EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA MINERÍA EN LA CALIDAD DE AGUA (SÓLIDOS Y NUTRIENTES) SOBRE LA CUENCA DEL RÍO RANCHERÍA A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT

KAREN YISEL RIAÑO FRACICA 507342

LUIS ALEJANDRO VARGAS MORENO 507487

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

BOGOTÁ D.C.

2022

Universidad Católica De Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA MINERÍA EN LA CALIDAD DE AGUA (SÓLIDOS Y NUTRIENTES) SOBRE LA CUENCA DEL RÍO RANCHERÍA A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Autores:

KAREN YISEL RIAÑO FRACICA 507342

LUIS ALEJANDRO VARGAS MORENO 507487

Director:

PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR

2022

AGRADECIMIENTOS

Dedicado a Dios. A mi madre Gloria Moreno y padre Antonio Vargas. A mi hijo Samuel Vargas. A mi compañera de vida Alejandra Vargas. A mis hermanos David Vargas y Daniel Moreno. A Nubia Vargas. A Rosa Lopez E. P. D.

Mi más sincero agradecimiento a Dios porque sin importar los obstáculos y pruebas que se presentaron en esta etapa de mi vida siempre estuvo presente concediéndome el don de la sabiduría y la destreza requerida para afrontar cada situación. A todas las personas que me han brindado su conocimiento y colaboración incondicional, especialmente por su dedicación y tiempo durante el desarrollo de esta investigación.

A mi madre Gloria Moreno y padre Antonio Vargas por los consejos, apoyo y cuidado en todo momento. A mi hijo Samuel Vargas por brindarme tanta alegría y llenarme de orgullo al demostrar tantas destrezas, aptitudes y dedicación en todo lo que hace. A mi compañera de vida Alejandra Vargas por haber creído en mí y darme fuerzas cuando lo necesitaba. A Nubia Vargas y Rosa Lopez quienes me enseñaron que a pesar de las circunstancias somos seres privilegiados que estamos en la capacidad de lograr todo lo que nos proponemos. A Karen Riaño por su amistad, paciencia y profesionalismo frente al desarrollo del proyecto. A toda mi familia por su amor incondicional. A mis amigos, compañeros e instructores por estos años llenos de anécdotas. Al Ingeniero Wilfredo Marimon por su disposición y aportes que dieron fruto a esta investigación. A todos, mil gracias.

Luis Alejandro Vargas Moreno

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por permitirme llegar a este momento de mi vida y estar concluyendo la ingeniería, así como alguna vez lo soñé, a pesar de las circunstancias que ocurrieron en el camino.

Agradezco a nuestro asesor PhD. Wilfredo Marimon por la ayuda en el proceso, por su disposición y guía para elaboración de este proyecto. Agradezco a mi madre por la paciencia y todas las personas que pudieron estar involucradas en el aprendizaje que tuve a través de los años y que me formaron. También gracias a mi compañero Alejandro. Por y para Luisa mi madre, para Johan mi hermano y para Leonardo mi padre E. P. D.

Karen Yisel Riaño

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá, junio 2022

Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the license. Advertencia.

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

GLOSARIO

NITRÓGENO: Elemento químico gaseoso de número atómico 7, inerte, incoloro, inodoro e insípido, abundante en la corteza terrestre, presente en todos los seres vivos, que constituye las cuatro quintas partes del aire atmosférico en su forma molecular N2, y que se usa en la fabricación de amoniaco, ácido nítrico, explosivos y fertilizantes y, en su forma líquida, en la conservación, a muy baja temperatura, de material biológico como embriones, sangre, tejidos, etc.

FÓSFORO: Elemento químico de número atómico 15, muy abundante en la corteza terrestre, de gran importancia biológica como constituyente de huesos, dientes y tejidos vivos, que se usa en pirotecnia y en la fabricación de cerillas, fertilizantes agrícolas y detergentes.

SEDIMENTO: Materia que, habiendo estado suspensa en un líquido, se deposita en el fondo por su mayor peso.

SWAT: Es la herramienta para evaluar el impacto de la actividad humana, el cambio climático en la cantidad y tasa de producción de agua y sedimentos a nivel de cuenca hidrológica, subcuenca o unidad de respuesta hidrológica (HRU). Es un software que aparentemente se transforma en una herramienta de planificación, ya que puede evaluar el impacto del uso del suelo, las actividades de restauración y diferentes medidas de protección del suelo en toda la cuenca optimizando la toma de decisiones.

AGUA: Líquido transparente, incoloro, inodoro e insípido en estado puro, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y que constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos.

HIDROLOGÍA: Disciplina que estudia las aguas de la Tierra. Estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del agua continental y marítima, su distribución y circulación en la superficie de la Tierra, en el suelo y en la atmósfera.

EROSIÓN: Desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro. Desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento

CLIMA: Conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región.

NUTRIENTES: Los nutrientes son las sustancias químicas que toda planta toma del suelo para asegurar su crecimiento y desarrollo normal; se trata de una serie de trece minerales cuya presencia balanceada determina las condiciones en que ésta vivirá su ciclo vital y productivo. Los nutrientes pueden ser rastreados en términos

de su transporte en agua y transformación en diferentes formas de especies Nitrógeno y Fósforo a lo largo de la cuenca de estudio. También, en el suelo la transformación del Nitrógeno de una especie a otra se encuentra gobernada por el ciclo natural del Nitrógeno, y por su parte el Fósforo presente en el suelo, se encuentra descrito por el ciclo natural del Fósforo.

MINERAL: Sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza terrestre. Se forma en las rocas ígneas y metamórficas y los secundarios aquellos formados en condiciones de epigénesis en rocas sedimentarias y suelos.

PRECIPITACIÓN: Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

ESCURRIMIENTO: Es la parte de la precipitación que fluye sobre el terreno, o que va a partes subterráneas, y eventualmente, hacia mares u océanos.

EVAPOTRANSPIRACIÓN: Es un proceso combinado que comprende la evaporación de todos los tipos de superficie (agua-vegetación-suelo) y la transpiración de las plantas en un intervalo de tiempo dado y en una región determinada. Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

PERCOLACIÓN: Se refiere al paso lento de fluidos a través de materiales porosos. Es el proceso de filtración del agua a las capas someras del terreno.

NITRITO: Sal formada por la combinación del ácido nitroso con una base. Los nitritos pueden formar sales o ésteres a partir del ácido nitroso.

MINERÍA: Es el arte de laborear las minas. Se define como una actividad económica del sector primario que se enfoca a la extracción de minerales y combustibles fósiles.

VERTIMIENTO: Es la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contendidos en un medio líquido. Se refiere a una corriente de agua que desemboca en otra.

CORRIENTE: Movimiento de traslación continuado, ya sea permanente, ya accidental, de una masa de materia fluida, como el agua o el aire, en una dirección determinada.

CAUDAL: Cantidad de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo. Se refiere al volumen de agua que atraviesa una superficie en un tiempo determinado.

NITRATO: Sal formada por combinación del ácido nítrico y una base. Se usan como fertilizantes para cultivos o el césped. El nitrato y el nitrito también se usan en la conservación de alimentos, algunos medicamentos, y en la producción de municiones y explosivos.

ESTACIÓN LIMNIGRÁFICA: Estación donde se mide el nivel de una corriente hídrica mediante un aparato registrador de nivel y que gráfica una curva llamada limnigrama.

ESTACIÓN METEOROLÓGICA: Es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas, como Precipitación, Temperatura y Humedad del aire, Presión Barométrica, Velocidad y Dirección del Viento, Temperatura y Humedad del Suelo, Radiación Solar, Medición de horas Luz, entre otros.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 15
1. ANTECEDENTES 16
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 18
3. JUSTIFICACIÓN 20
4. MARCO REFERENCIAL 22
4.1 MARCO TEÓRICO 22
4.1.1 Cuenca hidrográfica 22
4.1.2 Calidad de agua 23
4.1.3 Índice de calidad de agua (ICA) 23
4.1.4 Cuenca río ranchería 26
4.1.5 Modelación hidrológica 28
4.1.6 Soil and water assessment tool (SWAT) 29
4.2 MARCO LEGAL 30
5. ESTADO DEL ARTE 33
6. OBJETIVOS 36
6.1 OBJETIVO GENERAL 36
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 36
7. ALCANCES Y LIMITACIONES 37
7.1 ALCANCES 37
7.2 LIMITACIONES 37
8. METODOLOGÍA 38
8.1 AREA DE ESTUDIO 38
8.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 39
8.2.2 Caudal 43
8.2.3 Datos atmosféricos 43
8.2.4 Calidad del agua 44
8.2.5 Capas base 46
8.3 MODELO HIDROLOGICO 58
8.4 MODELO SWAT CUENCA RÍO RANCHERÍA 59
8.4.1 Motor Climático 59
8.4.2 Uso de suelos (Usersoil) 60
8.4.3 Abrir SWAT (Open SWAT) 61
8.4.4 Delineación de cuenca hidrográfica (Watershed Delineation) 62

8.4.5 Análisis HRU (HRU Analysis) 69
8.4.6 Escribir tablas de entrada (Write Input Tables) 85
8.4.7 Editar entrada SWAT (Edit SWAT Input) 88
8.4.8 Simulación SWAT 90
8.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN 92
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS 96
9.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS 98
9.1.1 Disminución de caudales en escenarios de cambio climático (Escenario 1) 99
9.1.2 Aumento de temperatura en escenarios de cambio climático (Escenario 2) 100
9.1.3 Aumento de la actividad minera y sus efectos sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos. (Escenario 3) 101
9.2 LABORATORIOS 105
10. RECOMENDACIONES 106
11. CONCLUSIONES 108
BIBLIOGRÁFIA 109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de cuenca y corrientes 22
Figura 2. Procedimiento metodológico, componente calidad del agua 23
Figura 3. Ubicación general de la cuenca del Rio Ranchería 26
Figura 4. Producción Nacional de minerales 27
Figura 5. Elementos que componen la terminología adoptada de modelación.....28
Figura 6. Esquema de trabajo del modelo SWAT 30
Figura 7. Cuenca del Río Ranchería.....38
Figura 8. Ubicación zona minera 39
Figura 9. Estación Loma Linda 40
Figura 10. Estación Pozo Hondo 40
Figura 11. Estación Puente Carretera.....41
Figura 12. La Mina Cerrejón 42
Figura 13. Caudal base.....43
Figura 14. Localización estaciones de monitoreo de variables ICA 44
Figura 15. Selección zona de estudio, Río Ranchería, Guajira 46
Figura 16. Filtros EARTH DATA 47
Figura 17. Descarga DEM (Hi-Res Terrain Corrected) 47
Figura 18. Sistema de coordenadas 48
Figura 19. Catálogo 49
Figura 20. Mosaico a nuevo Raster (Mosaic To New Raster).....49
Figura 21. Propiedades Mosaic To New Raster.....50
Figura 22. DEM base del modelo.....50
Figura 23. Parámetros NDVI.....51
Figura 24. Descarga NDVI 52
Figura 25. Imagen Norte NDVI.....53
Figura 26. Imagen Sur NDVI.....53
Figura 27. NDVI en ArcGis 54
Figura 28. Unión NDVI.TIF 55
Figura 29. NDVI Base del modelo.....55
Figura 30. Opción Mapa base.....56
Figura 31. Búsqueda Mapa Digital De Suelos Mundial.....56
Figura 32. Descarga Mapa Digital De Suelos Mundial.....57
Figura 33. Capa Uso de Suelos DSMW.....57
Figura 34. Protocolo de modelación de la calidad de agua 58
Figura 35. Descarga motor climático 59
Figura 36. Motor climático (WGEN CFSR World) 59
Figura 37. Descarga plugin uso de suelo.....60
Figura 38. SWAT plugin uso del suelo.....60

Figura 39 Eliminar Usersoil por defecto 60
Figura 40. Nuevo proyecto SWAT (New SWAT Project) 61
Figura 41. Configuración proyecto (Project Setup) 61
Figura 42. Delineación automática de cuenca (Automatic Watershed Delineation) 62
Figura 43. Configuración DEM (DEM Setup) 62
Figura 44. Abrir SWAT (Open DEM) 63
Figura 45. Configuración de proyección DEM (DEM Projection Setup) 63
Figura 46. Cálculo de área 64
Figura 47. Cálculo de corrientes 64
Figura 48. Corrientes Río Ranchería 65
Figura 49. Agregar punto de salida 66
Figura 50. Selección del punto de salida 66
Figura 51. Punto de salida sobre el Río Ranchería 67
Figura 52. Punto de salida a intervenir 67
Figura 53. Delinear cuenca 68
Figura 54. Delimitación Cuenca del Río Ranchería 68
Figura 55. Cálculo de las subcuencas 69
Figura 56. Extraer por mascara (Extract by Mask) - Cobertura vegetal NDVI 70
Figura 57. Cobertura vegetal NDVI - Delimitada 70
Figura 58. Propiedades NDVI Delimitado 71
Figura 59. Clasificación Cobertura Vegetal 72
Figura 60. Ingreso de códigos 72
Figura 61. Clasificación Cobertura Vegetal 73
Figura 62. Cobertura vegetal NDVI – Reclasificado (Reclassify) 73
Figura 63. Cobertura vegetal NDVI - Categorizado 74
Figura 64. Cuadricula Uso de suelo (Land Use Grid) 75
Figura 65. Cargue de información datos uso de suelo (Land Use Data) 75
Figura 66. Tabla de consulta (LookUp Table) 76
Figura 67. Códigos LandUseSwat 77
Figura 68. Reclasificación (Reclassify) 77
Figura 69. Reclasificación completada 78
Figura 70. Datos del suelo (Soil Data) 78
Figura 71. Cargue de FAO a datos del suelo (Soil Data) 79
Figura 72. Tabla de consulta (LookUp Table) 79
Figura 73. Equivalentes FAO 80
Figura 74. Usos de Suelo 80
Figura 75. Reclasificación Uso de Suelo 81
Figura 76. Parámetros pendiente (Slope) 82
Figura 77. Pendientes en la cuenca 82
Figura 78. HRU Definición 83

Figura 79. Definición HRU completada 83
Figura 80. Reporte de análisis HRU 84
Figura 81. HRU datos 84
Figura 82. Motor Climático Mundial 85
Figura 83. Información climática 86
Figura 84. Escribir tabla de base de datos (Write SWAT Database Tables) 86
Figura 85. Tablas de bases de datos generadas 87
Figura 86. Propiedades de las capas – etiquetas (Layer propierties – Labels) 87
Figura 87. Numeración de subcuencas 88
Figura 88. Editar entrada SWAT (Edit SWAT Input) 88
Figura 89. Edición de subcuencas 89
Figura 90. Parámetros subcuenca 89
Figura 91. Simulación SWAT 90
Figura 92. Correr SWAT (Run SWAT) 91
Figura 93. Lectura salida SWAT 91
Figura 94. SWAT CUP 92
Figura 95. Ajuste de datos - SWAT CUP 93
Figura 96. Datos para calibración 93
Figura 97. Calibración paso 1 - General parámetros HRU. 94
Figura 98. Calibración paso 2 – Agua subterránea (Groundwater) 94
Figura 99. Calibración paso 3 - Balance de agua (Water Balance) 95
Figura 100. Caudal sin calibrar 96
Figura 101. Datos modelo inicial 98
Figura 102. Escenario 1 100
Figura 103. Escenario 2 101
Figura 104. Valores Mensuales 103
Figura 105. Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 2012 – 2020 104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Variaciones del ICA y sus ponderaciones.....24
Tabla 2 Marco legal 31
Tabla 3 Marco legal (Continuación) 32
Tabla 4 Estación Loma Linda 39
Tabla 5 Estación Pozo Hondo 40
Tabla 6 Estación Puente Carretera.....41
Tabla 7 Estación La Mina Cerrejón.....42
Tabla 8 Variables Atmosféricas 43
Tabla 9 Geolocalización de las estaciones de monitoreo 44
Tabla 10 Valores de las variables fisicoquímicas.....45
Tabla 11 Calidad del agua de la zona de estudio según el BMWP/col 45
Tabla 12 Códigos SWAT cobertura vegetal.....71
Tabla 13 Nomenclatura cobertura vegetal 74
Tabla 14 Pendientes del suelo.....81
Tabla 15 Uso de suelos 97

INTRODUCCIÓN

La actividad minera se presenta como un agente de producción y generador de materias primas que facilitan la comercialización en el país y el desarrollo de manera importante del Producto Interno Bruto (PIB). Si bien tiene beneficios en diferentes sectores de la economía, también entra en debate por el impacto social y ambiental que genera esta actividad en el sector. [1]

El sector de la cuenca del Río Ranchería en el Departamento de Guajira presenta una gran actividad minera en la zona del Cerrejón y sectores aledaños, El Río es el principal afluente y fuente de abastecimiento para comunidades que viven en cercanías a este, debido al impacto que tienen los vertimientos y contaminación producida por las actividades de la minería se hace necesario realizar un estudio que de indicios de la contaminación del agua y posibles alteraciones a futuro del medio ambiente, se realizará el estudio pertinente de la zona, simulando su comportamiento, para ello es necesario tener en cuenta parámetros específicos de calidad de agua, datos hidrológicos y meteorológicos, usos del suelo y vegetación; factores que posiblemente puedan integrar todos los componentes de la Cuenca y favorecer el modelo.

Para el desarrollo del proyecto se tiene en cuenta el tipo de minería que está siendo ejecutada en el sector de la cuenca del Río Ranchería y los diferentes usos de la cuenca para el progreso de los municipios aledaños. Asimismo, se pretende analizar la calidad del agua que presenta la cuenca y lograr determinar qué impacto tiene la minería en este sector. Ahora bien, para lograr un estudio verídico de la cuenca, es necesario utilizar un software de modelación que permita simular los procesos, tanto hidrológicos como físicos viendo las variaciones que tiene la calidad del agua impactada por la minería en la zona.

Se realiza el modelo bajo el software (Soil and Water Assessment Tool) SWAT siendo capaz de evaluar el uso y manejo de la tierra y calidad del agua, teniendo en cuenta el movimiento de contaminantes en cuencas hidrológicas. Siendo necesario delimitar el área de estudio y dividirlo en subcuencas con datos de entrada, generar unidades de respuesta hidrológica con la información del uso de suelo y las condiciones hidrológicas generales.

1. ANTECEDENTES

La modelación hidrológica inicia en el siglo XIX cuando se utilizó para el diseño de canales, presas, puentes, redes de drenaje y sistemas de distribución de agua. A mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitaba a tratar de explicar los factores que intervienen en el ciclo hidrológico mediante expresiones matemáticas sencillas. En la década de 1960, luego de la revolución digital, Crawford y Linsley produjeron el primer modelo en 1966 para representar el ciclo hidrológico, el Stanford Watershed Model SWM. Desde entonces, gracias al desarrollo de nuevas herramientas informáticas en hidrología, ha sido posible modelar cuencas hidrográficas en amplios periodos de tiempo.

En el 2014 Cohen, I. S. y Arriaga, G. E modelaron dos cuencas correspondientes al río Nassas: Rodeo y Arroyo Naitcha ubicadas en la parte media de la zona hidrológica. Esta modelación se utilizó para analizar el efecto de los cambios en la superficie de la vegetación sobre la escorrentía, y se obtuvo una escorrentía muy similar durante un estudio de 5 años. Sin embargo, el aumento de la escorrentía se registró después de alterar el aumento de la superficie de matorral y la disminución de los pastizales. [37]

La contaminación de las aguas superficiales y del suelo se refiere a la presencia de altas concentraciones de productos químicos o sustancias que superan los límites permitidos y que afectan negativamente a la matriz física del agua y el suelo. Sin embargo, la mayoría de los contaminantes presentes en estos sistemas ambientales son antropogénicos, pero en algunos casos ciertos compuestos ocurren naturalmente en los suelos como parte de la estructura mineral, son tóxicos para macro y microbios en altas concentraciones. Es por esto que, según la investigación realizada por la Organización de las Naciones Unidas, la contaminación en los sistemas compuestos por sustratos de agua y suelo, la industrialización, las guerras, la minería y la intensificación de las actividades agropecuarias no se puede evaluar directamente porque no son fácilmente detectables y representan una amenaza para varios ecosistemas de abastecimiento y regulación hídrica.

El modelo SWAT es un modelo matemático que permite el estudio de ríos y cuencas hidrológicas diseñado por el Sr. Jeff Arnold con el fin de evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo del suelo en estructuras hidrológicas grandes y complejas con diferentes usos. Las respuestas hidrológicas que representan las cuencas hidrográficas tienen sus propias ventajas y desventajas debido a sus altos costos económicos. Los avances recientes en los sistemas de información geográfica han facilitado el desarrollo de la hidrología y han surgido varios modelos hidrológicos, incluidos modelos físicos que representan cuencas hidrográficas a escala real y modelos matemáticos que se basan en ecuaciones empíricas.

En el año 2015, la sentencia T-256 instaurada por la Corte Constitucional examinó la protección de los derechos de agua para la comunidad de La Guajira, reafirmó su carácter fundamental e identificó tres elementos normativos de los derechos fundamentales: (i) disponibilidad, (ii) calidad, (iii) accesibilidad. Además, se hizo mención a la crisis humanitaria que vive La Guajira por la carencia de agua potable, y concluyó que la disponibilidad de agua en la región es crítica por la falta de políticas claras que aborden el problema. [14]

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La Guajira cuenta con dos ríos principales, Cesar y Ranchería, este último tiene 223 kilómetros de longitud. Según José Iván Mojica (2006), el Río Ranchería pierde en su curso gran parte de su caudal debido a infiltraciones en el lecho a causa de la porosidad de los suelos, a la alta evaporación por las condiciones de aridez regional y las múltiples derivaciones de agua a través de canales y acequias para uso humano y para actividades agropecuarias. Su caudal medio anual es de 14 m^3/s y el rendimiento hídrico de la cuenca es considerado uno de los más bajos del país. Actualmente la cuenca del Río Ranchería tiene una superficie aproximada de 1070km^2 de extensión. [11]

A lo largo del tiempo, la cuenca Ranchería ha sido habitada por miembros de pueblos indígenas, el río es importante para su producción material, específicamente para actividades de subsistencia diversas como la pequeña agricultura, la pesca estacional, la caza, la recolección de frutos y la cría de animales. El 20,2% de los indígenas del territorio nacional vive en La Guajira, la mitad de ellos son población interétnica, de los cuales el 45% son indígenas y el 7,5% son afro descendientes. Para estas comunidades la lluvia es el principal insumo del balance hídrico, el cambio de precipitación en el área de Alta Guajira es de 300 mm/año y la parte noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta es de 2000 mm/año. [12]

Por otra parte, existen conflictos sociales presentados por la escasez de agua que generan decrecimiento económico en las temporadas más áridas. Las actividades mineras son la principal actividad económica del sector, por lo que han surgido varios problemas ambientales importantes. Se evidencia gran corrupción por parte del gobierno en el momento en que aprueban y dan paso a los proyectos mineros agresivos y al no prestar las ayudas necesarias teniendo los recursos para hacerlo, es por ello que por medio de la sentencia T-302 de 2017 el Estado Colombiano procura proteger el agua, los derechos fundamentales de la salud y garantizar la alimentación de niños y adolescentes de los municipios de Riohacha. [13]

En el año 2017, el gobierno tomó estas medidas para aliviar la situación de La Guajira y mejorar la calidad de vida en la zona dado que se presentaron innumerables noticias entre los años 2015 a 2017 que atestiguan las protestas de la comunidad Wayúu, ya que la desnutrición provocó la muerte continua de niños, la extinción temporal de los ecosistemas acuáticos y el desplazamiento masivo de comunidades indígenas para aliviar la situación. Crisis de La Guajira Y mejorar la calidad de vida en la zona. [13]

La minería es desarrolla como una actividad de crecimiento económico, que desde otra perspectiva se cuestiona por el impacto que genera. Visto desde otros aspectos de desarrollo en otros países se ha logrado implementar una minería exitosa con protocolos, regulaciones óptimas presentando impulsos económicos y neutralizando efectos nocivos en el ambiente. En países como Colombia estas regulaciones anteriormente mencionadas no superan los estándares. Pese a que es un país rico en minerales, metales preciosos y con gran capacidad minera se podría asegurar un fuerte desarrollo de la sociedad, pero para fortalecer este es necesario evitar los efectos negativos que tienen las practicas utilizadas, aclarar los verdaderos riesgos que tiene la extracción minera y enfrentarlos de manera adecuada conservando el futuro de las siguientes generaciones. Dichas prácticas mineras mal ejecutadas tienden a causar impactos ambientales irreversibles y destrucción de ecosistemas, contaminación, deterioro de la calidad de agua y perjudicando la salud de las comunidades. [2]

Uno de los departamentos en donde se lleva a cabo la explotación minera es en la guajira, donde se realiza la extracción de materiales No Metálicos como, arena, arcilla, grava, carbón y roca coralina. Los métodos efectuados en la extracción de los minerales representan un factor para la contaminación del recurso hídrico en la cuenca del Río Ranchería debido al aumento de actividad minera cercana que es la causa del deterioro en el agua generando cambios s y daños en el ecosistema.

La cuenca del Río Ranchería se surte de varios afluentes provenientes de la serranía del Perijá como son los arroyos Tabaco, Cerrejón, la Ceiba, río Palomino, arroyo la quebrada entre otros; Por lo tanto, la disponibilidad de agua afecta directamente la calidad de vida de los habitantes de la cuenca. [3]

Teniendo en cuenta los parámetros de contaminación de los afluentes del Río Ranchería y la afectación de los acuíferos subterráneos de la cuenca por las intervenciones mineras actuales; se plantea realizar un modelo hidrológico que permita identificar la calidad del recurso agua y una aproximación al deterioro con posible toma de decisiones para implementar la minería exitosa o regulación de esta.

¿Cómo por medio de la modelación de cantidad y calidad de agua de la cuenca del Río Ranchería se obtendrán resultados acerca del recurso hídrico debido a la contaminación por la explotación minera en el sector?

3. JUSTIFICACIÓN

Colombia es el principal productor de carbón en América Latina y representa el 10\% del comercio mundial de este mineral. El 2016 se logró como país una cifra histórica de producción, llegando a los 90.5 millones de toneladas, 86,1 de carbón térmico, y 4.4 de metalúrgico. Son cifras sencillamente impresionantes puesto que Colombia ocupa el un décimo lugar en el mundo en cuanto a exportación de este mineral. [15]

En el año 2013 la empresa El Cerrejón propuso desviar el río Ranchería para facilitar la expansión de las minas y la explotación del carbón. El proyecto P500 conduce al río y se estima que se pueden extraer 500 millones de toneladas de carbón en 26,2 kilómetros. Las comunidades Wayúu y afrodescendientes han sufrido el proceso de contaminación por la minería del carbón y también han sido testigos del proceso de extracción de agua. Además, esta asignación también es selectiva y está dirigida al agua de la más alta calidad (no contaminada), lo que inevitablemente conduce a que más personas no tengan suficiente cantidad y calidad de líquidos para las actividades diarias. [22]

Asimismo, la minería del carbón es parte de la historia de Colombia, de muchas regiones, de innumerables municipios, de comunidades enteras que han surgido, crecido y establecido alrededor de esta roca. Es una de las fuentes más potenciales de ingreso económico para el país y para sus regiones de empleo formal, de desarrollo, de oportunidades y de progreso. Por décadas, el carbón ha sido el padrino de muchas generaciones de colombianos, a los que esa piedra negra les ha permitido tener educación, vivienda, salud e infraestructura. Es por ello, que a través de la sentencia T-302 de 2017, el gobierno colombiano busca proteger el agua, los derechos básicos a la salud y la seguridad alimentaria de los niños y jóvenes en la Guajira [23].

Ahora bien, el gobierno al contratar la explotación de Carbón del Cerrejón, creó condiciones desfavorables para los miembros de la nación Wayúu, no se realizó consulta previa alguna y se estableció una reserva industrial para la extracción del carbón que hoy tiene más de 60.000 mil hectáreas que contaminan el suelo y subsuelo afectando todo el habitad, se destruyó la ganadería al acabarse las fuentes de aguas superficiales y subterráneas que abastecía lo necesario para la autonomía alimentaria de los E'iruku. Igualmente, se implantó una reserva industrial de 150 kilómetros de largo por dos kilómetros de ancho para uso exclusivo de una vía férrea, que durante más de tres décadas destruye la economía Wayúu. [14]

En relación con la extracción minera del cerrejón, el Consejo de Autoridades Indígenas Wayúu concluyó que el cauce del río Ranchería ha cambiado debido a la explotación del cerrejón, y desde hace más de 30 años el río ha dejado de abastecer

los ríos subterráneos de las grandes sabanas ubicadas entre las áreas rurales de Manaure, Uribia, Riohacha y Maicao representando un peligro potencial para la supervivencia física de los Wayúu. Por otro lado, los puntos de abastecimiento de alimentos en el área aledaña a la mina cerrejón, que ahora cubre más de 60.000 hectáreas, han sido completamente destruidos, ya que las aguas superficiales y subterráneas utilizadas para los cultivos se han secado, provocando graves y profundos problemas de seguridad y autonomía alimentaria. [14]

Como resultado, la propuesta de desvío del Río Ranchería fue rechazada por la comunidad guajira, tanto por las tradicionales como por sectores directamente relacionados con la defensa del territorio, los sindicatos, el sector político y muchos otros que dieron origen al Comité Cívico de La Guajira en Defensa del Río Ranchería. [22] El impacto de esta actividad se refleja tanto a nivel ambiental (desperdicio masivo de agua, contaminación) como sociocultural (expulsión del patrimonio cultural y acceso al agua). El polvillo de carbón es un elemento contaminante que llega a las fuentes de agua y acuíferos mediante la explotación y el trasporte del material. Este es un problema creciente ya que el 50\% de la población se alimenta de estos pozos subterráneos.

Los derechos de agua en la comunidad Wayúu han sido severamente violados durante mucho tiempo, especialmente en términos de disponibilidad y accesibilidad. De hecho, un número importante de comunidades no cuenta con fuentes de agua potable, y quienes las tienen presentan grandes dificultades para acceder a ellas. La falta de agua potable incide decisivamente en la desnutrición de los niños y niñas wayúu. Ningún esfuerzo alimentario o de salud resolverá la crisis de muertes infantiles en La Guajira sin agua potable disponible, accesible y de calidad. Se constató la falta de acceso al suministro de agua en los lugares de reasentamiento por causa de la explotación minera, por lo tanto, se dificulta atender las necesidades domésticas de la comunidad y el desarrollo de las labores agrícolas y ganaderas de las que siempre han vivido.

Frente a la problemática que presenta el Río Ranchería en el departamento La Guajira, se pretende modelar la cuenca del río en el software SWAT el cual permite obtener resultados sobre el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas en cuencas, para así anticipar cualquier impacto ambiental negativo permitiendo encontrar un sistema de alertas tempranas para prevenir, reducir o superar los posibles riesgos de contaminación debido a la calidad de agua que presente.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

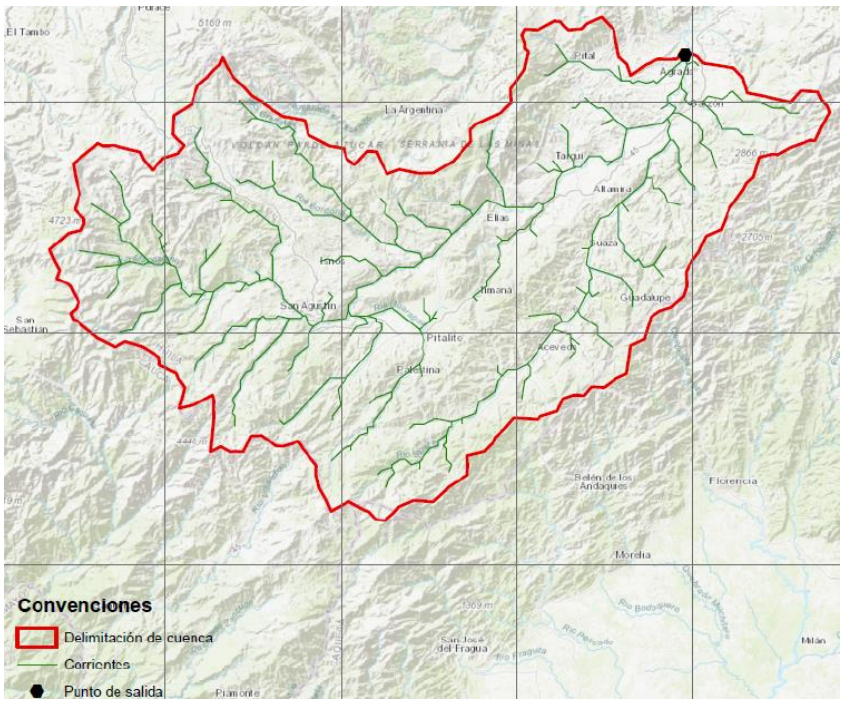
4.1.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca es un espacio geográfico limitado por divisiones expresando el ciclo hidrológico en un volumen de control, siendo el agua precipitada que entra en el área. Es una unidad de territorio donde el agua fluye de forma natural en un sistema interconectado permitiendo interacción con el entorno y elementos biofísicos. [4]

El río principal será aquel que desemboque sus aguas a un área generando escorrentía superficial. Para delimitar, jerarquizar, clasificar y numerar las cuencas, se debe iniciar con un inventario de cuencas por medio de numeración desde el punto donde las aguas confluyen y son entregadas a un afluente mayor. [4]

Las corrientes se organizan de tal manera que se conozca el grado de ramificación de la red. Los afluentes de la cuenca serán ordenados de forma jerarquizada desde que desembocan del río principal de segundo orden y las que tributan sus aguas de tercer orden y así sucesivamente. [4]

Figura 1. Delimitación de cuenca y corrientes

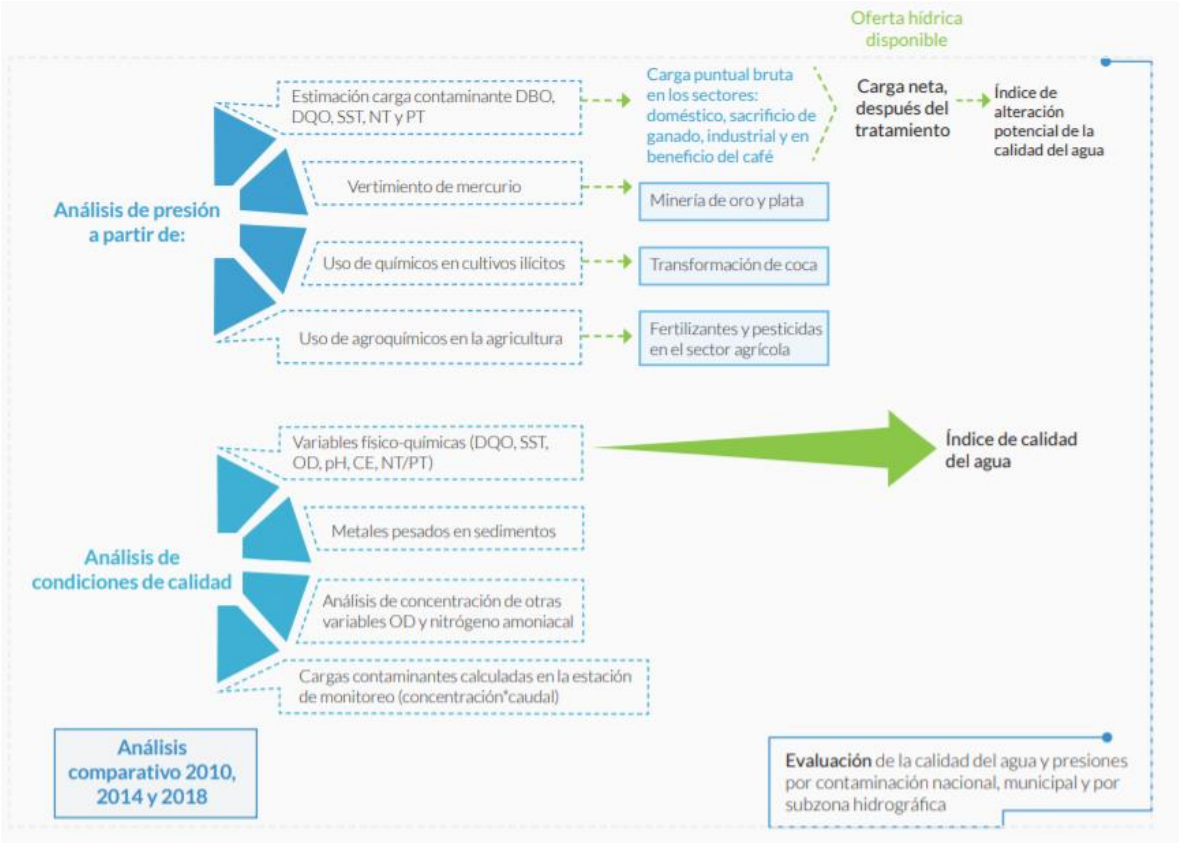


Fuente: Los Autores

4.1.2 Calidad de agua

El concepto que se planteó para el Estudio Nacional del Agua asume que es necesario proteger un cuerpo de agua más allá del recurso de consumo si no como bien ambiental. Uno de los principales factores que afectan la calidad del agua son los vertimientos con o sin tratamiento generado por diferentes actividades del ser humano como abastecimiento de la población, la industria, el beneficio de ganado, la agricultura, la minería, el sector pecuario, entre otros. [5]

Figura 2. Procedimiento metodológico, componente calidad del agua



Fuente: Fuente: IDEAM, “Estudio Nacional del Agua”, Bogotá, 2018, pp. 27-3

4.1.3 Índice de calidad de agua (ICA)

En corrientes superficiales, se refleja en una expresión numérica agregada y simplificada de la sumatoria equiponderada de valores obtenidos al medir la

concentración de variables fisicoquímicas básicas en las estaciones de monitoreo. [6]

La fórmula de cálculo del indicador se puede observar en la ecuación (1).

$$ICA_{njt} = (\sum_{i=1}^{n} Wi * I_{ikjt}) \quad (1)$$

Donde:

ICA_{njt}: Es el Índice de Calidad del Agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

W_i: Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

I_{ikjt}: Valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada k, del período de tiempo t.

n: Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5 o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione. [6]

Tabla 1. Variaciones del ICA y sus ponderaciones

Variable	**Unidades**	**Peso de importancia 1 (ICA 5 Variables)**	**Peso de importancia 2 (ICA 6 variables)**
Oxígeno Disuelto - OD	% Saturación	0.2	0.17
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	0.2	0.17
Demanda Química de Oxígeno - DQO	mg/L	0.2	0.17
Conductividad Eléctrica -CE	uS/cm	0.2	0.17
N total/P total - NT/PT	mg/L/mg/L	-	0.17
pH	Unidades de pH	0.2	0.17

