



Anexo: Guía de uso del componente en sistemas de información geográfica - SIG para la implementación práctica de la Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos de zonas probables de recarga de acuíferos. versión 2.0

Bogotá, Febrero de 2025



**MINISTERIO DE MINAS Y
ENERGÍA**

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	OBJETIVO	9
2.1.	Objetivos específicos	9
3.	DEFINICIONES	10
4.	MANUAL METODOLÓGICO SIG	13
5.	VARIABLES DEFINIDAS	14
5.1.	Litología (L)	16
5.2.	Relieve (R)	21
5.3.	Incidencia Geoestructural (Ie)	30
5.4.	COMPONENTE SUELO	45
5.4.1.	Subcomponente cobertura de la tierra (C)	45
5.4.2.	Suelos (Is)	47
5.4.2.1.	Textura	48
5.4.2.2.	Drenaje natural	48
6.	PROCESO PARA EL CÁLCULO DE FACTORES DE PONDERACIÓN OBJETIVOS.	50
7.	RESULTADO IZPR	58
8.	SOFTWARE LIBRE - ALGUNAS HERRAMIENTAS DE CÁLCULO	61
9.	PRODUCTOS SIG ESPERADOS	101
10.	RECOMENDACIONES	102
11.	BIBLIOGRAFÍA	103

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Herramienta Clip	15
Figura 2 Unidades geológicas de las cuencas de los ríos Suratá y Tona	16
Figura 3 Tabla de atributos con la columna "Class_L" que corresponde a la clasificación de las unidades geológicas	18
Figura 4 Selección de herramientas para exportar la capa de litología en formato ráster	19
Figura 5. Herramienta "Feature to Raster" para generar el ráster de la variable litología	20
Figura 6 Ráster de la clasificación variable litología en las cuencas de los ríos Suratá y Tona	21
Figura 7 Herramienta <i>Clip</i> donde se genera el corte de los drenajes sencillos por cuenca.	22
Figura 8 Herramienta <i>Feature to Point</i> usada para determinar el punto medio de cada drenaje sencillo.	23
Figura 9 a) Panel de la herramienta <i>Average Nearest Neighbor</i> y b) Resultado del cálculo de la distancia entre los centroides.	24
Figura 10 Herramienta <i>Kernel density</i> con la definición de los parámetros para realizar el cálculo de la densidad de drenaje de la cuenca del río Lebrija.	25
Figura 11 Herramienta para crear un mosaico con los ráster resultantes.	26
Figura 12. Herramienta para realizar el recorte al área de estudio final.	26
Figura 13. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de los ríos Suratá y Tona.	27
Figura 14. Modelo de elevación digital (DEM) del área de las cuencas de los ríos Surata y Tona cargado en el <i>software</i> SAGA.	28
Figura 15. Herramienta para calcular el ITH en un paso	28
Figura 16. Resultado del cálculo del ITH en la zona de estudio.	29
Figura 17. Mapa de índice topográfico de humedad de la cuenca de los ríos Suratá y Tona.	30
Figura 18 Vista de la caja de herramientas <i>NetworkGT</i> en el <i>software</i> <i>ArcMap</i> .	32
Figura 19. Ejemplo del uso de la herramienta <i>Repair Network</i> para correcciones topológicas de una red de lineamientos.	33
Figura 20 Panel de la herramienta <i>Sets</i> e intervalos establecidos para el caso de un esfuerzo sigma máximo orientado E-O.	34
Figura 21 Resultado de la herramienta <i>Sets</i> donde se observa el azimut de los rasgos lineales y la agrupación con respecto a la posición del sigma máximo.	35
Figura 22 Herramienta <i>Kernel density</i>	36
Figura 23 Mapa de densidad de lineamientos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.	37
Figura 24 Herramienta <i>Branches and Nodes</i> de la herramienta <i>Network GT</i> .	38
Figura 25 Herramienta <i>Kernel Density</i> para el cálculo de la densidad de nodos conectados.	39

Figura 26 Mapa de conectividad de lineamientos en las cuencas de los ríos Suratá y Tona	39
Figura 27 Herramienta empleada para el cálculo de la longitud de las fallas en el área evaluada.	40
Figura 28 Herramienta <i>Field Calculator</i> y expresión definida para calcular la zona de daño aproximada.	41
Figura 29 Ejemplo de la tabla de atributos que relaciona las características de las fallas en el área de las cuencas de los ríos Suratá y Tona. El peso se asigna según la cinemática de cada estructura.	42
Figura 30 Ejemplo del uso de la herramienta de geoprocesamiento <i>Buffer</i> . La distancia por usar viene dada por el campo asociado a las zonas de daño en la tabla de atributos.	43
Figura 31. Conversión de la capa temática a ráster asignándole su valor según el peso asignado a la estructura.	44
Figura 32 Ejemplo del mapa de zonas de daño y su calificación para el área de la cuenca del río Suratá y Tona	45
Figura 33 Tabla de atributos con la columna "Class_U" que corresponde a la clasificación de las coberturas vegetales	46
Figura 34 Ejemplo conversión a ráster de la capa cobertura vegetal.	46
Figura 35 Mapa cobertura vegetal para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.	47
Figura 36 Tabla de atributos con la columna "Class_T" que corresponde a la clasificación de Suelos	48
Figura 37 Mapa Suelos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.	49
Figura 38. Herramienta Raster Calculator y la expresión asociada al escalamiento de las variables aplicada sobre la variable litología.	51
Figura 39. Inversión de los valores escalados del criterio densidad de drenaje mediante el uso de la expresión adecuada en la herramienta Raster Calculator.	53
Figura 40. Ejemplo del uso de la herramienta Composite Bands para siete criterios. Nota: solo es un ejemplo del uso de la herramienta, para la aplicación de la guía deben usarse todos los criterios contemplados.	54
Figura 41. Uso de la herramienta Principal Components para hallar la matriz de correlación entre los criterios.	55
Figura 42. Ejemplo de parte del contenido del archivo de texto obtenido al ejecutar la herramienta Principal Components. La matriz de correlación marcada por la caja roja es el insumo fundamental para la obtención de los pesos objetivos. El contenido restante puede ser omitido.	56
Figura 43. Ejemplo del proceso para hallar la desviación estándar de la variable litología escalada en el programa QGIS. Debe realizarse para cada criterio.	57
Figura 44. Ejemplo de hoja de cálculo en la que se aplican las fórmulas del método CRITIC explicadas en detalle en la sección 8.3 del documento principal de la guía metodológica.	58
Figura 45. Ejemplo de la expresión usada para hallar el índice de zonas potenciales de recarga en las cuencas de los ríos Suratá y Tona.	59
Figura 46. Ejemplo de reclasificación de la capa producto de la combinación lineal de los criterios.	60
Figura 47. Interfaz gráfica de Qgis.	61
Figura 48. Menú de paneles	62

Figura 49. Ruta Cortar	63
Figura 50. Herramienta Cortar	64
Figura 51. Ruta Centroides	64
Figura 52. Interfaz de la herramienta Matriz de distancia	65
Figura 53. Mapa en donde se visualiza el corte de la capa vectorial de drenajes, y los centroides en el área del Páramo de Santurbán, cuenca la baja.	66
Figura 54. Atributos capa de centroides	67
Figura 55. Menú estadísticas básicas	67
Figura 56. Resultados estadística básica	68
Figura 57. Resultados de estadísticas básicas	68
Figura 58. Ruta de herramientas ráster	69
Figura 59. Caja de herramientas	70
Figura 60. Sistema de Fallas en la cuenca La Baja	70
Figura 61. Ubicación y menú Densidad de líneas	71
Figura 62. Densidad de Líneas a partir de sistema de fallas	72
Figura 63. Menú intersección de líneas	73
Figura 64. Resultado y detalle de intersección de líneas	74
Figura 65. Menú herramienta para calcular la densidad de puntos	75
Figura 66. Densidad de puntos de intersección de sistema de fallas de la cuenca La Baja.	76
Figura 67. Menú alinear rásteres	80
Figura 68. Lista de elementos a alinear	81
Figura 69. Calculadora ráster de Qgis, en la parte superior derecha las capas cargadas en Qgis y en la parte inferior la suma ponderada de tres de estas capas	82
Figura 70. Ruta para instalar complementos, en la parte inferior se ven algunos complementos instalados	83
Figura 71. Despliegue de menú de instalar complementos	84
Figura 72. Uso de herramientas Grass desde Qgis.	84
Figura 73. Menú herramienta r.reclass	85
Figura 74. Ejemplo de archivo texto para reclasificación de capas	86
Figura 75. Ejemplo de reclasificación de capa de densidad, a la izquierda capa original a la derecha el resultado de la reclasificación	87
Figura 76. Método CRITIC, al costado parte de la metodología que se desarrolla en SIG, al costado Derecho parte de la metodología que se desarrolla en Excel.	88
Figura 77. Variables para definir la zona de recarga	89
Figura 78. menú construir Raster virtual.	90
Figura 79. Capas listas para ser apiladas y conformar un ráster multibanda	90
Figura 80. Área de muestreo ubicada dentro de las cuencas de estudio.	91
Figura 81. Muestreo de la capa y generación de puntos dentro del área de estudio	92
Figura 82. Puntos aleatorios generados dentro de área de estudio	93
Figura 83. Muestreo de valores en el ráster multibanda.	93
Figura 84. Tabla de atributos de shape muestreado en los puntos aleatorios generados.	94
Figura 85. Exportar valores como archivo de texto.	94
Figura 86. Personalizar la cinta de opciones	95

Figura 87. Opciones para personalizar la banda	96
Figura 88. Activación de herramientas para análisis	97
Figura 89 Vista de análisis de datos.	97
Figura 90. Herramientas de análisis de datos	98
Figura 91. Menú de la herramienta coeficiente de correlación	99



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Características texturales a identificar para unidades no litificadas	17
Tabla 2 Características a identificar para las rocas	17
Tabla 3. Valores máximos y mínimos por variable	98
Tabla 4. Valores normalizados se detalla la formula considerada	98
Tabla 5. Matriz de correlación para 5 variables de entrada	99
Tabla 6. Cálculo de pesos de ponderación	100

**ANEXO: GUÍA PARA EL USO DEL COMPONENTE EN SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - SIG PARA LA IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE
LA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES
DE RECARGA DE ACUÍFEROS. VERSIÓN 2.0**

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha identificado la necesidad de construir y diseñar una guía a nivel nacional para definir las zonas potenciales de recarga de acuíferos, dicha tarea se ha desarrollado interdisciplinariamente lo que se refleja en las entidades que intervinieron en la elaboración de este documento IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y SGC, así como la participación de los grupos de valor a través de diferentes actividades y mesas de trabajo para el diseño y estructuración de la “*Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos*”, realizando postulaciones de variables, parámetros y componentes de carácter espacial vinculados con la recarga de acuíferos, y el cómo combinar dichas variables para priorizar zonas con mayor probabilidad de infiltración.

