHON	9,644	2,439	8,413	19,918	53,560	9,098	6,078	35,066	77,817	126,117	86,898	33,346
15070100 CARRIZAL	6,021	5,905	2,010	27,927	52,085	31,100	9,953	43,512	101,373	198,746	97,929	43,927
15070120 AHUYAMA	4,303	5,758	0,870	20,748	40,203	8,912	5,697	23,206	43,471	72,185	53,015	11,258
15070110 JOJONCITO	3,705	0,932	4,886	24,775	47,266	10,818	7,318	27,571	55,329	102,031	72,222	23,123
15080080 JASAY	1,116	2,558	2,023	8,549	36,562	8,814	7,333	21,184	39,702	78,212	45,058	10,833

Anexo 11. Valores medios multianuales de evaporación en mm (IDEAM, 2020)

VALORES MEDIOS MULTIANUALES DE EVAPORACION EN MM - PROMEDIO 1981 - 2010																				
CODIGO	CAT	NOMBRE ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO	ALTITUD	LONGITUD	LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
4801501	SP	Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	84	-69,944	-4,199	98	85	100	94	88	88	102	113	114	113	108	101	1113
1201502	AM	Uniban	Apartado	Antioquia	23	-76,651	7,826	98	98	107	95	84	84	94	96	95	94	86	84	1040
3705501	SP	Apto Arauca	Arauca	Arauca	128	-70,738	7,069	170	176	190	147	113	94	101	110	117	122	118	142	1570
2904502	SP	Apto E Cortissoz	Soledad	Atlantico	14	-74,774	10,895	179	180	209	192	166	152	166	163	136	120	125	150	1841
1401502	SP	Apto Rafael Nunez	Cartagena	Bolivar	2	-75,521	10,450	167	172	194	182	163	148	159	156	142	137	131	147	1807
2403513	CP	U P T C	Tunja	Boyaca	2690	-73,350	5,567	125	122	123	100	92	81	87	95	101	103	97	113	1230
2403534	CP	Apto A Lleras C	Sogamoso	Boyaca	2500	-72,968	5,677	134	126	133	109	101	96	101	101	100	105	106	124	1315
2615511	SP	Apto La Nubia	Manizales	Caldas	2062	-75,435	5,020	98	92	96	85	82	82	94	98	87	80	82	87	957
4403502	SS	Apto G Artunduaga	Florencia	Caqueta	244	-75,560	1,589	135	113	105	92	87	80	85	95	110	119	110	124	1256
3521501	CP	Apto Yopal	Yopal	Casanare	325	-72,383	5,317	237	225	195	122	114	111	115	119	132	144	145	194	1645
2603503	SP	Apto G L Valencia	Popayan	Cauca	1757	-76,612	2,456	100	96	102	88	88	92	109	111	103	93	88	87	1051
2803503	SP	Apto Alfonso Lopez	Valledupar	Cesar	138	-73,251	10,429	250	265	287	240	184	186	223	197	180	161	157	209	2365
1104501	SP	Apto El Carano	Quibdo	Choco	53	-76,639	5,696	73	74	84	81	90	83	93	95	95	90	79	72	960
2119512	CP	Ita Valsallice	Fusagasuga	Cundinamarca	1460	-74,396	4,396	110	107	96	89	92	86	93	103	109	100	96	100	1106
3109501	AM	Pto Inirida	Inirida	Guainia	100	-67,932	3,868	122	127	131	105	96	91	98	105	114	117	107	115	1239