Fuente: Fuente: IDEAM, “Hoja metodológica del Índice de calidad del agua", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2020, pp. 12

Parámetros fisicoquímicos

- Oxígeno disuelto (OD): Esta variable tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas.
- Sólidos suspendidos totales (SST): La presencia de sólidos en suspensión en los cuerpos de agua indica cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros. Tiene una relación directa con la turbiedad.
- Demanda química de oxígeno (DQO): Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica.
- Conductividad eléctrica (C.E.): Está relacionada con la presencia de sales en solución cuya disociación genera cationes y aniones capaces de transformar energía eléctrica. Refleja condiciones de mineralización.
- pH: Mide el nivel de acidez o basicidad de las aguas; niveles extremos afectan los procesos de osmorregulación de la flora y fauna acuática.
- Nitrógeno total/Fósforo total (NT/PT): Mide la degradación por intervención antrópica. Es una forma de aplicar el concepto de saprobiedad empleado para cuerpos de agua lénticos (ciénagas, lagos, etc.) como la posibilidad de la fuente de asimilar carga orgánica; es una relación que indica el balance de nutrientes para la productividad acuícola de las zonas inundables en los ríos neo tropicales. [6]

El Índice de alteración potencial de la calidad del agua

Es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la razón existente entre la carga de contaminante que se estima recibe una subzona hidrográfica j en un período de tiempo t y la oferta hídrica superficial, para año medio y año seco, de esta misma subzona hidrográfica1 estimada a partir de una serie de tiempo. [7]

Numéricamente corresponde al promedio de las categorías de clasificación asignadas a los cocientes que surgen de la relación entre las cargas estimadas de cada una de las cinco variables fisicoquímicas básicas seleccionadas y la oferta hídrica superficial. Las variables seleccionadas son aquellas que mejor reflejan la calidad de los vertimientos, que más estrechamente están ligados con los principales tipos de contaminación y que

representan la mayor parte de la magnitud de la contaminación (Demanda Bioquímica de Oxígeno para materia orgánica biodegradable, Demanda Química de

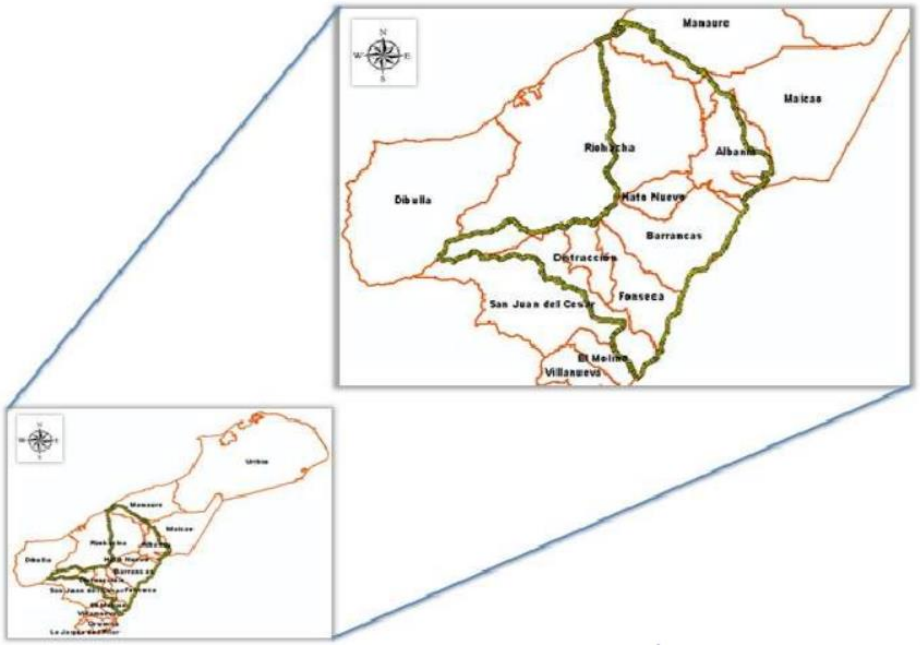
Oxígeno para materia orgánica no biodegradable, Sólidos Suspendidos Totales para material en suspensión, y Nitrógeno Total y Fósforo Total para nutrientes), expresados en toneladas (t) por año. La carga contaminante se estima por subzona hidrográfica para un año de referencia. [7]

4.1.4 Cuenca río ranchería

La cuenca se encuentra localizada en la parte baja del departamento de la Guajira, en el extremo norte de Colombia, colindante con la Sierra nevada de Santa Marta y desembocando en el Caribe, ubicada entre los municipios de San Juan del Cesar, Fonseca, Distracción, Barrancas, Hato nuevo, Albania, Riohacha, Manaure y Maicao. La cuenca del río Ranchería cuenta con una superficie de 4070 m^2 de extensión. [3]

El río Ranchería nace en el páramo de Chirigua a 3785 m.s.n.m., y después de 248 km desemboca en el mar Caribe. Sus aguas son provenientes de la serranía del Perijá y compuesto de varios afluentes hacen que la disponibilidad de agua en el sector influya directamente sobre la calidad de vida de los habitantes aledaños a la cuenca. [3]

Figura 3. Ubicación general de la cuenca del Rio Ranchería



Fuente: Corpoguajira, “Plan de Ordenamiento de la Cuenca del Río Ranchería”, 2011

Minería en la cuenca

El departamento de la Guajira es rico en recursos naturales y con un potencial minero, abriendo la posibilidad de intercambio comercial gracias a su ubicación costera. Siendo la explotación del Carbón mineral el principal recurso minero en el Departamento de la Guajira y la cuenca del río Ranchería. El carbón mineral es explotado en el complejo carbonífero Cerrejón Zona Norte. [3]

La extracción y calidad del carbón dependen de las condiciones geológicas, así como la profundidad e inclinación de la veta. Permitiendo el proceso de extracción conocido como tajo a cielo abierto o excavación subterránea. La calidad del carbón es definida de acuerdo a su función y composición de humedad, cenizas, azufre; los carbones del Cerrejón se consideran de gran calidad térmica y altamente competitivos en el mercado internacional. [3]

La minería a cielo abierto implica el restablecimiento continuo de la superficie, reponiendo las capas de subsuelo y restableciendo la capa vegetal y reforestación del área. [3] Esto alterando de cierta manera el ecosistema ya establecido.

En la figura 4 se muestran los datos de diferentes minerales extraídos en el Departamento de la Guajira 2020-2021:

Figura 4. Producción Nacional de minerales

Año	Mineral	Unidad (grupo)	
2021	CARBON	Ton	9.873.798
	GRAVAS	m3	82.099
	ORO	gr	19.629
	CALIZA	Ton	92.708
	ARENAS	m3	13.474
	RECEBO	m3	1.494
	YESOS	Ton	419
2020	CARBON	Ton	12.576.396
	GRAVAS	m3	48.650
	ORO	gr	906.647
	CALIZA	Ton	203.251
	ARENAS	m3	20.279
	RECEBO	m3	11.246
	PLATA	gr	53.956
	YESOS	Ton	1.978

Fuente: UPME, “Producción Nacional de Minerales", dic. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/mineriaconsolidadonacional.aspx

De acuerdo con el Upme (2017), la oferta del carbón en el mundo se establece para comprometerse con la reducción de gases de efecto invernadero y dar salidas a

nuevas alternativas y tecnologías más limpias generando una producción de energía térmica. La economía juega un papel importante en la toma de decisiones internacionales para uso y regulación del uso del carbón. [10]

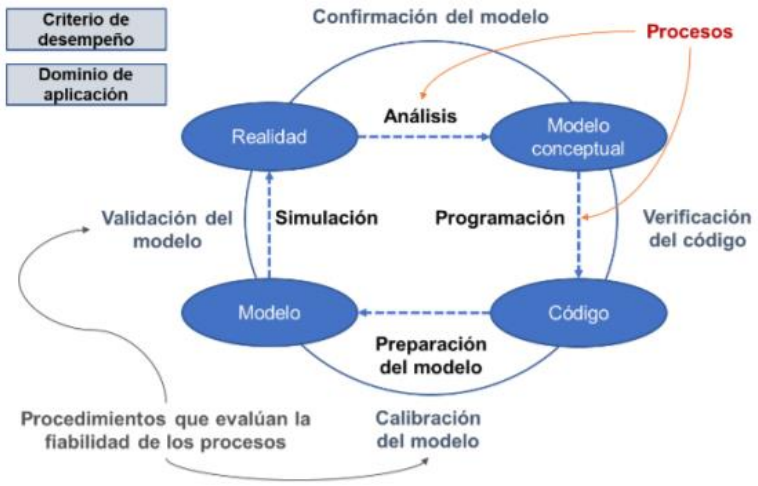
Otro factor importante se refiere a la extracción por canteras para materiales de construcción, las canteras legalizadas en la cuenca Ranchería están localizadas en jurisdicción del municipio de Riohacha, en Albania, San Juan del Cesar, Barrancas y en Fonseca. [10]

4.1.5 Modelación hidrológica

La modelación de calidad de agua permite caracterizar las transformaciones que se tienen en los cuerpos de agua superficiales y es de gran utilidad para las autoridades ambientales tener conocimiento de estos cambios, es importante analizar las transformaciones que ocurren en los cuerpos hídricos y es posible generar escenarios futuros para la toma de decisiones y cuidado del recurso, desarrollando instrumentos de planificación y administración con medidas para la contaminación y el manejo del recurso hídrico. [17]

El proceso de modelación se puede entender como la interacción de cuatro elementos básicos: realidad, modelo conceptual, código y modelo (Ver figura 5) Estos elementos se vinculan a través de procesos de análisis, programación preparación del modelo y simulación. Resultando en la evaluación de los procesos con la confirmación, verificación calibración y validación. [17]

Figura 5. Elementos que componen la terminología adoptada de modelación



Fuente: J. Refsgaard, \& H. Henriksen, “Modelling guidelines terminology and guiding principles", Advances in Water Resources, 2004. pp. 27-82

La simulación hidrológica en SWAT se basa en la siguiente ecuación 2 de balance de agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t} (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})i \quad (2)$$

Donde:

SW_t: es el contenido final de agua del suelo (mm)

SW_0: es el contenido inicial de agua del suelo (mm)

$_t$: es el tiempo (días)

R_{day}: es el valor acumulativo de la precipitación (mm)

Ea: es la evapotranspiración real (mm)

Q_{gw}: es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm).

W_{seep}: es la cantidad de percolación y flujo de derivación que sale del perfil del suelo (mm)

4.1.6 Soil and water assessment tool (SWAT)

Es una herramienta que permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, el impacto en la calidad de agua presentes en las practicas del ser humano por el uso del suelo y los usos de la tierra, planteado en este caso para el estudio de la minería y la calidad de agua en el sector. El modelo requiere los datos de tiempo, los suelos, topografía y factores antrópicos para poder representar un balance hídrico de la cuenca en donde se determine la entrada, salida y almacenamiento de agua.

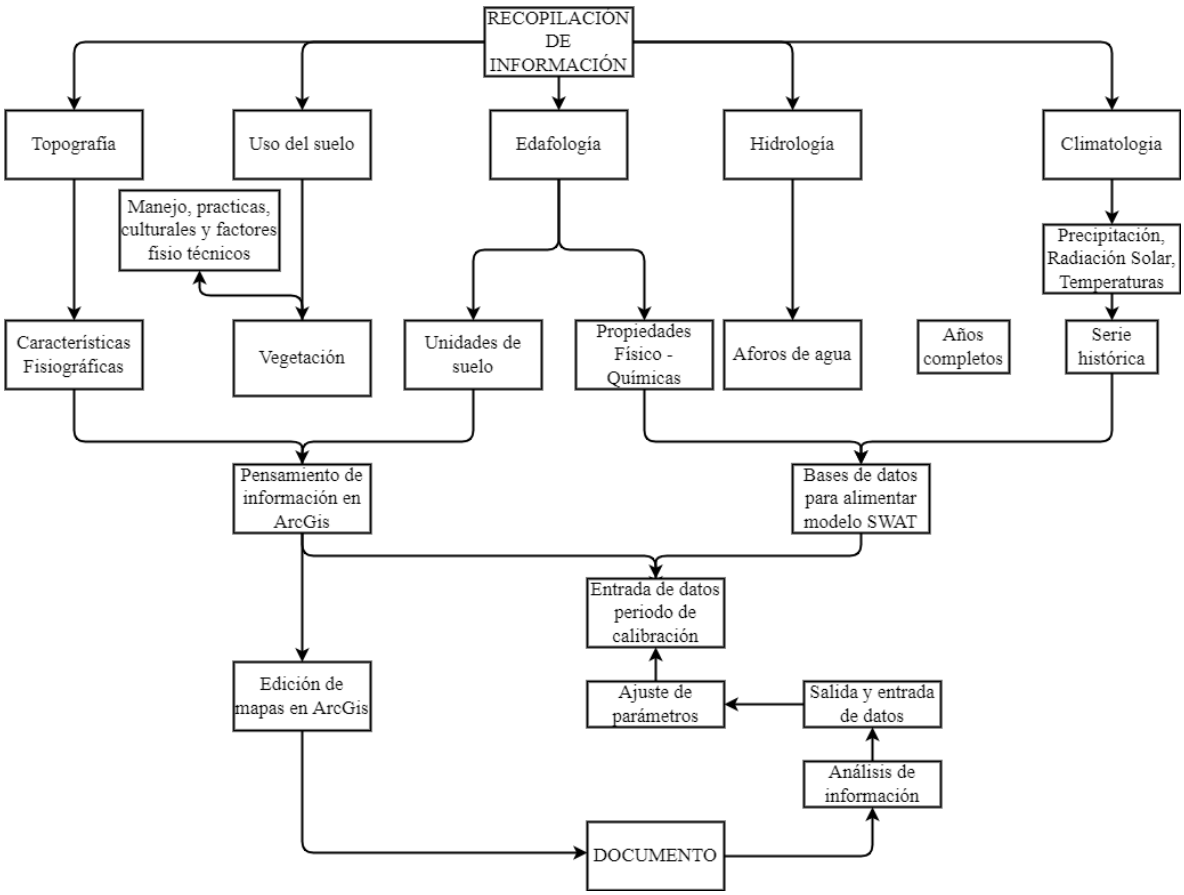
El modelo SWAT se presenta como una extensión en ArcGIS, siendo un paquete de análisis de datos para ayudar a generar archivos de entrada y analizar específicamente de información resultante de hidrología con características principales y herramientas de ArcGIS. [8]

Swat para propósitos de modelación de cuenca hidrográfica presenta división en subcuencas haciendo la simulación muy útil, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca con zonas desiguales que puedan afectar la hidrología del sector. La información presentada para cada subcuenca es organizada en categorías: clima,

HRUs (Hydrologic Response Units; unidades de respuesta hidrológica), estanques, agua subterránea, canal principal y drenado de las subcuenca. [8]

En la figura 6, se observan los procesos que requiere el modelo SWAT para su ejecución y generar la modelación de manera clara.

Figura 6. Esquema de trabajo del modelo SWAT



Fuente: T. Escalante, J. Llorente, D. Espinosa \& J. Soberon, “Base de datos y sistemas de información: aplicaciones en biogeografía", Revista de la Academia Colombiana de Ciencias, 2020. pp. 325-341

4.2 MARCO LEGAL

Para el desarrollo del proyecto es importante tener en cuenta el marco normativo vigente que rige los recursos hídricos en Colombia. Las primeras herramientas que se impulsaron para monitorear y controlar el medio ambiente en Colombia se contemplaron en el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y

Protección Ambiental de 1974, donde se inició la validación de la conservación de suelos y recursos naturales presentes en las regiones de la nación.

Además, es importante mencionar que dentro del contexto y la política nacional para la GIRH (Gestión Integral del Recurso Hídrico) en Colombia se contemplan objetivos, metas, indicadores y líneas de acción estratégicas para el manejo del recurso hídrico del país. No obstante, se encuentra en constante evolución y transformación, ya que la normativa a nivel general aún carece de límites permisibles para ciertos parámetros de calidad del agua.

A continuación, se encuentran las leyes, decretos y resoluciones encargadas de garantizar la seguridad hídrica en todo el país. Asimismo, en la tabla 2 se muestran diferentes disposiciones para el manejo del recurso hídrico y legalidad minera.

Tabla 2. Marco legal

TIPO	N°	FECHA	ENTIDAD	DESCRIPCIÓN
Decreto	1594	26/06/1984	Ministerio de Salud	“Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Part III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos”
Ley	0685	15/08/2001	Agencia Nacional de Minería	"Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones"
Resolución	1575	9/05/2007	Ministerio de la Protección Social	"Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano"
Resolución	2115	28/07/2007	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	"Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano"
Resolución	0811	5/03/2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	“Por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución”
Decreto	2820	5/08/2010		"Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales"
Decreto	3930	25/10/2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	"Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones."
Resolución	4716	18/11/2010		"Por medio de la cual se reglamenta el parágrafo del artículo 15 del Decreto 1575 de 2007 (Mapa de Riesgo de Calidad de Agua)"

Tabla 3. Marco legal (Continuación)

TIPO	N°	FECHA	ENTIDAD	DESCRIPCIÓN
Decreto	4728	23/12/2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010 y se fijará los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo"
Guia	3	2011	OMS (Organización Mundial de la Salud)	"Calidad del agua potable"
Guia	4	2011	OMS (Organización Mundial de la Salud)	"Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano"
Decreto	1640	2/08/2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	"Calidad del agua de consumo humano"
Resolución	631	17/03/2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	"Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones"
Decreto	1076	26/05/2015		"Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"
Ley	1753	9/06/2015	El Congreso de la República de Colombia	“Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país”
Resolución	0330	8/06/2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	"Por el cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico- RAS y se derogan resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009"
Decreto	050	16/01/2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos"

Fuente: Los Autores

5. ESTADO DEL ARTE

En el año 2012 Hernández-Saucedo y Rivera-Toral utilizaron un modelo SWAT en la cuenca alta del río Catamayo, ubicada en la frontera entre Ecuador y Perú, para estimar caudales y sedimentos en zonas donde tradicionalmente se utilizan de manera ineficiente los recursos naturales y la cobertura vegetal dado que esto puede llevar a que el suelo erosione, pérdida de fertilidad y arrastre de sólidos a los cursos de agua.[37] La contaminación de las aguas superficiales del río Ranchería es en gran parte producto del polvo de carbón que llega a la fuente de agua debido a la minería y camiones de volteo que transportan materiales, lo que lleva a la contaminación del acuífero, lo que incrementa la magnitud del problema si se tiene en cuenta que más del 50\% de la población se abastece por los pozos subterráneos.

Como resultado, a mediados del año 2013 el sector ha experimentado escasez de agua directamente relacionada con la contaminación, lo que se traduce en una reducción alarmante de las capturas pesqueras en los últimos años, y el impacto de la excavación en las tasas de evaporación también ha provocado cambios severos en el ciclo hidrológico. Además, según las comunidades aledañas a la zona de descarga de Cerrejón al río Ranchería y otras fuentes de agua superficial se disponen grandes cantidades de grasas, aceites, combustibles, carbón mineral y nitrato de amonio. [22]

La manera de explotación minera en Colombia ha generado un gran impacto negativo en el medio ambiente. En el año 2014 ciertos sectores de producción en Colombia, son los principales ejes de controversia en cuanto a la contaminación que sufre la región de la Guajira. Las actividades de explotación minera han generado serios problemas ambientales, tales como la emisión de gases, desplazamiento de flora y fauna, ruido, y el uso del agua con sus efectos sobre el ciclo hídrico del Río Ranchería. A partir de esto, la calidad del agua se ve ligada a la contaminación generando disminución de la pesca, y problemas de salud en los habitantes. [11] No obstante, el conflicto agua-ambiente en La Guajira es fundamentalmente una combinación de privatización, apropiación y contaminación del agua por patrones de explotación. En condiciones de escasez de agua y clima severo, el saqueo de tierras favorables al modelo minero energético configura simultáneamente escenarios de saqueo de agua y patrimonio natural que son entregados a intereses corporativos.

La cuenca del río Ranchería es una de las principales cuencas fluviales cuyos recursos hídricos son fundamentales para mantener los medios de subsistencia de la creciente población en la Guajira. Sin embargo, iniciando el año 2016 es de gran preocupación la inadecuada gestión de los escasos recursos entre demandas y

empresas competitivas que buscan acabar con el poco recurso hídrico con el que cuenta la región. El modelo SWAT va a ser utilizado como herramienta de apoyo a la decisión, por lo que se evaluó su aplicabilidad en la cuenca. Se realizará un análisis de sensibilidad del modelo utilizando datos meteorológicos diarios de una estación. [27]

Debido a la subjetividad del modelo SWAT en la generación de subcuencas acerca de la descretización espacial junto la generación de HRUs (Unidades de respuesta hidrológica), ya que la principal dificultad al realizar la subdivisión de cuencas es la uniformidad hidrológica de las áreas planteadas. En el año 2017 se realiza modelo y simulación SWAT de la cuenca de Río Grande con la estación pluviométrica Madre de Deus de Minas, el cual arroja mejores resultados en cuanto a calibración y validación cuando se generan mayor número de subcuencas y múltiples HRUs, teniendo en cuenta los tres criterios que emplea el SWAT en la creación de HRUs: Clase predominante, HRU predominante y múltiples HRU. Valores comparados a escenarios de menor detalle y solo un HRU por subcuenca, según los valores de referencia de los coeficientes NS (coeficiente de Nash-Sutcliffe) y PBIAS (sesgo). [19]

Finalizando el año 2018 se presenta el modelo de la cuenca del río Dee en Reino Unido utilizando SWAT para aguas superficiales y para modelo de agua subterránea MODFLOW, acoplando ambos modelos para mejorar el rendimiento de los resultados. Esto sirve de utilidad para evaluar la sensibilidad de los caudales de los arroyos a el cambio climático, la extracción de aguas subterráneas y alteraciones del uso de la tierra. Debido al acople de ambos modelos para agua superficial y subterránea presente simulaciones comparativamente mejores de caudales en líneas de arroyos mejorando el balance hídrico en la cuenca, mostrando un uso prometedor del modelo acoplado. [20]

La herramienta de evaluación del agua del suelo (SWAT), que, al funcionar con GIS, ayuda a la investigación de cantidad de agua en una cuenca, se necesita información sobre la cobertura del suelo y otros basados en la necesidad. Brinda resultados que evalúan y mejoran la trayectoria del flujo e identifican la extensión aérea de la cuenca en los periodos, tabulando y mostrando imágenes del proceso. La cuenca de Doma Micro está ubicada en el distrito Ranga Reddy en India. Se hace el estudio mediante modelos de elevación digital (DEM), y utilizando herramienta GIS, siguiendo el proceso de delimitación de cuencas y manejo de HRU definiendo las características de las subcuencas. En el año 2019 el resultado de la simulación refleja datos confiables para así lograr comprender las características típicas de la cuenca como escorrentía promedio anual, precipitación promedio anual y rendimiento de agua. [21]

Más tarde, en el año 2021 surge un enfoque factible y rentable para la gestión integrada de cuencas hidrográficas, el cual consiste en utilizar modelos de simulación de cuencas hidrográficas como una herramienta para estudiar los efectos de las variables que interactúan y que afectan la cantidad y la calidad de los recursos hídricos disponibles a escala temporal y espacial. Estos modelos son herramientas predictivas esenciales para apoyar la toma de decisiones en la gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos. La herramienta de evaluación de la humedad del suelo (SWAT) es un ejemplo de este modelo. El modelo SWAT es un modelo de tiempo continuo semidistribuido basado en la física que predice el impacto de decisiones de gestión alternativas sobre los recursos hídricos y la contaminación de fuentes no puntuales en grandes cuencas hidrográficas. Además, debido a sus limitaciones para representar procesos naturales complejos, los modelos como SWAT requieren calibración antes de su aplicación. [28]

Los datos de entrada requeridos incluyen el Modelo Digital de Elevación (DEM), el uso del suelo y el mapa de cobertura del suelo, el mapa del suelo y los datos meteorológicos. La herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT) se utiliza ampliamente para la modelización hidrológica cuantitativa. Este modelo físico generalmente se calibra en función del caudal, pero requiere datos de medición para cada variable. Varios estudios han implementado conjuntos de datos contenido de agua del suelo (SWC) de detección remota para calibrar modelos SWAT.

En estudios hidrológicos del presente año 2022, los modelos de la herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT) a menudo se calibran con datos de un solo sitio, generalmente la salida de una cuenca, utilizando una función objetivo única que describe un criterio de error. Sin embargo, es probable que la cuenca se mida en varios sitios, por lo que el modelo se puede calibrar de manera más confiable utilizando un conjunto de datos más grande como entrada y permite la compensación de errores humanos/instrumentales asociados con las mediciones de campo. Además, también se evaluó el impacto de las estaciones húmedas y secas en el desempeño de SWAT, como resultado el modelo SWAT funciona bien en períodos húmedos, pero no en períodos secos. [29]

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar mediante modelación de cantidad y calidad de agua los impactos producidos por actividades antrópicas (minería) en la cuenca del Río Ranchería.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el levantamiento y organización de datos base de la cuenca del Río Ranchería teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos, hidrológicos e hidrográficos que sean necesarios para la modelación.
- Desarrollar, calibrar y validar un modelo hidrológico en SWAT con distintos escenarios que permita simular la cuenca del Río Ranchería.
- Evaluar los efectos de los cambios en el uso del suelo y el deterioro de la calidad de agua producido por la minería en la zona de estudio.

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1 ALCANCES

Se tiene como fin desarrollar un modelo SWAT estableciendo como primer escenario los efectos de la minería sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la cuenca del Río Ranchería de la Guajira, teniendo en cuenta factores determinantes para el desarrollo de la vida como lo son el uso del suelo, información permisible sobre estos contaminantes en el medio ambiente y su impacto directo en la calidad del agua y en la vida acuática.

Es necesario aplicar un modelo hidrológico que permita simular la relación entre diferentes parámetros hidrológicos y generación de caudales. Se establecerán las variables de afectación, se analizarán los distintos escenarios y cada una de las causas raíces de variación con el fin de diagnosticar lo que pasaría en dicha situación y anticipar los impactos que se generen en la calidad del agua de la cuenca del Río Ranchería y las problemáticas para la población que esto conllevaría.

7.2 LIMITACIONES

El proyecto se enfocará en la actividad de producción minera legal y los contratos vigentes por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ya que no es posible cuantificar la ejecución de producción minera ilegal existente en el área de estudio.

La ejecución de las estrategias planteadas en el proyecto tiene como limitante la falta de datos proporcionados por los informes de las estaciones localizadas en la región. Así mismo, la variabilidad de los datos que se presenta por los cambios repentinos en el clima afectando considerablemente los resultados arrojados en las estaciones meteorológicas.

La data base es proporcionada por diferentes sistemas de información y entidades gubernamentales, por lo tanto, el periodo de tiempo de recolección de la misma es dependiente de los informes y bases de datos que son otorgados por el gobierno.

No se dispone de datos confiables sobre la actividad minera dentro del área de estudio, ya que se tiene como factor limitante la obtención de datos detallados e información relevante sobre los procesos, la actividad interna y las industrias presentes en el área que permita un modelo adecuado.

8. METODOLOGÍA

En esta sección se dispondrán los procesos a seguir para cumplir los objetivos ya establecidos.

8.1 AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el departamento de la Guajira en La cuenca del río Ranchería, la cual se surte de varios afluentes provenientes de la Serranía del Perijá. Existen importantes núcleos urbanos y rurales que hacen de esta región un territorio altamente poblado en los 248 km que recorre el río desde su nacimiento en el páramo de Chirigua hasta su desembocadura. [24]

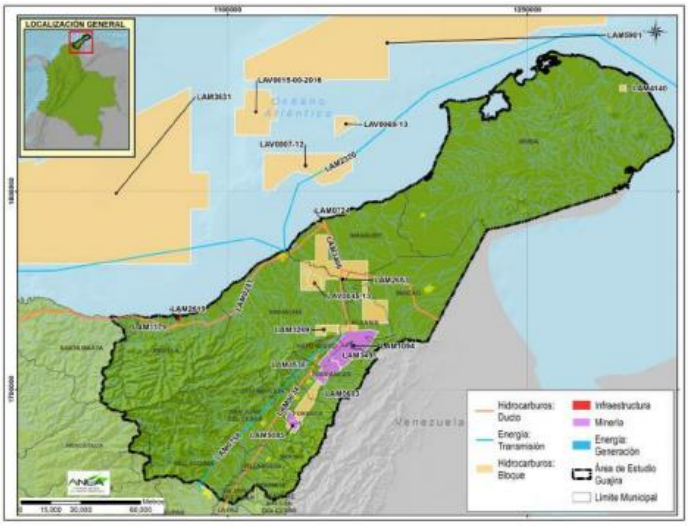
Figura 7. Cuenca del Río Ranchería

Fuente: Corpoguajira, “Plan de Ordenamiento de la Cuenca del Río Ranchería”, 2011

Se puede observar en la figura 7 el área comprendida por el sector minero entre los municipios de Barrancas, Hato Nuevo, Albania y Fonseca. [24]

El área de estudio abarcará el sector minero de la cuenca del Río Ranchería y por ende se hará el análisis de toda la zona comprendida por la cuenca.

Figura 8. Ubicación zona minera



Fuente: ANLA, “Reporte de Alertas Zona Hidrográfica Caribe-Guajira”, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018

8.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

8.2.1 Estaciones – Datos IDEAM

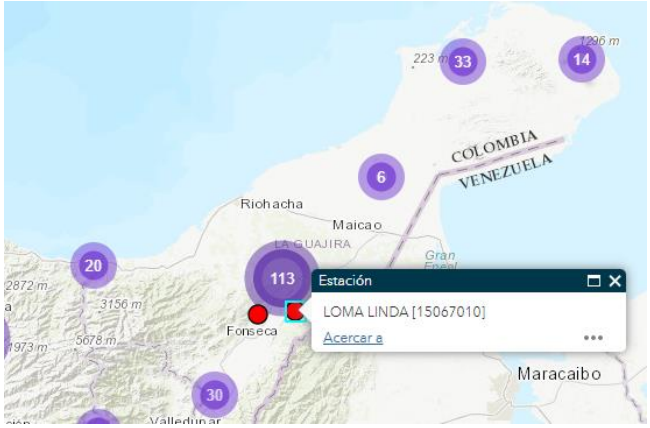
Las estaciones de Loma Linda y Pozo Hondo, sirven para administrar datos de caudal que serán incluidos en el modelo para realizar el proceso de calibración y verificar las correlaciones, se tiene en cuenta que se toman los datos base de Loma Linda y se completan valores con Pozo Hondo para las fechas que serán simuladas desde 02/01/2012 hasta 01/01/2021.

Tabla 4. Estación Loma Linda

CODIGO	15067010
Nombre	LOMA LINDA
Categoría	Limnigráfica
Tecnología	Convencional
Estado	Activa
Fecha de instalación	1985-12-15
Altitud	130
Latitud	11.01
Departamento	La Guajira
Municipio	Barrancas
Área operativa	Área Operativa 05 - Magdalena - Cesar - Guajira
Área hidrográfica	Caribe
Zona hidrográfica	Caribe - Guajira

Fuente: Los Autores

Figura 9. Estación Loma Linda



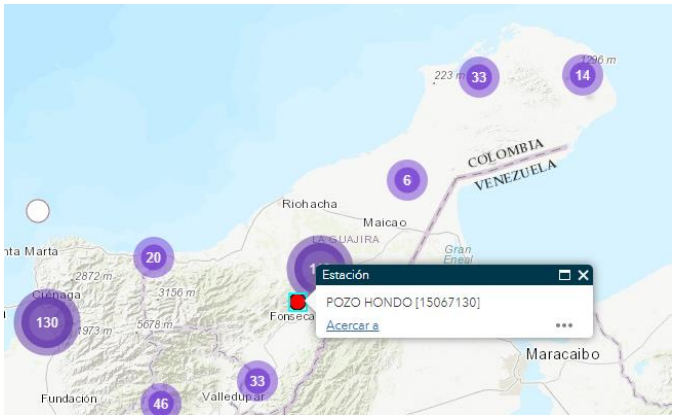
Fuente: Los Autores

Tabla 5. Estación Pozo Hondo

CODIGO	15067130
Nombre	POZO HONDO
Categoría	Limnigráfica
Tecnología	Convencional
Estado	Activa
Fecha de instalación	1987-07-15
Altitud	210
Latitud	11.00
Departamento	La Guajira
Municipio	Barrancas
Área operativa	Área Operativa 05 - Magdalena - Cesar - Guajira
Área hidrográfica	Caribe
Zona hidrográfica	Caribe - Guajira

Fuente: Los Autores

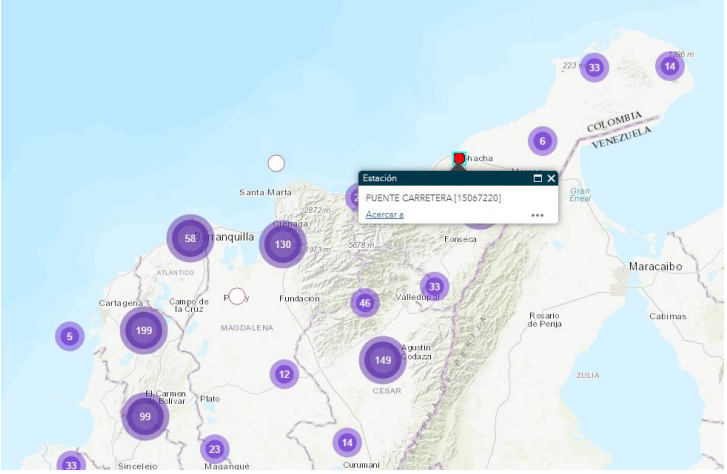
Figura 10. Estación Pozo Hondo



Fuente: Los Autores

De la estación PUENTE CARRETERA se tomaron los datos de Precipitación total diaria (automática) del período comprendido entre 02/01/2012 hasta 24/04/2022. Información extraída de [25] en formato .csv y organizada a conformidad de lo solicitado por el modelo.

Figura 11. Estación Puente Carretera



Fuente: Los Autores

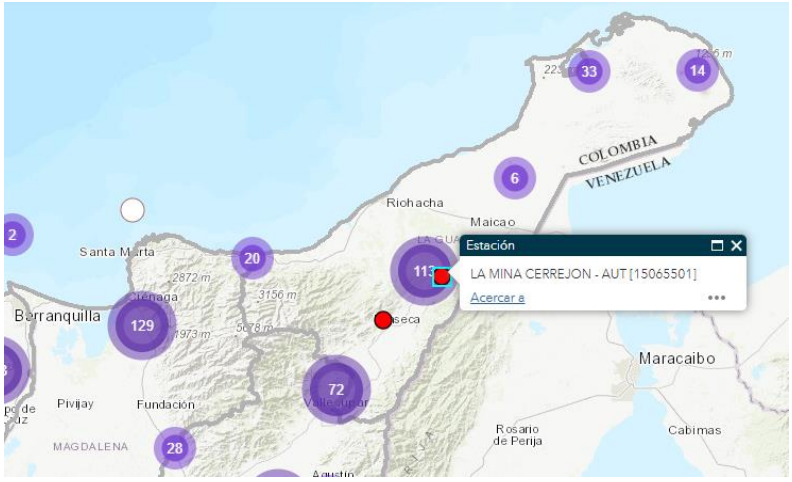
Tabla 6. Estación Puente Carretera

CODIGO	15067220
Nombre	PUENTE CARRETERA
Categoría	Limnigráfica
Tecnología	Automática con Telemetría
Estado	Activa
Fecha de instalación	2011/12/01
Altitud	7
Latitud	11.51
Departamento	La Guajira
Municipio	Riohacha
Área operativa	Área Operativa 05 - Magdalena - Cesar - Guajira
Área hidrográfica	Caribe
Zona hidrográfica	Caribe - Guajira

Fuente: Los Autores

De la Estación de LA MINA CERREJÓN se extrajeron los datos de temperatura mínima diaria y máxima diaria en el período comprendido entre 02/01/2012 hasta 01/01/2021 para que la modelación tuviera un rango amplio de ejecución de aprox. 9 años. Información extraída de [25] en formato .csv y organizada a conformidad de lo solicitado por el modelo.

Figura 12. La Mina Cerrejón



Fuente: Los Autores

Tabla 7. Estación La Mina Cerrejón

CODIGO	15065501
Nombre	La Mina Cerrejón
Categoría	Climática Principal
Tecnología	Automática con Telemetría
Estado	Activa
Fecha de instalación	2014-08-26
Altitud	80
Latitud	11.14
Departamento	La Guajira
Municipio	Albania
Área operativa	Área Operativa 05 - Magdalena - Cesar - Guajira
Área hidrográfica	Caribe
Zona hidrográfica	Caribe - Guajira

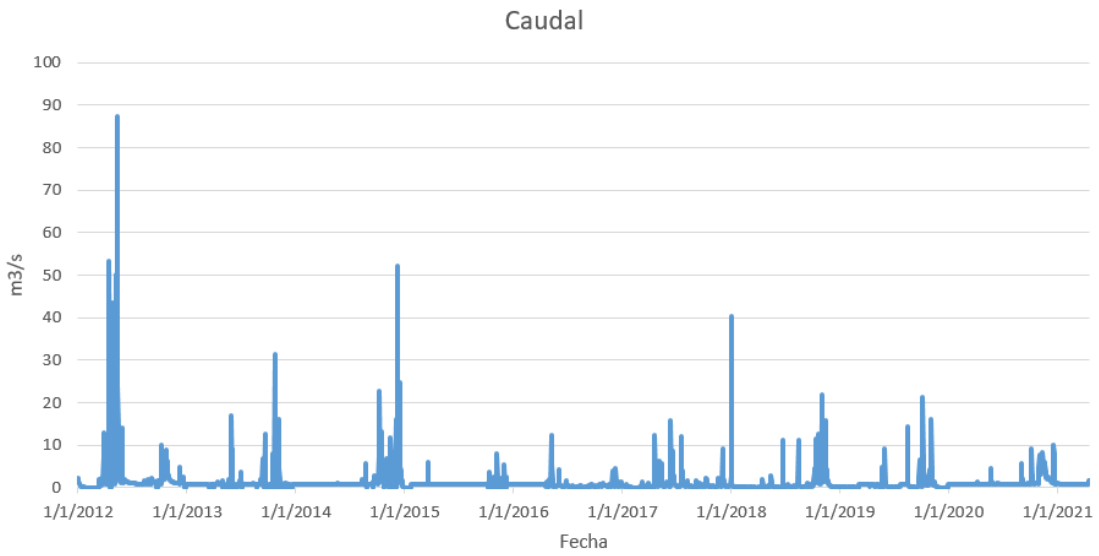
Fuente: Los Autores

8.2.2 Caudal

El registro de datos de caudal se tomó del IDEAM, en una base de datos con información de 2012-2021 [25] para la estación descrita en la tabla 4 La cual opera en las corrientes del río Ranchería comprendida entre Hato Nuevo, Barrancas y Riohacha.