Ahora bien, este documento es parte integral de la publicación de la “*Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos*” y busca presentar la metodología necesaria para definir las zonas de recarga suponiendo que el usuario tiene la información necesaria, la cual ha de ser procesada en diferentes sistemas de información geográfica. Dicho procesamiento por la tradición en cada una de las entidades involucradas se ha realizado principalmente en Arcgis, sin embargo, se ha construido un aparte adicional orientada a software libre.

La metodología aquí planteada se puede definir en tres etapas:

- 1- Construcción de cada una de las variables a la misma escala de trabajo: en la que se obtienen capas temáticas espacialmente distribuidas que

identifican un parámetro relacionado con la recarga, cada una de ellas con diferente nivel de complejidad.

- 2- Definición de pesos: Recuerde que la guía busca definir los pesos mediante la integración de métodos objetivos fundamentados en la información que cada variable aporta al proceso evaluado (recarga) y métodos subjetivos basados en el conocimiento de la zona que tiene el profesional. Los pesos objetivos se obtienen mediante la aplicación del método CRITIC por sus siglas en inglés, a su vez, los pesos subjetivos provienen de la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico. La aplicación y ejecución de ambos métodos será desglosada en el presente anexo.
- 3- Sumatoria lineal ponderada de las capas temáticas: Es una de las etapas más simples, sin embargo, en el presente manual se hace un detalle de los posibles errores que pueden surgir, por ejemplo, ajustar extensión de las capas, la resolución espacial de las mismas, diferencias en el origen de coordenadas, entre otros.

La última parte del presente documento tiene como objetivo explicar el uso de algunas herramientas de *software* libre que son útiles para la construcción de las variables, la definición de los pesos y la definición de zonas potenciales de recarga.

2. OBJETIVO

Generar un manual de manera estructurada y organizada para el uso del componente espacial (SIG) en la implementación de la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"*, que busca ser una ayuda de memoria de las herramientas y pasos en un sistema de información geográfica.

2.1. Objetivos específicos

- 1 Estructurar el paso a paso del uso de datos espaciales en un *software* que permita el almacenamiento, manejo, actualización y el intercambio de datos entre diferentes entidades y usuarios.

- 2 Proveer una salida gráfica digital a escala 1:100.000 o mayor, si los insumos lo permiten, para interpretación y análisis de expertos y usuarios interesados.

3. DEFINICIONES

Se incluyen aquí las definiciones más relevantes para la interpretación de la presente guía.

- **Clip:** Es una herramienta que permite recortar una capa con la forma de otra capa que se superponga (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **DEM:** Un Modelo Digital de Elevación o MDE es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, describiendo una superficie continua en formato ráster (Benavides, y otros, 2017).
- **Feature class:** Son clases de entidades y cada clase almacena un conjunto de puntos, líneas (arcs), polígonos o anotaciones (texto). Las coberturas pueden tener una topología, que determina las relaciones entre las entidades. Es la representación de un objeto geográfico, se dice que un objeto en un SIG es cualquier elemento relativo a la superficie terrestre que tiene tamaño, es decir, que presenta una dimensión física (alto - ancho - largo) y una localización espacial o una posición medible en el espacio relativo a la superficie terrestre. (Environmental Systems Research Institute, 2019).
- **GDB:** La GeoDataBase - GDB es la estructura de datos nativa para el software ArcGIS y es el formato de datos principal que se utiliza para la edición y administración de datos. ArcGIS trabaja con información geográfica en numerosos formatos de archivo del sistema de información geográfica (SIG), también diseñado para trabajar con las capacidades de la geodatabase. (Environmental Systems Research Institute, 2019).
- **Geoestadística:** La geoestadística es una clase de estadística utilizada para analizar y predecir los valores asociados con fenómenos espaciales o espaciotemporales. Incorpora las coordenadas espaciales (y en algunos casos temporales) de los datos dentro de los análisis.

Muchas herramientas geoestadísticas se desarrollaron originalmente como un medio práctico para describir patrones espaciales e interpolar valores para ubicaciones donde no se tomaron muestras. (GeoInnova, 2019).

- **Interpolación:** Procedimiento que se emplea para predecir valores desconocidos de unas localizaciones geográficas, en la vecindad de otras localizaciones cuyos valores son conocidos. Sirven para crear una superficie continua a partir de muestras discretas con valores medidos, tales como la elevación o la concentración química. Hay varias herramientas de interpolación, y cada una de ellas incorpora una variedad de parámetros que influyen en la superficie de salida. (Gutiérrez , 2011).
- **Kernel Density:** Es una herramienta que permite calcular la densidad de las entidades lineales o de puntos en la vecindad de cada celda ráster de salida (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **Merge:** Es una herramienta que permite Combinar varios datasets de entrada en un único dataset de salida nuevo. Esta herramienta puede combinar tablas o clases de entidad de punto, de línea o de polígono (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **MXD:** Este archivo es un documento de salida de ArcGis (ArcMap) y hace referencia al mismo como un documento de mapa o mxd, ya que la extensión del nombre de archivo (.mxd) se anexa automáticamente al nombre del documento de mapa. Los documentos de mapa (.mxd) contienen propiedades de visualización de la información geográfica con la que se trabaja en el mapa (como las propiedades y definiciones de las capas del mapa, marcos de datos y el diseño del mapa para la impresión), además de cualquier personalización opcional y macros que pueda agregar al mapa. (Environmental Systems Research Institute, 2018).
- **Raster:** Es el formato que se define como una grilla o una malla de rectángulos o cuadrados a los que se les denomina grilla; cada retícula posee información alfanumérica asociada que representa las características de la zona o superficie geográfica que cubre. También se define como el formato que consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, por ejemplo, la temperatura. (Gutiérrez , 2011) (Environmental Systems Research Institute, 2018).

- **Reclassify:** Es una herramienta que permite cambiar los valores en un ráster (reclasifica) (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **Resample:** Es una herramienta de que permite cambiar la resolución espacial de un ráster, además admite establecer reglas para agregar o interpolar valores en los nuevos tamaños de píxel (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **Resolución:** Tamaño del píxel de la imagen. La dimensión de la celda es básica en la confección del mapa, de manera que cuanto más reducido sea el mismo más precisa será la representación de la imagen; en contrapartida, mayor será la memoria ocupada por el fichero que almacene la información. (Glosarios de términos especializados, 2016)
- **Shape:** Un shapefile es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). (Environmental Systems Research Institute, 2018).
- **Slope:** Es una herramienta que estima las pendientes (gradientes o tasas de cambio máximo en el valor z) desde cada celda de una superficie de un ráster. Como entrada se utiliza un ráster de modelo de elevación del terreno (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **Sistema de Referencia:** Marco de referencia espacial que permite la definición de localizaciones mediante coordenadas. Las referencias espaciales incluyen un sistema de coordenadas para los valores 'x', 'y', y 'z'. En las geodatabases corporativas, la referencia espacial también incluye valores de tolerancia y resolución. Toda esta información junta ayuda a indicar en qué parte de la tierra se representan las formas de su mapa plano. (Environmental Systems Research Institute, 2018).
- **Unión:** Es una herramienta que permite realizar la unión geométrica de las entidades de entrada. Todas las entidades y sus atributos se escribirán en la clase de entidad de salida (Environmental Systems Research Institute, 2016).
- **Vector:** El formato vectorial representa la información por medio de vectores formados por pares ordenados de coordenadas, este

ordenamiento da lugar a las entidades universales con las que se representan los objetos gráficos. Adicional contiene datos espaciales (ubicación) y de atributos (descriptivos) de entidades geográficas. (Gutiérrez , 2011) (Environmental Systems Research Institute, 2018).

4. MANUAL METODOLÓGICO SIG

Se inicia este manual con la lectura y entendimiento de la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"*, a escalas principalmente 1:100.000 o mejores si la resolución de las variables de entrada lo permiten, es importante recordar que las variables que intervienen en la identificación de las Zonas Potenciales de Recarga son:

L = Litología

R = Relieve

Ie = Incidencia geoestructural

C = Cobertura de la tierra

Is = Suelos

Las cuales a su vez se componen de parámetros o criterios, los cuales han de ser combinados considerando una suma ponderada para cada píxel, la cual viene definida por la siguiente fórmula:

$$IZPR = \sum_{j=1}^8 W_j * S_j$$

Donde, IZPR corresponde al índice de zona potencial de recarga que evidencia la potencialidad de cada celda para favorecer el proceso de recarga de acuíferos, j responde al número de criterios, W_j es el peso individual de cada criterio determinado mediante la integración de los métodos anteriormente descritos y S_j corresponde al ráster de cada criterio calificado en función del potencial de recarga.

Por otro lado, el uso de la información cartográfica relacionada con las variables de Geología/Litología, Relieve, Incidencia geoestructural, Cobertura vegetal y Suelos de la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"*, han de ser consultadas y/o solicitadas a la entidad del orden nacional correspondiente o de ser posible construir las variables a partir de información de mejor resolución.

Para la aplicación del presente manual, y como guía al usuario, se incluye en el presente documento el paso a paso de la aplicación de la guía y los resultados obtenidos en una zona montañosa en el Páramo de Santurbán en las cuencas de Surata-Tona, donde la información temática fue consultada al Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, a través del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC, y bases temáticas del Servicio Geológico Colombiano – SGC; con dicha información y utilizando el software ArcGis 10.x (Advanced), se procedió a estructurar un MXD y una GDB.

5. VARIABLES DEFINIDAS

Antes de iniciar la ejecución práctica de este manual se ha de tener en cuenta las siguientes recomendaciones y procesos previos, lo que facilitará el desarrollo de este:

Tener a la mano la *“Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos”*.

Disponer de un profesional en el área de la geomática, que cuente con la experiencia necesaria en el manejo de información espacial, geoestadística y software especializado en procesamiento con datos geográficos, así como el o los profesionales temáticos expertos en cada variable, necesarios para la interpretación de los resultados de acuerdo a la guía.

Incorporar en la GDB las variables consultadas y descargadas de la zona de interés a utilizar, y depurarlas si es el interés del experto.

Manipular y/o transformar el *feature class* de cada variable, limitándose al área de estudio por medio de un recorte (Clip) de la zona de interés.

Identificar y definir el sistema de referencia (origen único nacional CTM-12) correspondiente a la zona de estudio para cada variable.

Iniciar el presente manual para definir, estructurar y normalizar el componente espacial por variable.