3210507	CO	San Jose Guaviare	San Jose del Guaviare	Guaviare	165	-72,647	2,553	126	120	117	92	83	82	83	91	104	107	93	115	1085
2111502	SS	Apto Benito Salas	Neiva	Huila	439	-75,293	2,949	164	154	161	149	160	175	208	232	211	176	138	143	2060
1506501	SP	Apto Alm Padilla	Riohacha	La Guajira	4	-72,933	11,533	197	198	219	202	205	228	253	235	178	165	143	161	2256
1501505	SP	Apto. Simón Bolívar	Sta Marta	Magdalena	4	-74,233	11,133	193	188	209	195	174	159	164	159	157	150	136	159	2002
3503502	SP	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	423	-73,620	4,163	128	123	117	100	98	88	93	103	116	121	105	113	1273
5204501	AM	Obonuco	Pasto	Narino	2871	-77,306	1,201	111	96	81	103	113	112	124	130	98	97	85	86	1202
5205501	SP	Apto San Luis	Aldana	Narino	2961	-77,678	0,857	84	78	83	102	83	95	103	112	94	124	86	86	1104
1601501	SP	Apto Camilo Daza	Cucuta	Norte Santander	250	-72,530	7,781	156	153	167	158	195	220	241	256	220	185	145	141	2211
4401504	CO	Moccoa Acueducto	Moccoa	Putumayo	650	-76,652	1,157	89	83	85	76	69	62	70	80	96	97	87	87	918
2612506	SP	Apto El Eden	Armenia	Quindio	1247	-75,770	4,458	116	108	124	106	108	104	122	127	119	113	101	107	1301
2613504	SP	Apto Matecana	Pereira	Risaralda	1367	-75,738	4,818	129	120	131	111	105	102	116	122	113	115	108	116	1315
1701501	SP	Apto Sesquicentena	San Andres	San Andres y Pr	1	-81,704	12,584	118	122	152	144	128	113	121	119	102	97	91	107	1300
2319513	SP	Apto Palonegro	Lebrija	Santander	1189	-73,187	7,129	139	127	136	120	124	112	124	126	127	123	107	116	1434
2315503	SP	Apto Yariques	Barrancabermeja	Santander	126	-73,809	7,026	143	135	140	122	124	125	145	145	130	115	106	120	1523
2502508	SS	Apto Rafael Barvo	Corozal	Sucre	166	-75,285	9,333	154	161	176	154	132	134	143	139	118	121	110	131	1603
2124504	SS	Apto Perales	Ibague	Tolima	928	-75,144	4,430	122	117	122	108	117	122	153	173	141	120	102	107	1485
2118502	AM	Nataima	Espinal	Tolima	431	-74,960	4,188	165	159	164	140	139	151	195	227	190	158	131	141	1932
2605507	CP	Univ del Valle	Cali	Valle	1004	-76,535	3,379	120	120	128	111	110	112	129	141	135	117	101	105	1362
5311501	SP	Apto Buenaventura	Buenaventura	Valle del Cauca	14	-76,992	3,820	70	81	88	89	80	79	85	82	80	79	71	82	927
4207501	CP	Mitu	Mitu	Vaupes	180	-70,239	1,260	107	89	99	89	71	66	80	86	101	103	93	101	893
3801503	SP	Apto Pto Carreno	Puerto Carreno	Vichada	50	-67,499	6,167	226	240	255	186	139	117	121	134	143	155	158	191	1857