Los datos de caudal medio diario están dados en m^3/s de un año escogido en el rango de 2012-2021, como se pueden apreciar en la figura 13.

Figura 13. Caudal base



Fuente: Los Autores

8.2.3 Datos atmosféricos

La información del clima es necesaria para los comportamientos de las diferentes zonas que contemplan el área de estudio. Teniendo en cuenta la precipitación, evaporación, radiación solar, viento, humedad, temperatura los datos se basan en la estación LA MINA CERREJÓN [15065501] de la figura 12 y registrados en tabla 8. Datos tomados del IDEAM [24].

Tabla 8. Variables Atmosféricas

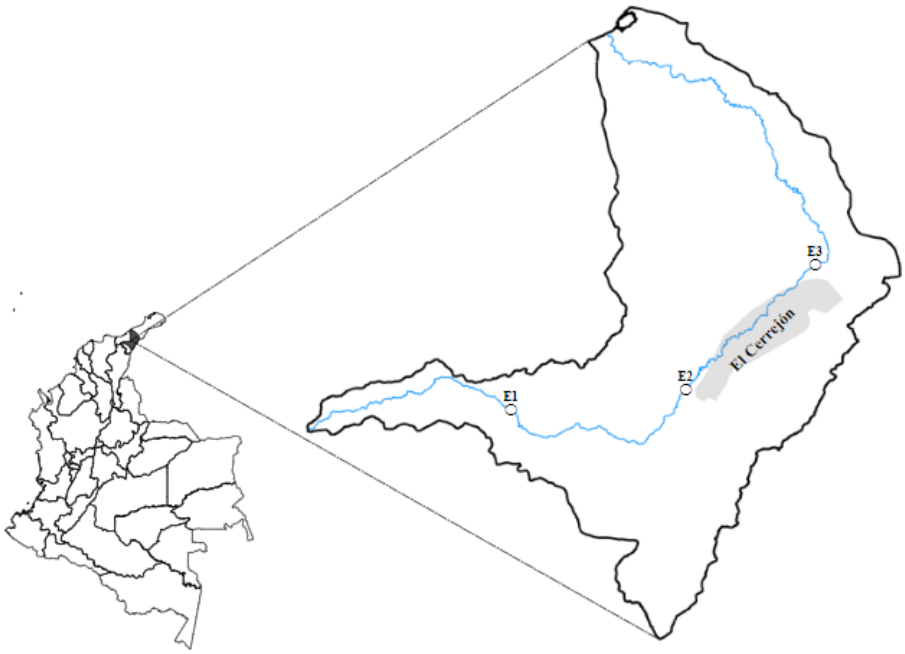
Variables	**Unidad**	**Valor**
Rad. Solar	W/m^2	176.4
Humedad Rel.	Adim	23.6
Vel. Viento	m/s	0.86
Temperatura	°C	32

Fuente: Los Autores

8.2.4 Calidad del agua

Para hacer el desarrollo de datos de calidad de agua se tiene en cuenta: la información del articulo *Salud ambiental del río Ranchería a través de macro invertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón* [26] en donde se ubican 3 estaciones de monitoreo sobre el Río Ranchería (ver figura 14) permitiendo recolectar datos de parámetros fisicoquímicos del agua.

Figura 14. Localización estaciones de monitoreo de variables ICA



Fuente: L. Díaz, A. Espinosa y G. Molina. “Salud ambiental del Río Ranchería a través de macroinvertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón", 2020. pp. 49-63

En la tabla 9 se encuentran los datos de localización de las estaciones de monitoreo tenidas en cuenta para los datos de calidad de agua.

Tabla 9. Geolocalización de las estaciones de monitoreo

Estaciones de monitoreo	Coordenadas		Descripción de la zona
	Norte	Este	
E1	10º 57’ 12.85”	73º 03’ 31.66”	Corregimiento de Caracolí
E2	10º 59’ 02.49”	72º 46’ 00.42”	Corregimiento de Papayal
E3	11º 10’ 48.29”	72º 33’ 11.74”	Municipio de Albania

Fuente: L. Díaz, A. Espinosa y G. Molina. “Salud ambiental del Río Ranchería a través de macroinvertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón", 2020. pp. 49-63

Se ha demostrado que la mina del Cerrejón a través de los años ha generado deterioro en la calidad de agua del río Ranchería por los vertimientos de centros poblados. La turbiedad, disminución de velocidad y coloración del cauce del río, debido a partículas en suspensión. Por eso se han tomado los datos de las variables fisicoquímicas para orientar así los valores permisibles y/o contaminación. En la tabla 10 se observan los valores solidos suspendidos, turbiedad, oxígeno disuelto, etc., permitiendo analizar la calidad de agua como dato de entrada.

Tabla 10. Valores de las variables fisicoquímicas

Variable	**Unid.**	**E1**	**E2**	**E3**
		$\bar{x}$ **± s**	$\bar{x}$ **± s**	$\bar{x}$**± s**
Temp	°C	24.85 ±1,44	31.45 ±2,72	33.45 ±3,08
Ph	Adim	8.2 ±0,44	7.86 ±0,30	7.83 ±0,20
OD	mg/l	8.48 ±1,26	6.80 ±2,14	6.51 ±1,56
Sal	X	0.00 ±0,00	0.00 ±0,05	0.10 ±0,08
Cond	µS/cm	44.50 ±5,66	435.50 ±123,08	715.00 ±185,23
Turb	unt	7.50 ±6,31	24.55 ±252,59	87.00 ±355,09
SST	mg/l	11.45 ±10,57	25.55 ±191,34	38.90 ±285,88
Cl^-	mg/l	9.86 ±2,82	23.15 ±2,47	36.71 ±3,66
NH4+	µg/l	2.28 ±3,71	11.06 ±17,80	21.87 ±34,95
NO2-	µg/l	2.41 ±0,87	19.51 ±11,32	25.64 ±5,02
NO3-	µg/l	10.64 ±8,28	34.43 ±22,00	61.52 ±16,34

Fuente: L. Díaz, A. Espinosa y G. Molina. “Salud ambiental del Río Ranchería a través de macroinvertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón", 2020. pp. 49-63

La tabla 11 se encuentra el contexto general de la calidad del agua debida a cada estación del río Ranchería.

Tabla 11. Calidad del agua de la zona de estudio según el BMWP/col

Estación	**BMWP/col**	**ASPT**	**Calidad**
E1	130	6.50	Aguas de clase I, de buena calidad o no contaminadas
E2	65	5.00	Aguas clase III, de calidad aceptable o ligeramente contaminadas
E3	50	5.25	Aguas clase IV, de calidad dudosa o moderadamente contaminadas

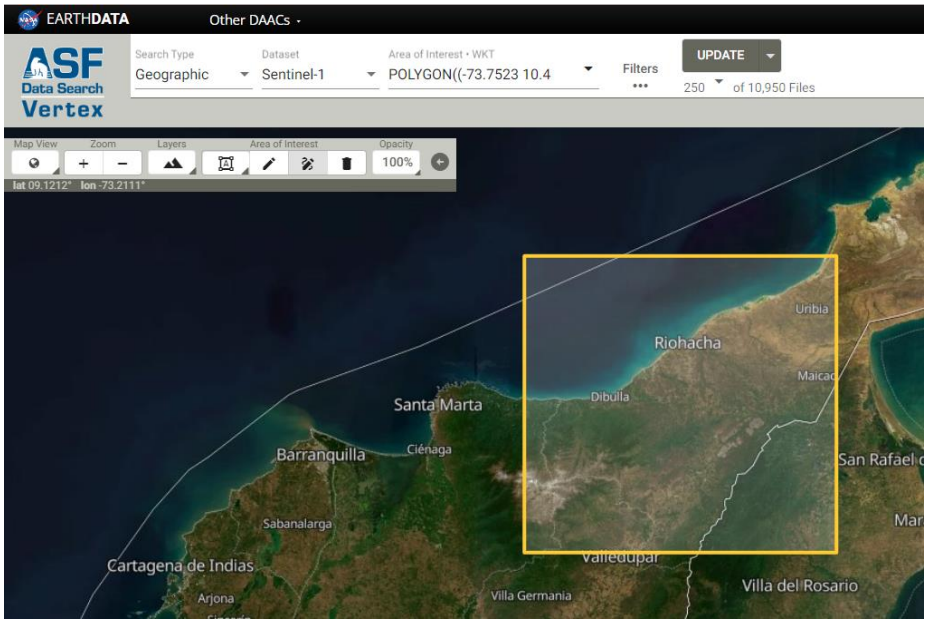
Fuente: L. Díaz, A. Espinosa y G. Molina. “Salud ambiental del Río Ranchería a través de macroinvertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón", 2020. pp. 49-63

8.2.5 Capas base

DEM, Satélite ALOS PALSAR

Se realiza la descarga de los archivos DEM de la zona de estudio en la página de la NASA EARTH DATA [32] en donde se hace un recuadro en la zona de estudio que permite abarcar toda el área de lo que sería la cuenca.

Figura 15. Selección zona de estudio, Río Ranchería, Guajira

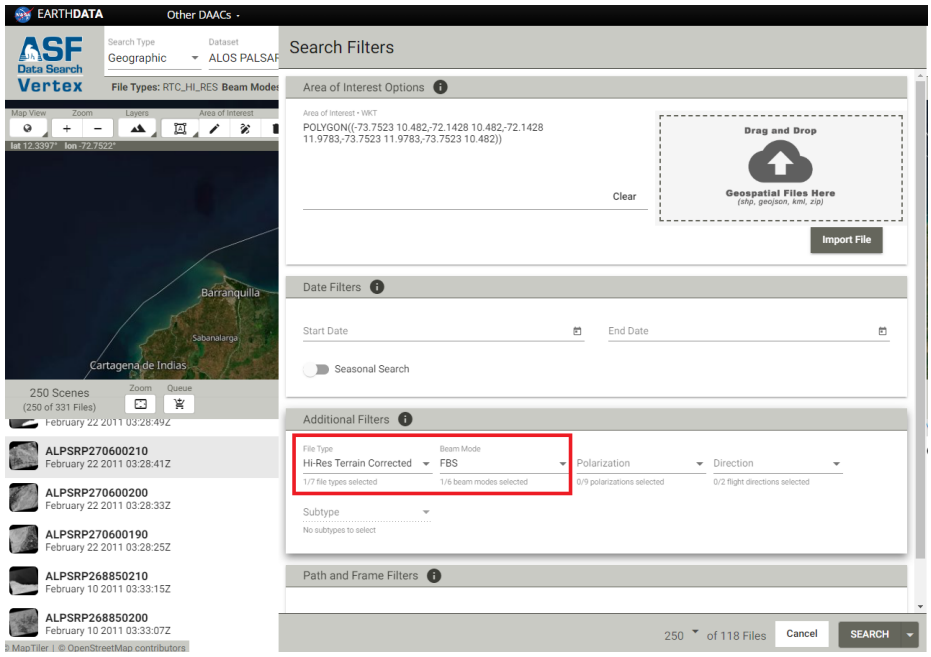


Fuente: EARTH DATA, “NASA - Descarga DEM”, [En línea]. Disponible en: https://search.asf.alaska.edu/\#/

Una vez se ha seleccionado la zona de estudio, el EARTH DATA permitirá ver los mosaicos o imágenes que integran el área, las cuales se descargan. En la Figura 16 se puede observar la configuración para la descarga, donde es necesario seleccionar en la pestaña Data Set (ALOS PALSAR) satélite escogido por su alta calidad de resolución 12.5m x 12.5 por píxel.

Seguido se realiza un filtro para hacer la búsqueda más efectiva en Filters-Additional filters, seleccionar el tipo de filtro de descarga (Hi-Res Terrain Corrected) así como (FBS) en Beam Mode y se genera la búsqueda.

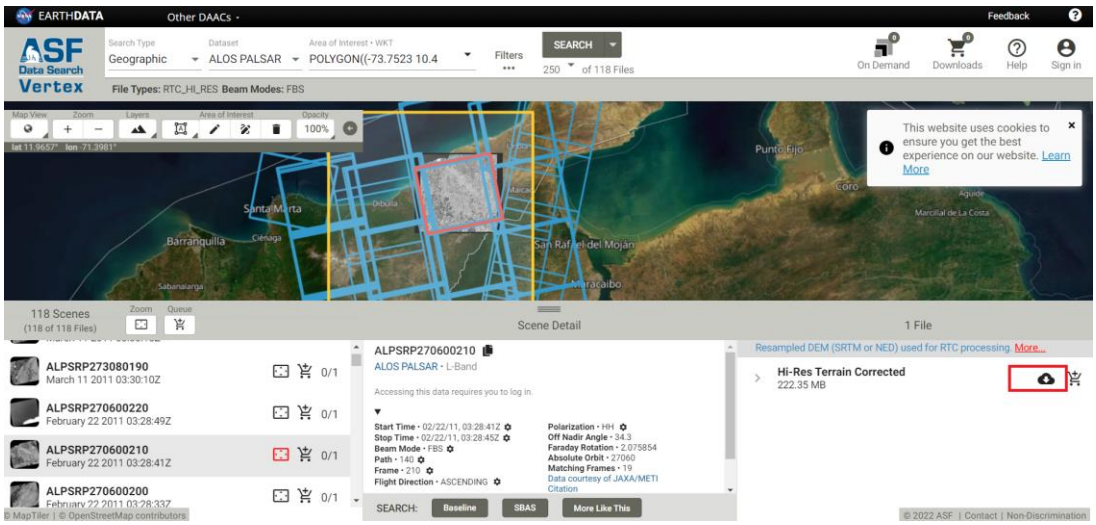
Figura 16. Filtros EARTH DATA



Fuente: EARTH DATA, “NASA - Descarga DEM”, [En línea]. Disponible en: https://search.asf.alaska.edu/\#/

Se descargan los DEM que integran la cuenca y se extraen en el computador teniendo en cuenta que debe organizarse la información en carpetas para que no queden archivos sueltos.

Figura 17. Descarga DEM (Hi-Res Terrain Corrected)



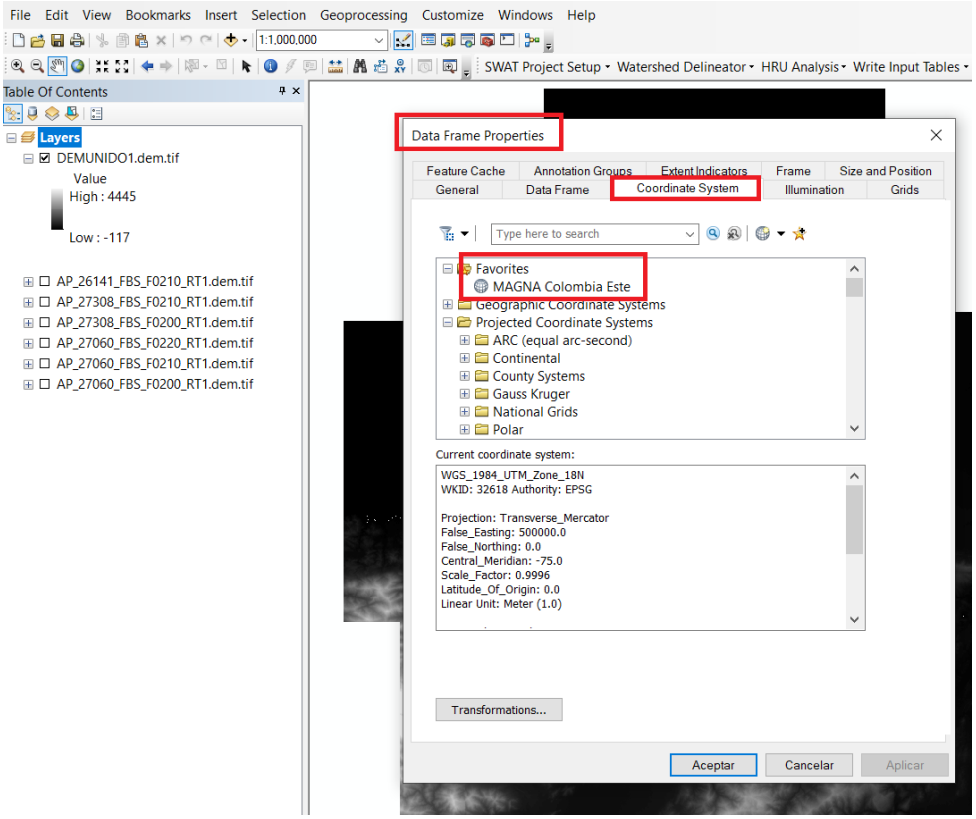
Fuente: EARTH DATA, “NASA - Descarga DEM”, [En línea]. Disponible en: https://search.asf.alaska.edu/\#/

Unión raster DEM.tif

Teniendo descargadas las capas DEM, se procede a su unión, para conformar un solo archivo DEM base para la modelación, se procede al montaje en ArcGis, descrito a continuación:

Se abre ArcGis seleccionando el sistema de coordenadas MAGNA_Colombia_Este (Click derecho zona de trabajo → Data Frame Propierties → Coordinate System).

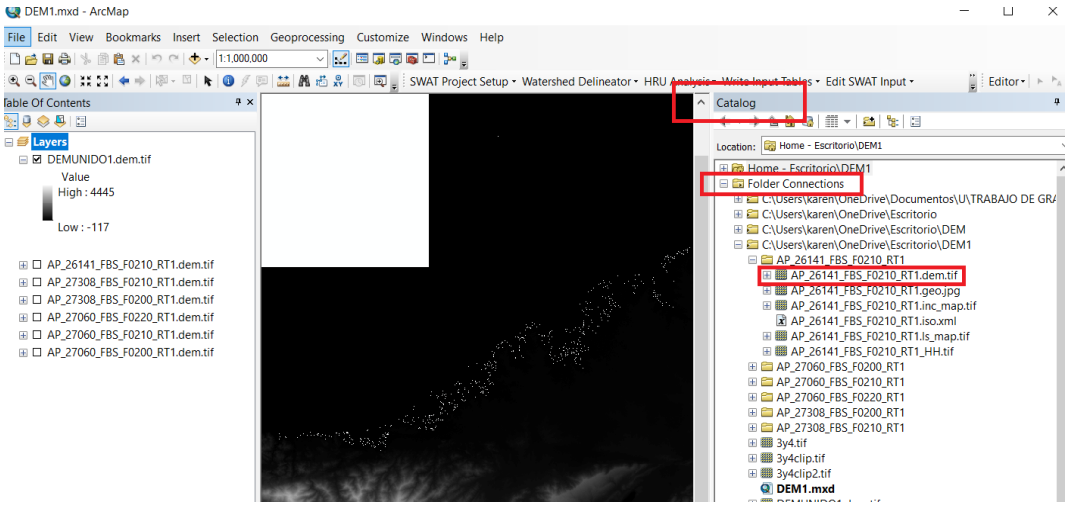
Figura 18. Sistema de coordenadas



Fuente: Los Autores

Es importante guardar en la parte superior derecha en la pestaña Catalogo las rutas de carpetas, donde se tiene guardada la información, esto para permitir la búsqueda y cargue de capas de manera óptima.

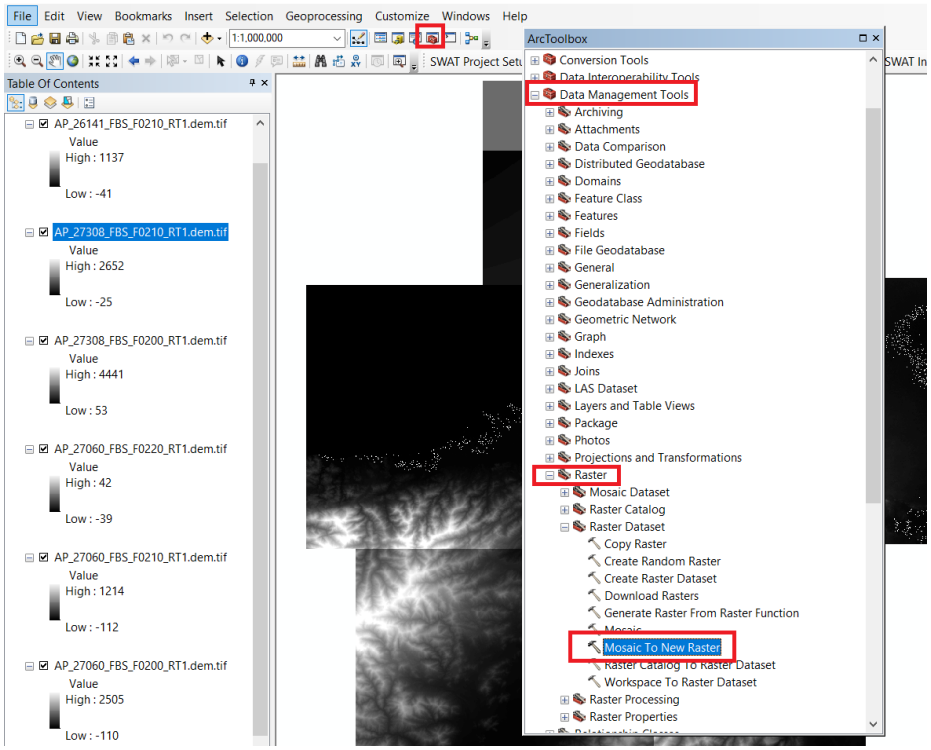
Figura 19. Catálogo



Fuente: Los Autores

Se montan los archivos .Tif de cada DEM descargado en ArcGis, se busca y selecciona la opción Data Management Tools → Mosaic To New Raster.

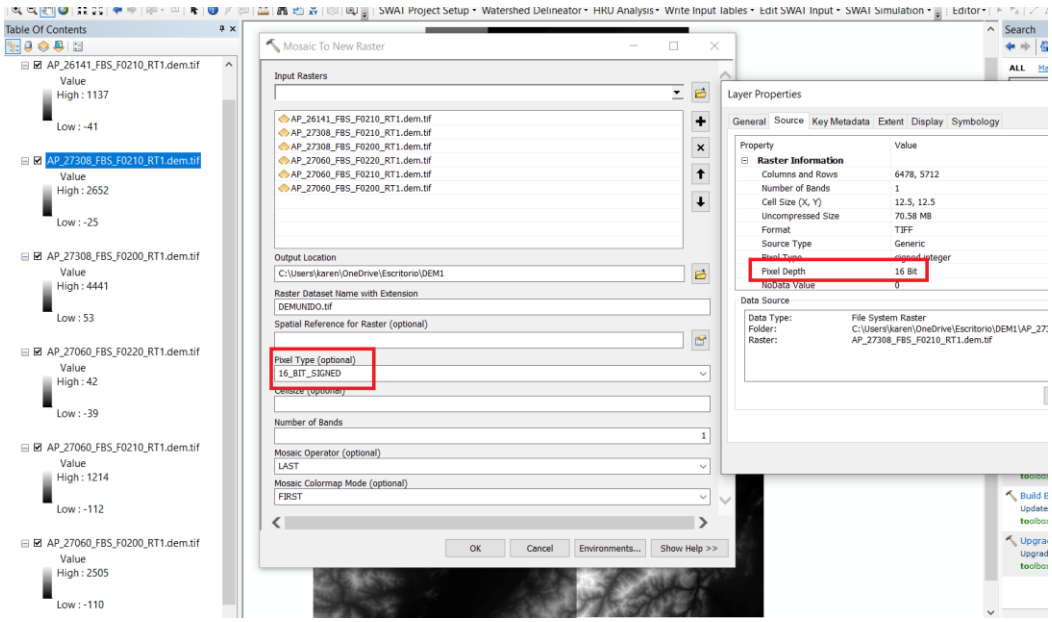
Figura 20. Mosaico a nuevo Raster (Mosaic To New Raster)



Fuente: Los Autores

En la ventana de Mosaic To New Raster se seleccionan los DEM que van a integrar la unión, así como las propiedades, el lugar donde se van a guardar, nombre y sistema de coordenadas opcional. En Pixel Type se asigna 16_BIT_SIGNED pues son los píxeles con los que vienen los DEM; en número de bandas se deja 1.

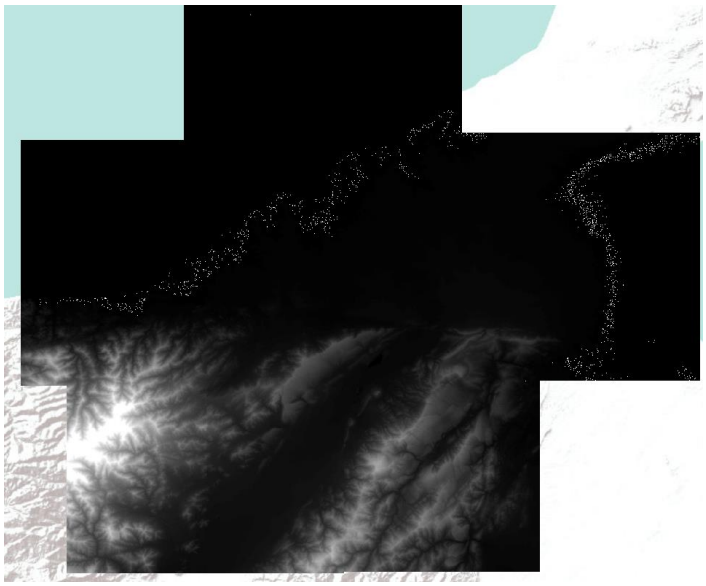
Figura 21. Propiedades Mosaic To New Raster



Fuente: Los Autores

El raster base unido de la zona del Río Ranchería queda de la siguiente manera como se ve en la figura 22.

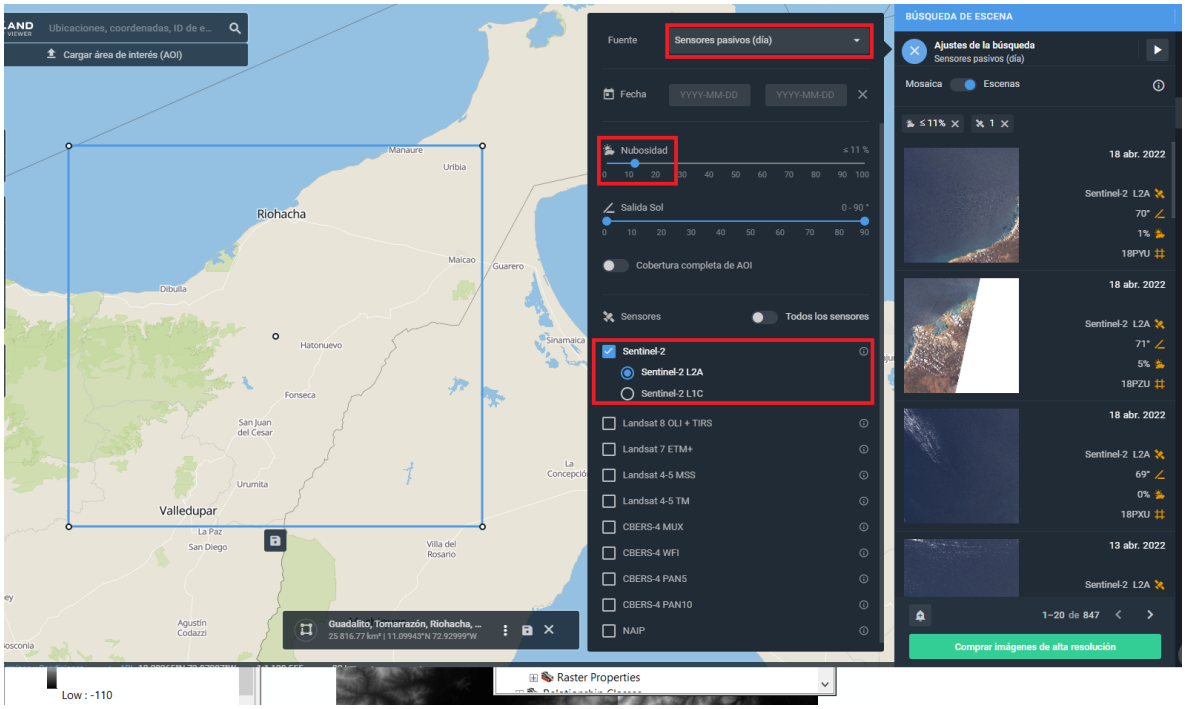
Figura 22. DEM base del modelo



Cobertura vegetal – datos NDVI

La información de cobertura vegetal NDVI (índices de vegetación de diferencia normalizada) se extrae de la plataforma LAND VIEWER de EOS [33], que permite descargar información satelital real y filtrar para recopilar datos y afinar la búsqueda del área de interés.

Figura 23. Parámetros NDVI

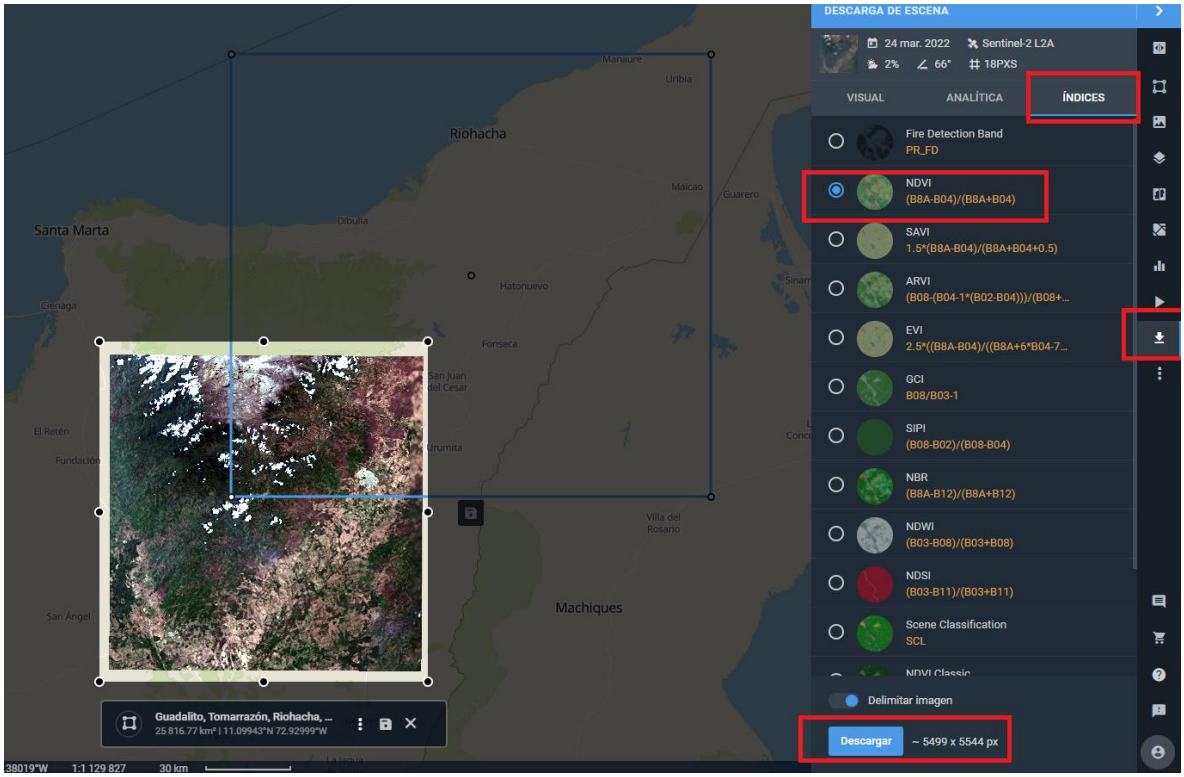


Fuente: Los Autores

Para el descargue se ubica el área de estudio y se seleccionan parámetros de búsqueda en sensores pasivos (día), Nubosidad de 10° para que las imágenes salgan mejor, y se usa el satélite SENTINEL-2. Ver figura 23.

Se debe seleccionar las imágenes que abarquen el área de interés una por una, se va a la pestaña de símbolo de descarga → índices → NDVI ((B8A-B04) / (B8A+B04)). Pues las imágenes contienen los datos requeridos de índices de vegetación de diferencia normalizada para el modelo.

Figura 24. Descarga NDVI

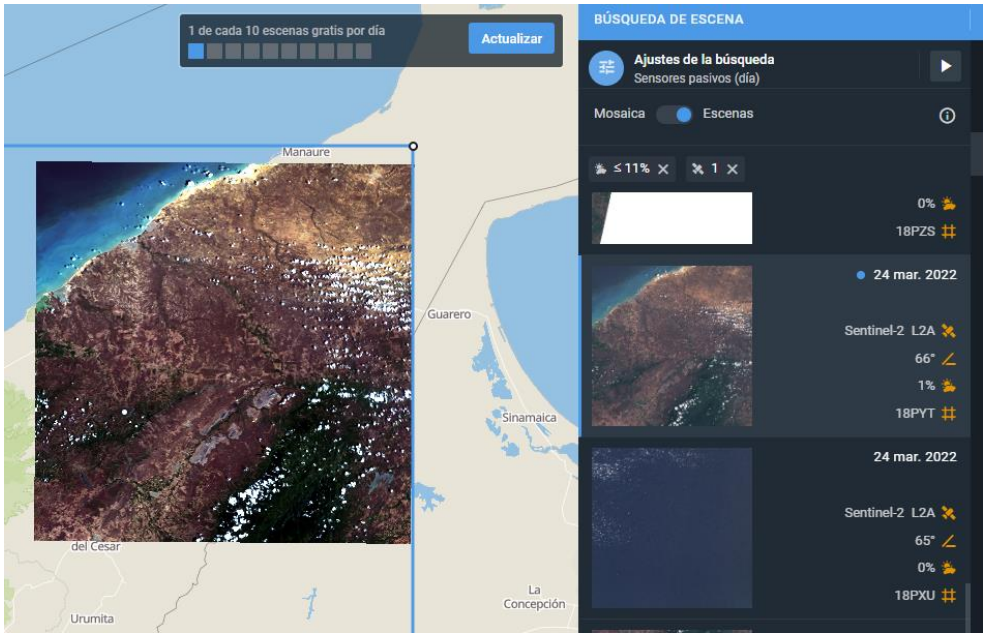


Fuente: Los Autores

Las imágenes tomadas para el modelo se pueden observar a continuación siendo estas tomadas del día 24 de marzo de 2022.

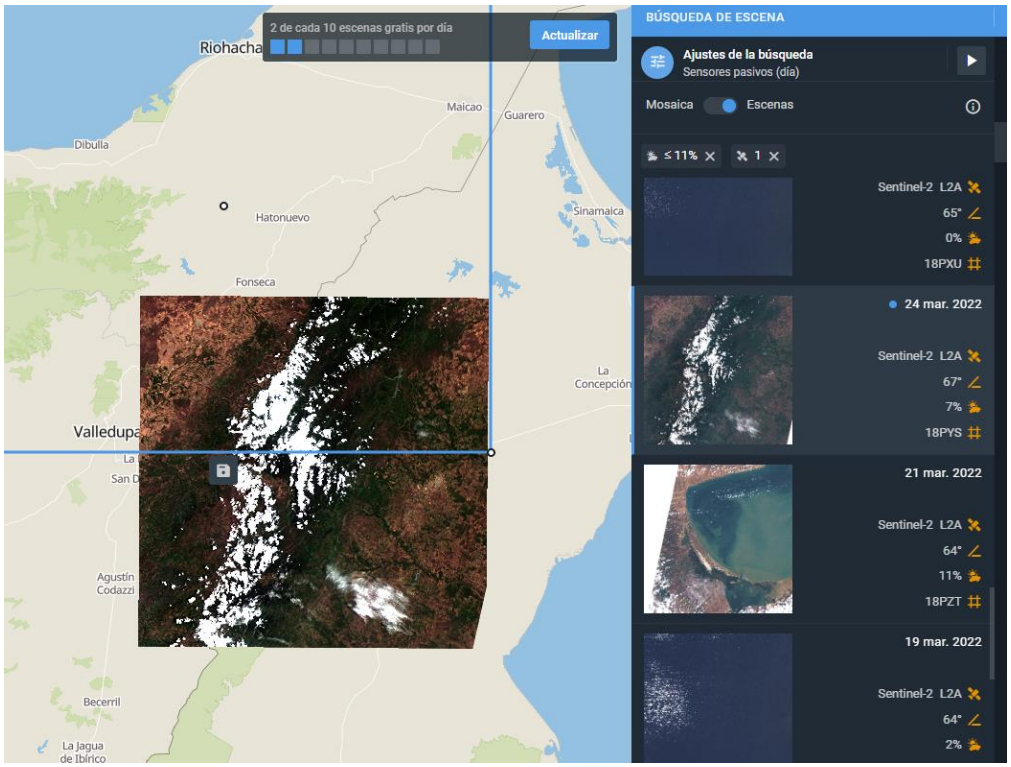
Solo estas capas se seleccionaron para cobertura vegetal 25 y 26 puesto que la búsqueda de información en esta parte de la Guajira no se obtuvo de manera completa, pues no se pudo encontrar el referente a la cuenca que cumpliera con los parámetros de calidad de imagen y resolución para la unión con los demás raster.