Seleccionar el área de estudio

Para realizar un ejemplo del uso de la herramienta "Clip", se utilizará el feature class Cobertura_Tierra_2018, el cual se descarga de la página WEB del SIAC, o del portal Colombia en Mapas. Se procede a "recortar" el área de interés, para el presente documento se trabajó en el área de las cuencas hidrográficas de los ríos Suratá y Tona, en el departamento de Santander, lo anterior debido a que el *shapefile* que se descarga en la página del SIAC corresponde a un *shape* con información a nivel nacional.

Se ingresa a Geoprocessing / Clip del ArcMap

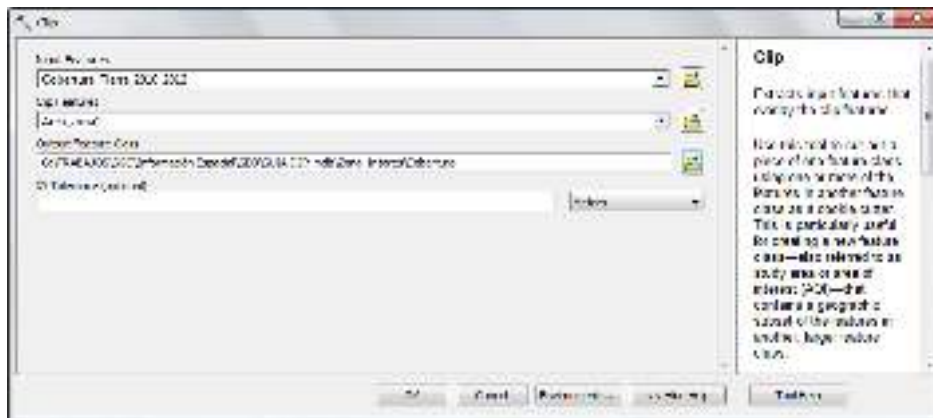


Figura 1 Herramienta Clip

Para las demás variables de la guía que se requieran recortar a la zona de trabajo, se realiza el mismo procedimiento de "recorte o clip" descrito en este ítem, siempre y cuando correspondan a capas tipo vector. Para las variables tipo ráster se realizará el "paso a paso" más adelante.

Posteriormente, y con los respectivos *feature class* de cada variable de la zona de interés a utilizar en el desarrollo de la "Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos", se procede a clasificar, tomando en cuenta lo enunciado en la guía, así como la experticia del profesional a cargo. A continuación, se presenta la orientación para la clasificación de las variables y parámetros contemplados en la guía metodológica:

Figura 2 Unidades geológicas de las cuencas de los ríos Suratá y Tona

Identificación de las características texturales

Se debe completar la Tabla 1 y Tabla 2 correspondientes a depósitos, respectivamente, según sea el caso.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de identificación de aspectos texturales de distintas unidades de roca y depósitos de las planchas geológicas 109-Rionegro (Ingeominas, 1977), 120-Bucaramanga (Ingeominas, 1997b), 110-Pamplona (Ingeominas, 1977c) y 16-Galerazamba (Ingeominas, 2001).

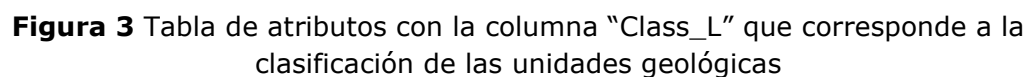
Tabla 1 Características texturales a identificar para unidades no litificadas

Nombre	Nomenclatura	Plancha	Litología predominante	Tamaño de Grano	Matriz o clasto soportado	Presencia de matriz	Tipo de Matriz
Depósitos de terraza	Qtf	109	Depósitos de gravas de areniscas de grano fino, arenas y limos	Gravas, arenas y limos	Grano soportado	Sí	Areno limosa
Depósitos de lagunas	Q1lg	147	Limos y arcillas de depósitos lagunares	Limos y arcillas	NA	NA	NA

Tabla 2 Características a identificar para las rocas

Nom bre	Nomen clatura	Plan cha	Tipo de roca	Litología predominante	Tamaño de Grano	Matriz o clasto soportado	¿Presencia de matriz?	¿Alta cementada?	Tipo de Matriz	Tipo de cemento	¿Piroclástica?	¿Presencia de vesículas?	¿Roca carbonatada?	¿Presencia de procesos de karstificación?
Granito o pesca dero	JRgp	110	Ígnea intrusiva	Granito	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	No	No
Orton eis	PDo	109	Metamórfica	Neis cuarzo-monzonítico y granodiorítico	NA	NA	NA	NA	NA	NA	No	No	No	No

Con la capa de geología de la zona de interés, el usuario realiza la valoración de la temática a partir de la información requerida en las tablas 1 y 2 y en el flujograma de clasificación de la variable Litología del capítulo 7.2.1 de la “*Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos*”. Esta clasificación se integra en la tabla del *feature class* mediante un nuevo atributo de tipo numérico entero, denominado “Class_L” para este ejercicio práctico (ver Figura 3).



Una vez se tengan todas las unidades clasificadas se procede a exportar la capa a formato ráster con la herramienta *Feature to Raster*, que se encuentra en la sección *Search* de ArcMap o directamente en las herramientas de geoprocесamiento siguiendo la ruta: *ArcToolBox/Conversion Tools/To Raster/Feature to Raster* (Figura 4).



Figura 4 Selección de herramientas para exportar la capa de litología en formato ráster

Al seleccionar la herramienta *Feature to Raster* se abre una nueva ventana donde se configuran los campos necesarios (Figura 5), en el campo "Input Features" se debe agregar la capa que contiene las unidades geológicas, en "Field", se selecciona el atributo correspondiente a la clasificación de la litología, identificado en este caso como "Class_L", en el campo "Output Raster" se define la ruta de salida y el nombre del archivo ráster y finalmente en el campo "Output cell size" se ingresa el tamaño de celda, que debe ser igual para todos los ráster generados de las distintas variables. Para este ejercicio se utilizará la misma resolución del Modelo Digital de Elevación (DEM) empleado, con una resolución espacial de 30x30 m, por lo que el valor a ingresar será 30.

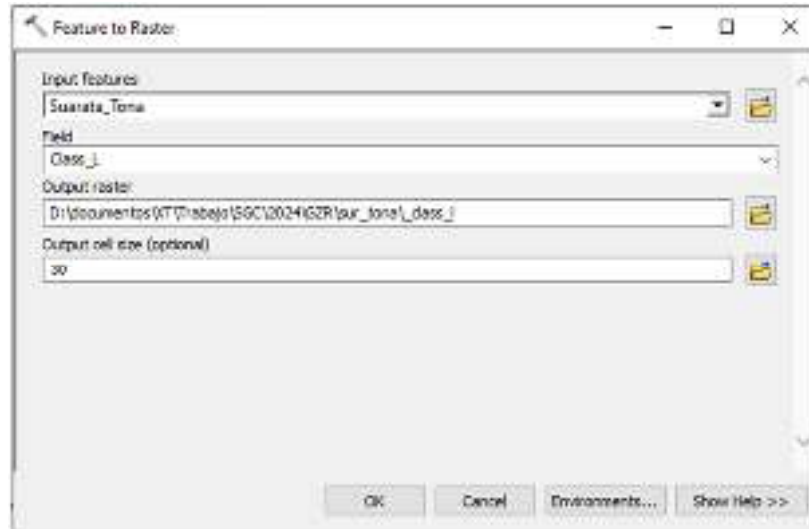


Figura 5. Herramienta “Feature to Raster” para generar el ráster de la variable litología

El resultado será un ráster con valores entre 1 y 5, según la clasificación asignada a la litología (Figura 6).

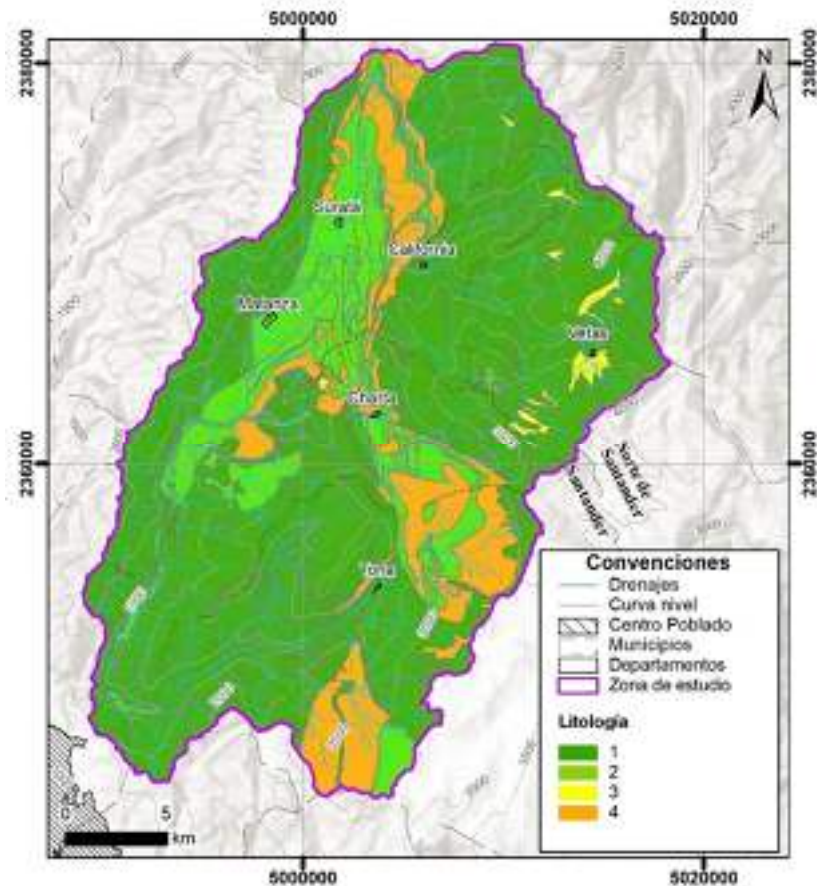


Figura 6 Ráster de la clasificación variable litología en las cuencas de los ríos Suratá y Tona

5.2. Relieve (R)

La variable Relieve se compone de dos parámetros principales: la densidad de drenaje y el índice topográfico de humedad (ITH). Estos parámetros se evalúan para integrar las características morfológicas del área de estudio a partir de información secundaria. A continuación, se describe el paso a paso para el cálculo de cada uno de estos parámetros:

Parámetro Densidad de drenaje

Se debe contar con la cartografía básica proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:100.000 o en una escala más detallada, dependiendo de los insumos disponibles. En caso de no disponer de

esta información, puede consultarse en la plataforma *Colombia en Mapas* a través del enlace <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>.