Anexo 12. Valores medios multianuales de evapotranspiración en mm (IDEAM, 2020)

VALORES MEDIOS MULTIANUALES DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL PARA PRINCIPALES CIUDADES DEL PAIS EN MM - PROMEDIO 1981-2010																				
CODIGO	CAT	NOMBRE ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO	ALTITUD	LONGITUD	LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
4801501	SP	Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	84	-69,944	-4,199	115,3	101,3	106,2	91,7	87,5	80,2	89,1	100,1	103,9	108,0	104,9	110,2	1198,4
2701507	SP	Apto Olaya Herrera	Medellin	Antioquia	1490	-75,589	6,221	129,2	122,1	133,5	121,1	124,2	127,9	142,7	143,7	128,1	118,8	109,8	116,5	1517,6
1201502	AM	Uniban	Apartado	Antioquia	23	-76,651	7,826	108,3	103,8	115,4	107,1	107,3	99,3	109,3	112,7	107,2	108,2	98,9	98,9	1276,4
3705501	SP	Apto Arauca	Arauca	Arauca	128	-70,738	7,069	149,6	149,3	160,9	125,5	111,9	99,7	105,2	113,4	118,0	122,8	117,0	131,8	1505,1
2904502	SP	Apto E Cortissoz	Soledad	Atlantico	14	-74,774	10,895	157,4	154,2	176,8	164,9	152,1	143,2	151,6	150,5	131,4	123,4	121	140,7	1767,2
1401502	SP	Apto Rafael Nunez	Cartagena	Bolivar	2	-75,521	10,450	133,3	129	145,9	138	135	130,5	139,4	138,7	127,1	121,5	114,1	122,9	1575,4
2403513	CP	U P T C	Tunja	Boyaca	2690	-73,350	5,567	103,9	98,3	105,6	92,4	86,8	79,4	83,5	88,7	90,4	92,6	87,8	95	1104,4
2403534	CP	Apto A Lleras C	Sogamoso	Boyaca	2500	-72,968	5,677	117,5	109,3	116	100,8	96,9	93	98,5	100,4	98,1	98,6	96,1	107	1232,2
2615511	SP	Apto La Nubia	Manizales	Caldas	2062	-75,435	5,020	93,2	88,9	95	86,2	86	84,7	94,8	96,7	87	83,3	79,3	85,4	1060,5
4403502	SS	Apto G Artunduaga	Florencia	Caqueta	244	-75,560	1,589	135,3	117,5	117,9	105,7	101,9	92,8	100,5	113,8	119,8	123,2	117,8	128,3	1374,5
3521501	CP	Apto Yopal	Yopal	Casanare	325	-72,383	5,317	164	152,7	154,6	123,2	114,8	104,2	110,8	119,9	124,2	128,9	126,5	145,8	1569,6
2603503	SP	Apto G L Valencia	Popayan	Cauca	1757	-76,612	2,456	96,5	89,7	97,4	89,6	89,9	92,6	105,3	109,9	100,4	93,6	85,6	89,1	1139,6
2803503	SP	Apto Alfonso Lopez	Valledupar	Cesar	138	-73,251	10,429	231,4	232,2	243,8	205,6	168,7	161,6	190,8	178,8	152,6	148,9	151	191,1	2256,5
1104501	SP	Apto El Carano	Quibdo	Choco	53	-76,639	5,696	90,5	88	100	98	103,3	99,3	107,9	110,7	105	102,9	92,1	87,8	1185,5
1308504	SS	Apto Los Garzones	Montería	Córdoba	36	-75,835	8,831	127,3	109,6	119,7	104	102,5	93,7	104,1	113,6	113	116,4	107,5	117,7	1329,1
2120579	SP	Apto Eldorado P1-2	Bogota	Cundinamarca	2547	-74,142	4,696	97,8	90,7	96,7	86,5	85,9	84,8	91,2	94,6	90,1	87,8	82,8	90,3	1079,2
2119512	CP	Ila Valsalce	Fusagasuga	Cundinamarca	1460	-74,396	4,396	107,6	100,2	103,5	94,2	93,7	91,7	99,8	106,5	104,3	102,7	93,5	96,2	1193,9
3109501	AM	Pto Inirida	Inirida	Guainia	100	-67,932	3,868	135,1	130,1	138	116,1	105,7	99,4	108,8	119,5	125	128,5	119,2	123,7	1449,1
3210507	CO	San Jose Guaviare	San Jose del	Guaviare	165	-72,647	2,553	135,3	125,3	127,9	108,6	98,9	89,6	97,4	110	116,1	117,7	110,5	119,3	1356,6