Figura 25. Imagen Norte NDVI



Fuente: Los Autores

Figura 26. Imagen Sur NDVI

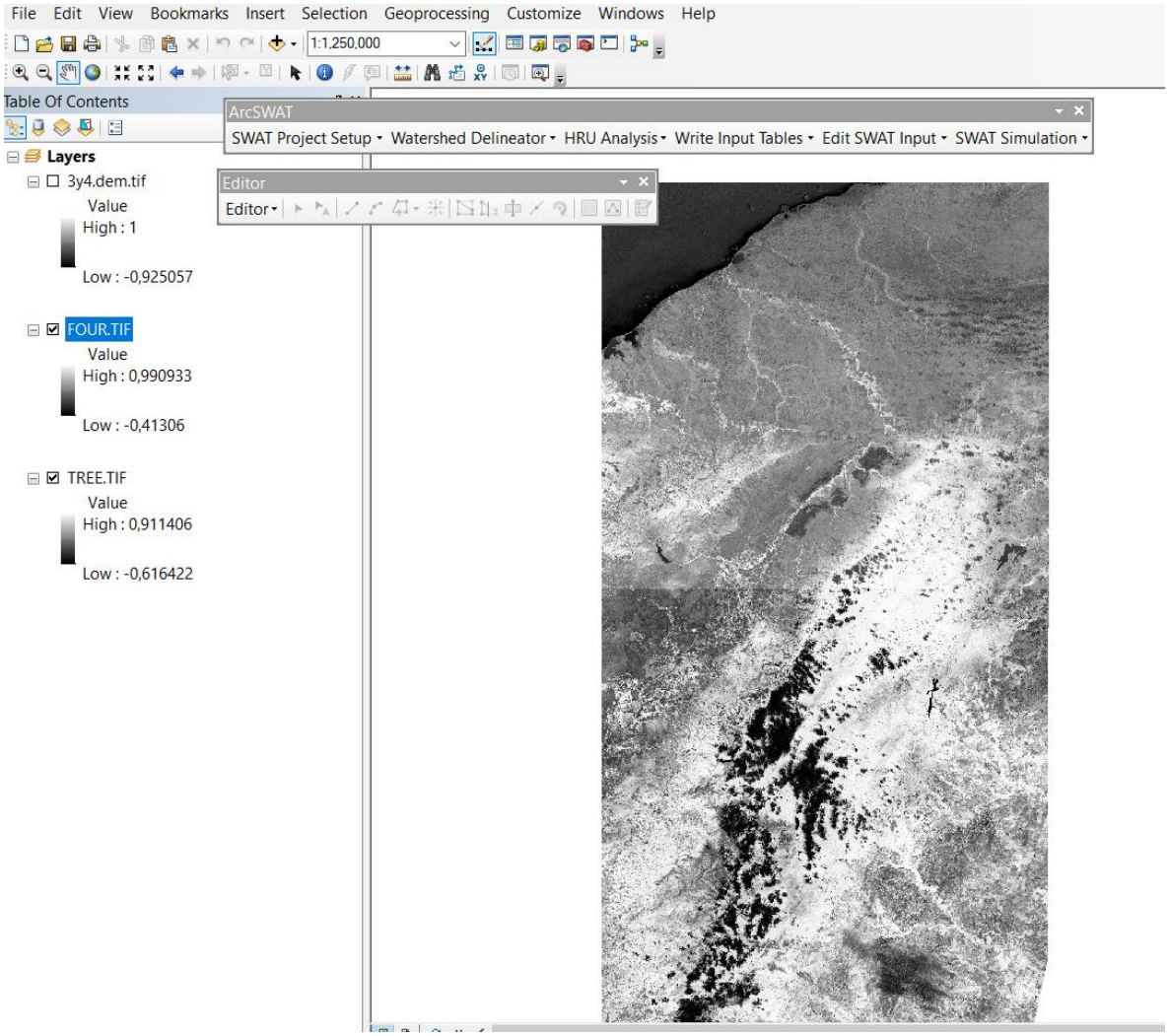


Fuente: Los Autores

Unión raster ndvi.tif

Para la unión de los NDVI en ArcGis se contempla el mismo procedimiento descrito en la figura 20 una vez agregadas las capas en el ArcGis.

Figura 27. NDVI en ArcGis

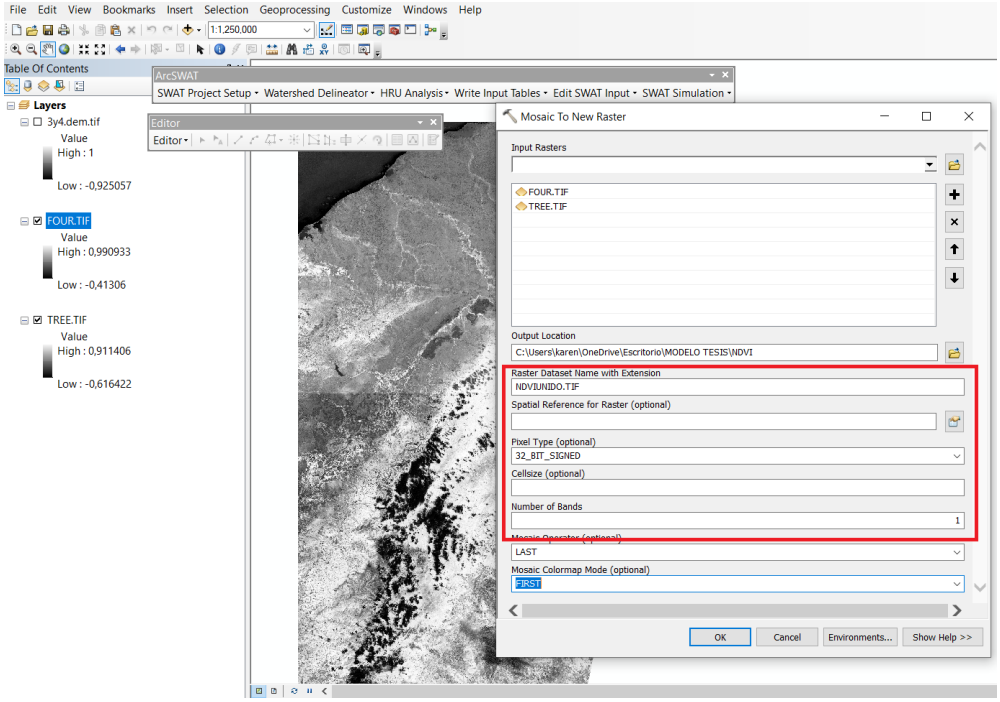


Fuente: Los Autores

Se configura y realiza la unión con Mosaic To New Raster, pero esta vez con los parámetros indicados en la figura28 En Pixel Type se asigna 32_BIT_SIGNED pues son los píxeles con los que vienen los NDVI; en número de bandas se deja 1.

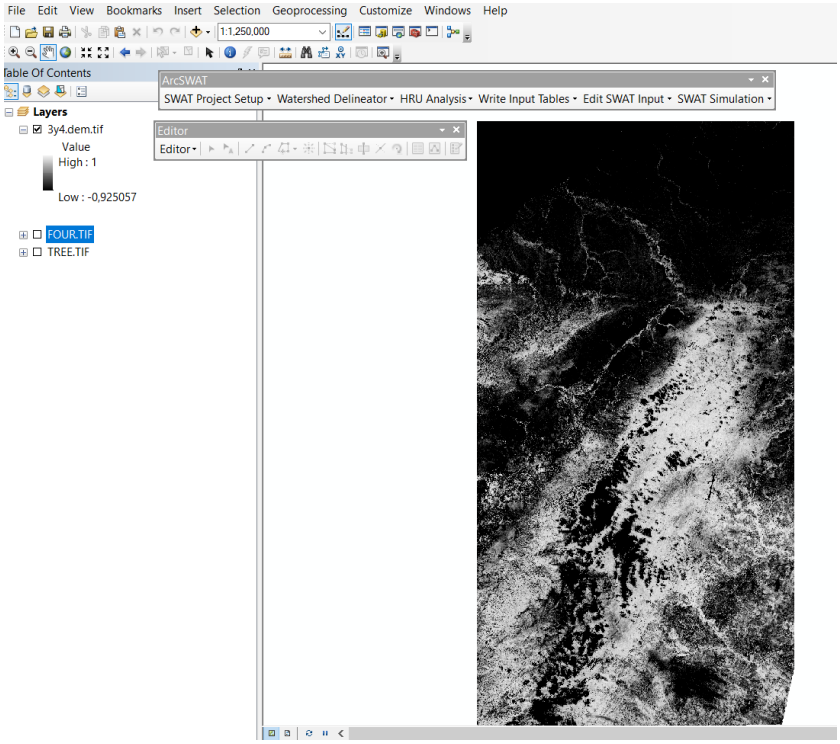
De esta manera queda unido el archivo de cobertura vegetal para el área de trabajo y se debe ver como en la figura 29.

Figura 28. Unión NDVI.TIF



Fuente: Los Autores

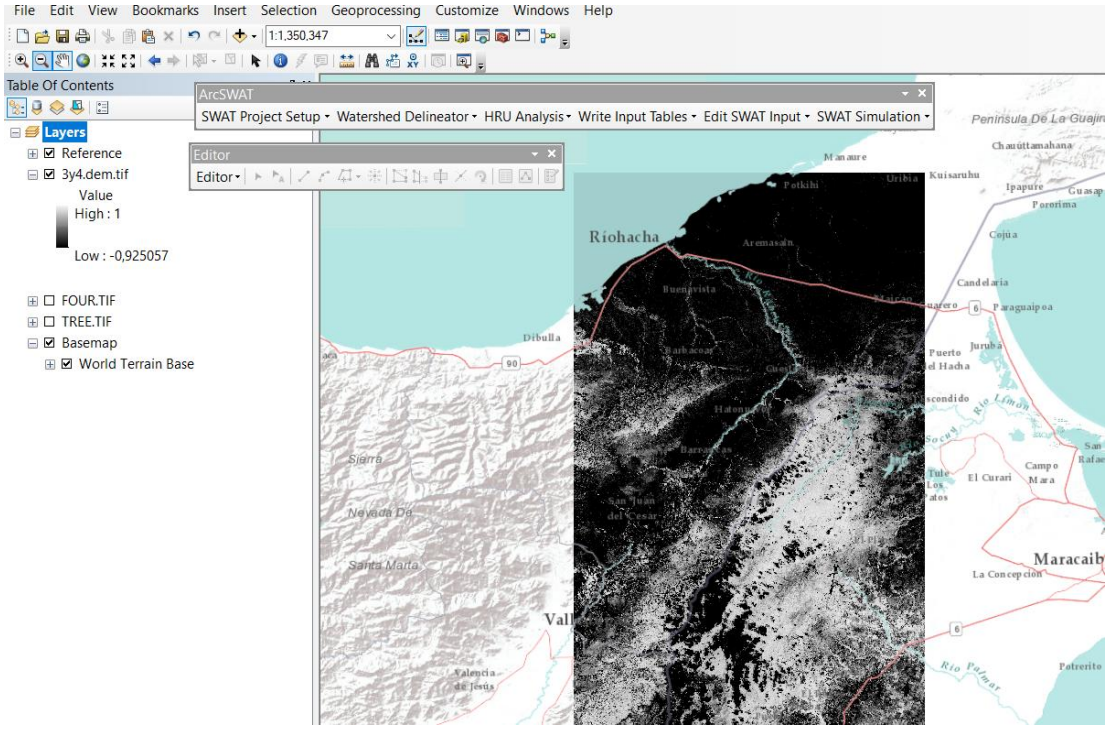
Figura 29. NDVI Base del modelo



Fuente: Los Autores

Es opcional poner un mapa base para contemplar la ubicación del área que corresponde a las capas agregadas si se quiere, se puede buscar en ArcGis Online o En Add Basemap, una capa de guía. En este proyecto se utilizó solo un mapa de base mientras se hizo la obtención de data.

Figura 30. Opción Mapa base

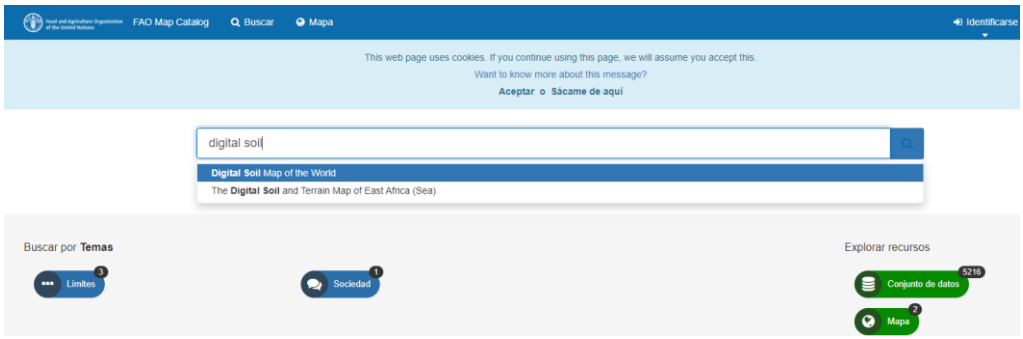


Fuente: Los Autores

Uso de suelos FAO

Para la identificación del recurso suelo, se hace necesario descargar la capa de usos del suelo de FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) Se descarga mediante la página web [34].

Figura 31. Búsqueda Mapa Digital De Suelos Mundial



Fuente: Los Autores

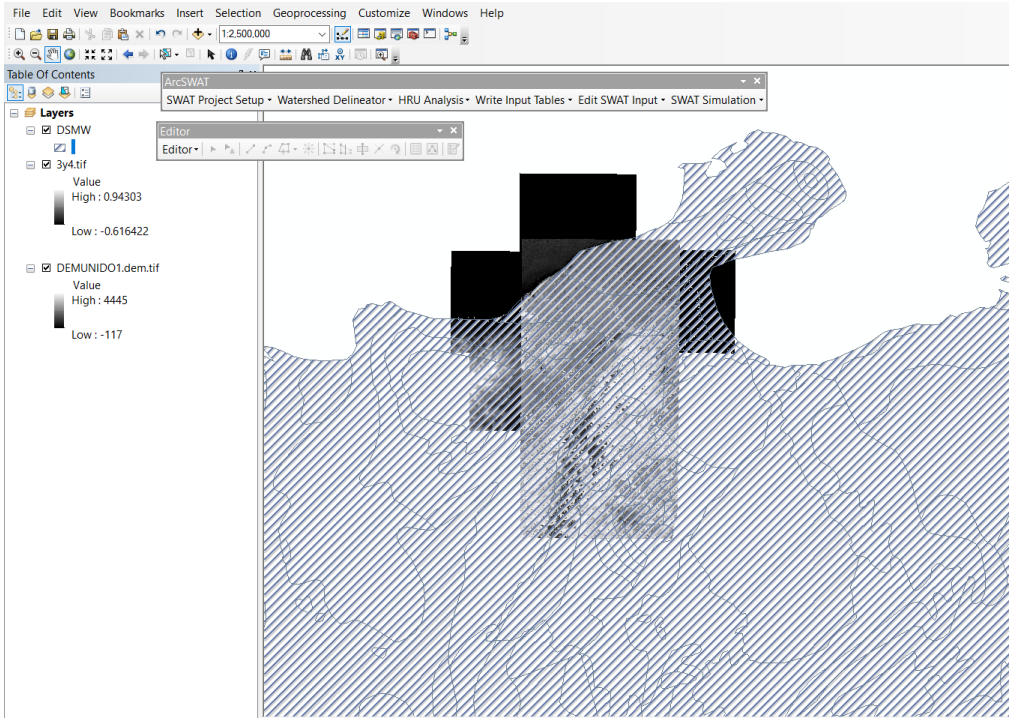
El mapa digital se descarga en formato Shapefile y se procede a introducirlo en ArcGis.

Figura 32. Descarga Mapa Digital De Suelos Mundial

Fuente: Los Autores

Se realiza la escala del Shape, pues se encuentra en unidades diferentes a comparación con las demás capas. Una vez se encuentra en la ubicación correcta se puede usar para el modelo.

Figura 33. Capa Uso de Suelos DSMW

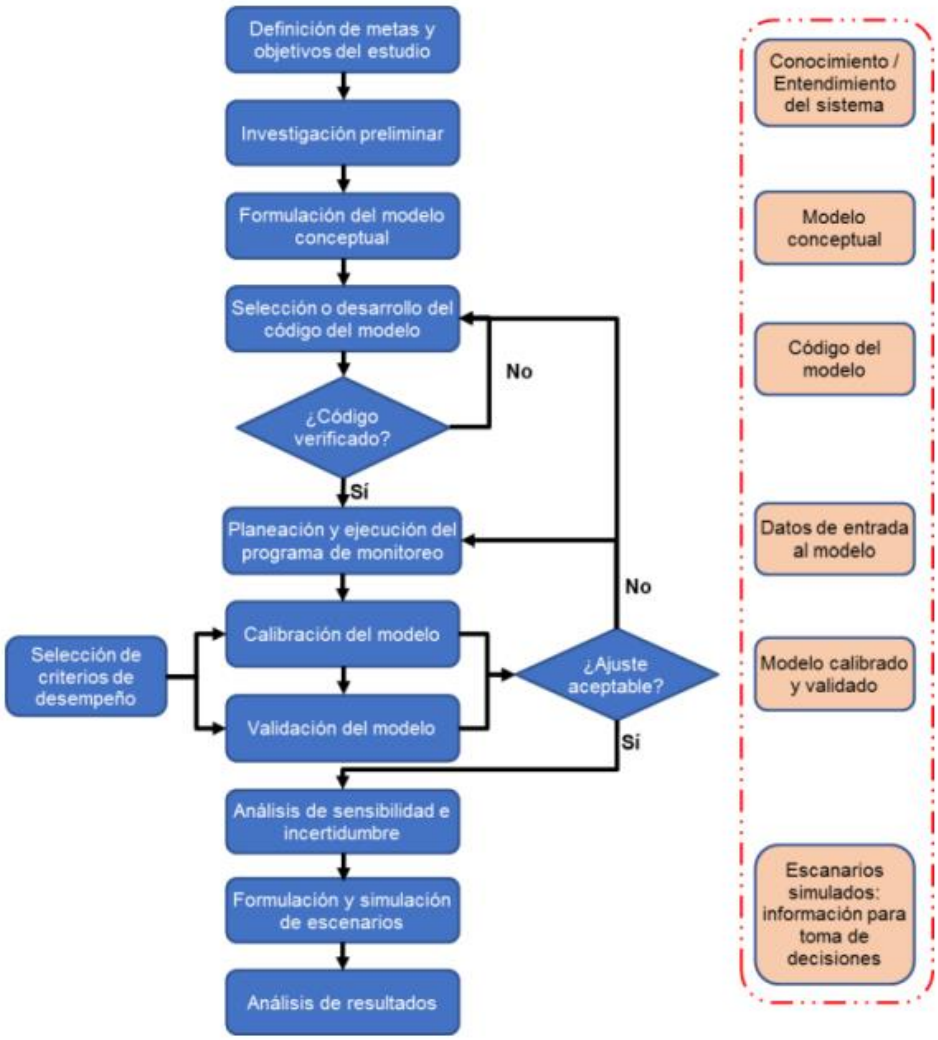


Fuente: Los Autores

8.3 MODELO HIDROLOGICO

Se tienen en cuenta aspectos generales del protocolo de modelación adaptado a la guía nacional de modelación [26] indicando los aspectos generales de modelación de calidad de agua de manera efectiva como se puede ver en la figura 34, la cual se considera con diversidad de metodologías y particularidades del problema planteado; para este proyecto en particular se tiene como caso de estudio la minería expuesta en el recurso hídrico, entendiendo el modelo como un proceso continuo, el cual debe ser verificado periódicamente.

Figura 34. Protocolo de modelación de la calidad de agua



Fuente: A. Salazar, y C. Pineda, “Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales", Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, 2018

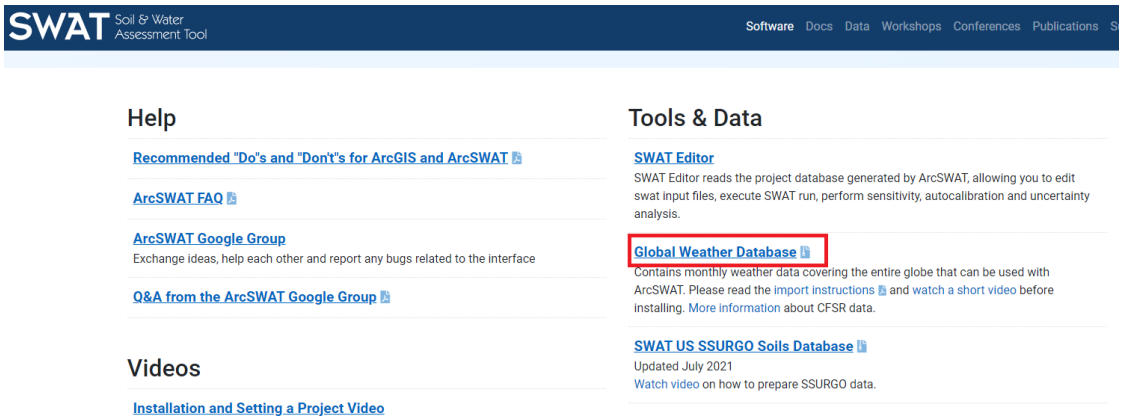
8.4 MODELO SWAT CUENCA RÍO RANCHERÍA

Se tendrán en cuenta los parámetros descritos a continuación que en el desarrollo del modelo serán usados de conformidad a lo requerido en el proceso.

8.4.1 Motor Climático

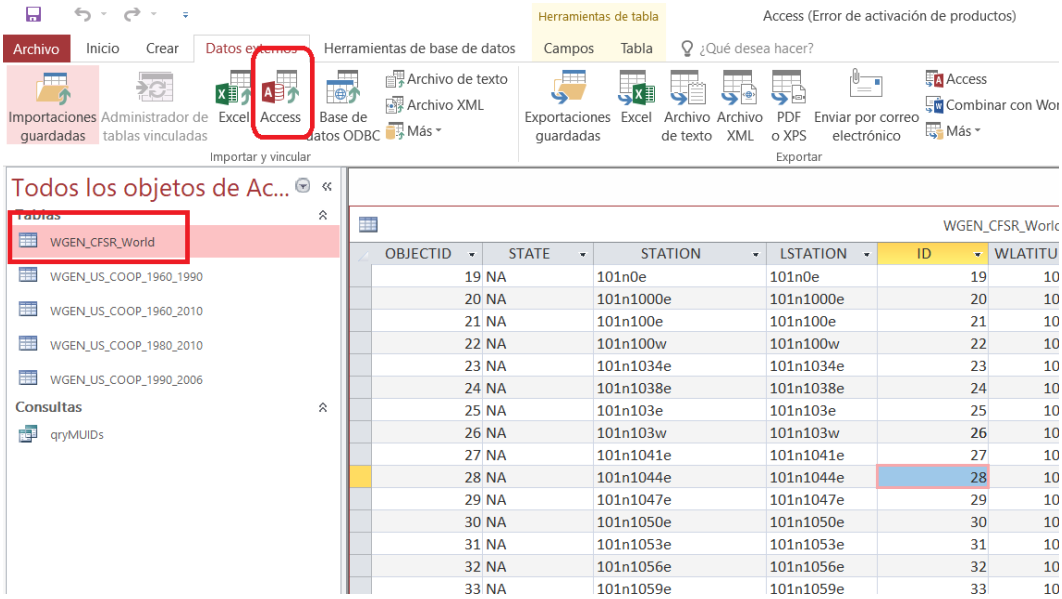
El motor climático se descarga de la página web de SWAT figura 35 en (Global Weather Database), se instala y el instructivo permite ver el proceso para importarlo.

Figura 35. Descarga motor climático



Fuente: Los Autores

Figura 36. Motor climático (WGEN CFSR World)



Fuente: Los Autores

8.4.2 Uso de suelos (Usersoil)

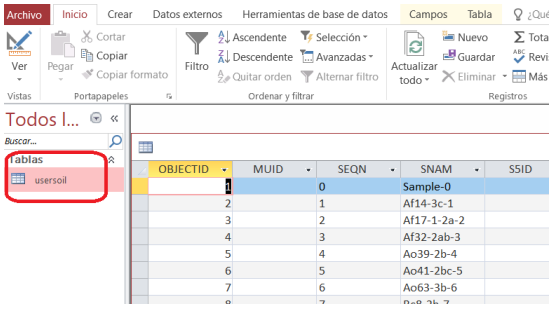
Se descarga el plugin de uso de suelos, quien tiene los datos base mundiales y que será de apoyo para el modelo en usos del suelo FAO. Una vez descargado se abre el archivo en Acces y se borran los demás elementos que no sean (usersoil). Se guarda el archivo con ese nombre en un lugar de fácil acceso.

Figura 37. Descarga plugin uso de suelo

Fuente: Los Autores

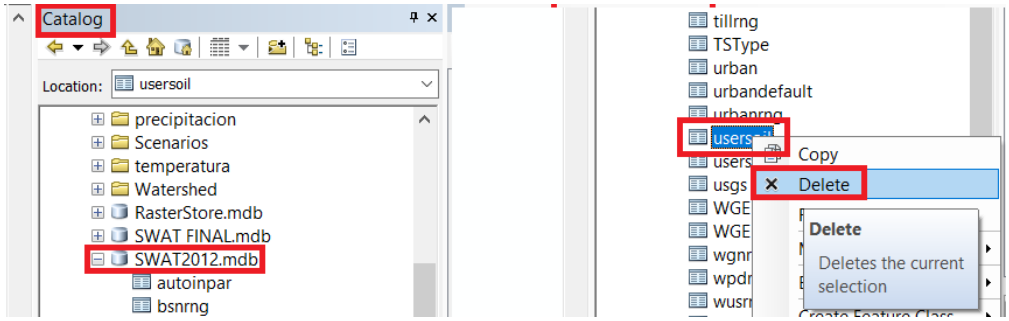
En el catálogo se busca el archivo que se está trabajando y el Usersoil que aparece por defecto el cual es necesario borrar ya que pertenece a los suelos de Estados Unidos. Se reemplaza por el creado en el paso anterior con la herramienta Table to Table.

Figura 38. SWAT plugin uso del suelo



Fuente: Los Autores

Figura 39 Eliminar Usersoil por defecto

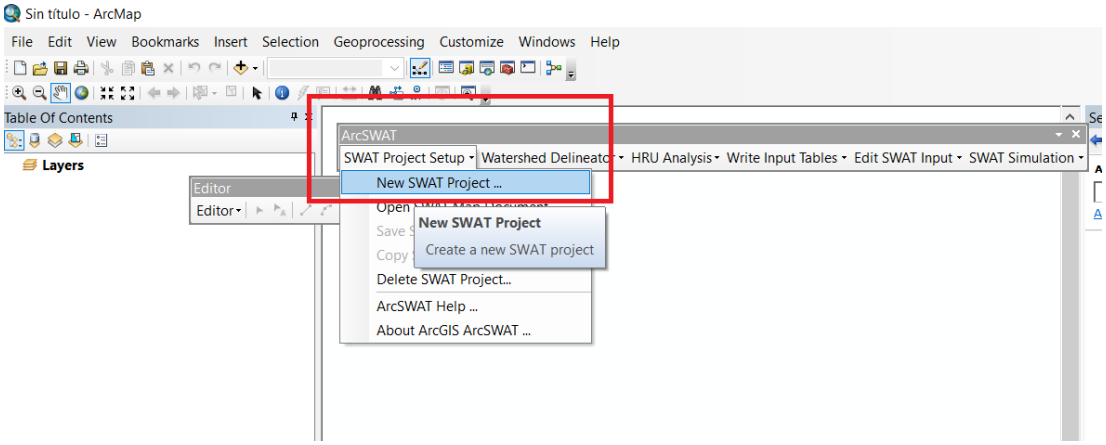


Fuente: Los Autores

8.4.3 Abrir SWAT (Open SWAT)

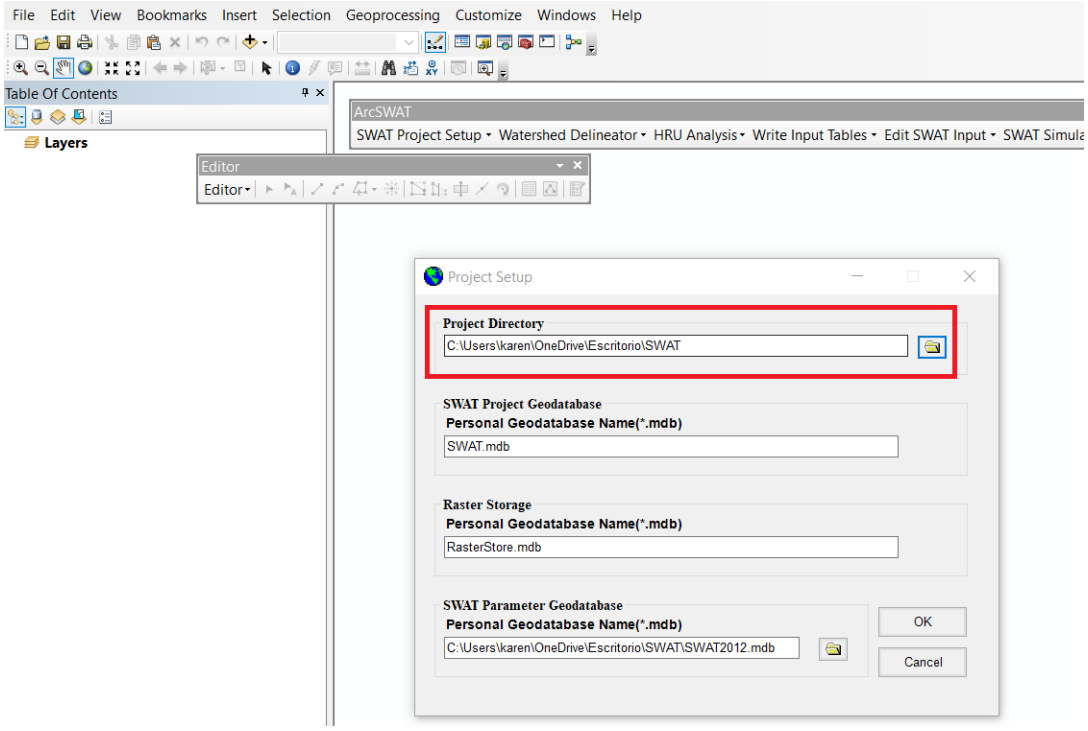
Al iniciar el modelo de SWAT es necesario generar un New SWAT Project, como se puede ver en la figura 40 y guardar el proyecto en una carpeta aparte donde se van a organizar los archivos. Se escoge la carpeta de destino en donde se guardará el archivo de trabajo. Ver figura 41.

Figura 40. Nuevo proyecto SWAT (New SWAT Project)



Fuente: Los Autores

Figura 41. Configuración proyecto (Project Setup)

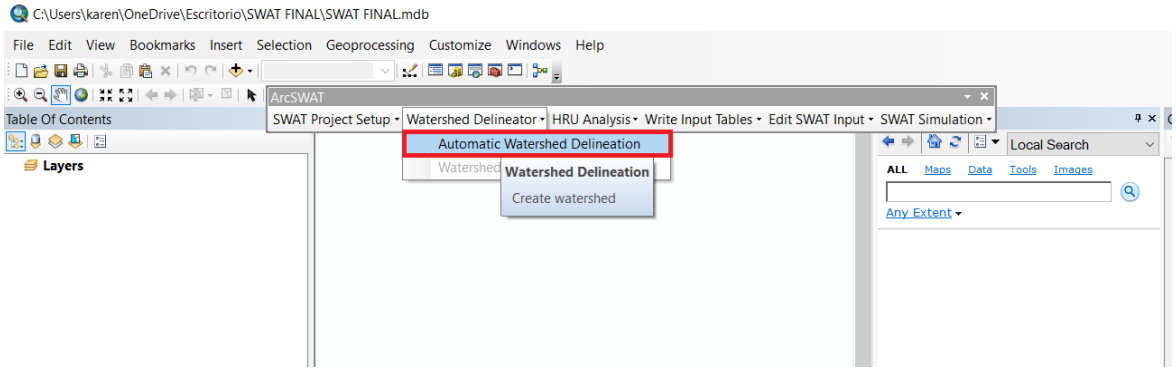


Fuente: Los Autores

8.4.4 Delineación de cuenca hidrográfica (Watershed Delineation)

Una vez guardado el archivo se realiza el proceso de Watershed Delineation en donde se hará el delineamiento de la cuenca, cálculo del área, ubicación del punto de salida, cálculo de corrientes y subcuencas.

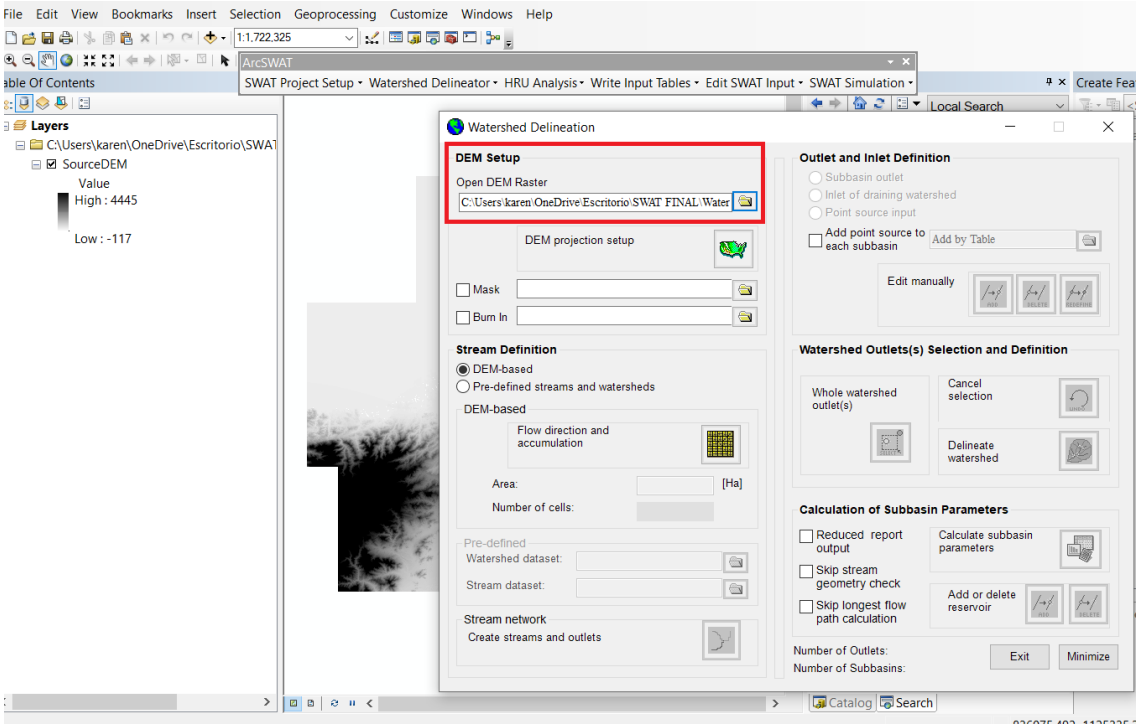
Figura 42. Delineación automática de cuenca (Automatic Watershed Delineation)



Fuente: Los Autores

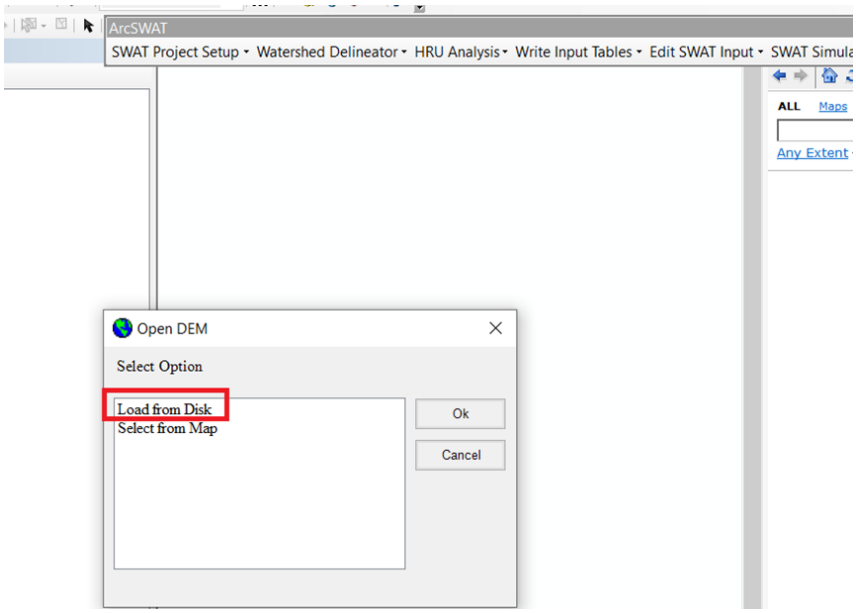
Configuración DEM (DEM SETUP)

Figura 43. Configuración DEM (DEM Setup)



Fuente: Los Autores

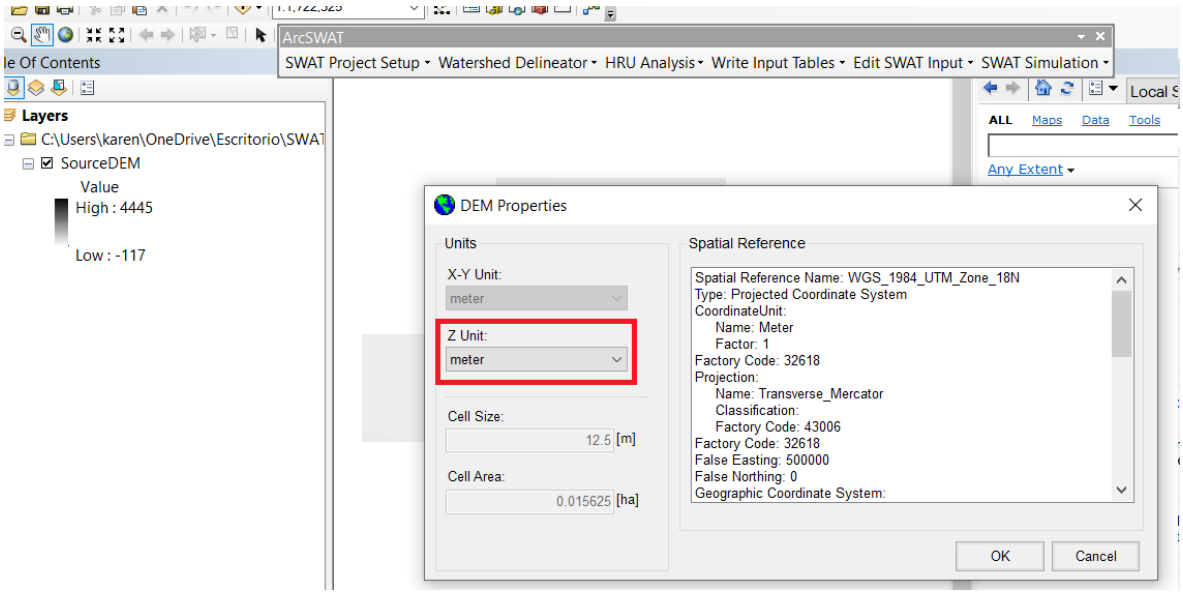
Figura 44. Abrir SWAT (Open DEM)



Fuente: Los Autores

Se selecciona la carpeta donde se encuentra el archivo DEM y se carga la información como se ve en la figura 43 → Load from Disk. Luego se verifica que las unidades a trabajar estén en metros como se ve en la figura 45 al seleccionar el icono de DEM Projection Setup. Si el Proceso presenta errores, es necesario cambiar el DEM.