Como unidad mínima de análisis, se recomienda dividir el área de estudio en las cuencas hidrográficas definidas según la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas de Colombia del IDEAM. Los datos pueden descargarse del enlace https://bart.ideam.gov.co/cneideam/Capasgeo/Zonificacion_Hidrografica_2013_v11.zip. Posteriormente, se debe cortar la capa de drenajes sencillos obtenida de la cartografía básica del IGAC para cada cuenca dentro del área de estudio.

Con la herramienta *Clip*, ubicada en la ruta *Geoprocessing/Clip* del software Arcgis, se realiza el recorte de los drenajes sencillos para cada cuenca hidrográfica. En el campo *Input Features* se selecciona la capa de drenajes sencillos, mientras que en *Clip Features* se ingresa la capa correspondiente al área de la cuenca a procesar. Si el área de estudio incluye varias cuencas hidrográficas, este proceso debe repetirse para cada una de ellas, Figura 7.

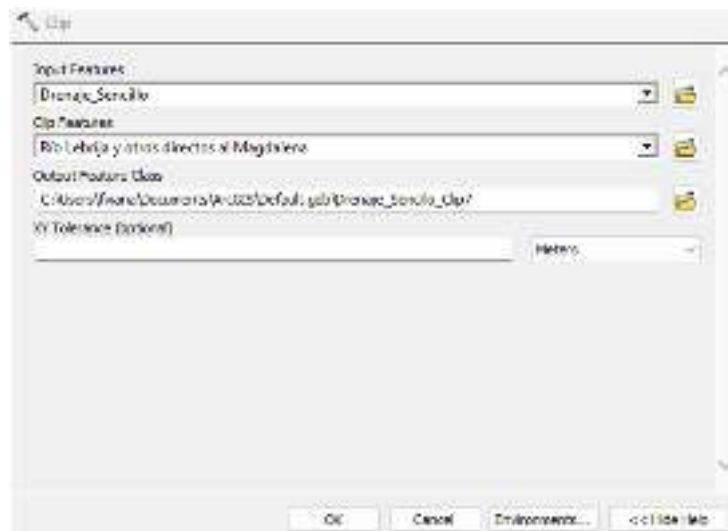


Figura 7 Herramienta *Clip* donde se genera el corte de los drenajes sencillos por cuenca.

Después del recorte de los drenajes sencillos por cada cuenca, se calculan los centroides, los cuales corresponden al punto medio de cada drenaje sencillo, esto por medio de la herramienta *Feature To Point* de ArcGIS, en la ruta *Arctoolbox/Data Management Tools/Features/Feature to Point*. Se añade la capa de los drenajes sencillos en *Input Features* y se recomienda seleccionar la casilla

Inside para que los centroides queden sobre el punto medio de cada uno de los drenajes. Este procedimiento debe ser realizado para los drenajes de cada una de las cuencas que componen la zona de estudio, Figura 8.

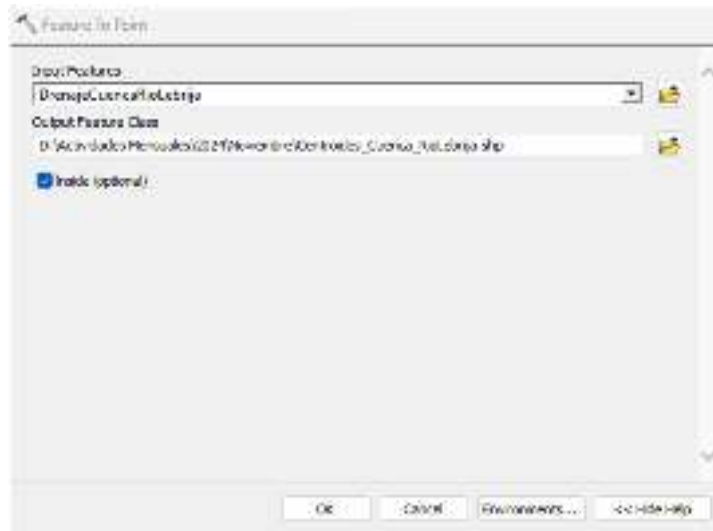


Figura 8 Herramienta *Feature to Point* usada para determinar el punto medio de cada drenaje sencillo.

Posteriormente, con el resultado de los centroides, se emplea la herramienta *Average Nearest Neighbor*, que permite obtener la distancia promedio entre los centroides de cada uno de los drenajes de las cuencas a analizar y se encuentra en la ruta *Arctoolbox/Spatial Statistics Tools/Analyzing Patterns/Average Nearest Neighbor*.

En *input feature class* se ingresa la capa resultante de la obtención de los centroides y se selecciona la pestaña de generar reporte, cuando finaliza el proceso se obtiene la distancia promedio, la cual es una representación de la distribución de los drenajes dentro del área evaluada y será usada como el radio de búsqueda que se utilizará para realizar el cálculo de la densidad de drenaje.

En el campo *Input Feature Class* de la herramienta se cargan los centroides obtenidos en el paso anterior y se deja el método de distancia por defecto, en la ventana *Results* del panel *Geoprocessing* se consultan los resultados del procesamiento, abriendo la pestaña del último proceso ejecutado de la herramienta *Average Nearest Neighbor*, la distancia promedio entre centroides

está definida por el valor asociado a la etiqueta *NNObserved*, que para el caso de la cuenca del río Lebrija usada como ejemplo es de 702,401258, Figura 9. De igual forma, se puede acceder a los resultados del procesamiento dando clic derecho sobre la pestaña *Messages* y seleccionando *View*.

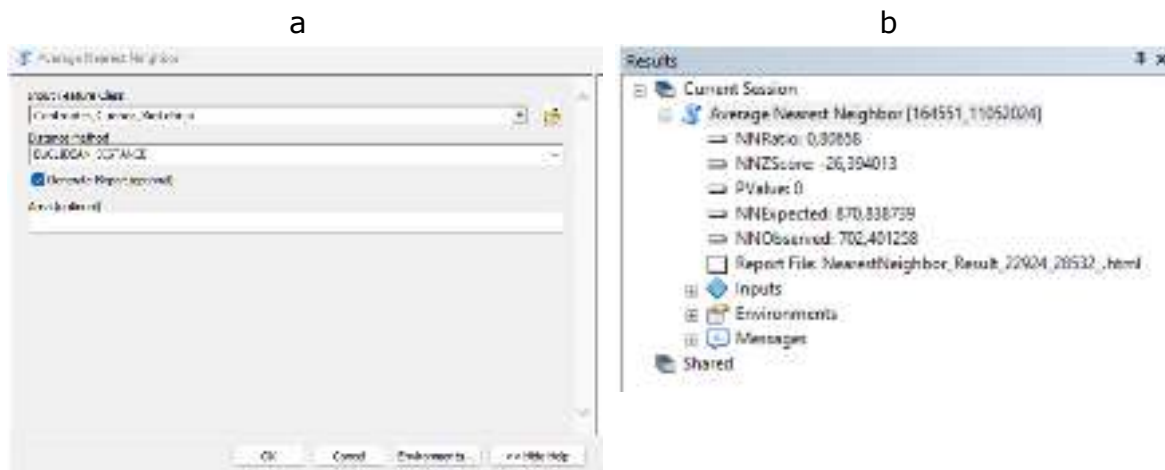


Figura 9 a) Panel de la herramienta *Average Nearest Neighbor* y b) Resultado del cálculo de la distancia entre los centroides.

Finalmente, se realiza el cálculo de la densidad de drenaje, para tal fin se emplea la herramienta *Kernel Density*, ubicada en la ruta *Arctoolbox/Spatial Statistics Tools/Density/Kernel Density*.

Los datos de entrada serán los *shapes* que contienen los drenajes sencillos delimitados por las cuencas definidas en la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas de Colombia que cubren la zona de estudio, el tamaño de celda será de 30m, el radio de búsqueda será la distancia promedio obtenida en el paso anterior. Este proceso debe realizarse para cada una de las cuencas definidas en el área evaluada, Figura 10.

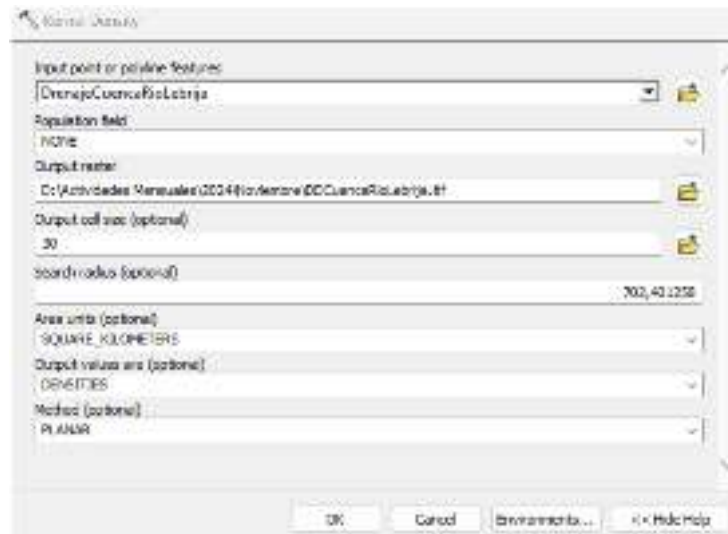


Figura 10 Herramienta *Kernel density* con la definición de los parámetros para realizar el cálculo de la densidad de drenaje de la cuenca del río Lebrija.

El resultado será un ráster con valores que oscilan entre 0 y 7,4849 km/km² de acuerdo con la distribución de valores nacionales de densidad de drenaje.

Finalmente, con las capas de densidad de drenaje de cada cuenca hidrográfica se procede a crear un mosaico utilizando la herramienta *Mosaic to New Raster*, ubicada en la ruta *ArcToolbox/Data Management Tools/Raster/Raster Dataset/Mosaic to New Raster*. En el campo Input Rasters se incorporan las capas de densidad de drenaje de cada una de las cuencas que conforman la zona de estudio, además, se debe asignar una ruta de salida adecuada al ráster resultante, Figura 11.

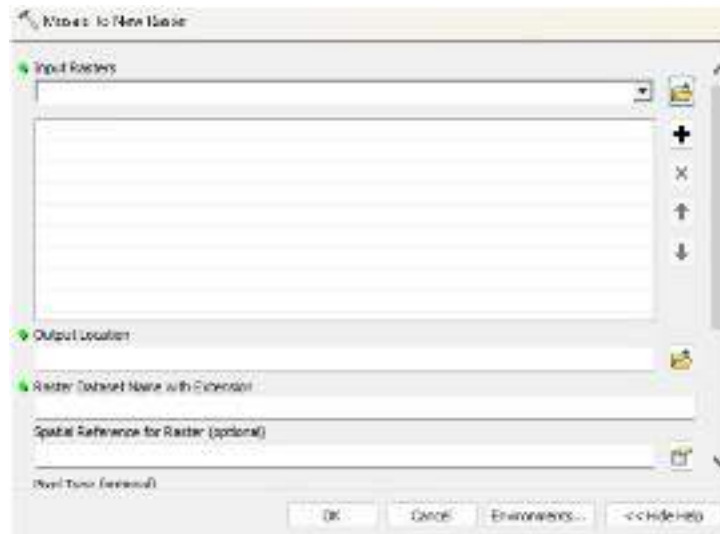


Figura 11 Herramienta para crear un mosaico con los ráster resultantes.