2111502	SS	Apto Benito Salas	Neiva	Huila	439	-75,293	2,949	131,7	123,2	132,6	127,3	133,8	144,3	168,7	181,4	161,1	138,1	116,6	120,3	1679,1
1506501	SP	Apto Alm Padilla	Riohacha	La Guajira	4	-72,933	11,533	165,9	160,8	180,9	168,3	173,3	191,2	214,8	195,3	156,2	143,1	132,9	147,9	2030,6
1501505	SP	Apto. Simón Bolívar	Sta Marta	Magdalena	4	-74,233	11,133	162,8	162,1	183,7	170,6	161,8	153,4	157	154,4	143,2	138,3	130,3	144,6	1862,2
2502509	SP	Apto Las Flores	El Banco	Magdalena	34	-73,971	9,046	208,6	196,3	216,8	192,6	173,1	164,5	185,3	184,5	160,2	151,9	149,6	185,8	2169,2
3503502	SP	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	423	-73,620	4,163	118,8	110,8	115,1	102,7	99,8	91,4	95,8	106,6	112,6	115	105,5	111,4	1285,5
5204501	AM	Obonuco	Pasto	Narino	2871	-77,306	1,201	81	74,6	80,6	77,8	79,6	78,3	85,7	91,8	90,7	87,8	78,3	79,2	985,4
5205501	SP	Apto San Luis	Aldana	Narino	2961	-77,678	0,857	78,1	71,9	78,4	75,6	75,3	70,5	74,5	79,7	81,2	83,2	76,5	77,1	922
1601501	SP	Apto Camilo Daza	Cucuta	Norte Santander	250	-72,530	7,781	128,1	123,2	134,9	134,4	162,9	185,6	209,3	213,9	182,3	154,8	125,3	121	1875,7
4401504	CO	Mocoa Acueducto	Mocoa	Putumayo	650	-76,652	1,157	96,3	89,1	95,1	88,9	84,7	76,4	83,3	94	101,3	105,6	97	96,9	1108,6
2612506	SP	Apto El Eden	Armenia	Quindio	1247	-75,770	4,458	100,9	96,1	105,4	97,1	95,8	92,3	105,2	111,7	102,9	98,7	91,3	94,3	1191,7
2613504	SP	Apto Matecana	Pereira	Risaralda	1367	-75,738	4,818	114,1	107,1	116,5	105,2	104,1	101,8	114,5	119,2	109,9	106,2	99	104,4	1302
1701501	SP	Apto Sesquicentena	San Andres	San Andres y F	1	-81,704	12,584	136,2	133,4	160,6	158,7	147,7	132,9	138,6	142,1	130	124,4	117,1	126,9	1648,6
2319513	SP	Apto Palonegro	Lebrija	Santander	1189	-73,187	7,129	109	102,3	108,9	101,2	103,5	99,8	108,6	112,1	106,6	101,6	90,8	97,3	1241,7
2315503	SP	Apto Yariquies	Barrancabermeja	Santander	126	-73,809	7,026	133,3	124,8	130,4	120,8	123,7	122,2	135,6	137,8	127,2	120,3	111,2	119,6	1506,9
2502508	SS	Apto Rafael Barvo	Corozal	Sucre	166	-75,285	9,333	155,0	149,0	165,8	143,6	129,9	126,2	139,2	139,8	121,8	120,8	116,2	134,7	1642,2
2124504	SP	Apto Perales	Ibague	Tolima	928	-75,144	4,430	117,3	110,3	118,1	109,5	113,5	118,8	139,9	151,3	132,4	116,2	100,9	106,6	1434,8
2118502	AM	Nataima	Espinal	Tolima	431	-74,960	4,188	145,3	137,4	149,4	133,8	134,7	137,5	166,8	186,7	166,9	147,2	128	132,1	1765,8
2605507	CP	Univ del Valle	Cali	Valle	1004	-76,535	3,379	128,1	121,6	133,4	120,4	119	119,4	135,9	144,5	131,8	122,4	110,9	116,7	1504,1
5311501	SP	Apto Buenaventura	Buenaventura	Valle del Cau	14	-76,992	3,820	84,7	83,6	97,4	97	94	88,1	96,6	100,3	93,9	94,1	84,2	83,3	1097,2
4207003	PM	Villafatima	Mitu	Vaupes	175	-69,9107	0,99372	125,9	108,5	118,6	103,1	101,6	93,1	103,3	112,7	112,1	115,3	106,6	116,5	1317,3
3801503	SP	Apto Pto Carreno	Puerto Carreno	Vichada	50	-67,499	6,167	191,9	185,9	191,9	145,4	122,2	106	110,6	118,2	123,7	135,4	137,2	165	1733,4