Figura 45. Configuración de proyección DEM (DEM Projection Setup)

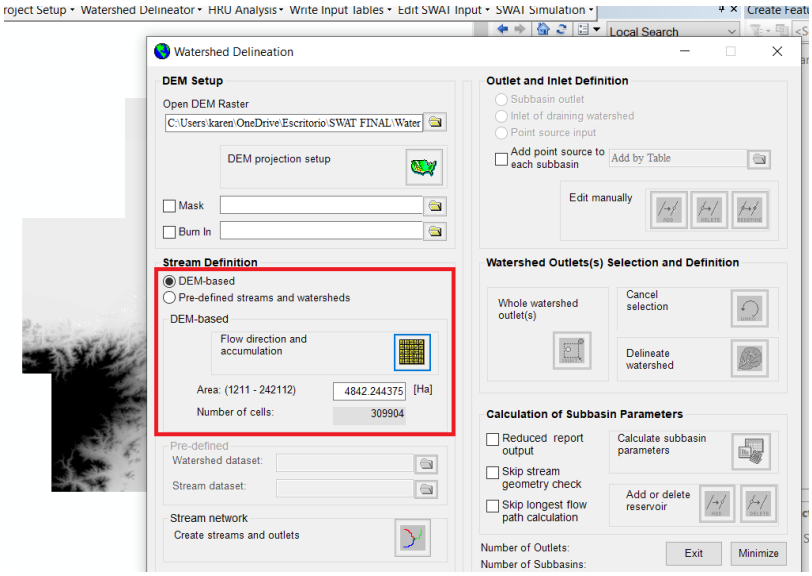


Fuente: Los Autores

Definición de flujo (STREAM DEFINITION)

En este paso se calcula el (Flow direction and Flow Accumulation) y se halla el valor del área total del DEM calculada en 4842.24 Ha y el número de celdas 309904.

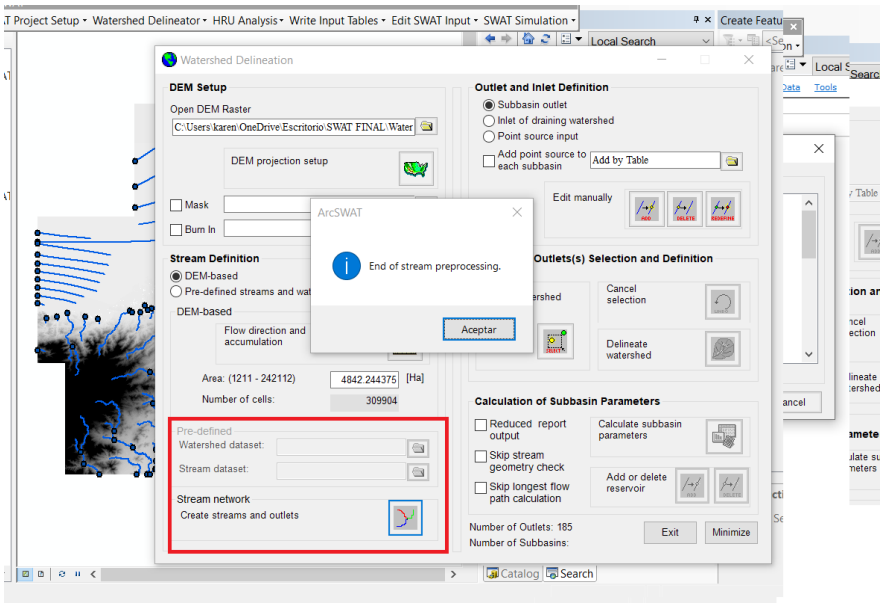
Figura 46. Cálculo de área



Fuente: Los Autores

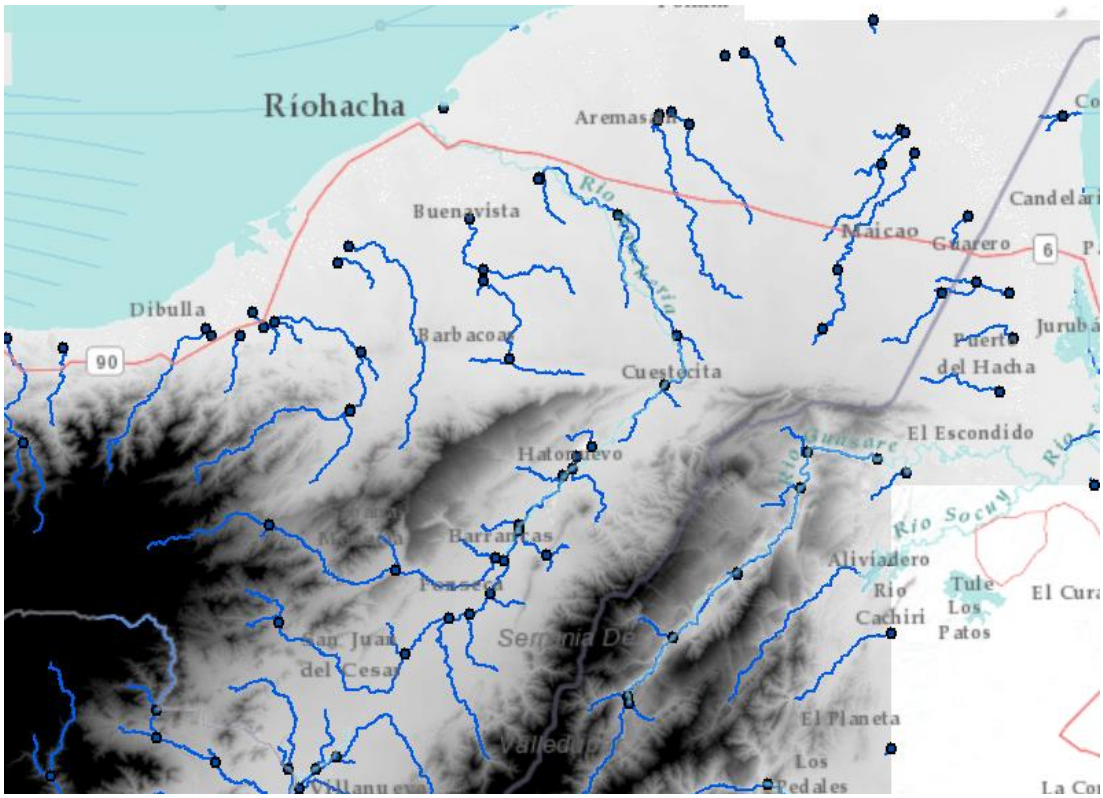
Seguido se crean las corrientes del área de estudio para la delimitación de la cuenca. Las corrientes se muestran en la figura 48.

Figura 47. Cálculo de corrientes



Fuente: Los Autores

Figura 48. Corrientes Río Ranchería



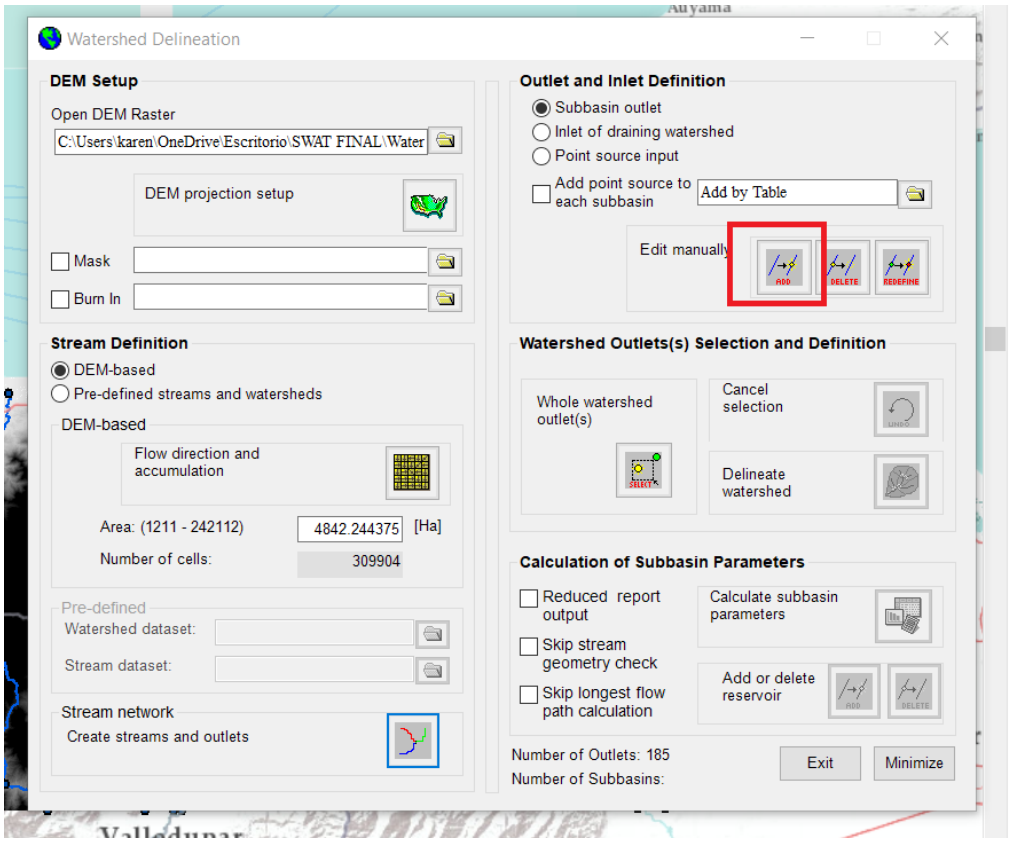
Fuente: Los Autores

Es importante aclarar en este paso como se ve en la figura 48 las corrientes sobre el Río Ranchería están dispersas, no fue posible abarcar la totalidad lo que se tenía planeado de la cuenca desde lo que sería San Juan del Cesar, por lo que el análisis se hará sobre la cuenca formada por las corrientes generadas Desde Hato nuevo y se presenta el modelo de la parte aguas abajo de la cuenca hacia Riohacha. El modelo de igual manera toma en cuenta que la minería está presente y si aplica para la zona de estudio.

Definición de salida y entrada (OUTLET AND INLET DEFINITION)

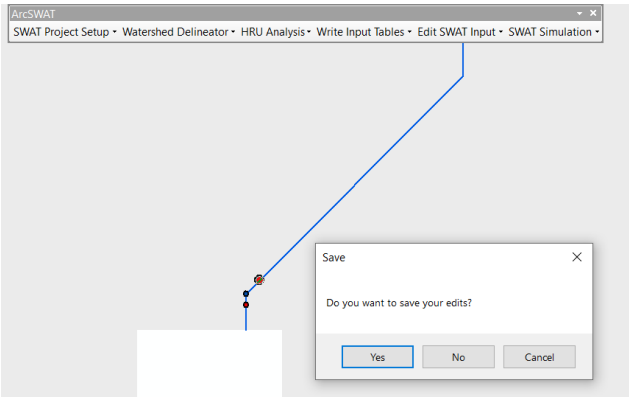
En este paso se selecciona el punto de salida de lo que será la cuenca a delimitar. Una vez se le da Stop Editing se desbloquea la opción de (Watershed Outlets Selection and Definition).

Figura 49. Agregar punto de salida



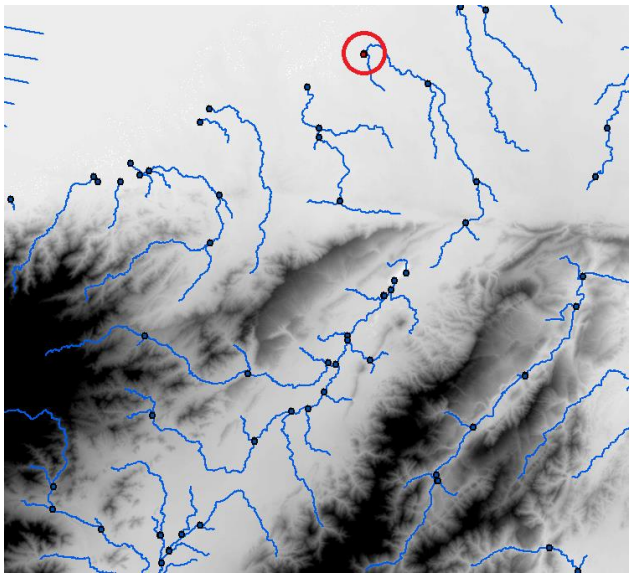
Fuente: Los Autores

Figura 50. Selección del punto de salida



Fuente: Los Autores

Figura 51. Punto de salida sobre el Río Ranchería

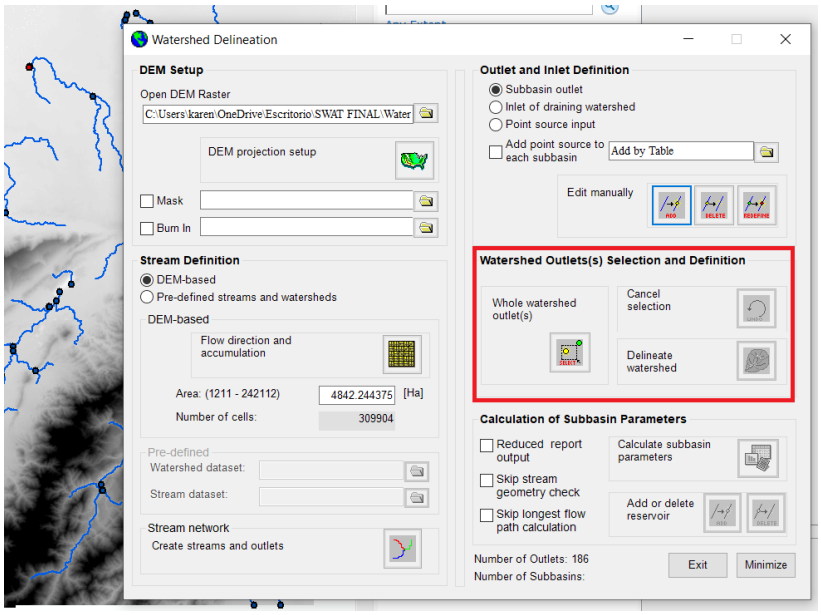


Fuente: Los Autores

Selección y definición de salida de las cuencas (WATERSHED OUTLETS SELECTION AND DEFINITION)

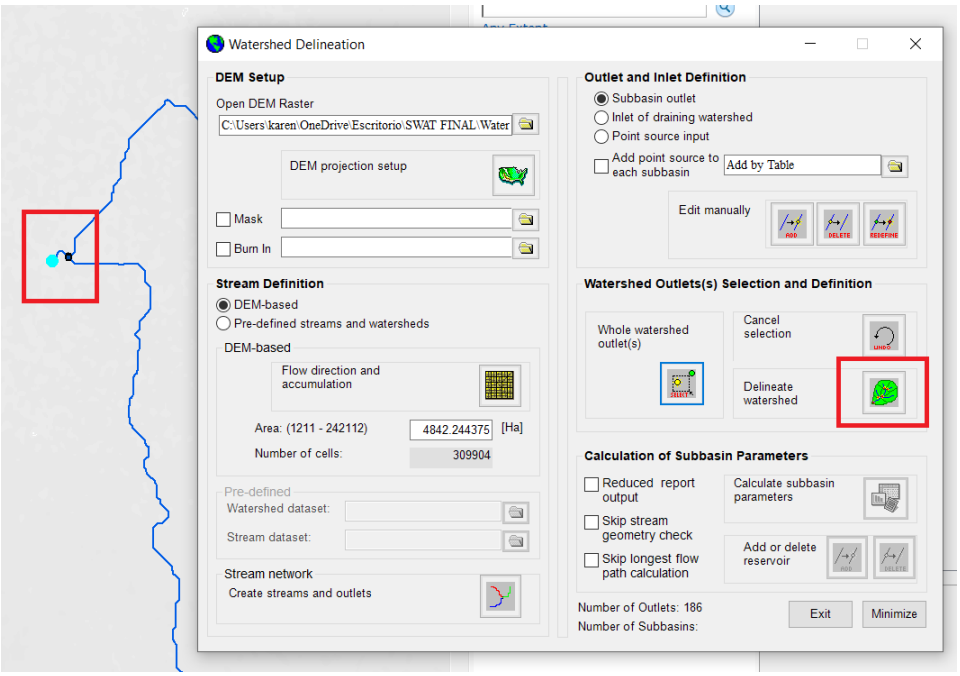
Una vez habilitada se selecciona en (Whole watershed outlets) el punto de salida escogido, después se procede a delinear la cuenca en (Delineate watershed).

Figura 52. Punto de salida a intervenir



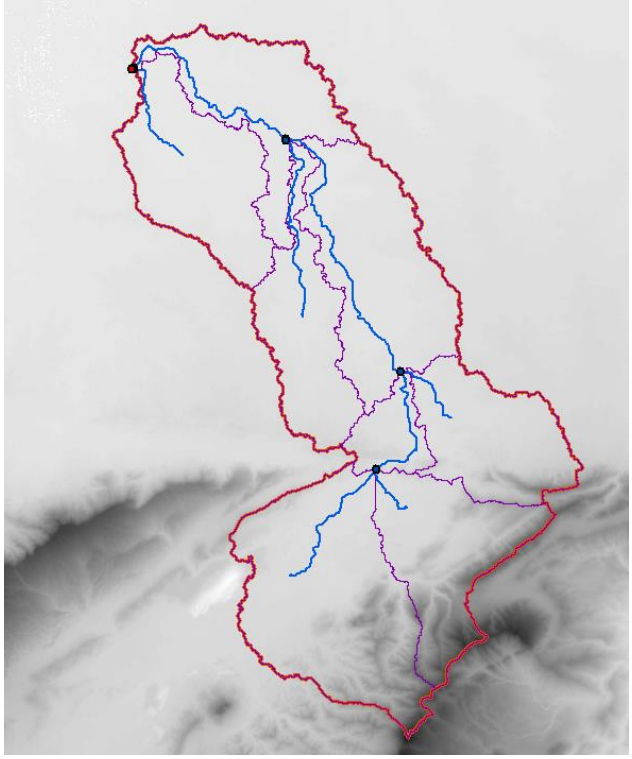
Fuente: Los Autores

Figura 53. Delinear cuenca



Fuente: Los Autores

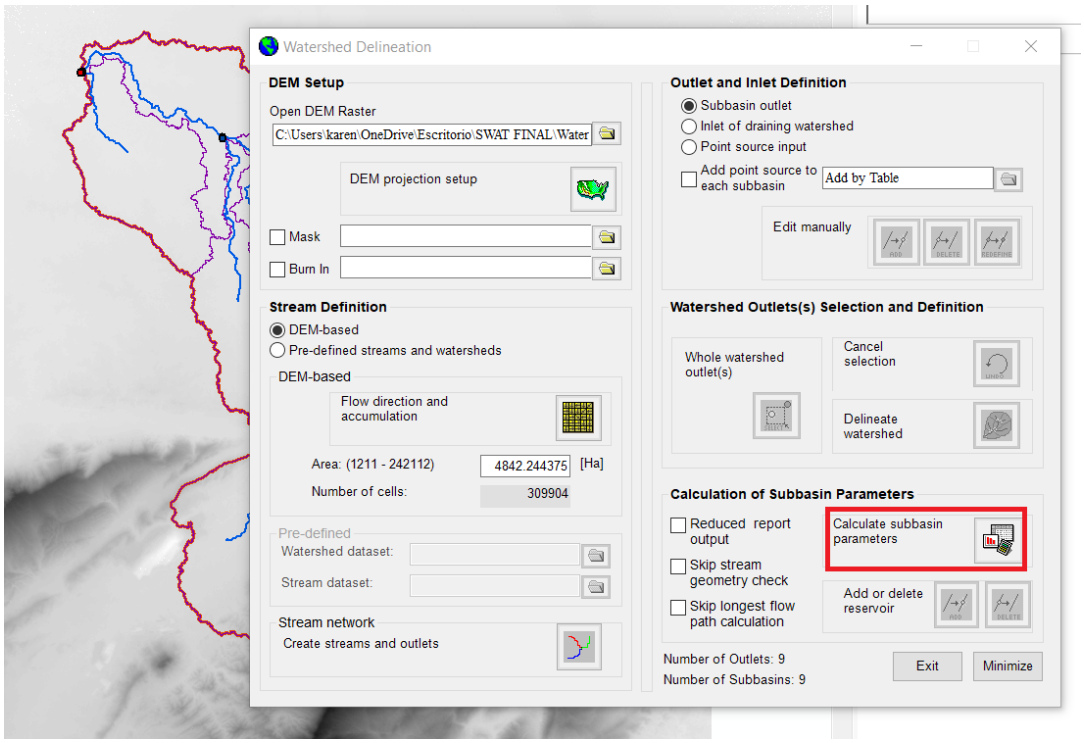
Figura 54. Delimitación Cuenca del Río Ranchería



Fuente: Los Autores

Cálculo de parámetros de subcuenca (CALCULATION OF SUBBASIN PARAMETERS)

Figura 55. Cálculo de las subcuencas



Fuente: Los Autores

Se calcula las subcuencas que en total son 9 y se dan valores en tablas representando la composición de cada una su, Uso de suelos, tipo de suelo y pendientes.

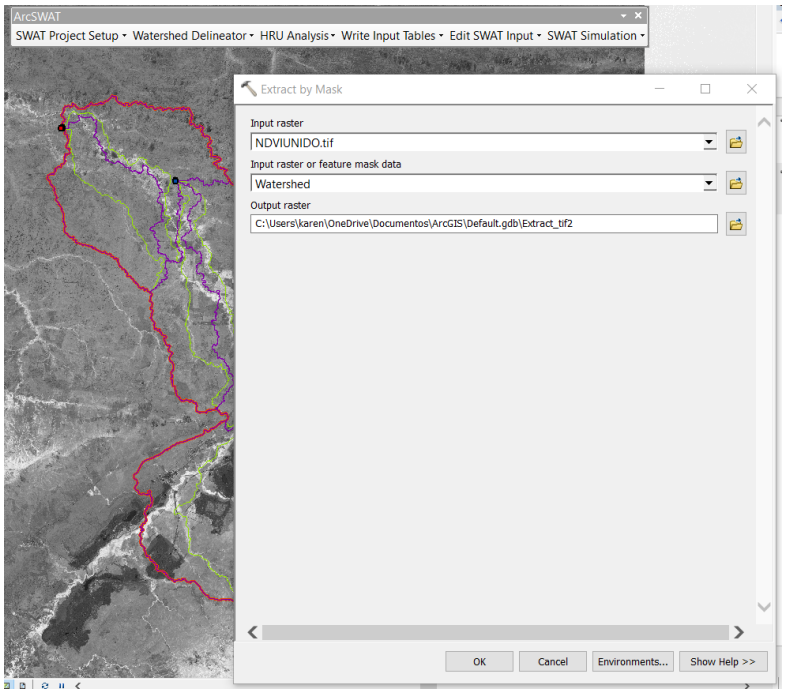
8.4.5 Análisis HRU (HRU Analysis)

Para el HRU Análisis es necesario ingresar las capas de NDVI, FAO, así como los datos extraídos de las estaciones del IDEAM como son: precipitación diaria total, temperatura mínima y máxima diaria.

Cobertura vegetal NDVI

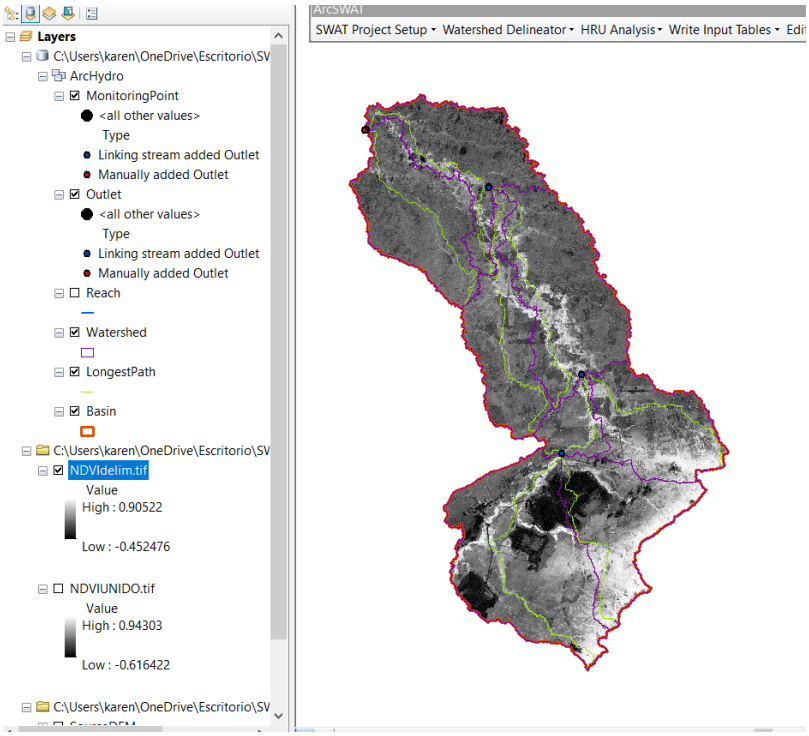
Se inserta la capa en el archivo SWAT, como ya se tiene la delimitación de la cuenca, se genera el recorte del raster para que solamente se tome la información de la cuenca, para esto se usa la herramienta Extract by Mask. Teniendo de referencia el límite de la cuenca (Watershed).

Figura 56. Extraer por mascara (Extract by Mask) - Cobertura vegetal NDVI



Fuente: Los Autores

Figura 57. Cobertura vegetal NDVI - Delimitada



Fuente: Los Autores

Es necesario clasificar la cobertura vegetal para el análisis SWAT de acuerdo a los códigos de la tabla 12 se toman valores intermedios dentro del rango de referencia.

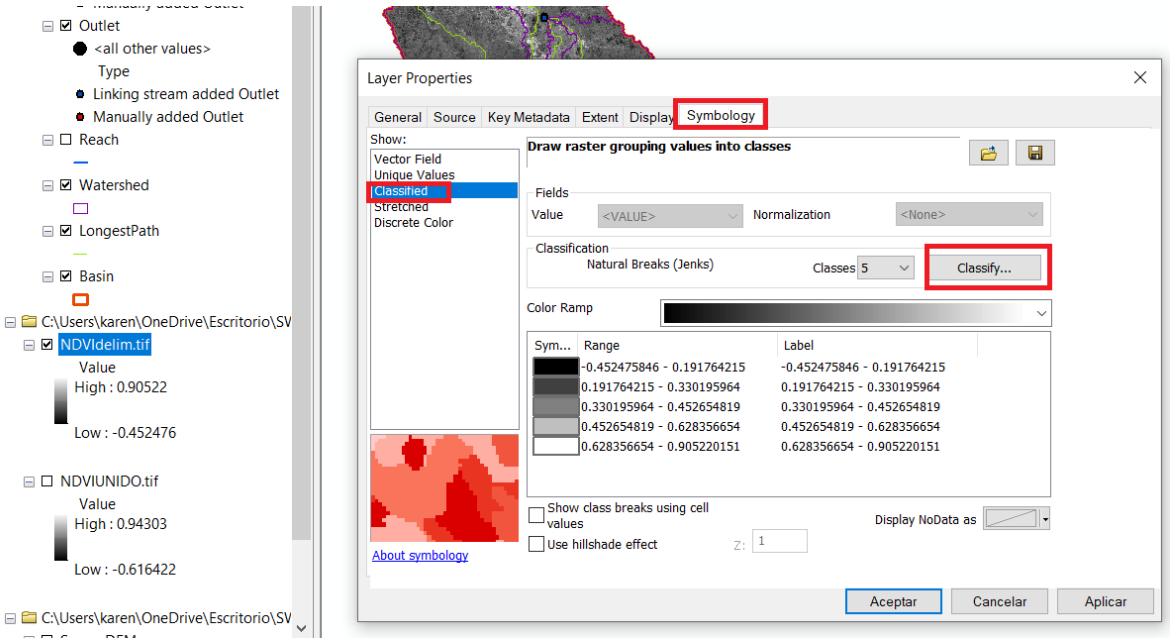
Tabla 12. Códigos SWAT cobertura vegetal

Valor SWAT	Código
-0.5 a 0.1	WATR
0.1 a 0.2	SWRN
0.2 a 0.4	RNGB
0.4 a 0.5	PAST
0.5 a 0.7	FRST
0.7 a 0.9	WELT

Fuente: Los Autores

Se abren las propiedades del raster NDVI delimitado y se procede a hacer la clasificación como se indica en la figura 58 se ingresa la pestaña de (classification), se eligen 6 Clases y se cambian los valores figura 59.

Figura 58. Propiedades NDVI Delimitado

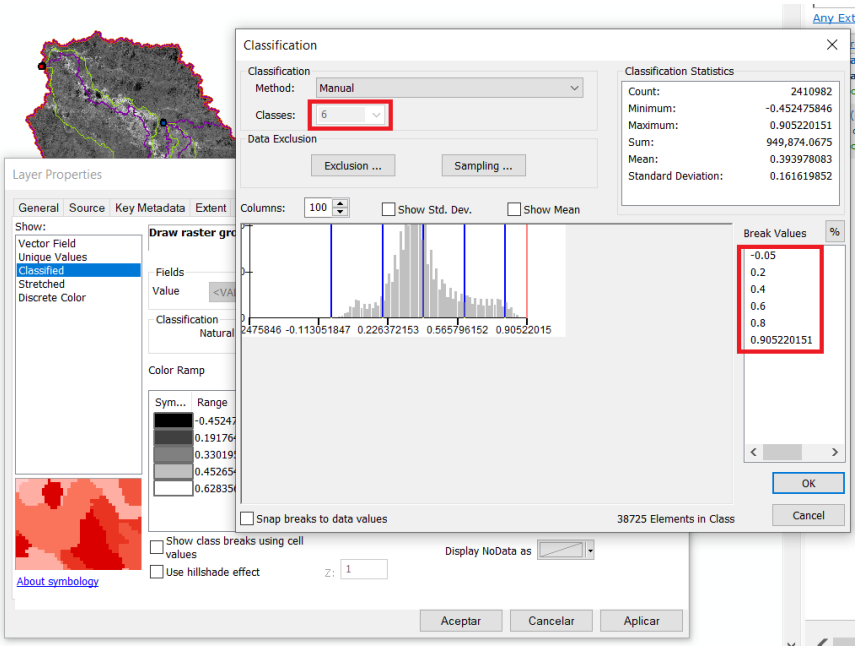


Fuente: Los Autores

Se presenta la clasificación de la cobertura vegetal en cuanto a los usos del suelo presentes, que pueden ser comparados de acuerdo a la tabla 13.

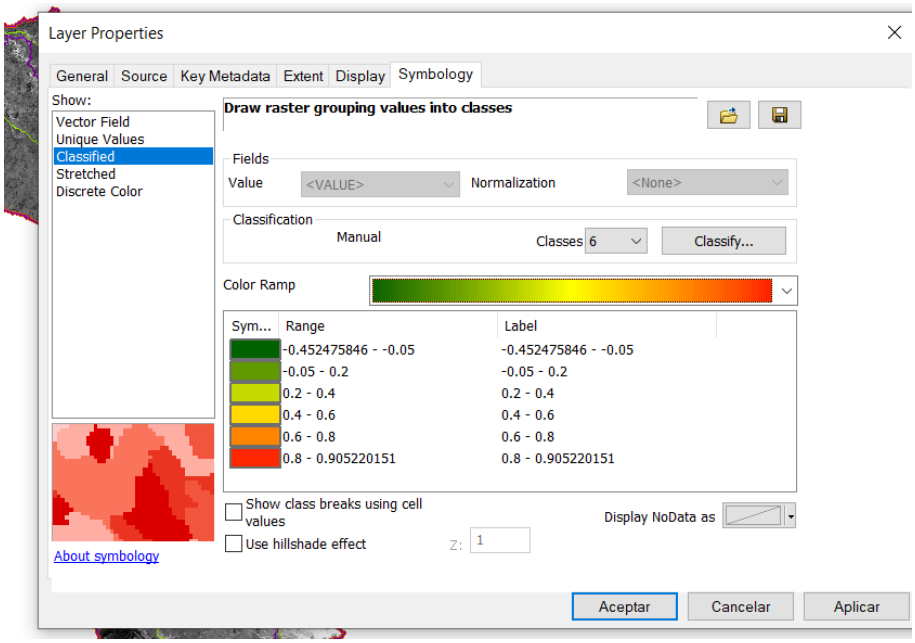
Paso seguido es necesario hacer la categorización de la cobertura vegetal, de acuerdo a la herramienta Reclassify (Ver figura 61) de acuerdo al rango de valores necesarios para SWAT.

Figura 59. Clasificación Cobertura Vegetal



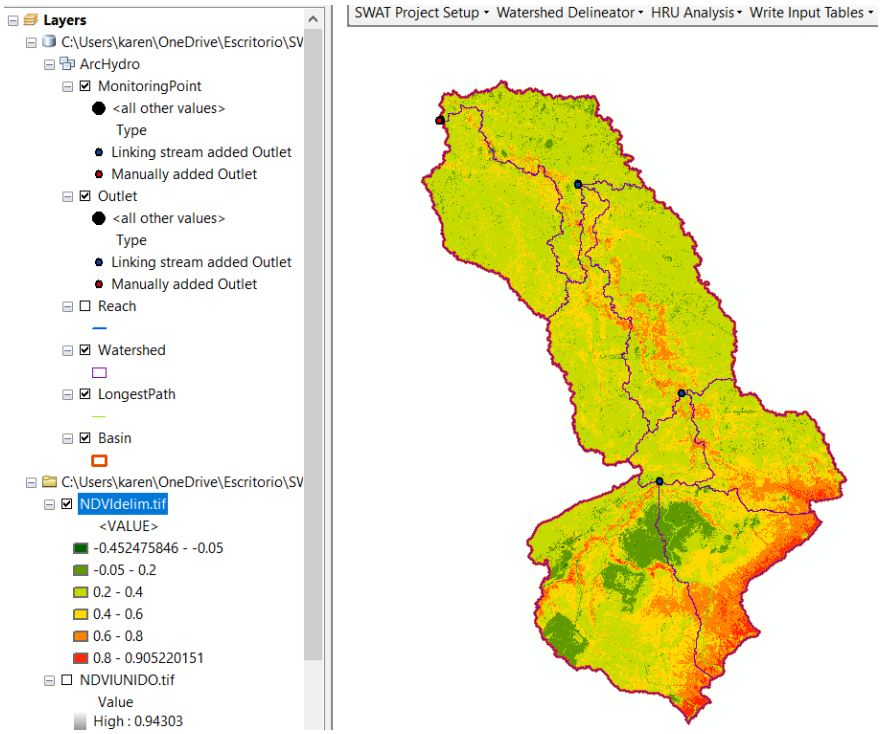
Fuente: Los Autores

Figura 60. Ingreso de códigos



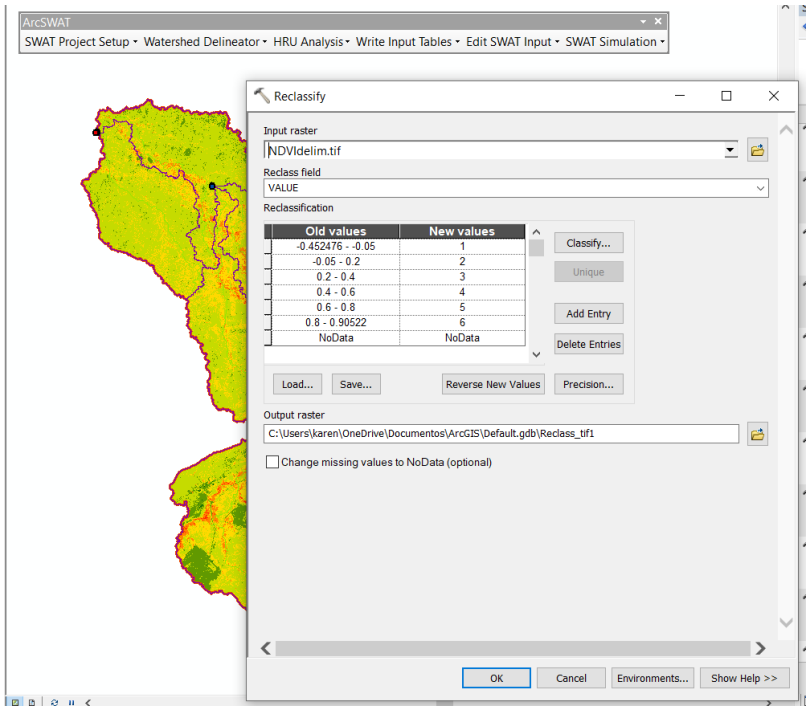
Fuente: Los Autores

Figura 61. Clasificación Cobertura Vegetal



Fuente: Los Autores

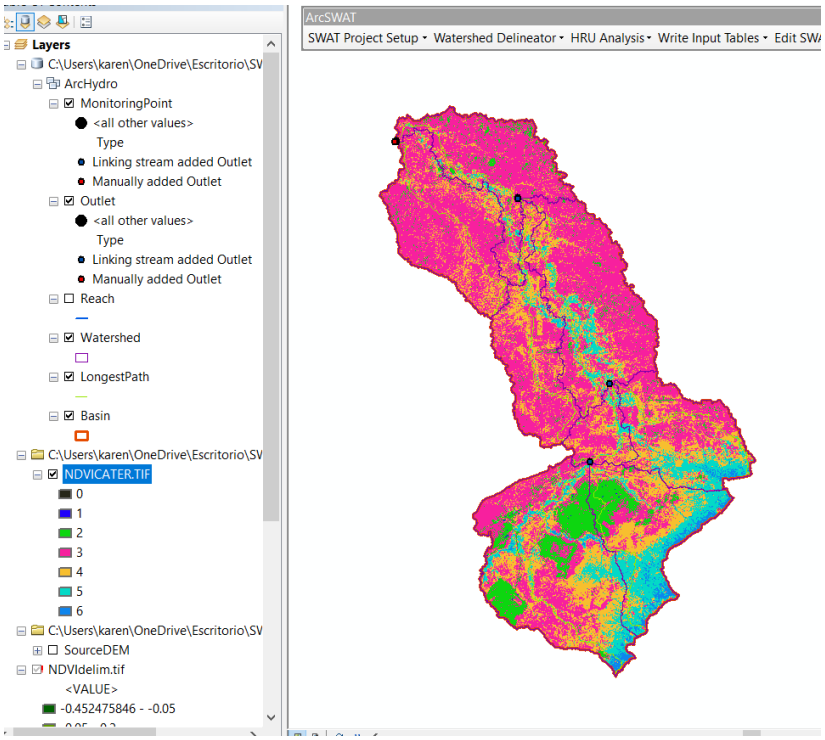
Figura 62. Cobertura vegetal NDVI – Reclasificado (Reclassify)



Fuente: Los Autores

Cada número de 1 al 6 representan un valor para SWAT de acuerdo a la clasificación de la tabla 13. Se presenta la cobertura vegetal categorizada.