Por último, con el mosaico generado a partir de los rásters, se realiza un recorte de la densidad de drenaje al área de estudio utilizando la herramienta *Extract by Mask*, ubicada en la ruta *ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract by Mask*, Figura 12. En este proceso, se selecciona el mosaico generado previamente como entrada y, en el campo *Feature Mask Data*, se agrega la capa correspondiente al área de la zona de estudio, Figura 13.

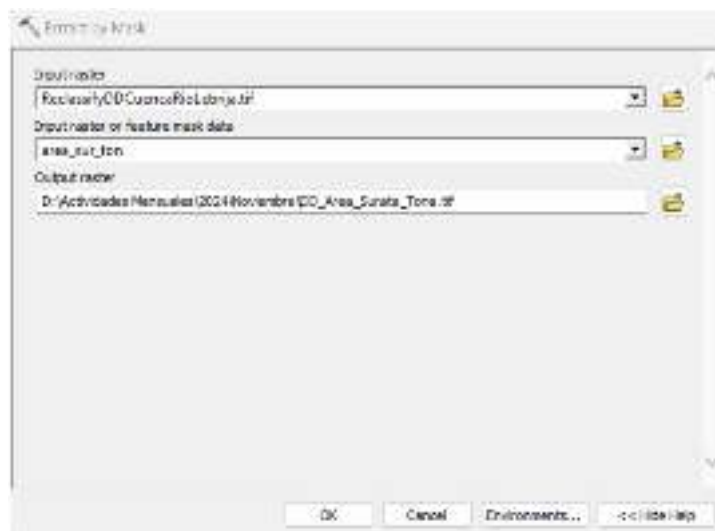


Figura 12. Herramienta para realizar el recorte al área de estudio final.

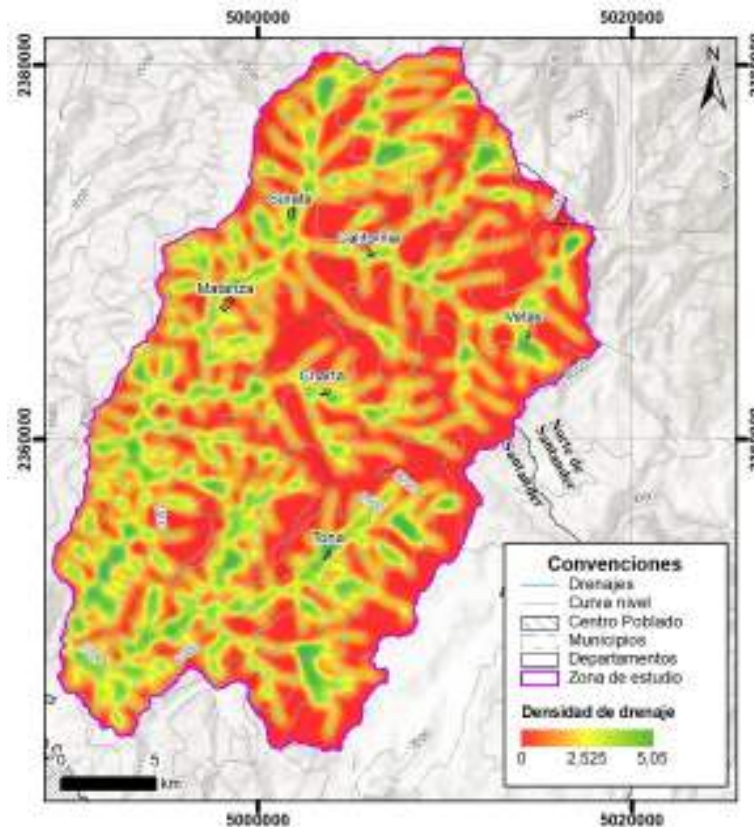


Figura 13. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de los ríos Suratá y Tona.

Parámetro Índice Topográfico de Humedad (ITH)

Para el cálculo del parámetro *Índice Topográfico de Humedad* (ITH), el insumo principal es el modelo digital de elevación (DEM) con una resolución de 30 m, adecuado para trabajos a escala 1:100.000. Para escalas mayores, se debe utilizar el DEM con el mayor detalle disponible. El software a emplear es de acceso libre: *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA), el cual puede descargarse desde el siguiente enlace: <https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>.

En SAGA, se inicia cargando el DEM del área a calcular a través de la ruta *File/Open*, lo que permite abrir el archivo en formato Geotiff. Para calcular el ITH de manera automatizada, se sigue la ruta *Geoprocessing/Terrain Analysis/Hidrology/Hydrology/Topographic Indices/Topographic Wetness Index (One Step)*, Figura 14.

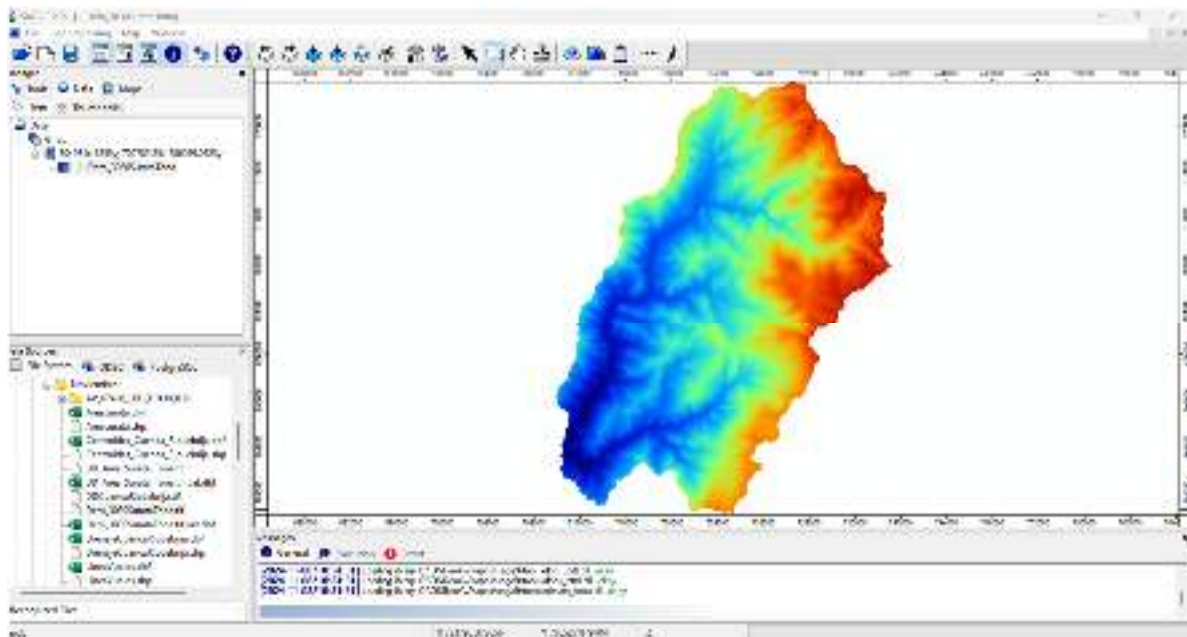


Figura 14. Modelo de elevación digital (DEM) del área de las cuencas de los ríos Surata y Tona cargado en el software SAGA.

En la herramienta *Topographic Wetness Index (One Step)*, en la opción *Grid System*, se selecciona el DEM previamente cargado. En el campo *Elevation*, se elige nuevamente el mismo DEM. Finalmente, en la opción *Flow Distribution*, se selecciona *Multiple Flow Direction* y se ejecuta la herramienta, Figura 15.



Figura 15. Herramienta para calcular el ITH en un paso

Al finalizar el proceso, aparecerá un mensaje de confirmación y se generará el ITH de la zona de estudio, para el ejemplo se muestra el resultado obtenido en las cuencas de los ríos Suratá y Tona. El resultado se guarda como un archivo GeoTIFF; para ello, se debe hacer clic derecho sobre el resultado y seleccionar la opción para guardarlo en la carpeta deseada, Figura 16 y Figura 17.

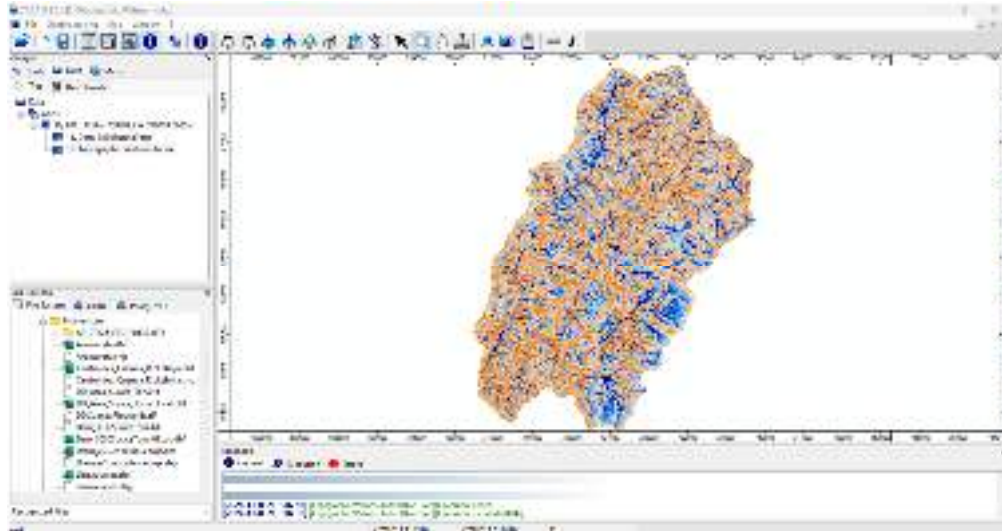


Figura 16. Resultado del cálculo del ITH en la zona de estudio.