Anexo 13. Precipitación y evapotranspiración en mm/día (Fuente propia).

Mes	Precipitación mm/día	Evapotranspiración mm/día
Enero del 2010	200	1,666666667
Febrero del 2010	25	13,4
Marzo del 2010	25,41666668	15,075
Abril del 2010	42,91666668	14,025
Mayo del 2010	360	14,44166667
Junio del 2010	100,4166667	15,93333333
Julio del 2010	177,5	17,9
Agosto del 2010	380,8333333	16,275
Septiembre del 2010	657,9166668	13,01666667
Octubre del 2010	293,3333333	11,925
Noviembre del 2010	722,0833333	11,075
Diciembre del 2010	241,25	12,325
Enero del 2011	15	13,825
Febrero del 2011	24,16666667	13,4
Marzo del 2011	27,5	15,075
Abril del 2011	78,33333333	14,025
Mayo del 2011	213,75	14,44166667
Junio del 2011	126,25	15,93333333
Julio del 2011	107,5	17,9
Agosto del 2011	127,5	16,275
Septiembre del 2011	151,6666667	13,01666667
Octubre del 2011	365,4166668	11,925
Noviembre del 2011	425,8333333	11,075
Diciembre del 2011	140	12,325
Enero del 2012	22,5	13,825
Febrero del 2012	0	13,4
Marzo del 2012	22,5	15,075

Mes	Precipitación mm/día	Evapotranspiración mm/día
Abril del 2012	98,75	14,025
Mayo del 2012	145	14,44166667
Junio del 2012	115	15,93333333
Julio del 2012	22,5	17,9
Agosto del 2012	43,75	16,275
Septiembre del 2012	30,41666668	13,01666667
Octubre del 2012	411,25	11,925
Noviembre del 2012	116,6666667	11,075
Diciembre del 2012	68,75	12,325
Enero del 2013	0	13,825
Febrero del 2013	0	13,4
Marzo del 2013	22,5	15,075
Abril del 2013	22,5	14,025
Mayo del 2013	126,25	14,44166667
Junio del 2013	22,5	15,93333333
Julio del 2013	22,5	17,9
Agosto del 2013	41,25	16,275
Septiembre del 2013	276,6666668	13,01666667
Octubre del 2013	90	11,925
Noviembre del 2013	120,4166667	11,075
Diciembre del 2013	70	12,325
Enero del 2014	0	13,825
Febrero del 2014	0	13,4
Marzo del 2014	0	15,075
Abril del 2014	22,5	14,025
Mayo del 2014	43,75	14,44166667
Junio del 2014	0	15,93333333
Julio del 2014	0	17,9
Agosto del 2014	61,25	16,275

Mes	Precipitación mm/día	Evapotranspiración mm/día
Septiembre del 2014	136,6666667	13,01666667
Octubre del 2014	223,3333333	11,925
Mes	Precipitación mm/día	Evapotranspiración mm/día
Noviembre del 2014	125,8333333	11,075
Diciembre del 2014	22,5	12,325

Anexo 14. Balance climático y recarga (Fuente propia).

Mes	Balance climático	Recarga (m/s)
Enero del 2010	198,3333333	8,03435E-07
Febrero del 2010	11,6	4,69908E-08
Marzo del 2010	10,34166668	4,18934E-08
Abril del 2010	28,89166668	1,17038E-07
Mayo del 2010	345,5583333	1,39983E-06
Junio del 2010	84,48333334	3,42236E-07
Julio del 2010	159,6	6,46529E-07
Agosto del 2010	364,5583333	1,4768E-06
Septiembre del 2010	644,9000001	2,61245E-06
Octubre del 2010	281,4083333	1,13997E-06
Noviembre del 2010	711,0083333	2,88025E-06
Diciembre del 2010	228,925	9,2736E-07
Enero del 2011	1,175	4,75985E-09
Febrero del 2011	10,76666667	4,36151E-08
Marzo del 2011	12,425	5,03329E-08
Abril del 2011	64,30833333	2,60509E-07
Mayo del 2011	199,3083333	8,07385E-07
Junio del 2011	110,3166667	4,46886E-07
Julio del 2011	89,6	3,62964E-07
Agosto del 2011	111,225	4,50565E-07
Septiembre del 2011	138,65	5,61662E-07