Figura 63. Cobertura vegetal NDVI - Categorizado



Fuente: Los Autores

Tabla 13. Nomenclatura cobertura vegetal

Valor	Uso del suelo	Concepto
1	WTR	Agua
2	AGRL	Suelo agrícola genérico
3	RNGB	Range brush
4	PAST	Pasto
5	FRST	Bosque mixto
6	WELT	Humedales

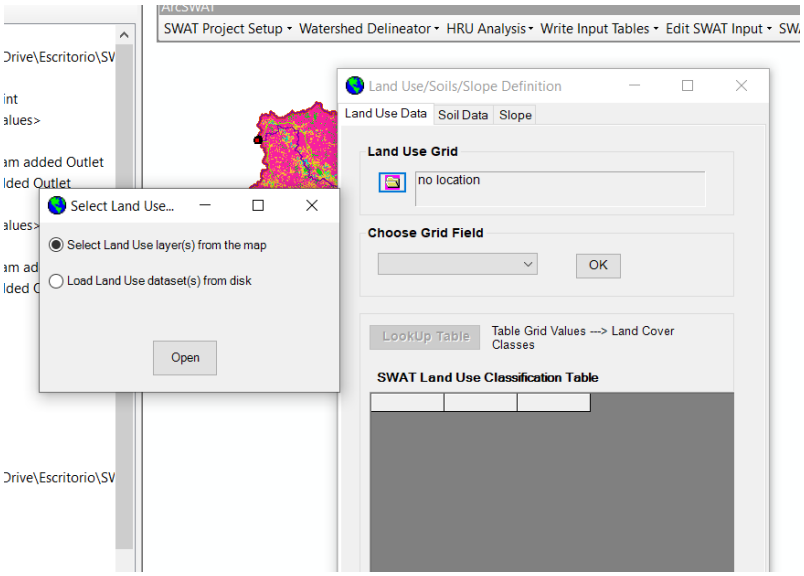
Fuente: Los Autores

Uso de suelos/Suelos/Definición de pendiente (LAND USE/SOILS/SLOPE DEFINITION)

En la pestaña de HRU Analysis se selecciona la opción de Land Use/Soils/Slope Definition, la cual se encuentra desbloqueada. La primera pestaña es Land Use Data en donde se agregará el NDVI Categorizado. Se carga el archivo y es

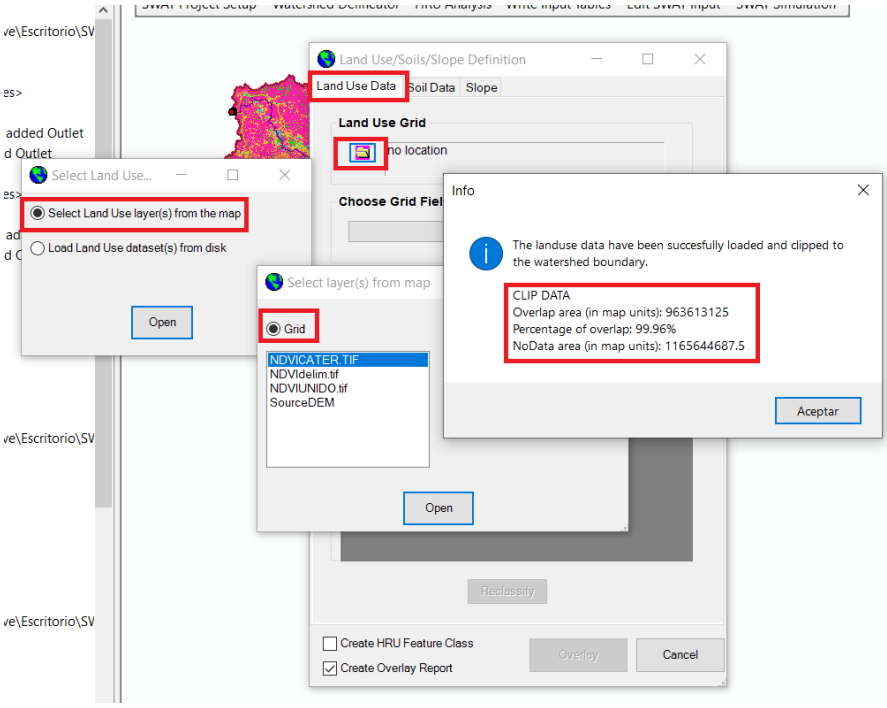
importante que la capa cubra la totalidad de la cuenca y en el resultado de 100% en este caso dio 99.96% muy aproximado al 100%.

Figura 64. Cuadricula Uso de suelo (Land Use Grid)



Fuente: Los Autores

Figura 65. Cargue de información datos uso de suelo (Land Use Data)

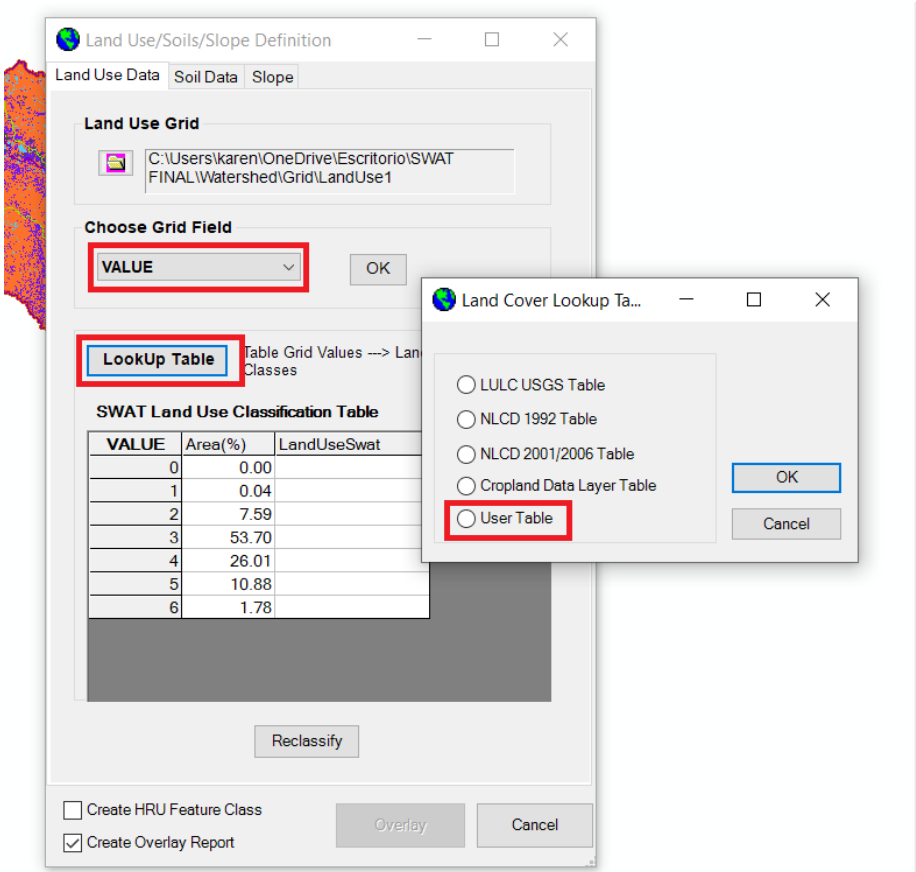


Fuente: Los Autores

Una vez guardada la carpeta, en Choose Grid Field se selecciona VALUE, mostrando los 6 componentes del suelo. Para parametrizar y reclasificar es necesario generar un archivo .txt, que será la base para que SWAT clasifique la cobertura del suelo de la cuenca y sus respectivos porcentajes.

En LookUp Table se selecciona la opción de User Table en donde se agregará la tabla con la clasificación que maneja SWAT, en la primera columna debe ir el valor "Value" seguido del uso del suelo "Landuse".

Figura 66. Tabla de consulta (LookUp Table)

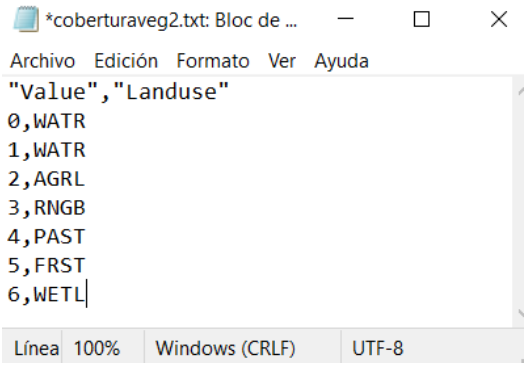


Fuente: Los Autores

Se aclara que el SWAT por lo general trabaja con valores desde 1, pero las capas incluidas en este proyecto arrojaron datos de 0, por lo cual se contemplaron como WATR y que en área no representan porcentaje importante.

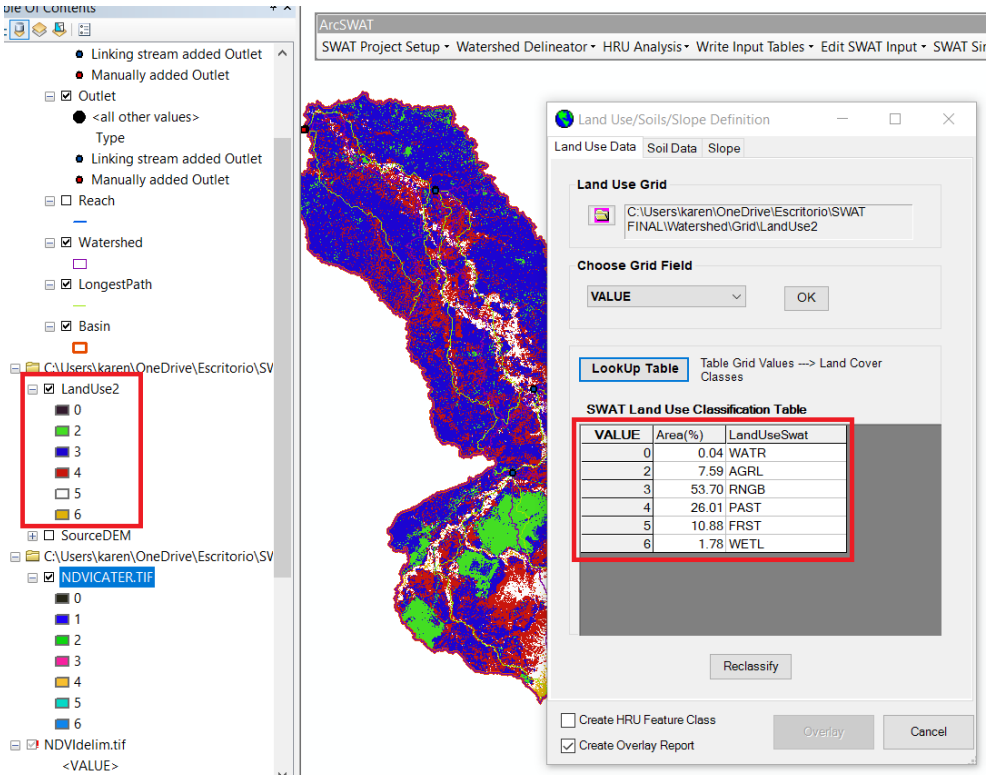
Se asignan los códigos correspondientes a cada área con su respectivo porcentaje y se realiza la reclasificación.

Figura 67. Códigos LandUseSwat



Fuente: Los Autores

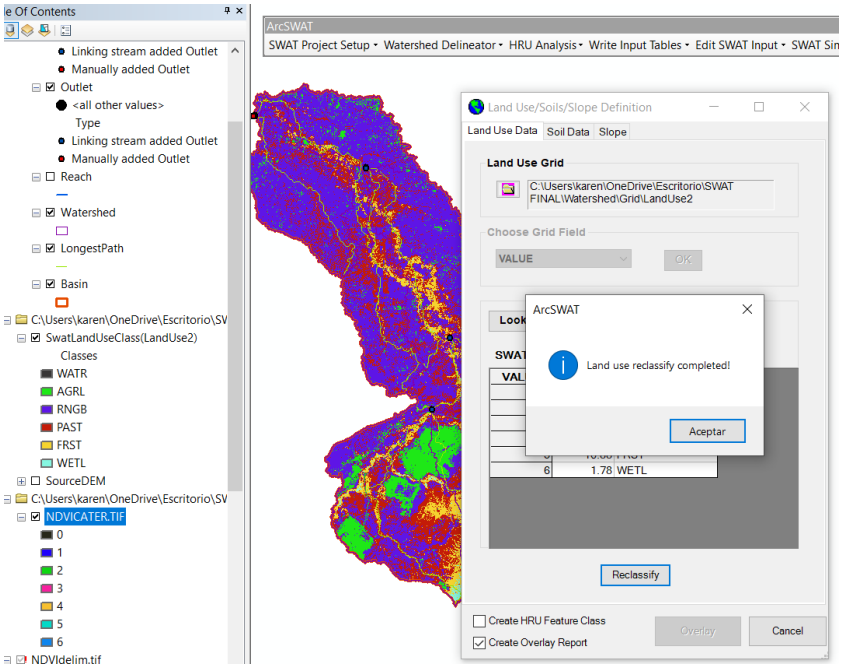
Figura 68. Reclasificación (Reclassify)



Fuente: Los Autores

En la figura 69 se observa como se ha creado la reclasificación con sus respectivos colores.

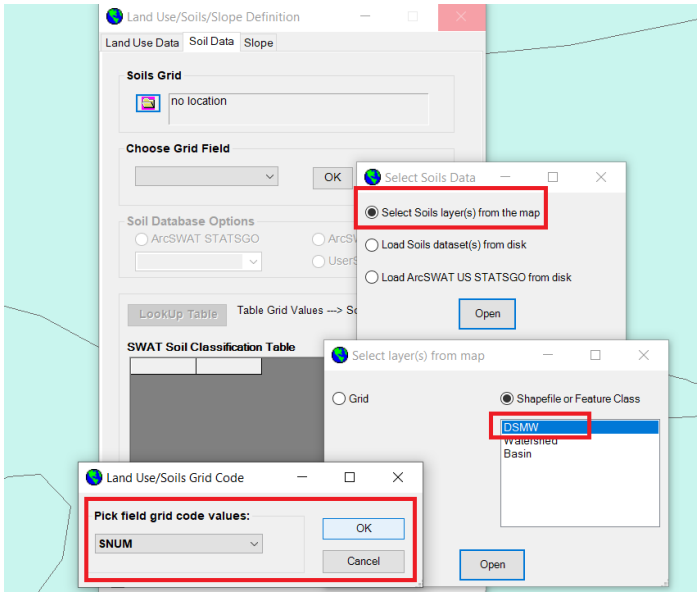
Figura 69. Reclasificación completada



Fuente: Los Autores

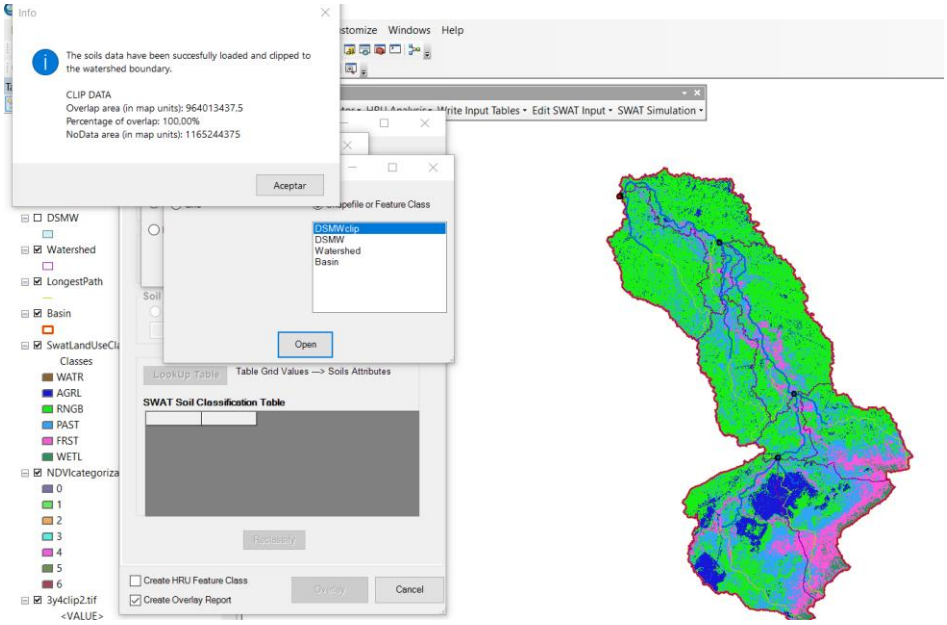
Ahora se ingresa a la pestaña de Soil Data en donde se agregará el uso de suelo FAO, seleccionando los valores que aparecen en la figura 70. Select Soils layer(s) from the map → Shapefile of Features Class → SNUM. Una vez cargado el Uso de suelo SWAT deberá arrojar un 100\% de superposición y se dará en aceptar.

Figura 70. Datos del suelo (Soil Data)



Fuente: Los Autores

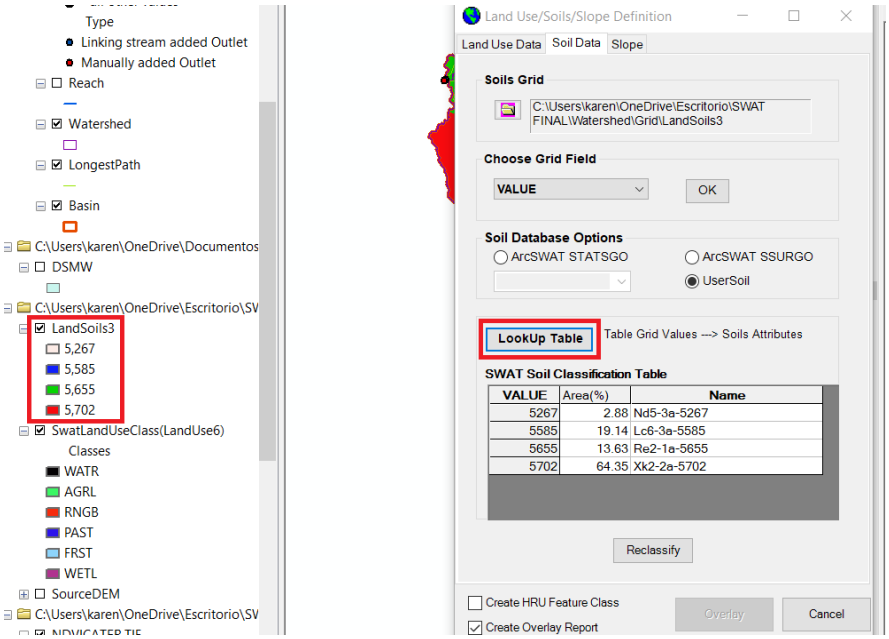
Figura 71. Cargue de FAO a datos del suelo (Soil Data)



Fuente: Los Autores

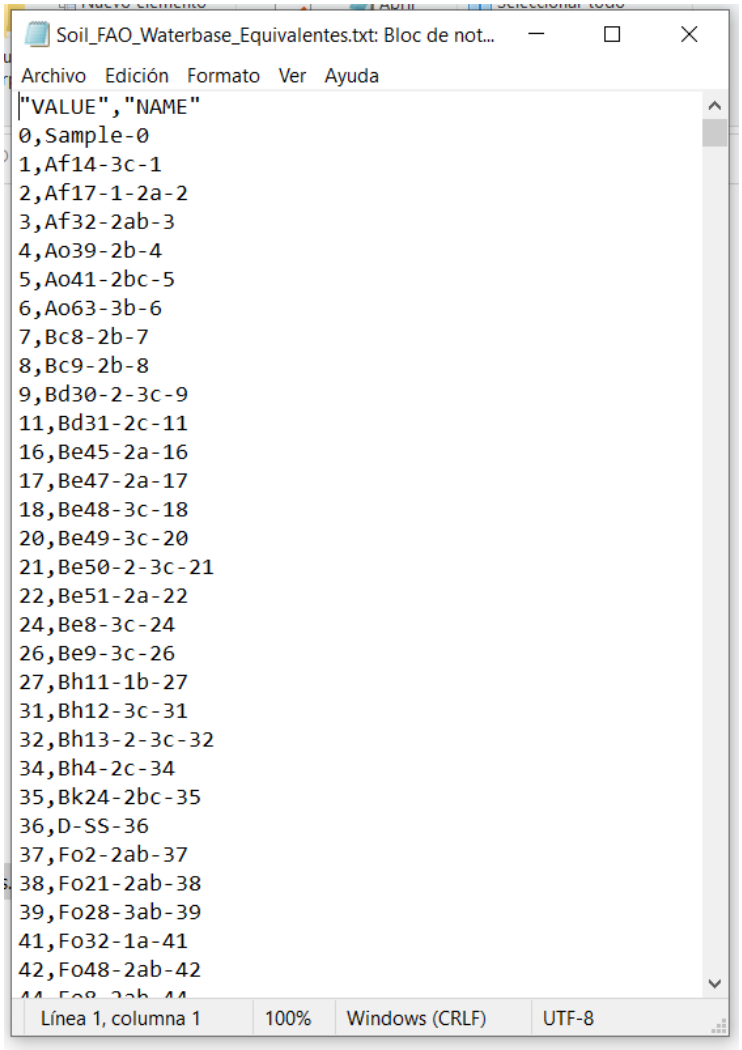
Una vez cargado el Uso de suelo se selecciona la opción de Usersoil paso generado en el instructivo visto en la figura 37 es necesario cargar la tabla de referencia en LooKUp Table, esta tabla también viene como archivo .txt (Soil_FAO_Waterbase_Equivalentes).

Figura 72. Tabla de consulta (LookUp Table)



Fuente: Los Autores

Figura 73. Equivalentes FAO



Fuente: Los Autores

Se realiza la reclasificación cuando se tienen montados los parámetros de uso de suelo con sus respectivos valores y porcentaje de área.

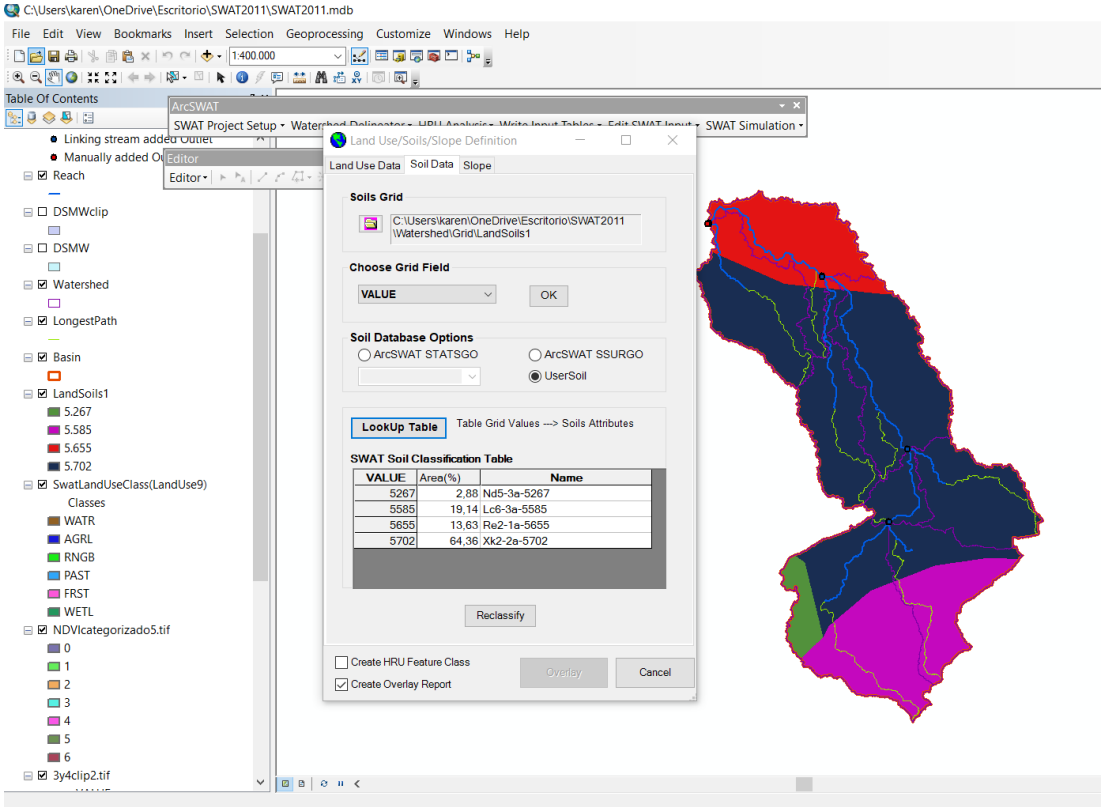
Figura 74. Usos de Suelo

SWAT Soil Classification Table

VALUE	Area(%)	Name
5267	2,88	Nd5-3a-5267
5585	19,14	Lc6-3a-5585
5655	13,63	Re2-1a-5655
5702	64,36	Xk2-2a-5702

Fuente: Los Autores

Figura 75. Reclasificación Uso de Suelo



Fuente: Los Autores

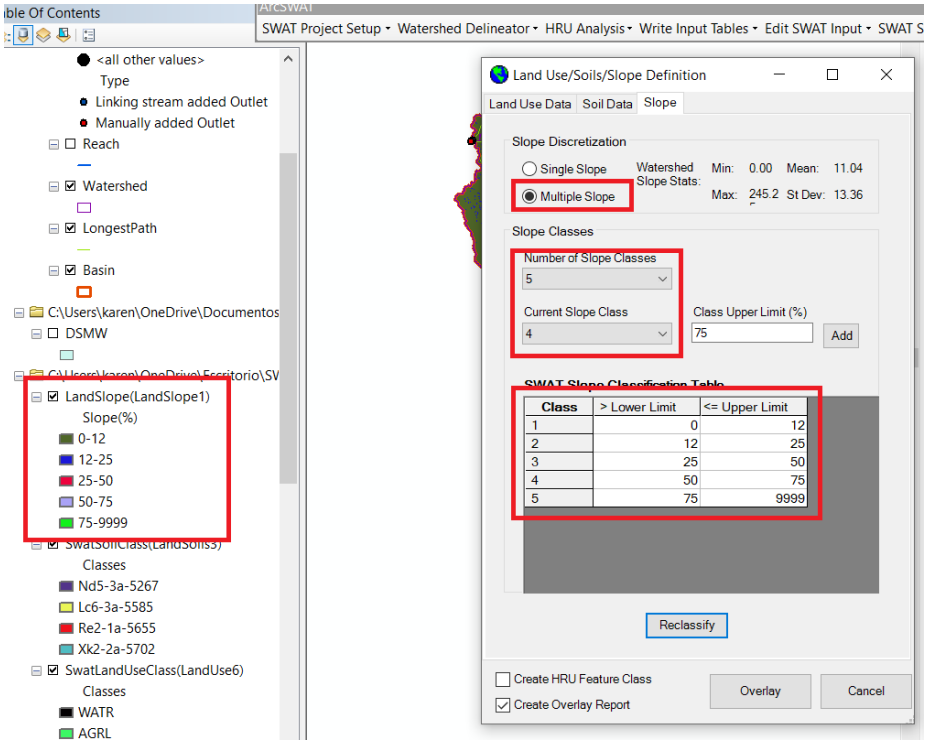
En la pestaña siguiente SLOPE, se selecciona Multiple Slope. Luego se generan 5 clases diferentes de pendientes y se asignan valores como se observan en la tabla 14.

Tabla 14. Pendientes del suelo

%	Clase
0 a 12	1
12 a 25	2
25 a 50	3
50 a 75	4
75 a 9999	8

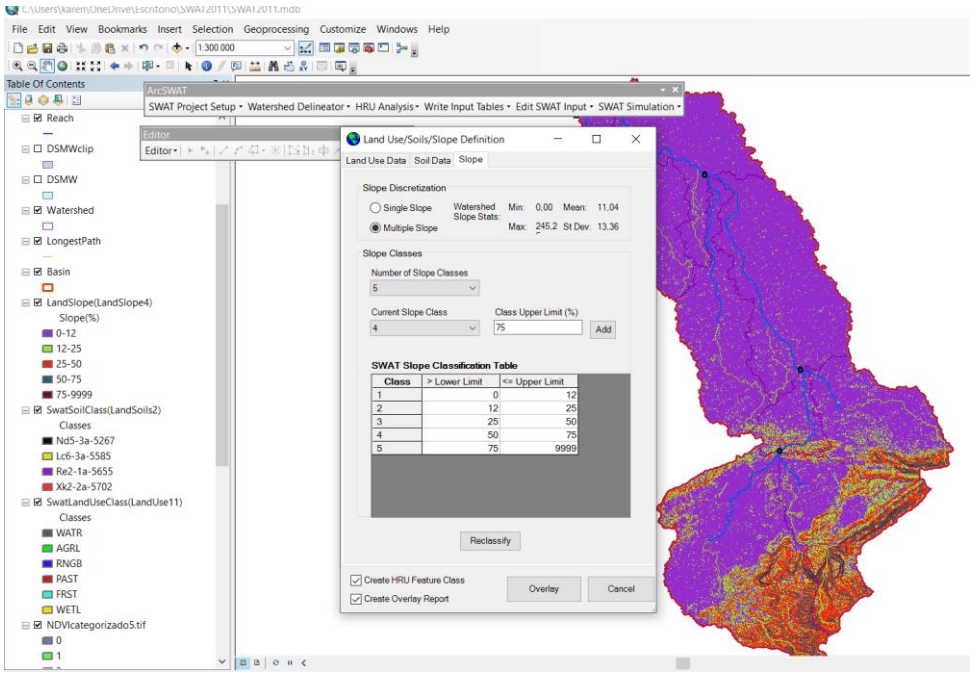
Fuente: Los Autores

Figura 76. Parámetros pendiente (Slope)



Fuente: Los Autores

Figura 77. Pendientes en la cuenca



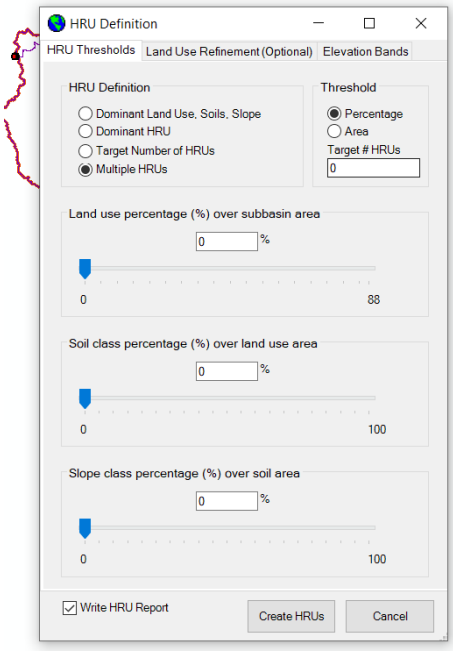
Fuente: Los Autores

Cuando se tienen las 3 pestañas de HRU Analysis, se selecciona la opción Create HRU Feature Class → Overlay. Para extraer y consignar los datos HRU en archivo .txt.

Definición HRU (HRU DEFINITION)

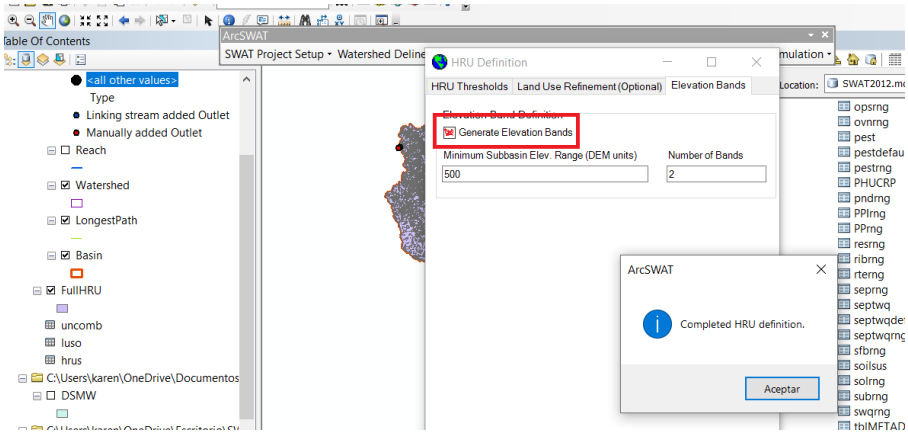
En esta pestaña se definirán los diferentes HRU que conforman la cuenca figura 78. Todos los datos se dejan tal y como están por defecto y en la pestaña Elevation Bands se selecciona la opción de Generate Elevation Bands → Create HRUs.

Figura 78. HRU Definición



Fuente: Los Autores

Figura 79. Definición HRU completada

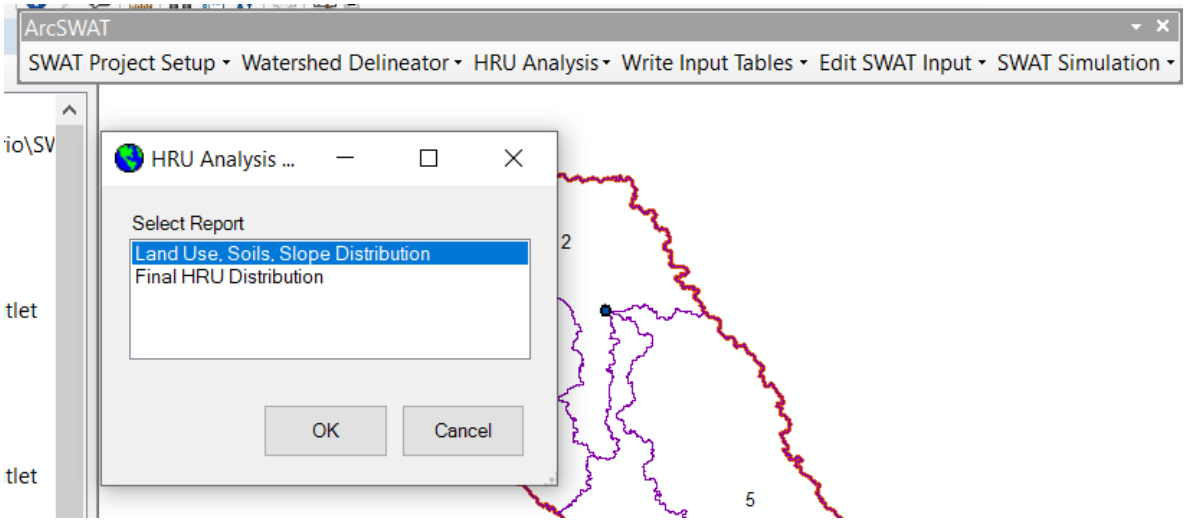


Fuente: Los Autores

Reporte de análisis HRU (HRU ANALYSIS REPORTS)

En este paso se pueden sacar los reportes correspondientes a cada una de las subcuencas, en cuando a Uso de suelo, tipo de suelos y pendientes; en cuanto a áreas y porcentajes.

Figura 80. Reporte de análisis HRU



Fuente: Los Autores

Figura 81. HRU datos

	Area [ha]	Area[acres]	
Watershed	96401.3438	238212.5405	
Number of Subbasins: 9			

	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area
LANDUSE:			
Water --> WATR	35.4679	87.6428	0.04
Agricultural Land-Generic --> AGRL	7320.2429	18088.6862	7.59
Range-Brush --> RNGB	51770.4511	127927.3732	53.70
Pasture --> PAST	25071.4892	61952.9034	26.01
Forest-Mixed --> FRST	10487.2611	25914.5467	10.88
Wetlands-Mixed --> WETL	1716.4315	4241.3881	1.78
SOILS:			
Lc6-3a-5585	18451.7716	45595.2502	19.14
Nd5-3a-5267	2771.2602	6847.9224	2.87
Re2-1a-5655	13133.6882	32454.0003	13.62
Xk2-2a-5702	62044.6238	153315.3676	64.36
SLOPE:			
0-12	73918.2419	182655.6716	76.68
12-25	11101.9852	27433.5604	11.52
25-50	8719.0425	21545.1900	9.04
50-75	2210.0740	5461.2033	2.29
75-9999	452.0002	1116.9151	0.47

Fuente: Los Autores

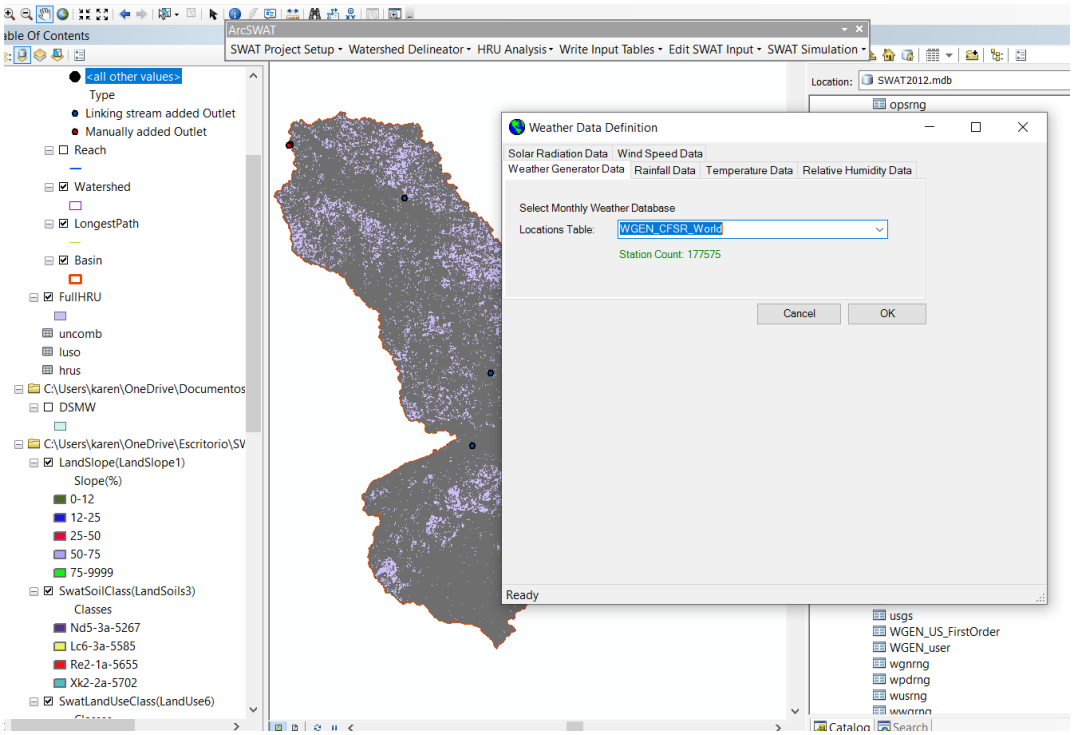
8.4.6 Escribir tablas de entrada (Write Input Tables)

Estaciones meteorológicas (weather stations)

Antes de insertar la información es necesario cambiar las propiedades de la fecha del computador en Formato regional se asigna (inglés (Estados Unidos)), pues el formato que usa SWAT para el modelo es MES/DÍA/AÑO.

En esta sección se agregan las características climáticas de la zona de estudio, será necesario insertar el motor climático, nombrado como (WGEN_CFSR_World). En la pestaña Weather Generator Data.