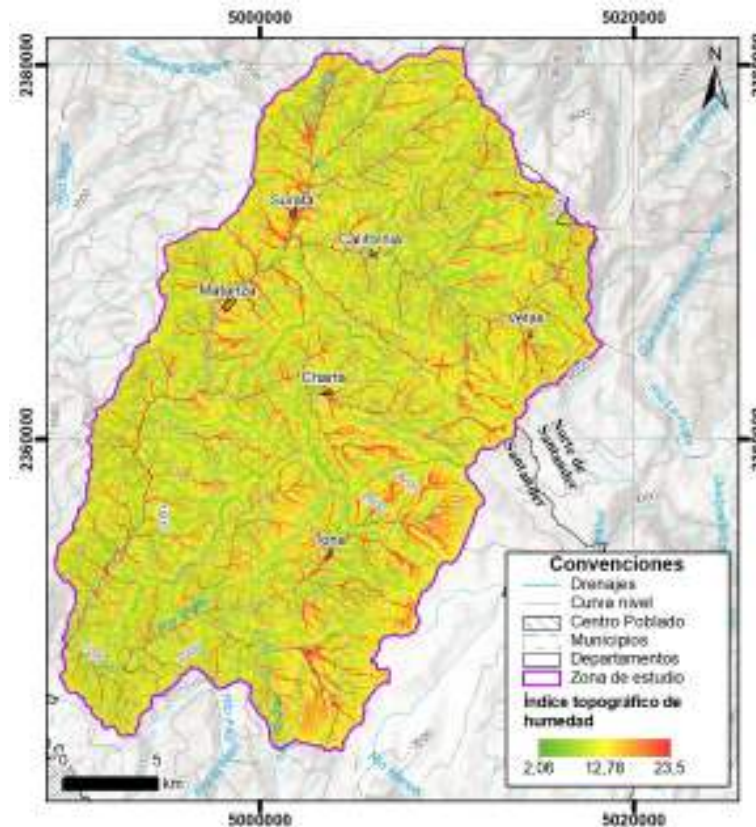


Figura 17. Mapa de índice topográfico de humedad de la cuenca de los ríos Suratá y Tona.

1.1 Incidencia Geoestructural (Ie)

La variable incidencia geoestructural corresponde a la sumatoria de los parámetros de densidad de lineamientos ponderada, conectividad de lineamientos y zona de daño. La información requerida para la construcción de esta variable proviene de mapas geológicos a diferentes escalas y de información obtenida a partir de sensores remotos.

El primer paso consiste en compilar los mapas geológicos a escala 1:100.000, así como la información detallada proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) que cubren el área a evaluar. Para descargar esta información cartográfica disponible del SGC, se debe acceder al Motor Integrado de Información Geocientífica (MIIG), a través del siguiente enlace: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>.

De igual forma, se deben compilar todos los insumos necesarios para optimizar la interpretación de rasgos morfotectónicos que representen discontinuidades en las rocas, como fotografías aéreas de diferentes escalas e imágenes satelitales disponibles en el portal dispuesto por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), al cual se puede acceder mediante el siguiente enlace: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>. De igual forma, se deben descargar Modelos de Elevación Digitales (DEM) del portal <https://asf.alaska.edu/> e imágenes satelitales de enlace dispuesto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS): <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Lo anterior solo corresponde a sugerencias, el usuario de la guía debe evaluar el uso de cualquier recurso que facilite la interpretación morfotectónica.

Parámetro Densidad de lineamientos

Para calcular el parámetro, es esencial realizar una interpretación de los rasgos lineales. El primer paso consiste en interpretar los rasgos lineales que puedan corresponder a discontinuidades en las rocas, las cuales favorecen la infiltración del agua desde superficie. Estos rasgos interpretados deben almacenarse en formato vectorial (.shp).

Una vez interpretados los rasgos lineales, se debe analizar la orientación (rumbo) y la conectividad de la red de lineamientos previamente interpretada. Para llevar a cabo el análisis topológico y de orientación de los rasgos lineales, se recomienda utilizar la caja de herramientas *NetworkGT*, desarrollada por Nyberg et al. (2018). Esta herramienta está disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/BjornNyberg/NetworkGT/releases>.

Se debe descargar la versión más reciente e instalar la herramienta. Una vez descargada y descomprimida la carpeta que contiene la herramienta, se instala el *toolbox* asociado, para lo cual se debe acceder a *ArcToolBox*, dar click derecho sobre el ícono, seleccionar *Add Toolbox* y buscar la ruta en la que se almacenó la carpeta, el archivo a instalar viene relacionado como *NetworkGT.tbx*, Figura 19.

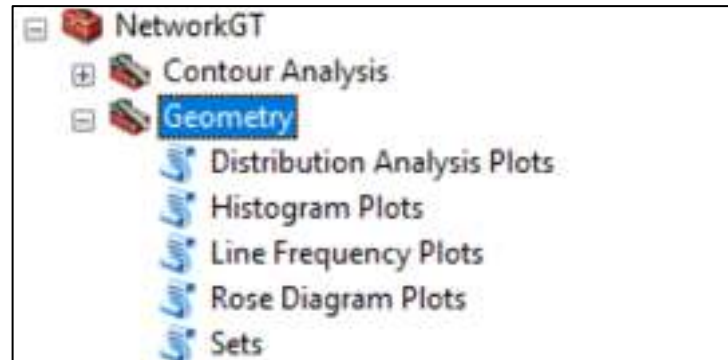


Figura 18 Vista de la caja de herramientas *NetworkGT* en el software *ArcMap*.

Una vez instalada la herramienta se debe realizar la corrección topológica de la red de lineamientos, para lo cual se debe ejecutar la herramienta *Repair Network*, localizada en *ArcToolBox / NetworkGT/ Topology /Repair Network*, en el campo *Network* se introduce la capa que contiene los rasgos lineales interpretados, se asigna una ruta de salida adecuada y se seleccionan los campos *Trim short fractures*, *Extend short fractures*, *Merge offset fractures* y *Delete loops*, (ver Figura 19) lo anterior permite corregir posibles errores topológicos cometidos durante la digitalización de la red de lineamientos, lo cual es importante para posteriormente evaluar la conectividad de la red.

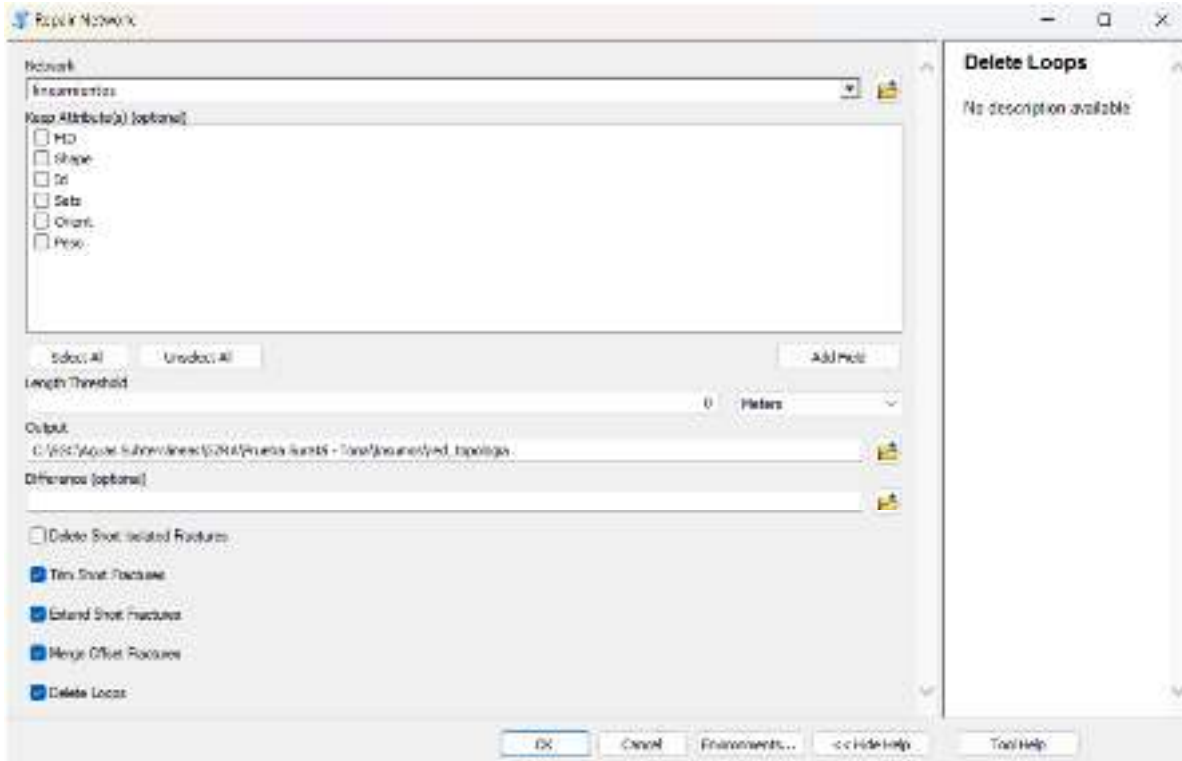


Figura 19. Ejemplo del uso de la herramienta Repair Network para correcciones topológicas de una red de lineamientos.

Posteriormente se debe ejecutar la herramienta *Sets* del conjunto de herramientas *Geometry*, ubicada en *ArcToolbox/NetworkGT/Geometry/Sets*. Esta herramienta permite la definición rápida de la orientación de los lineamientos y su categorización según la dirección del esfuerzo máximo compresivo (σ_1).

En el campo *Network* se ingresa la capa vectorial en la que se almacenan los lineamientos interpretados y corregidos topológicamente y en el campo *Bins*, se definen los rangos de orientación, cuyos intervalos se establecen según la dirección del esfuerzo máximo.

Para el caso de este ejemplo aplicado en las cuencas de los ríos Surata y Tona la dirección del esfuerzo máximo es E-O (90°). Se asume que los lineamientos paralelos a esta dirección, con una orientación dentro del rango de $\pm 10^\circ$, son de carácter tensional, a su vez, lineamientos con una orientación aproximadamente perpendicular al esfuerzo máximo serán de compresionales,

toda discontinuidad que se encuentre entre los dos extremos tendrá un valor intermedio. Según la disposición del esfuerzo máximo compresivo los rangos que se establecen son: de 0° a 10°, de 10° a 80°, de 80° a 110°, de 110° a 170° y de 170° a 180° Figura 20.