Mes	Balance climático	Recarga (m/s)
Octubre del 2011	353,4916668	1,43197E-06
Noviembre del 2011	414,7583333	1,68016E-06
Diciembre del 2011	127,675	5,17203E-07
Enero del 2012	8,675	3,51419E-08
Febrero del 2012	-13,4	0
Marzo del 2012	7,425	3,00782E-08
Abril del 2012	84,725	3,43215E-07
Mayo del 2012	130,5583333	5,28883E-07
Junio del 2012	99,06666667	4,01313E-07
Julio del 2012	4,6	1,86343E-08
Agosto del 2012	27,475	1,11299E-07
Septiembre del 2012	17,40000001	7,04863E-08
Octubre del 2012	399,325	1,61764E-06
Noviembre del 2012	105,5916667	4,27745E-07
Diciembre del 2012	56,425	2,28574E-07
Enero del 2013	-13,825	0
Febrero del 2013	-13,4	0
Marzo del 2013	7,425	3,00782E-08
Abril del 2013	8,475	3,43317E-08
Mayo del 2013	111,8083333	4,52928E-07
Junio del 2013	6,566666667	2,66011E-08
Julio del 2013	4,6	1,86343E-08
Agosto del 2013	24,975	1,01172E-07
Septiembre del 2013	263,6500001	1,06803E-06
Octubre del 2013	78,075	3,16277E-07
Noviembre del 2013	109,3416667	4,42936E-07
Diciembre del 2013	57,675	2,33638E-07
Enero del 2014	-13,825	0
Febrero del 2014	-13,4	0
Marzo del 2014	-15,075	0

Mes	Balance climático	Recarga (m/s)
Abril del 2014	8,475	3,43317E-08
Mayo del 2014	29,30833333	1,18726E-07
Junio del 2014	-15,93333333	0
Julio del 2014	-17,9	0
Agosto del 2014	44,975	1,82191E-07
Septiembre del 2014	123,65	5,00898E-07
Octubre del 2014	211,40833333	8,56401E-07
Noviembre del 2014	114,75833333	4,64879E-07
Diciembre del 2014	10,175	4,12183E-08

Anexo 15. Salida de terminación de simulación (Fuente propia).

FloPy is using the following executable to run the model: ../Exe/MODFLOW-NWT_64.exe

```

MODFLOW-NWT-SWR1
U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR FINITE-DIFFERENCE GROUNDWATER-FLOW MODEL
WITH NEWTON FORMULATION
Version 1.1.4 4/01/2018
BASED ON MODFLOW-2005 Version 1.12.0 02/03/2017

```

SWR1 Version 1.04.0 09/15/2016

Using NAME file: Model2.nam

Run start date and time (yyyy/mm/dd hh:mm:ss): 2021/05/11 15:10:33

```

Solving: Stress period: 1 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.
Solving: Stress period: 2 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.
Solving: Stress period: 2 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.
Solving: Stress period: 3 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.
Solving: Stress period: 3 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.
Solving: Stress period: 4 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.

```

Solving:	Stress period:	4	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	5	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	5	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	6	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	6	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	7	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	7	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	8	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	8	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	9	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	9	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	10	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	10	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	11	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	11	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	12	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	12	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	13	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	13	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	14	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	14	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	15	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	15	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	16	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	16	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	17	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	17	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	18	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	18	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	19	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	19	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	20	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.

Solving:	Stress period:	20	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	21	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	21	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	22	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	22	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	23	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	23	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	24	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	24	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	25	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	25	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	26	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	26	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	27	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	27	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	28	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	28	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	29	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	29	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	30	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	30	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	31	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	31	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	32	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	32	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	33	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	33	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	34	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	34	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	35	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	35	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	36	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.

Solving:	Stress period:	36	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	37	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	37	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	38	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	38	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	39	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	39	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	40	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	40	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	41	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	41	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	42	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	42	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	43	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	43	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	44	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	44	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	45	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	45	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	46	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	46	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	47	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	47	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	48	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	48	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	49	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	49	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	50	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	50	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	51	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	51	Time step:	2	Groundwater-Flow Eqn.
Solving:	Stress period:	52	Time step:	1	Groundwater-Flow Eqn.

```
Solving: Stress period: 52 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 53 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 53 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 54 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 54 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 55 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 55 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 56 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 56 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 57 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 57 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 58 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 58 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 59 Time step: 1 Groundwater-Flow Eqn.  
Solving: Stress period: 59 Time step: 2 Groundwater-Flow Eqn.
```

Run end date and time (yyyy/mm/dd hh:mm:ss): 2021/05/11 15:11:13

Elapsed run time: 39.745 Seconds

Normal termination of simulation

```
Out[43]:  
(True, [])
```