Figura 82. Motor Climático Mundial



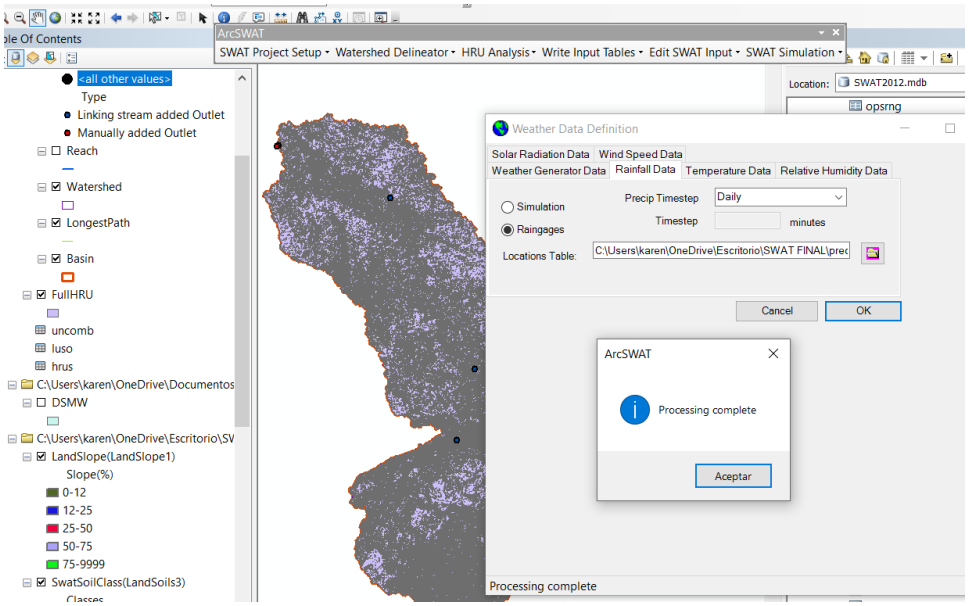
Fuente: Los Autores

Para la precipitación diaria se selecciona la pestaña de (Rainfall Data) y la opción (Raingages) y se agrega el archivo .txt, de las estaciones escogidas del IDEAM y los respectivos datos organizados para ser asignados al modelo.

Para la temperatura mínima y máxima diaria se selecciona la pestaña de (Temperature Data) y la opción (Climate Stations) y se agrega el archivo .txt, de las estaciones escogidas del IDEAM y los respectivos datos organizados para ser asignados al modelo.

Para los datos de radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, se dejarán los datos que por defecto SWAT asigne con el motor climático mundial.

Figura 83. Información climática

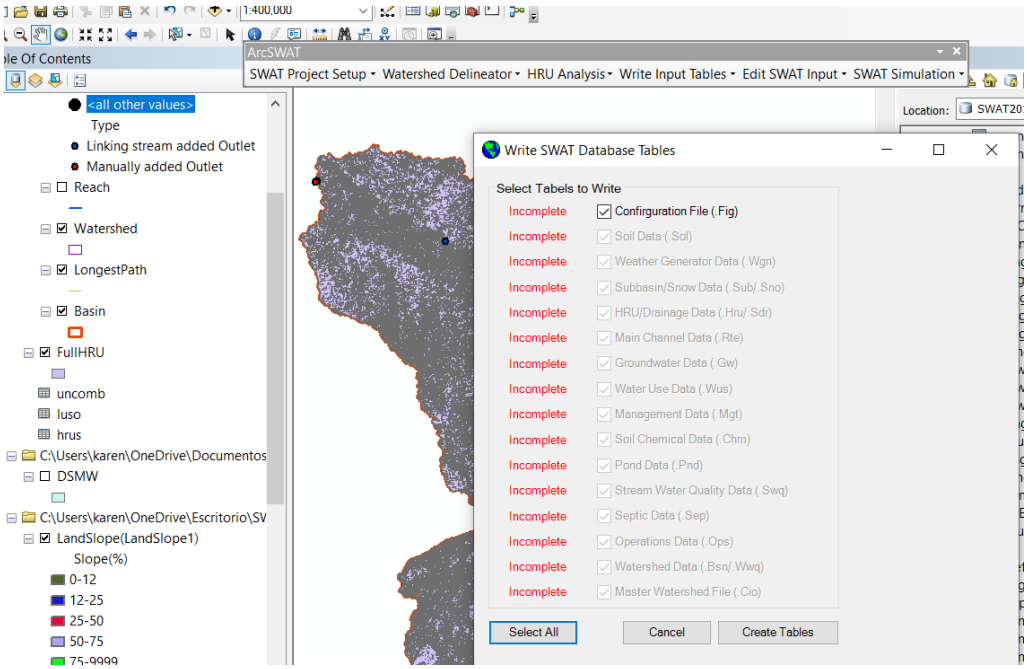


Fuente: Los Autores

Escribir tabla de base de datos SWAT (WRITE SWAT DATABASE TABLES)

Una vez abierta la pestaña, se despliega un listado de las diferentes tablas de datos que arroja SWAT, en este paso se da en Select All → Create Tables.

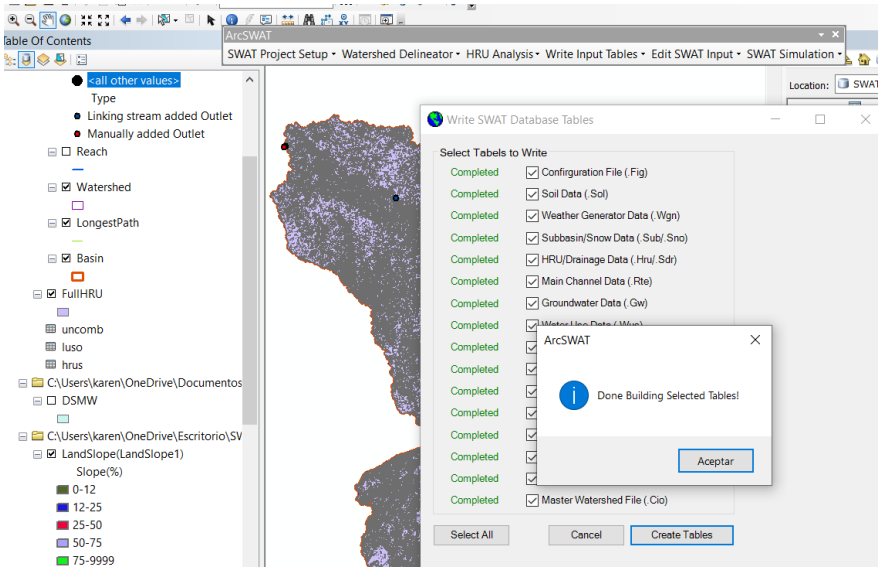
Figura 84. Escribir tabla de base de datos (Write SWAT Database Tables)



Fuente: Los Autores

Antes de generar las tablas SWAT arroja una opción de (Use weather database to calculate heat units to maturity (US only)) a lo que se selecciona NO, puesto que las tablas se están generando para Colombia y no para Estados Unidos.

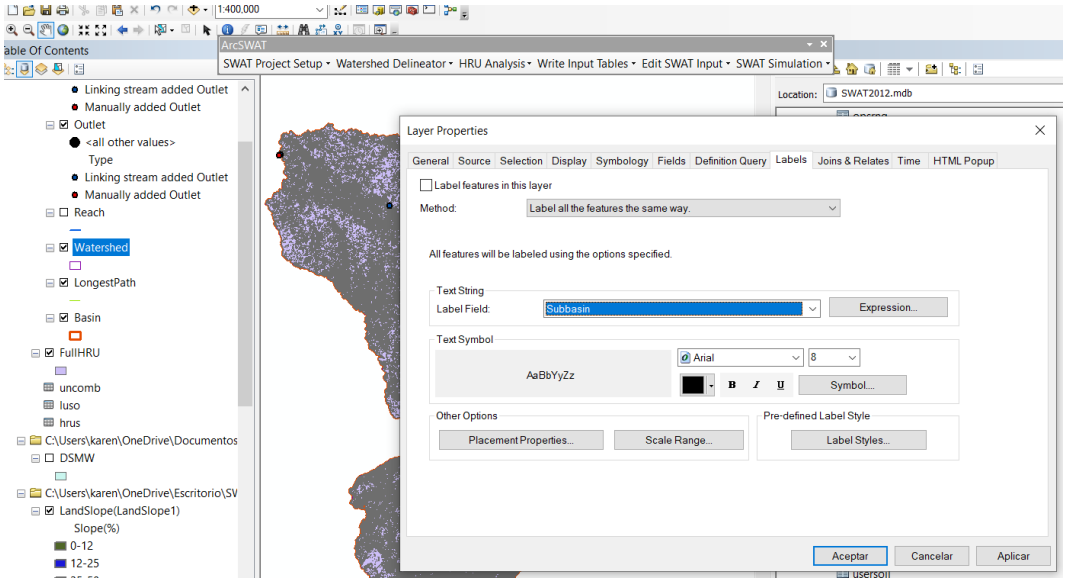
Figura 85. Tablas de bases de datos generadas



Fuente: Los Autores

Un paso opcional para ver la numeración de las subcuencas es seleccionando Layer propierties del Watershed → Labels → Label Field: Subbasin. Se selecciona tamaño y fuente de texto y se da en aplicar y aceptar.

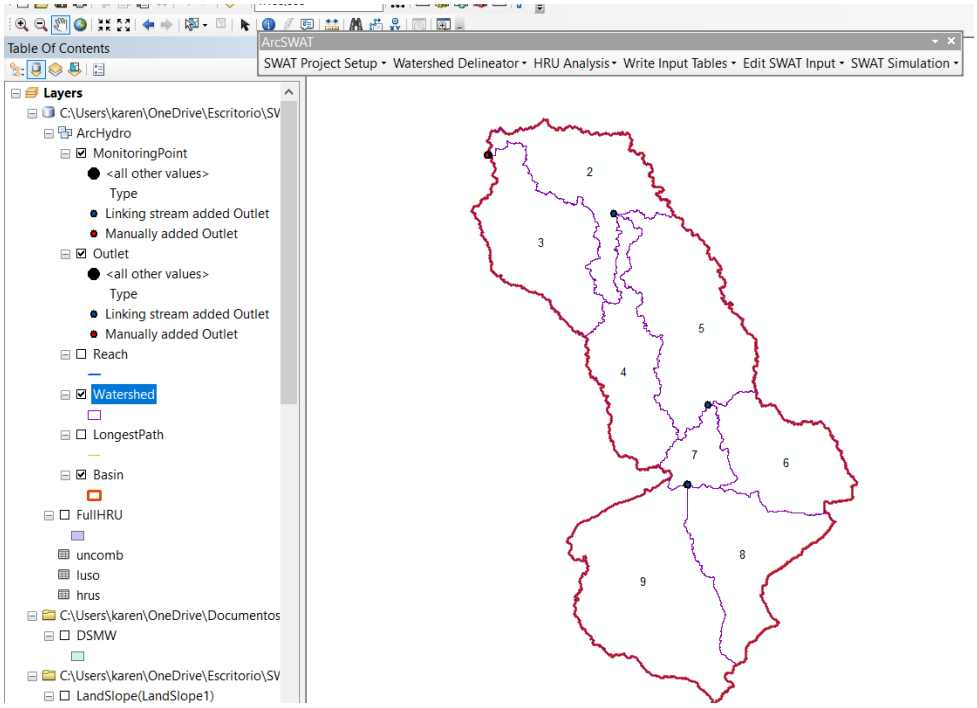
Figura 86. Propiedades de las capas – etiquetas (Layer propierties – Labels)



Fuente: Los Autores

De esta manera se pueden identificar las subcuencas generadas por el modelo y sus respectivos datos correspondientes con las tablas.

Figura 87. Numeración de subcuencas

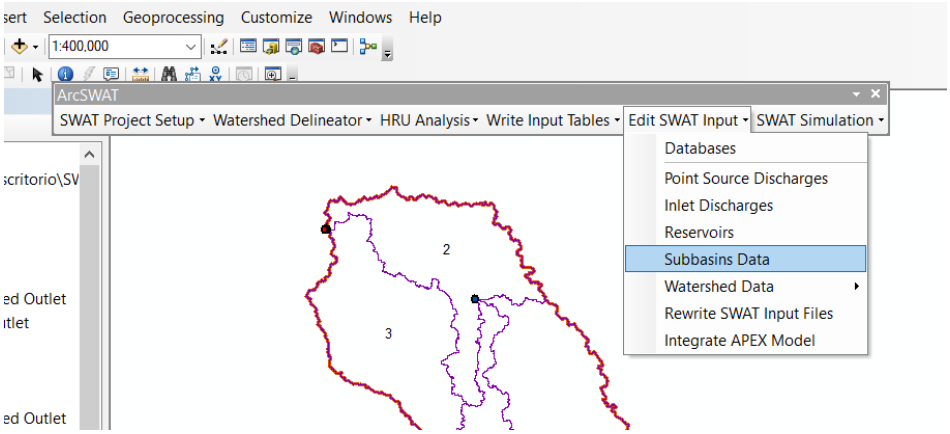


Fuente: Los Autores

8.4.7 Editar entrada SWAT (Edit SWAT Input)

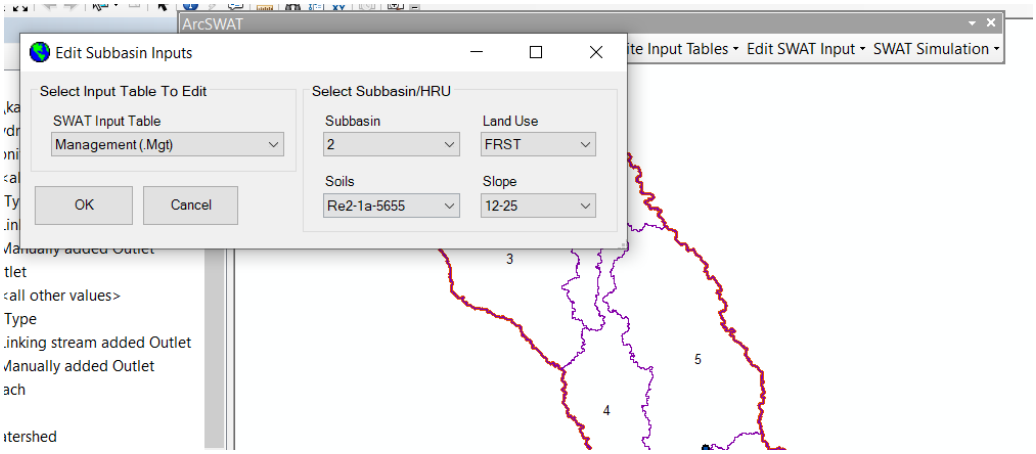
Esta parte es la del editor de parámetros, en donde se pueden hacer configuraciones pertinentes de la cuenca, subcuencas, reservorios y otros componentes que dieran a lugar.

Figura 88. Editar entrada SWAT (Edit SWAT Input)



Fuente: Los Autores

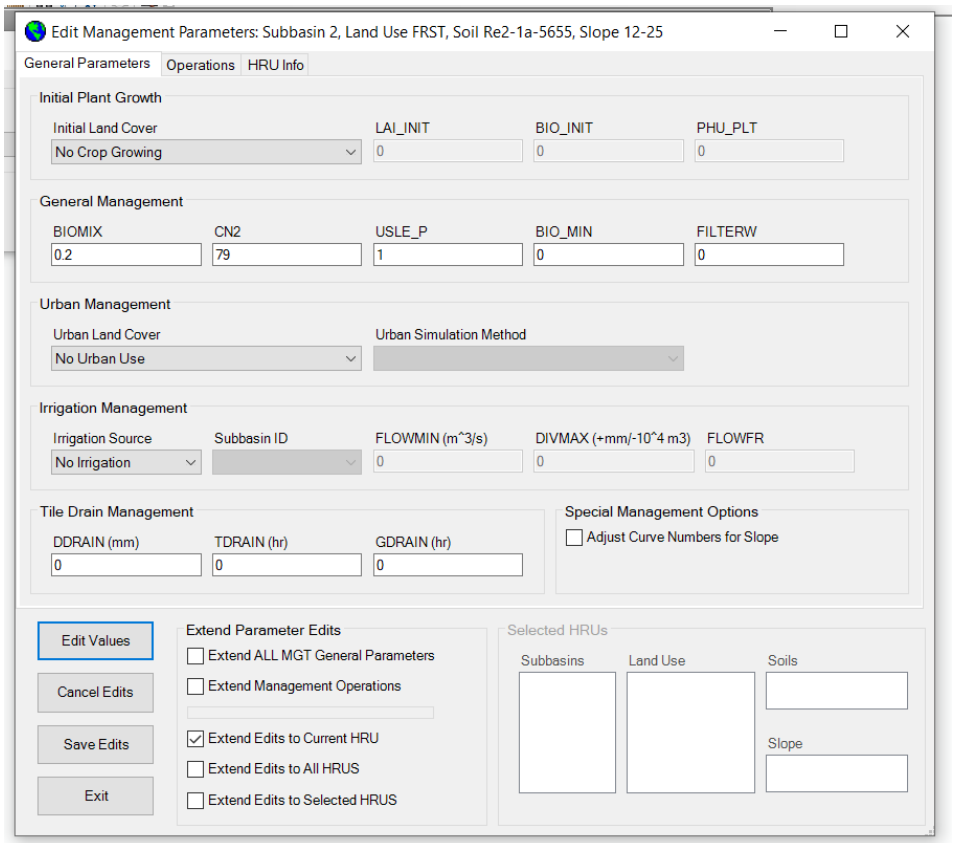
Figura 89. Edición de subcuencas



Fuente: Los Autores

Luego el editor permite ver los componentes generales de los datos seleccionados, se puede editar, seleccionar más cuencas para que edite los mismos valores en diferentes subcuencas y así guardar y salir, generando los cambios.

Figura 90. Parámetros subcuenca



Fuente: Los Autores

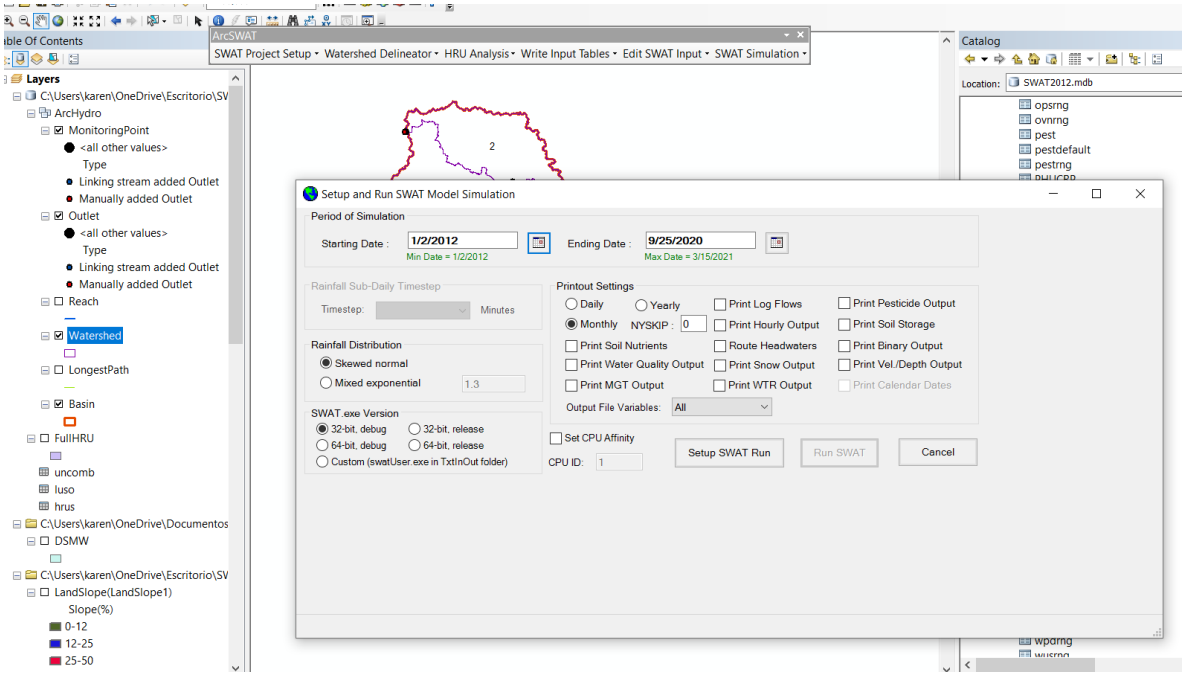
En este proyecto el modelo preliminar para la simulación de la cuenca del Río Ranchería, se dejó con los parámetros que por defecto SWAT generó, por ende, las comparaciones respectivas con los escenarios propuestos se harán con los resultados del modelo simulado sin edición.

8.4.8 Simulación SWAT

Para hacer el proceso de simulación se debe haber completado todos los pasos anteriores. Las fechas de simulación Inicio y Final coinciden con los datos consignados en las bases climáticas. En este proyecto será simulada la cuenca desde la fecha 02/enero/2012 hasta 25/Septiembre/2020.

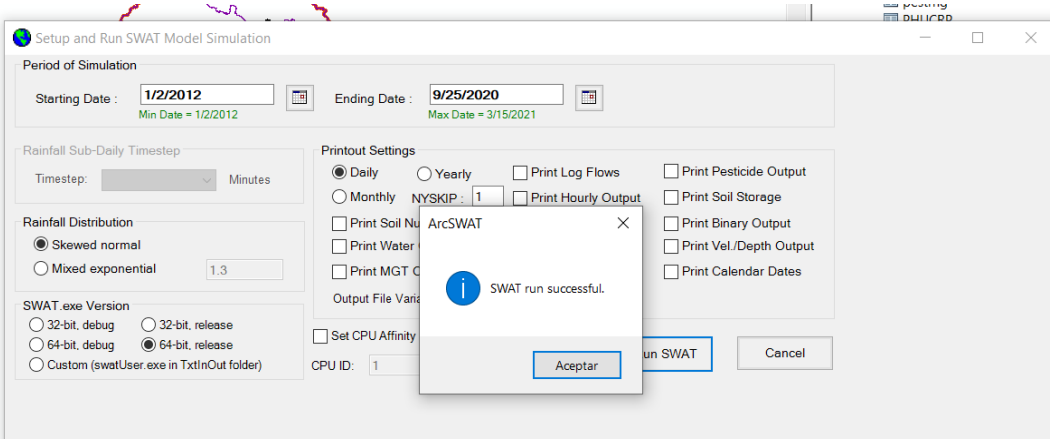
Para completar la simulación se selecciona Printout settings: Daily, ya que la información importada en el modelo está dada en diaria. Luego NYSKIP: 1 ya que no se van a simular muchos años, si así lo fuera pueden utilizarse otros valores como 2 o 3, dependiendo el caso. Se habilita la opción de 64-bit, release para que sea más rápido y se ejecuta el modelo.

Figura 91. Simulación SWAT



Fuente: Los Autores

Figura 92. Correr SWAT (Run SWAT)



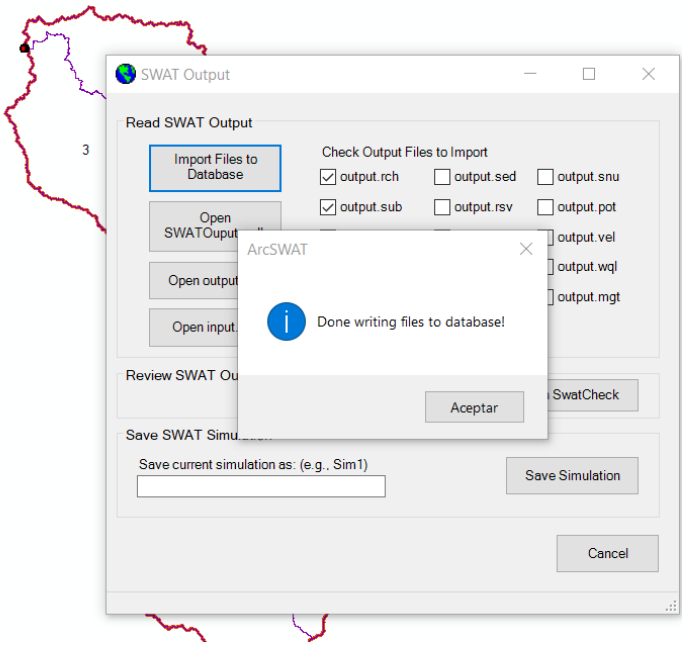
Fuente: Los Autores

Lectura salida SWAT (READ SWAT OUTPUT)

En este paso se seleccionan Output.rch (para ríos) y Output.sub (para subcuencas) para importar esta información a la base de datos, seguido se busca el archivo en la carpeta donde se esté trabajando el proyecto.

Datos que serán comparados a la calibración y validación generado por los diferentes escenarios a exponer.

Figura 93. Lectura salida SWAT



Fuente: Los Autores

8.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

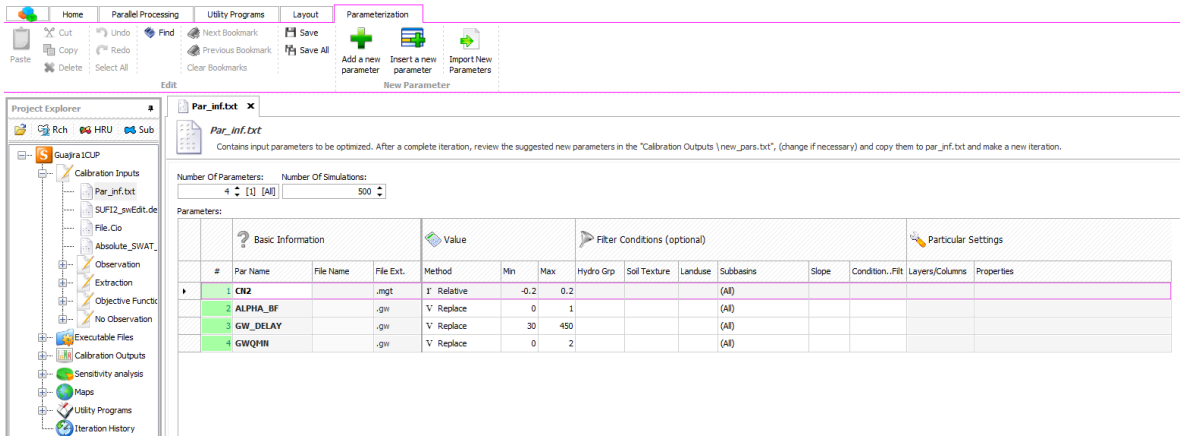
En cuanto a los datos que se utilizarán para el modelado hidrológico en la interfaz SWAT se encuentran las entradas espaciales que incluyen un mapa de uso de la tierra, una descripción de las propiedades del suelo y un modelo de elevación digital (DEM) para definir las HRU. Se tiene contemplado la obtención de datos como el tipo de suelo, topográficos para la delimitación de cuencas hidrográficas derivado de un modelo de elevación digital (DEM). Asimismo, se obtienen datos meteorológicos (lluvia, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del aire). Se Utilizan datos de caudal diario para la calibración y validación. [29]

En el presente proyecto, el DEM de la cuenca resultante se utiliza para delinear y obtener parámetros topográficos como la pendiente de la superficie, la red fluvial y la longitud de la pendiente para cada subcuenca.

Los datos meteorológicos utilizados se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio. Esto incluye precipitaciones diarias, datos de temperatura máxima y mínima, datos de escorrentía en la estación de medición utilizados para la calibración y validación del modelo.

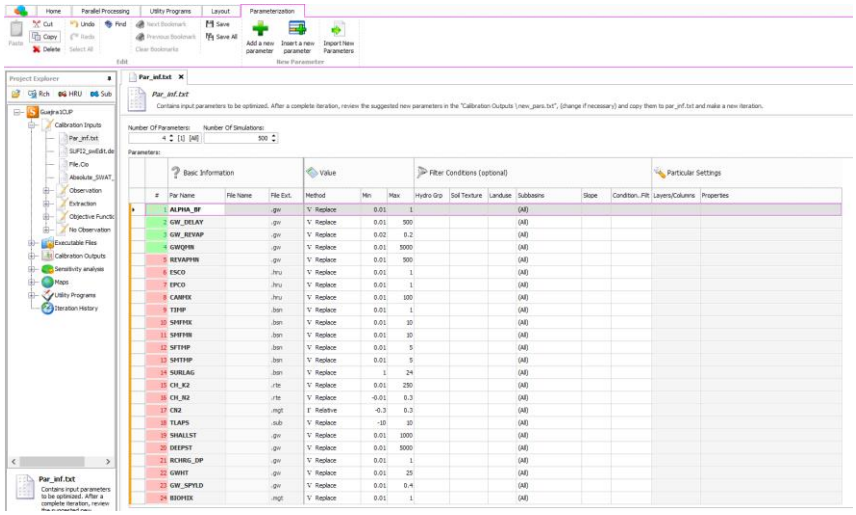
Una vez concluida la ejecución del modelo, se realiza la calibración en la extensión de SWAT (SWAT CUP), que permitirá realizar las correlaciones y ejecuciones para obtener los mejores datos. La calibración se realizó con los datos de caudal diarios descargados del IDEAM de las estaciones de Loma Linda y se completan valores con la estación cercana de Pozo Hondo para las fechas que serán simuladas desde 01/01/2013 hasta 31/12/2017. Datos de calibración que serán comparados en el rango de 01/01/2018 hasta 31/12/2021 para la validación.

Figura 94. SWAT CUP



Fuente: Los Autores

Figura 95. Ajuste de datos - SWAT CUP



Fuente: Los Autores

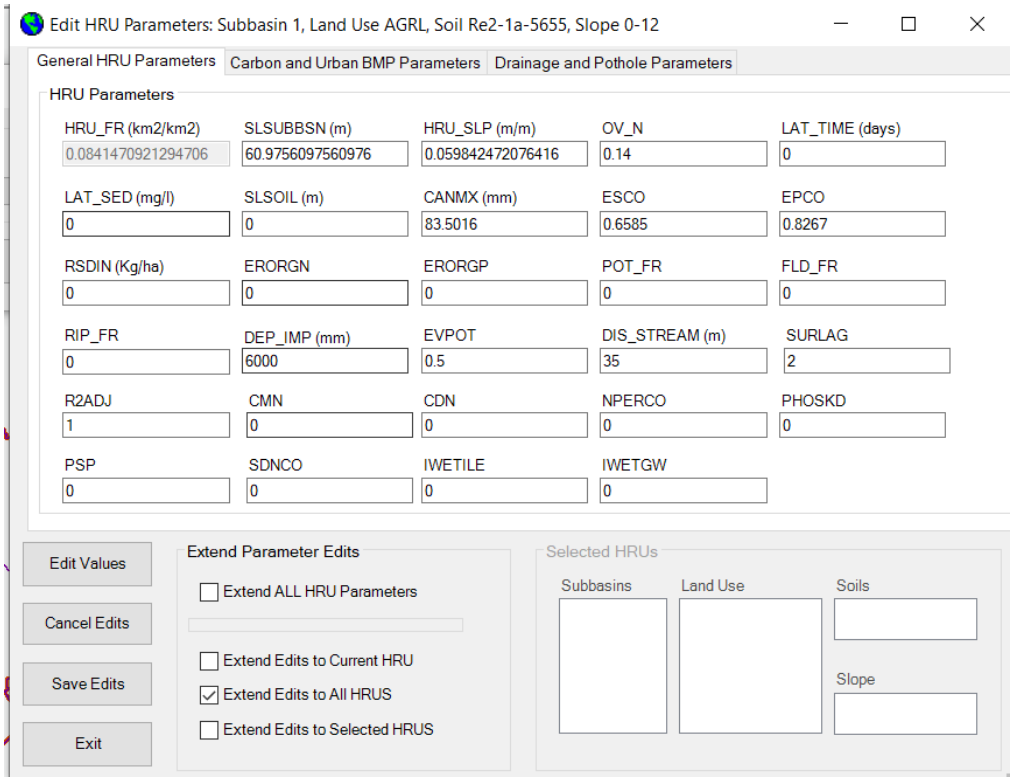
Una vez se genera en SWAT CUP las simulaciones con los respectivos datos y subcuenca seleccionada se procede a calibrar el modelo. Como se puede evidenciar en la figura 96, datos expuestos de SWAT CUP, que deberán incluirse en SWAT y así realizar la simulación con las calibraciones hechas.

Figura 96. Datos para calibración

Sim_No.	1
1:V__ALPHA_BF.gw	0.4209
2:V__GW_DELAY.gw	437.5013
3:V__GW_REVAP.gw	0.1145
4:V__GWQMN.gw	4975
5:V__REVAPMN.gw	207.5058
6:V__ESCO.hru	0.6585
7:V__EPCO.hru	0.8267
8:V__CANMX.hru	83.5016
9:V__TIMP.bsn	0.8465
10:V__SMFMX.bsn	0.8591
11:V__SMFMN.bsn	3.1569
12:V__SFTMP.bsn	1.2326
13:V__SMTMP.bsn	3.6776
14:V__SURLAG.bsn	9.625
15:V__CH_K2.rte	188.7525
16:V__CH_N2.rte	0.0163
17:R__CN2.mgt	-0.249
18:V__TLAPS.sub	-1.3
19:V__SHALLST.gw	795.002
20:V__DEEPST.gw	975.0081
21:V__RCHRG_DP.gw	0.3614
22:V__GWHT.gw	16.3785
23:V__GW_SPYLD.gw	0.3356
24:V__BIOMIX.mgt	0.0248

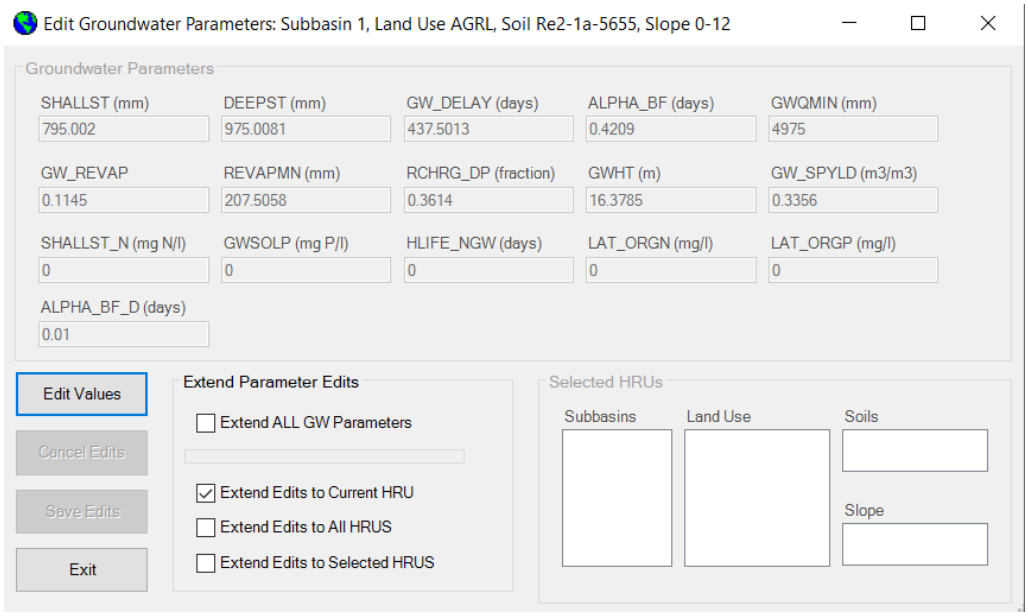
Fuente: Los Autores

Figura 97. Calibración paso 1 - General parámetros HRU.



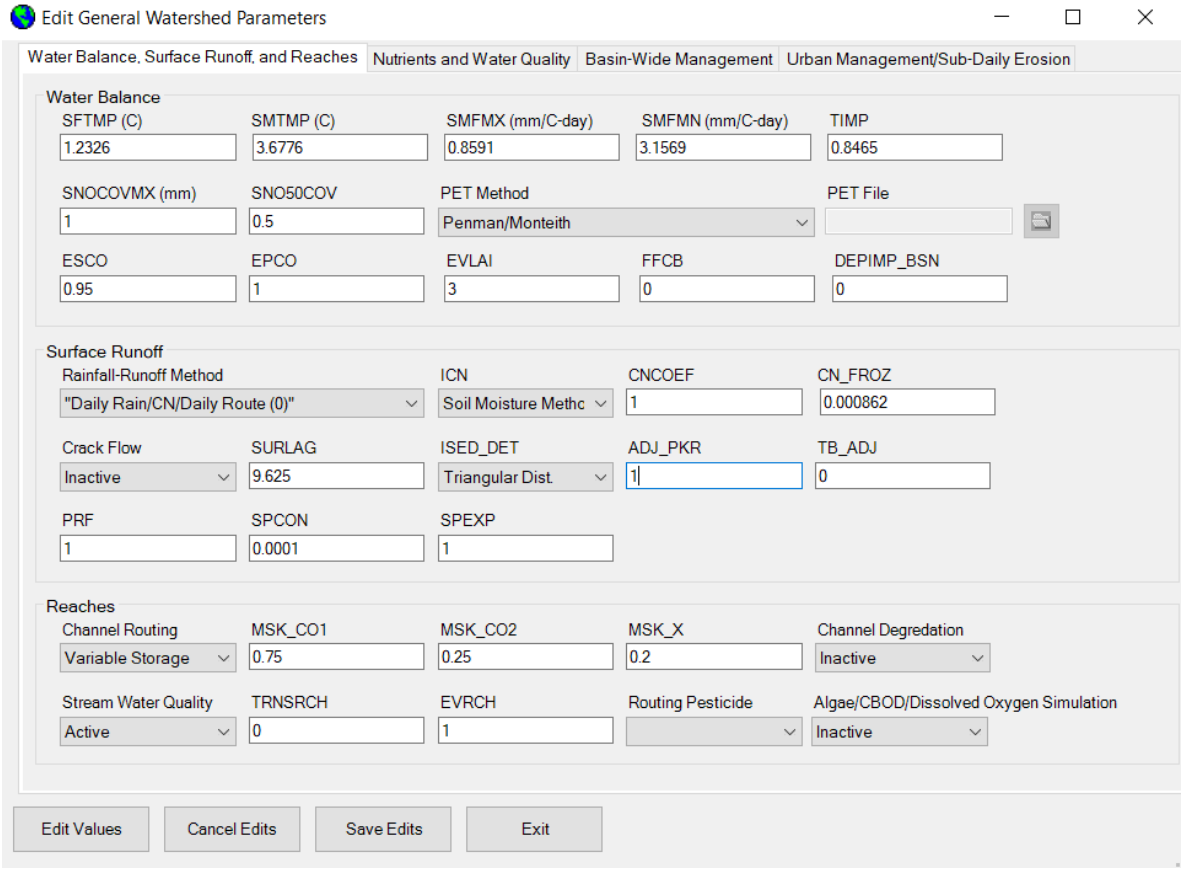
Fuente: Los Autores

Figura 98. Calibración paso 2 – Agua subterránea (Groundwater)



Fuente: Los Autores

Figura 99. Calibración paso 3 - Balance de agua (Water Balance)



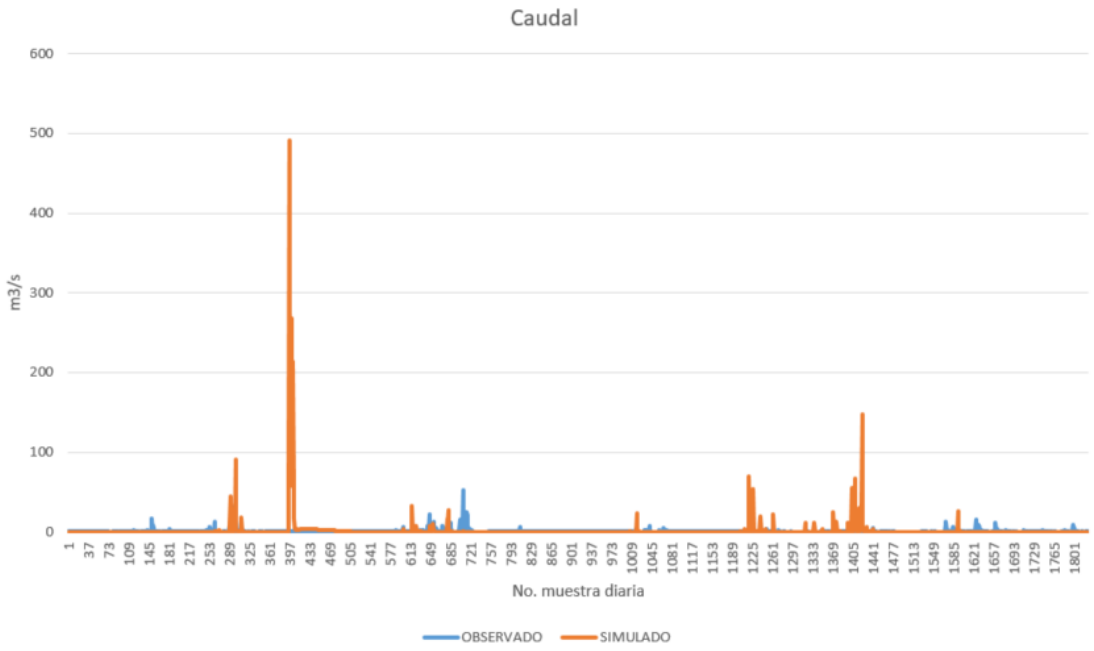
Fuente: Los Autores

Una vez se calibrado el modelo se dispone de las tablas que arroja, para realizar las gráficas pertinentes a comportamiento de caudal, en la figura 100 se observa el caudal con los datos base del IDEAM y los datos arrojados por la simulación sin calibrar.