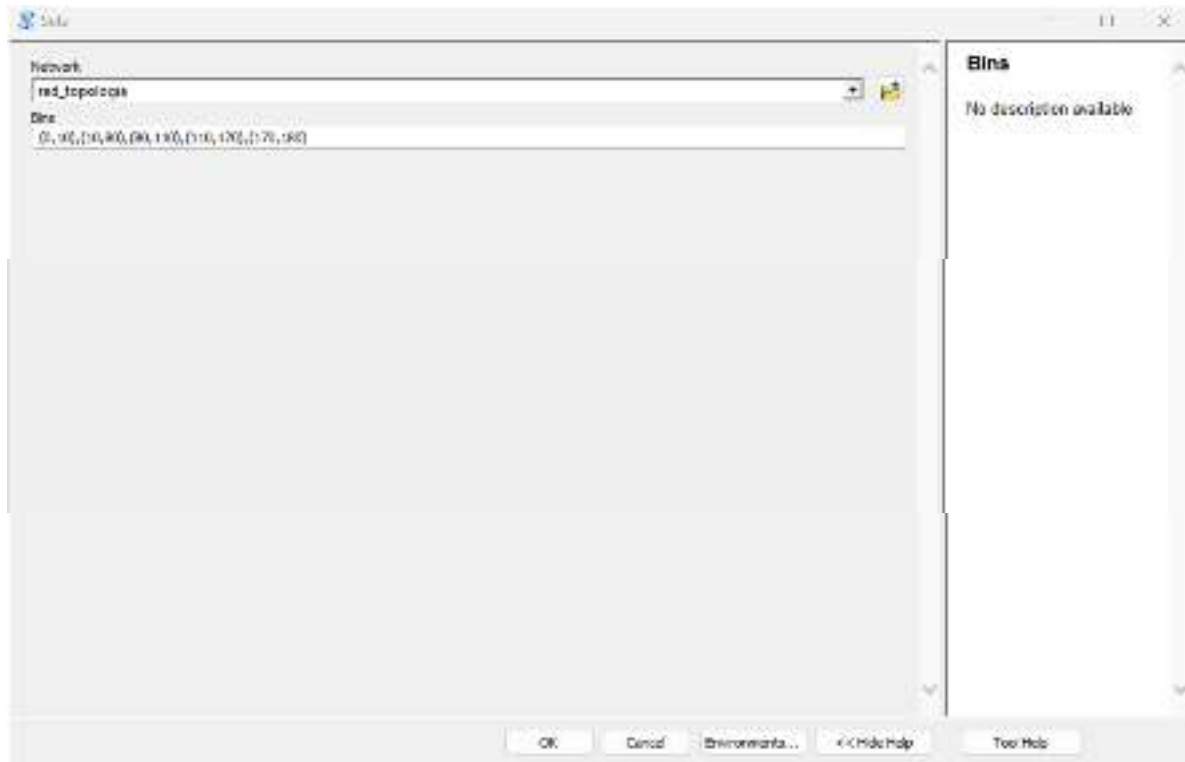


Figura 20 Panel de la herramienta Sets e intervalos establecidos para el caso de un esfuerzo sigma máximo orientado E-O.

La herramienta crea dos nuevos campos en la tabla de atributos de la capa ingresada como entrada: uno que contiene la categorización de los lineamientos según su posición con respecto al sigma 1, y otro que muestra el ángulo de azimut, Figura 21.

ID	Shape	M	Set	Orient
62	Polylines	0	0	6,01
96	Polylines	0	1	75,92
103	Polylines	0	2	94,54
20	Polylines	0	3	120,56
5	Polylines	0	4	127,34

Figura 21 Resultado de la herramienta *Sets* donde se observa el azimut de los rasgos lineales y la agrupación con respecto a la posición del sigma máxima.

En este caso los lineamientos contenidos en las agrupaciones 0 y 4 son aproximadamente perpendiculares al esfuerzo máximo, los agrupados en los conjuntos 1 y 3 son oblicuos y los contenidos en el conjunto 2 son aproximadamente paralelos. La categorización de estos conjuntos debe realizarse según la tabla de pesos definida en la guía metodológica en el apartado 7.1.5.7. Para lo cual debe crearse un nuevo campo en la tabla de atributos debidamente nombrado que contenga los valores asignados.

A continuación, se accede al panel de la herramienta *Kernel Density* para ingresar los parámetros necesarios para calcular el mapa de densidad de lineamientos ponderado. En la casilla *Population field*, se asigna como factor de ponderación el campo de la tabla de atributos que contiene el peso asignado a cada discontinuidad. Se debe establecer un tamaño de celda de 30 para todas las capas temáticas y asignar una ruta de salida adecuada. El radio de búsqueda se deja por defecto, Figura 22, en la Figura 23 se muestra el mapa final de densidad de lineamientos.

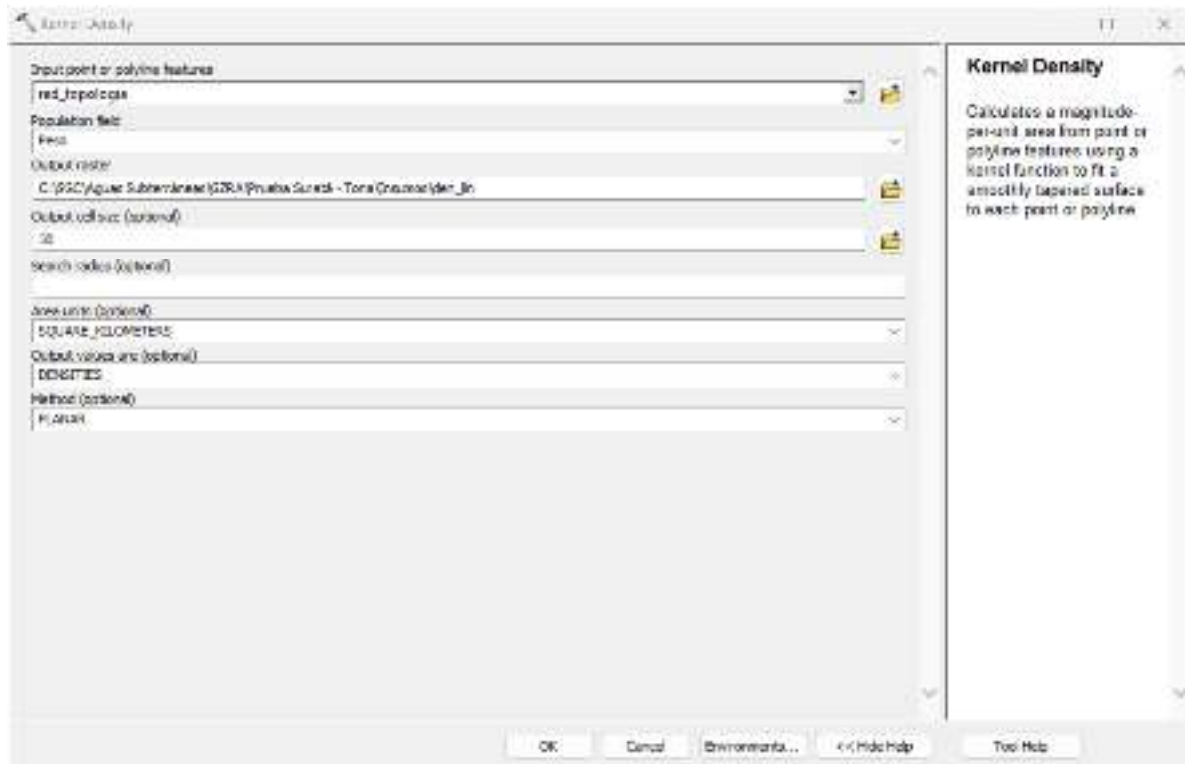


Figura 22 Herramienta Kernel density

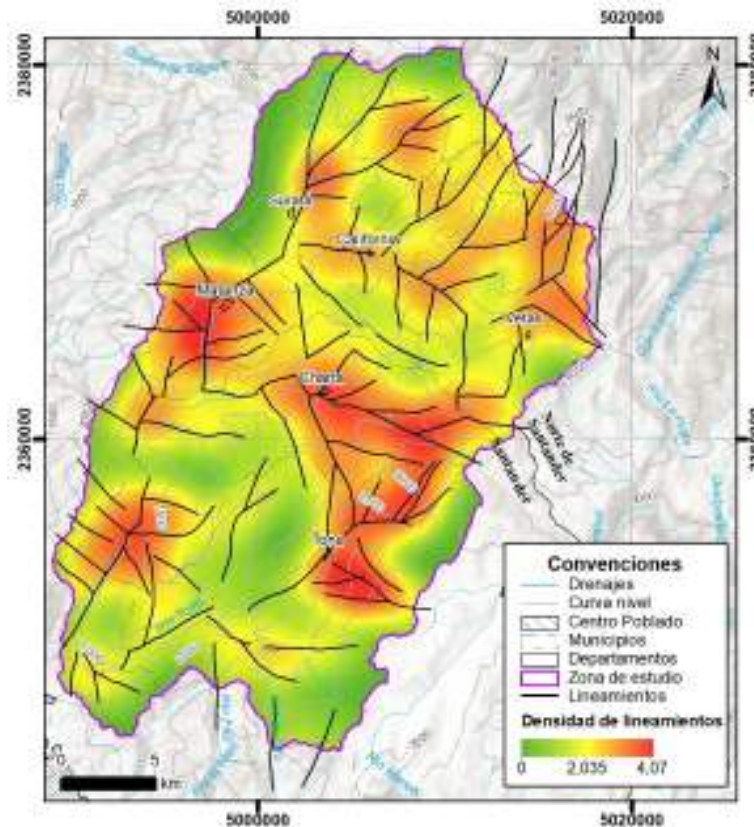


Figura 23 Mapa de densidad de lineamientos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.

Parámetro Conectividad de Lineamientos

El siguiente paso consiste en determinar las relaciones topológicas dentro de la red de lineamientos interpretados. Para ello, se sugiere utilizar la herramienta *Branches and Nodes* del conjunto de herramientas *Topology* en la caja *NetworkGT*, ubicada en la ruta *ArcToolbox/NetworkGT/Topology/Branches and Nodes*, Figura 24.

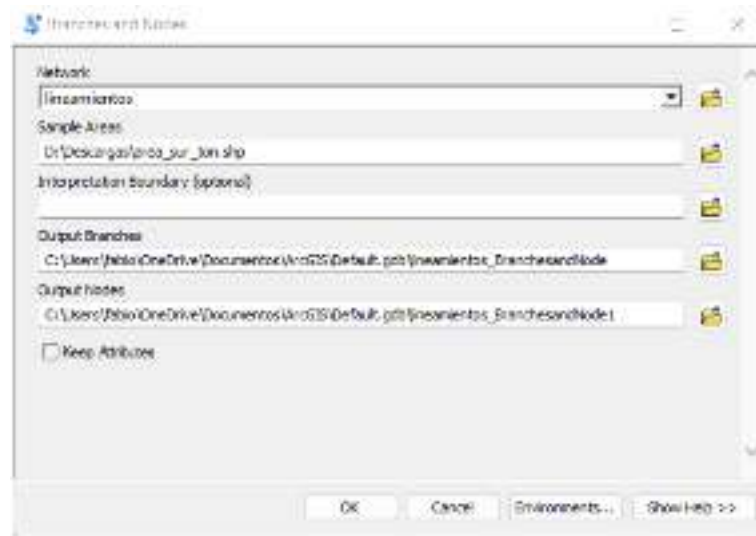


Figura 24 Herramienta Branches and Nodes de la herramienta Network GT.