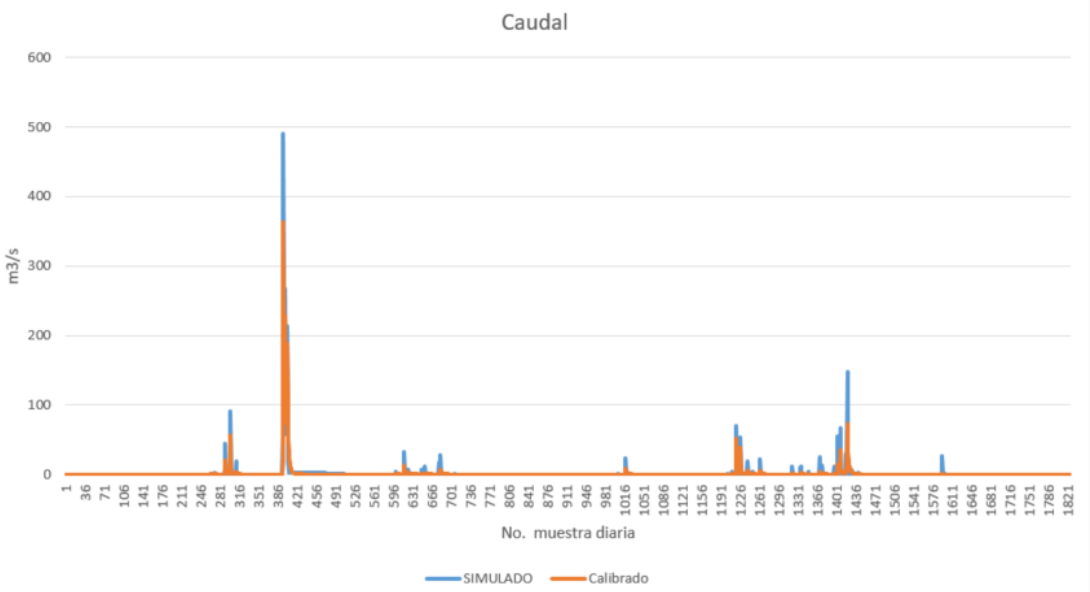
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 101 se observa el caudal calibrado en naranja con el cual se dispondrá a trabajar para asignación de escenarios. En enero de 2014 hubo un sobresalto en la precipitación y este alcanzo niveles muy superiores a los demás registros.

Figura 100. Caudal sin calibrar



Fuente: Los Autores



Fuente: Los Autores

Se presentan los suelos que componen la zona de estudio de la cuenca del río Ranchería, en la tabla 15, se describen entre suelos finos y llanos, presencia de arcillas, zonas con procesos erosivos y compuestos por materia orgánica.

Tabla 15. Uso de suelos

Símbolo cartográfico	**Tipo de suelo**	**Descripción**	**Textura**	**Pendiente**
Nd5-3a	Nitosoles districos	Presentan una delgada capa superficial, pero el subsuelo presenta un espesor de más de 1.5 m, con un alto contenido de arcillas; su color es generalmente rojizo y su pH acido; son poco fértiles ya que su saturación de bases es menor de 35%	Fina	Llano
Lc6-3a	Luvisoles cromicos	Un Luvisol se caracteriza por la acumulación de arcillas de niveles superiores al inferior. Se desarrollan en zonas con poca pendiente o llanas de clima templado, cálido o frío pero con una estación seca y otra lluviosa	Fina	Llano
Re2-1a	Regusoles éutricos	Suelos desarrollados sobre materiales no excesivamente consolidados y que presentan una escasa evolución, fruto generalmente de su reciente formación sobre aportes recientes no aluviales o localizarse en zonas con fuertes procesos erosivos que provocan un continuo rejuvenecimiento de los suelos	Grueda	Llano
Xk2-2a	Xerosoles calcicos	El suelo está condicionado por multitud de factores que van desde el sustrato geológico o la pendiente, hasta el clima y la comunidad biótica que soporta. Su desarrollo, profundidad, textura y contenido en materia orgánica son parámetros que, entre otros, van a determinar, de forma conjunta, la capacidad general de uso de los suelos	Mediana	Llano

Fuente: Los Autores

9.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la actividad minera, que es la actividad principal económica del departamento, se desprenden varios problemas ambientales de consideración. En el Plan de Acción Nacional de Lucha contra la sequía en Colombia se señalan como manifestaciones de la desertificación y sequía: i) la acelerada erosión hídrica y eólica de los suelos, ii) la creciente salinización de los suelos y las aguas freáticas cercanas a la superficie, iii) la menor retención de humedad, iv) el aumento de los escurrimientos superficiales y la variabilidad de los flujos de los cursos de agua, v) la disminución de la diversidad de especies y en la biomasa vegetal y vi) el descenso en la productividad con el consecuente empobrecimiento de las comunidades de base, con tendencia a empeorarse al cabo del tiempo. [31]

Figura 101. Datos modelo inicial

```
NUTRIENTS
     ORGANIC N =    14.595 (KG/HA)
     ORGANIC P =     1.830 (KG/HA)
     NO3 YIELD (SQ) =   315.059 (KG/HA)
     NO3 YIELD (LAT) =    0.338 (KG/HA)
     NO3 YIELD (TILE) =    0.000 (KG/HA)
     SOLP YIELD (TILE) =    0.000(KG/HA)
     SOLP YIELD (SURF INLET RISER) =    0.000 (KG/HA)
     SOL P YIELD =    0.049 (KG/HA)
     NO3 LEACHED =    13.772 (KG/HA)
     P LEACHED =     0.191 (KG/HA)
     N UPTAKE =    17.561 (KG/HA)
     P UPTAKE =    2.973 (KG/HA)
     NO3 YIELD (GWQ) =     0.663 (KG/HA)
     ACTIVE TO SOLUTION P FLOW =        -1.763 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE P FLOW =        -1.258 (KG/HA)
     N FERTILIZER APPLIED =     3.187 (KG/HA)
     P FERTILIZER APPLIED =     0.000 (KG/HA)
     N FIXATION =     0.000 (KG/HA)
     DENITRIFICATION =     0.000 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG N =     5.075 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE ORG N =    -2.773 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG P =    0.869 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG N =    3.609 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG P =    0.611 (KG/HA)
     NO3 IN RAINFALL =   341.330 (KG/HA)
     INITIAL NO3 IN SOIL =      48.797 (KG/HA)
     FINAL NO3 IN SOIL =        51.624 (KG/HA)
     INITIAL ORG N IN SOIL =    4388.595 (KG/HA)
     FINAL ORG N IN SOIL =      4210.382 (KG/HA)
     INITIAL MIN P IN SOIL =    2149.135 (KG/HA)
     FINAL MIN P IN SOIL =      2086.055 (KG/HA)
     INITIAL ORG P IN SOIL =     537.603 (KG/HA)
     FINAL ORG P IN SOIL =     513.910 (KG/HA)
     NO3 IN FERT =     3.187 (KG/HA)
     AMMONIA IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG N IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     MINERAL P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     N REMOVED IN YIELD =    12.512 (KG/HA)
     P REMOVED IN YIELD =     2.143 (KG/HA)
     AMMONIA VOLATILIZATION =     0.000 (KG/HA)
     AMMONIA NITRIFICATION =      0.000 (KG/HA)
     NO3 EVAP-LAYER 2 TO 1 =    5.998
```

Fuente: Los Autores

9.1.1 Disminución de caudales en escenarios de cambio climático (Escenario 1)

El recurso hídrico es uno de los elementos ambientales más relevantes en el área de estudio, las condiciones naturales como la baja precipitación y la sequía en la región limitan la disponibilidad del recurso hídrico superficial, especialmente en la Alta Guajira, donde también se presentan altas tasas de evaporación e intrusión salina, y estas condiciones provocan la disolución en las aguas subterráneas, limitando el uso y aprovechamiento de este recurso.

En la parte media y baja de la Guajira, ANLA y CORPOGUAJIRA cuentan con la mayor cantidad de tomas de agua autorizadas, de las cuales las más utilizadas son los recursos hídricos superficiales, alrededor de 1.347 tomas de agua con un caudal de 18 m^3/s, la gran mayoría son utilizadas para el desarrollo de actividades agrícolas, alrededor del 80% de los caudales de agua provienen de las cuencas de los ríos Ranchería y Tapias, los cuales se encuentran en conflicto por la disponibilidad y disponibilidad del recurso hídrico, especialmente en épocas de sequía. [31]

Asimismo, aunque las condiciones de sequía no son tan severas en la Baja y Central Guajira como en la Alta Guajira, existen conflictos por el acceso y disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos debido a la concentración de importantes proyectos en esta región. Minería, que requiere mucha agua.

Para realizar este escenario fue necesario variar los datos de precipitación expuestos en los datos originales y según el documento “ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN COLOMBIA" [36] la precipitación podría disminuir entre 15% y 36% en los próximos años, para el ejercicio se tomó una disminución de precipitación del 20%.

En la primera figura 101 se encuentran los datos originales del modelo, donde se observa un factor importante de (NO_3 IN RAINFALL), que representa los nitratos por medio de la precipitación.

El nitrato es uno de los principales nutrientes de la naturaleza, potencializa la aparición de algas, aunque en exceso en aguas freáticas puede generar contaminación. En la figura 102 se encuentra la variación de 273.062 (kg/Ha) con 341.33 (kg/Ha) del dato original. Pudiendo afectar los nutrientes presentes en la cuenca del río Ranchería a futuro.

Figura 102. Escenario 1

```
NUTRIENTS
     ORGANIC N =    15.203 (KG/HA)
     ORGANIC P =     1.901 (KG/HA)
     NO3 YIELD (SQ) =   248.718 (KG/HA)
     NO3 YIELD (LAT) =    0.328 (KG/HA)
     NO3 YIELD (TILE) =    0.000 (KG/HA)
     SOLP YIELD (TILE) =    0.000(KG/HA)
     SOLP YIELD (SURF INLET RISER) =    0.000 (KG/HA)
     SOL P YIELD =    0.050 (KG/HA)
     NO3 LEACHED =    13.458 (KG/HA)
     P LEACHED =     0.188 (KG/HA)
     N UPTAKE =    17.026 (KG/HA)
     P UPTAKE =    2.823 (KG/HA)
     NO3 YIELD (GWQ) =     0.644 (KG/HA)
     ACTIVE TO SOLUTION P FLOW =        -1.659 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE P FLOW =        -1.172 (KG/HA)
     N FERTILIZER APPLIED =     2.752 (KG/HA)
     P FERTILIZER APPLIED =     0.000 (KG/HA)
     N FIXATION =     0.000 (KG/HA)
     DENITRIFICATION =     0.000 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG N =     4.955 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE ORG N =    -2.669 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG P =    0.848 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG N =    3.412 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG P =    0.568 (KG/HA)
     NO3 IN RAINFALL =   273.062 (KG/HA)
     INITIAL NO3 IN SOIL =      48.797 (KG/HA)
     FINAL NO3 IN SOIL =        41.666 (KG/HA)
     INITIAL ORG N IN SOIL =    4388.595 (KG/HA)
     FINAL ORG N IN SOIL =      4219.329 (KG/HA)
     INITIAL MIN P IN SOIL =    2149.135 (KG/HA)
     FINAL MIN P IN SOIL =      2089.323 (KG/HA)
     INITIAL ORG P IN SOIL =     537.603 (KG/HA)
     FINAL ORG P IN SOIL =     515.050 (KG/HA)
     NO3 IN FERT =     2.752 (KG/HA)
     AMMONIA IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG N IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     MINERAL P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     N REMOVED IN YIELD =    12.262 (KG/HA)
     P REMOVED IN YIELD =     2.052 (KG/HA)
     AMMONIA VOLATILIZATION =     0.000 (KG/HA)
     AMMONIA NITRIFICATION =      0.000 (KG/HA)
     NO3 EVAP-LAYER 2 TO 1 =    6.797
```

Fuente: Los Autores

9.1.2 Aumento de temperatura en escenarios de cambio climático (Escenario 2)

De acuerdo a un estudio realizado por el IDEAM en cuanto al cambio climático en Colombia “ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN COLOMBIA" [36]], se estima un aumento de temperatura de 1.4 °C para los años 2011-2040, con base a este indicador se realizó la variación de acuerdo a los datos iniciales suministrados al modelo.

Al realizar la comparación con los datos base del modelo en la figura 101 y la figura 103 se contemplan algunas variaciones en los datos. En todos hay disminuciones, evidenciando que cuando la temperatura llegase a aumentar, los nutrientes del suelo tendrían disminuciones no tan significativas, pero pueden llegar a tener cambios en la cobertura vegetal, nitratos presentes en el suelo y demás componentes orgánicos.

Figura 103. Escenario 2

```
NUTRIENTS
     ORGANIC N =    14.531 (KG/HA)
     ORGANIC P =     1.821 (KG/HA)
     NO3 YIELD (SQ) =   315.145 (KG/HA)
     NO3 YIELD (LAT) =    0.339 (KG/HA)
     NO3 YIELD (TILE) =    0.000 (KG/HA)
     SOLP YIELD (TILE) =    0.000(KG/HA)
     SOLP YIELD (SURF INLET RISER) =    0.000 (KG/HA)
     SOL P YIELD =    0.048 (KG/HA)
     NO3 LEACHED =    13.852 (KG/HA)
     P LEACHED =     0.191 (KG/HA)
     N UPTAKE =    17.243 (KG/HA)
     P UPTAKE =    2.901 (KG/HA)
     NO3 YIELD (GWQ) =     0.668 (KG/HA)
     ACTIVE TO SOLUTION P FLOW =        -1.709 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE P FLOW =        -1.209 (KG/HA)
     N FERTILIZER APPLIED =     3.029 (KG/HA)
     P FERTILIZER APPLIED =     0.000 (KG/HA)
     N FIXATION =     0.000 (KG/HA)
     DENITRIFICATION =     0.000 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG N =     5.071 (KG/HA)
     ACTIVE TO STABLE ORG N =    -2.778 (KG/HA)
     HUMUS MIN ON ACTIVE ORG P =    0.868 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG N =    3.532 (KG/HA)
     MIN FROM FRESH ORG P =    0.593 (KG/HA)
     NO3 IN RAINFALL =   341.330 (KG/HA)
     INITIAL NO3 IN SOIL =      48.797 (KG/HA)
     FINAL NO3 IN SOIL =        51.621 (KG/HA)
     INITIAL ORG N IN SOIL =    4388.595 (KG/HA)
     FINAL ORG N IN SOIL =      4209.822 (KG/HA)
     INITIAL MIN P IN SOIL =    2149.135 (KG/HA)
     FINAL MIN P IN SOIL =      2086.518 (KG/HA)
     INITIAL ORG P IN SOIL =     537.603 (KG/HA)
     FINAL ORG P IN SOIL =     513.823 (KG/HA)
     NO3 IN FERT =     3.029 (KG/HA)
     AMMONIA IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG N IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     MINERAL P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     ORG P IN FERT =     0.000 (KG/HA)
     N REMOVED IN YIELD =    12.325 (KG/HA)
     P REMOVED IN YIELD =     2.098 (KG/HA)
     AMMONIA VOLATILIZATION =     0.000 (KG/HA)
     AMMONIA NITRIFICATION =      0.000 (KG/HA)
     NO3 EVAP-LAYER 2 TO 1 =    6.099
```

Fuente: Los Autores

9.1.3 Aumento de la actividad minera y sus efectos sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos. (Escenario 3)

Los humedales caribeños de La Guajira albergan una gran biodiversidad y variedad en cuanto a especies de plantas y animales, incluyendo aproximadamente 25 especies del orden Cetácea, 68 especies de aves acuáticas, 43 de las cuales son migratorias. Según el estudio de la ANLA publicado en el año 2018, en relación al análisis de la conectividad ecológica, se parte de visualizar la región como un área conformada por diferentes tipos de ecosistemas interactuando entre sí, lo cual se define destacando rasgos distintivos relacionados con las preferencias de hábitat de 14 especies animales, por lo tanto, se consideran críticas en el área de estudio.

Se presenta el contenido de hierro en el monitoreo de corrientes oceánicas en el área de estudio, donde se destaca que la concentración en la cuenca baja es mayor

a 0.1 mg/L en la mayoría de las mediciones realizadas en la cuenca. El río Ranchería en áreas con suelos inundados, que están expuestos a cambios de caudal, pastoreo y actividades agrícolas en la zona, que pueden aumentar la concentración de nutrientes y minerales. [31]

En cuanto al uso y extracción de aguas subterráneas en la Provincia de La Guajira, se encontró que la demanda de este recurso es principalmente para consumo humano, uso doméstico, uso agrícola y uso industrial, destacando que ciertas zonas de la región son la única fuente de suministro. Sin embargo, especialmente en Alta y Media Guajira, el agua subterránea utilizada no presenta las mejores características de calidad debido a su alto contenido en sales disueltas, que se concentran de forma natural, lo que limita mucho su uso para consumo humano, uso doméstico o agrícola la situación del riego.

El aprovechamiento de las aguas subterráneas por parte de los proyectos mineros proviene de dos fuentes: el acuífero Aluvial Ranchería, que se caracteriza por tener agua dulce de alta calidad, y el agua asociada a los mantos carboníferos de la Formación Cerrejón, que es de calidad media o mala. El proyecto utiliza las aguas del Aluvial de la Ranchería para los usos domésticos e industriales del mismo.

Los acuíferos de Ranchería, Fonseca - San Juan, Ocay, Monguí, Cerrejón y Hatonuevo - Barrancas son vulnerables a la contaminación, son altamente susceptibles a los contaminantes de la superficie, situación que es decisiva para la planificación actual y las futuras actividades y desarrollo de la cuenca.

El PMAA (Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos) determinó que los acuíferos están amenazados por agotamiento, por lo cual, se presentan causas relacionadas con la “minería descontrolada o desordenada” y las “intervenciones que afectan la recarga”. Estas razones se relacionan con una serie de aspectos asociados con la política pública en los sectores minero y ambiental, así como con la falta de control y aplicación de la legislación ambiental.

Para este escenario se determinan las variables fisicoquímicas tomadas de la tabla 10 datos tomados de *“Salud ambiental del río Ranchería a través de macro invertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón"* [26] en donde se efectúa el montaje de los datos de nutrientes presentes en la estación E3, Estación que está ubicada en la zona de estudio.

Pues bien, los nutrientes y la capacidad y los datos de deterioro de la calidad de agua el modelo no presenta variaciones o alteraciones de acuerdo a los datos suministrados demostrando la capacidad de amortiguamiento del río sobre la contaminación y su capacidad de auto depuración, siempre y cuando las condiciones se mantengan.

Ahora bien, en el sector minero 100\% corresponden a proyectos de explotación entre los municipios de Barrancas, Hato Nuevo, Albania y Fonseca. Las concesiones de agua autorizadas por CORPOGUAJIRA, se encuentran distribuidas en las siguientes corrientes hídricas: río Ranchería, arroyo Bruno, arroyo Tabaco y lagunas de retención y sumideros de tajos mineros de Cerrejón. Considerando que estos permisos no fueron autorizados por la ANLA, no fue posible identificar el estado actual de dichas captaciones, respecto a si están o no siendo usadas por el proyecto.

La minería que en 1960 no era parte de la estructura productiva departamental, en 2010 constituía el 60,9%, ubicándose por encima del promedio nacional. Lo anterior ha conllevado, por un lado, a la trasformación en la estructura económica del departamento, tanto en la composición del PIB como en su tamaño, y, por otro lado, a cambios en la configuración territorial por la intervención de las actividades de expansión minera en el territorio con la mina, el ferrocarril y el puerto sobre el mar Caribe. Asimismo, se contemplan proyectos como el minero de explotación de carbón mina Caypa en un área de 300 hectáreas ubicado en el cerrejón central, proyecto de explotación minera de carbón cañaverales y proyecto minero de explotación de carbón Mina Caypa.

Se consideró necesario aplicar un modelo hidrológico que permitiera simular la relación de los diferentes parámetros que gobiernan el ciclo hidrológico y la generación de escurrimiento para así contar con información detallada de la oferta hídrica superficial.

Figura 104. Valores Mensuales

AVE MONTHLY BASIN VALUES

MON	RAIN (MM)	SNOW FALL (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	WATER YIELD (MM)	ET (MM)	SED YIELD (T/HA)	PET (MM)	PERCOLATION
1	3090.57	0.00	3032.70	0.56	2840.09	16.10	3061.00	136.40	272.80
2	4630.75	0.00	4563.95	2.94	4768.72	28.67	5261.33	114.62	229.24
3	1431.64	0.00	1395.81	1.23	1411.70	51.61	434.49	136.30	272.6
4	5201.56	0.00	5129.98	1.38	4959.29	43.24	577.71	144.56	289.12
5	10878.31	0.00	10746.20	3.66	10776.36	50.68	673.56	174.19	348.38
6	10956.27	0.00	10854.97	3.93	11023.47	28.33	495.92	186.67	373.34
7	12153.91	0.00	12055.16	3.90	12004.14	20.85	3009.76	191.73	383.46
8	11006.24	0.00	10890.05	4.03	10964.61	28.23	5182.26	222.95	445.90
9	9261.11	0.00	9135.92	3.72	9280.99	47.15	6103.62	218.17	436.34
10	113.24	0.00	17.79	1.40	19.09	56.40	10.04	207.25	414.5
11	73.93	0.00	26.23	1.14	27.55	40.77	11.41	173.46	346.92
12	9.11	0.00	0.22	0.40	0.79	18.81	0.08	141.86	283.72

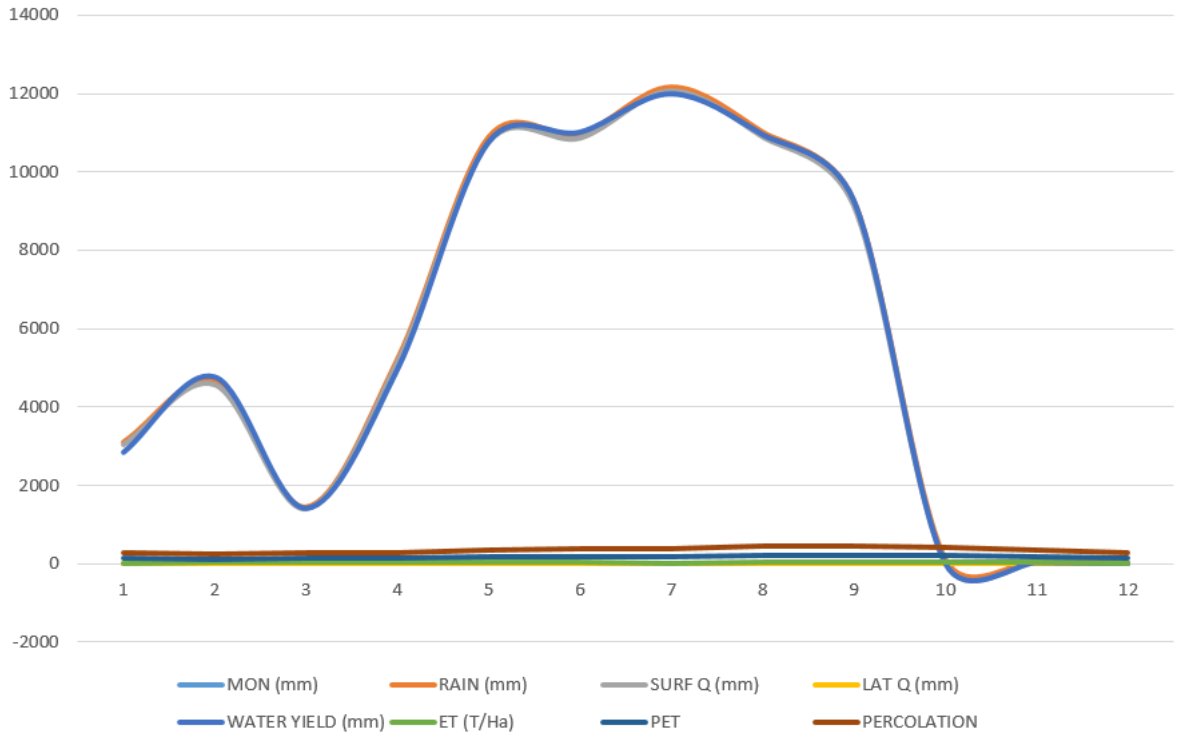
Fuente: Los Autores

A partir de lo anterior, en el alcance de la metodología se plantea simular el comportamiento hidrológico de los principales afluentes del Río Ranchería mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT y evaluar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca mediante la estimación de indicadores hídricos. Sobre este escenario se

contempla un hipotético aumento de las zonas deforestadas en la cuenca. El cual nos brindará una respuesta aproximada ante cambios extremos de deforestación como resultado de actividad minera.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de las variables hidrológicas para este escenario.

Figura 105. Variables hidrológicas medias mensuales para escenario 2012 – 2020



Fuente: Los Autores

De hecho, SWAT es una herramienta para evaluar el impacto de la actividad humana, el cambio climático en la cantidad y tasa de producción de agua y sedimentos a nivel de cuenca hidrológica, subcuenca o unidad de respuesta hidrológica (HRU). Pero también es un software que aparentemente se transforma en una herramienta de planificación, ya que puede evaluar el impacto del uso del suelo, las actividades de restauración y diferentes medidas de protección del suelo en toda la cuenca optimizando la toma de decisiones.

Al relacionar la precipitación (RAIN), con el escurrimiento (SURF Q), el escurrimiento subsuperficial (LAT Q) la evapotranspiración real (ET), el agua de escorrentía generada por las HRU (WATER YIELD), la cantidad de sedimentos emitidos por las HRU (SED YIELD) y la percolación (PERCOLATION), se puede decir que para el escenario de aumento de actividad minera, la porción que se convirtió en escorrentía subsuperficial es de 1.98% la porción que se evaporó y

transpiró fue de 10.13%, la porción de la lluvia que se transformó en escurrimiento tuvo un valor medio de 35.36%, y la porción que se percoló es de 39.82%.

Según lo mencionado anteriormente, esos cambios efectuados en la respuesta hidrológica de la cuenca no se vieron muy afectados por esta pequeña modificación en la cobertura vegetal. Por ende, se entiende que cada año el caudal se incrementó en el escenario de aumento de actividad minera, lo que evidentemente nos muestra que son proporcionales ya que al aumentar el área deforestada aumenta el caudal de escorrentía superficial en la cuenca.

9.2 LABORATORIOS

El alcance del proyecto no contempla la ejecución de laboratorios dado que la modelación de la cuenca y simulación de los parámetros hidrológicos se realizará en el software SWAT con los datos proporcionados por diferentes sistemas de información y entidades gubernamentales.

10. RECOMENDACIONES

A través de la aplicación del SWAT para el modelo y el proceso en general, se exponen algunas sugerencias para futuros procesos.

Debido a que la zona de la Guajira presenta variación climática y alteración en los datos, surgen algunas brechas. Al realizar el levantamiento de información en la zona de estudio para precipitación, los datos presentan altas diferencias al momento de hacer la calibración y validación, se hace necesario completar los datos con una estación cercana que presente el mismo rango de información, en el tiempo establecido de modelación. Para el caso de la Cuenca del Río Ranchería y la falta de información óptima se realiza el completado de datos con una estación que perteneciera a la zona de estudio, aun así, se presentaron grandes diferencias al momento de generar los datos de caudal.

Se recomienda, hacer la toma de datos de una estación que los tenga lo más completos posibles para que así evitar el completado de datos para que la calibración y validación se ejecute sin errores y no pierda series hidrológicas y de calidad de agua que puedan alterar los resultados de manera significativa.

En cuanto al análisis de calidad de agua y minería, se recomienda obtener datos actualizados y completos de calidad de agua en la zona de estudio, así como la obtención de datos de los niveles de Nitrógeno Orgánico (NO kg/día), Nitrógeno Amoniacal (NH4 kg/día), Nitratos (NO3 kg/día), Nitritos (NO2 kg/día), Fósforo orgánico (PO kg/día), Fósforo inorgánico (PI kg/día). Datos que pueden ser cargados mediante un punto (Point Source Discharges) asignado a una zona escogida del río en estudio.

Las imágenes satelitales aplicadas como capas asignadas al modelo se deben verificar y corroborar que sean lo más actualizadas y de mayor calidad posible, para que presenten mejores resultados en cuanto al análisis de usos del suelo, ya que para el caso de la cuenca del Río Ranchería en la búsqueda de las mejores capas no fue posible generar la totalidad de la zona que se tenía prevista con los DEM existentes y la cobertura vegetal presenta errores al momento de realizar el montaje en el modelo. Para lo cual se trabajó con las capas expuestas y que no arrojaron errores, por lo tanto, se logró completar la totalidad de la cuenca.

Se recomienda a las entidades gubernamentales garantizar la trazabilidad de la información arrojada por las estaciones meteorológicas en el sector, con el fin de obtener datos de una estación lo más completos posibles para así evitar errores en la calibración y validación. Por lo tanto, obtendremos una ejecución sin errores y sin pérdida de series hidrológicas y de calidad de agua que puedan alterar los resultados de manera significativa.

Se recomienda trabajar mucho más en las políticas que rigen los contratos y licencias de explotación minera, dado que, según reportes, blogs y denuncias, actualmente La Guajira presenta demasiados puntos de explotación ilegales y fraudulentos. Por lo cual, se entiende que los datos del presente estudio se considera afectación legal, mas no se involucran las acciones ilícitas y corruptas que por varios años se han instaurado en la región.

11. CONCLUSIONES

Mediante la modelación de la cuenca hidrológica del Río Ranchería, se lograron obtener varios aportes y recomendaciones para la aplicación de SWAT, puesto que, este realiza un análisis completo de la zona de estudio de la cuenca mediante uso de suelos y composición climática. Por ende, fue posible generar un modelo que simule los comportamientos de la cuenca, y para esto se hace necesario tener de primera mano los datos base reales levantados en campo o bien mediante sistemas de información geográfica.

Surgieron algunos limitantes en cuanto a la información base para la implementación del modelo. La capa base DEM, no generó las corrientes esperadas para la totalidad abarcada por la Cuenca del Río Ranchería, se realizó la simulación con la información desde Hato Nuevo hasta Riohacha.

Las capas NDVI de cobertura vegetal necesarias para abarcar la zona no cumplían con la calidad óptima presentando errores en la ejecución, por lo cual, se logró realizar la unión con solo dos imágenes que presentaban una buena calidad. ArcGis las unió sin inconvenientes y alcanza a abarcar la zona de la que se generaron las corrientes finalmente.

Se tiene en cuenta la limitante por desinformación que presenta el departamento de La Guajira, en cuanto a precipitación y temperatura se pudieron consolidar datos que presentaban continuidad desde el año 2012, recomendando que para realizar una buena simulación es necesario tener un rango más amplio de datos al utilizado en este proyecto; a lo que sería bueno realizar un planteamiento frente a las entidades reguladoras para que se pueda tener mejor información y adaptar equipos que permitan la toma de datos de manera óptima.

Se obtuvieron datos para los escenarios de cambio climático, con variaciones en la precipitación y temperatura, presentando alteraciones en la cantidad de nitratos, los cuales son los principales nutrientes de la naturaleza; teniendo en cuenta que las actividades antrópicas generan alteraciones en los comportamientos de los ciclos, que para este ejercicio en el 2040 se presentará una reducción del 20\% en los nitratos que componen la Cuenca del Río Ranchería, si la precipitación y el caudal disminuye y la temperatura aumenta.

El río Ranchería tiene una gran capacidad de amortiguación y autodepuración siempre y cuando los niveles de minería se mantengan y no incrementen, si esto llegase a ocurrir sería necesario tomar medidas para evitar el desequilibrio de los nutrientes del río.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Martínez Ortiz, “Impacto socioeconomico de la minería en Colombia", Fedesarrollo, abr. 2012.

[2] M. Cárdenas, & M. Reina, “La Minería en Colombia: Impacto Socio Económico y Fiscal", Fedesarrollo, 2008.

[3] Corpoguajira, “Plan de Ordenamiento de la Cuenca del Río Ranchería”, 2011.

[4] IDEAM, “Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia", Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, nov. 2013.

[5] IDEAM, “Estudio Nacional del Agua", Bogotá, 2018, pp. 27-38.

[6] IDEAM, “Hoja metodológica del Índice de calidad del agua", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2020, pp. 12.

[7] IDEAM, “Hoja metodológica del Índice de alteración potencial de la calidad del agua", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2020, pp. 16.

[8] N. Uribe, “SWAT Conceptos básicos y guía rápida para el usuario", abr. 2010.

[9] UPME, “Producción Nacional de Minerales", dic. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-sectoriales/Paginas/mineriaconsolidadonacional.aspx

[10] IDEAM, “Estudio Nacional del Agua", Bogotá, 2019, pp. 48.

[11] C. Gerra, “Una mirada histórica y etnográfica a la cuenca del río Ranchería", sep. 2014.

[12] Corpoguajira, “Plan de Gestión Ambiental Regional de Corpoguajira", 2009.

[13] J. M. Castillo, “Monografía de Grado”, jun. 2020.

[14] Corte Constitucional, “SentenciaT-256/15", 2015.

[15] Agencia Nacional de Minería, “Carbón, el padrino minero de Colombia", 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/?q=carbon_el_padrino_minero_de_colombia_principal

[16] A. Bautista, “Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala", Revista internacional de contaminación ambiental, México, 2014.

[17] A. Salazar, & C. Pineda, “Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales", Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, 2018.

[18] J. Refsgaard, & H. Henriksen, “Modelling guidelines terminology and guiding principles", Advances in Water Resources, 2004. pp. 27-82.

[19] E. Bueno, R. De Mello, & V. Augusto, “Desempeño de modelo SWAT para diferentes criterios de unidades de respuesta hidrológica", Ciencia Agraria, 2017.

[20] S. Abbas, Y. Xuan, & R. Bailey, “Improving River Flow Simulation Using a Coupled Surface-groundwater model for Integrated Water Resources Management", HIC, 2018.

[21] T. Santosh Reddy & S. Dhanasekar, “Analysis the Quantity of Water Flow for Watershed by Assessing Swat Model", International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, pp. 462–472.

[22] C. Inés, & U. Danilo, “Conflictos socio ambientales por el agua en La Guajira", 2013.

[23] Extracto de Sentencia Corte Constitucional, “Situación actual de los niños y niñas del pueblo Wayúu", 2017.

[24] ANLA, “Reporte de Alertas Zona Hidrográfica Caribe-Guajira”, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018.

[25] IDEAM, “Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos”, 2022. [En línea]. Disponible en: http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

[26] L. Díaz, A. Espinosa & G. Molina. “Salud ambiental del Río Ranchería a través de macroinvertebrados acuáticos en el área de influencia del complejo carbonífero El Cerrejón", 2020. pp. 49-63.

[27] Ethiopian Journal, “Prediction of the streamflow of Hadejia-Jama’are-Komadugu-Yobe-River Basin, North Eastern Nigeria, using swat model”, Apr. 2016.

[28] Journal of Engineering Issuew and Solutions, “Sensitivity analysis of groundwater parameters of SWAT model Effects of source digital elevation models in assessment of gross run- off-river hydropower potential", Nepal, Apr. 2021.

[29] M. Zare, S. Azam & D. Sauchyn, “Article Evaluation of Soil Water Content Using SWAT for Southern Saskatchewan", Canada, Jan. 2022.

[30] T. Escalante, J. Llorente, D. Espinosa & J. Soberon, “Base de datos y sistemas de información: aplicaciones en biogeografía", Revista de la Academia Colombiana de Ciencias, 2020. pp. 325-341.

[31] ANLA, “Reporte de Alertas Zona Hidrográfica Caribe-Guajira”, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018. pp. 5–24.

[32] EARTH DATA, “NASA - Descarga DEM”, [En línea]. Disponible en: https://search.asf.alaska.edu/\#/

[33] LANDVIEWER, “Landviewer - Descarga NDVI”, [En línea]. Disponible en: https://eos.com/landviewer/?lat=4.64930&lng=-74.06170&z=11

[34] FAO, “FAO/UNESCO Soil Map of the World”, [En línea]. Disponible en: https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/

[35] Data bases, “SWAT Appendix a Model databases", 2012.

[36] IDEAM, PNUD, MADS, DNP y CANCILLERÍA. “Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia", Comunicación Nacional de Cambio Climático, 2015.

[37] F. Hernández Saucedo, R. Rivera Toral, & S.Ibáñez Castillo, “Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México", Agrociencia, 2012. pp. 101-105.