Esta herramienta utiliza como entrada la capa temática de rasgos lineales interpretados y el área de muestreo (área de estudio). Como resultado, se generan dos nuevas capas temáticas en formato *shapefile* que corresponden a los tipos de nodos y ramales. Los nodos de interés para la metodología aplicada son los de intersección (Y) y entrecruzamiento (X), ya que representan las conexiones entre discontinuidades donde el desarrollo de porosidad secundaria podría ser mayor, por consiguiente, se deben seleccionar los nodos tipo X e Y y exportar una nueva capa temática, asegurándose que solo se exporten los elementos seleccionados. La capa asociada a los tipos de nodos puede ignorarse para efectos de la metodología.

A continuación, se deben crear mapas de densidad de frecuencia de nodos conectados (X, Y) Figura 26. Para ello, se recomienda el uso de la herramienta *Kernel Density*. Como entrada se ingresa la capa de nodos conectados producto del paso metodológico anterior y se establece un tamaño de celda de 30m × 30m, como en todas las variables, Figura 25. De igual forma, el radio de búsqueda se deja por defecto.

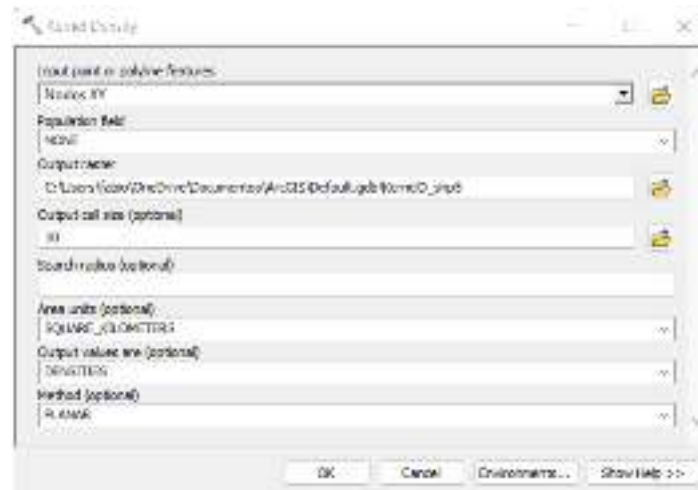


Figura 25 Herramienta Kernel Density para el cálculo de la densidad de nodos conectados.

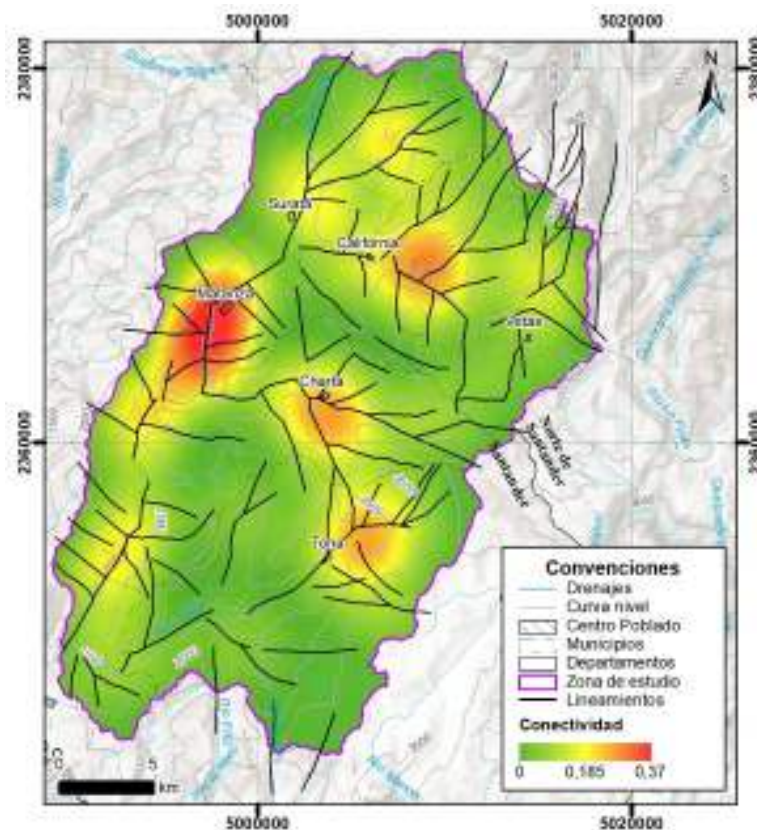


Figura 26 Mapa de conectividad de lineamientos en las cuencas de los ríos Suratá y Tona

Parámetro Zona de Daño

Esta línea de aproximación pretende usar la cartografía geológica realizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) asignando pesos a las zonas de daño de las estructuras de acuerdo con su importancia hidrogeológica.

Inicialmente, se cargan todas las fallas presentes en la zona de estudio y se crea un campo de longitud para medir las fallas o segmentos de falla presentes en el área de aplicación de la guía metodológica. A continuación, se utiliza la herramienta *Calculate Geometry* dando clic derecho sobre el campo recientemente creado. En la casilla *Property* se selecciona *Longitud*, el sistema de coordenadas se asigna por defecto según sea el definido en la capa origen, es importante resaltar que estrictamente debe corresponder a coordenadas planas, finalmente, en *Units* se asigna metros, Figura 27

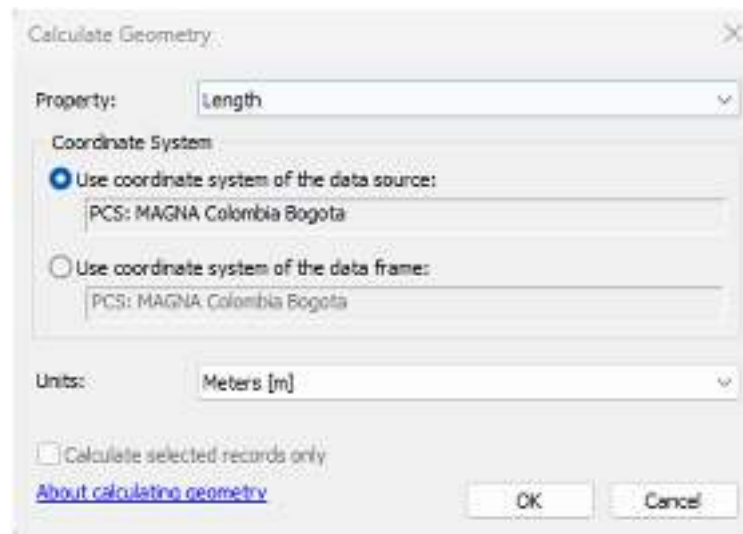


Figura 27 Herramienta empleada para el cálculo de la longitud de las fallas en el área evaluada.

Posteriormente al cálculo de la longitud de las fallas, se debe crear un campo denominado "zona de daño" o "Buffer" en la tabla de atributos. Luego, se utiliza la herramienta *Field Calculator*, aplicando la fórmula definida para el cálculo de la zona de daño, Figura 28. A cada una de las estructuras se le asigna un peso de acuerdo con su importancia en el proceso de recarga, tal como se define en

la guía, el cual debe ser consignado en otro campo en la tabla de atributos, Figura 29.

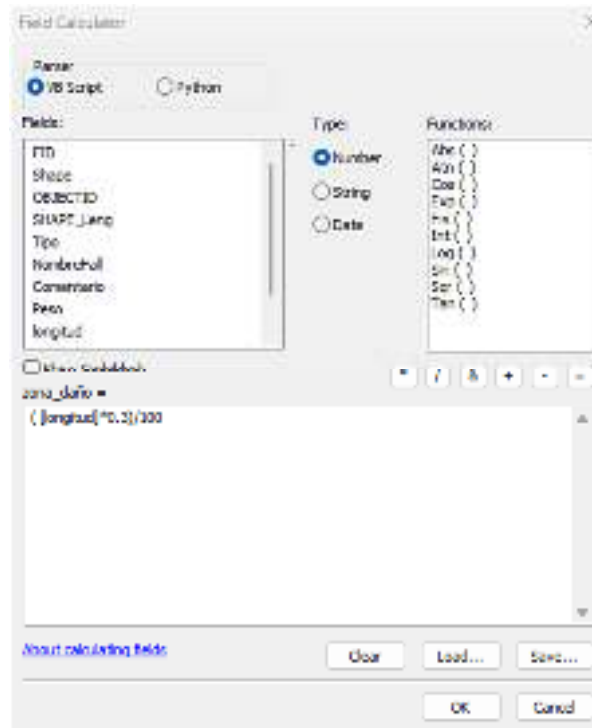


Figura 28 Herramienta *Field Calculator* y expresión definida para calcular la zona de daño aproximada.

ID	Shape	OBJECTID	SHAPE_Length	Tipo	NombreFall	Comentario	Peso	Integridad	Area_Metro
0	Polyline	14126	3,073969	Falla			5	8165,25	24,5969
1	Polyline	14127	3,013300	Falla			5	1479,77	4,43921
2	Polyline	14128	8,82320	Falla			5	3523,34	7,89391
3	Polyline	14129	3,081200	Falla			5	139,96	15,6154
4	Polyline	14130	3,043307	Falla	Falla de Caramba		5	8794,8	16,2938
5	Polyline	14141	3,025943	Falla			5	8051,12	24,1634
6	Polyline	15160	3,080546	Falla			5	944,838	2,80461
7	Polyline	15179	3,198885	Falla			5	17338,3	52,0178
8	Polyline	15179	3,026238	Falla			5	4228,28	12,6258
9	Polyline	15821	3,288888	Falla			5	11728,3	98,1848
10	Polyline	16226	3,026197	Falla			5	408,641	12,0702
11	Polyline	16474	3,079842	Falla			5	8741,17	26,2235
12	Polyline	16802	3,057513	Falla			5	8256,61	19,0794
13	Polyline	16908	3,027979	Falla			5	4195,98	12,8806
14	Polyline	16912	3,253507	Falla	Falla de Tona		5	26848,5	84,1799
15	Polyline	17218	3,131448	Falla			5	14938,2	45,8148
16	Polyline	17344	3,083402	Falla			5	8229,68	27,8888
17	Polyline	17343	3,079406	Falla			5	2168,67	6,50401
18	Polyline	17252	3,119862	Falla de rumbo normal	Falla de Rio Cucaracha		5	25349,2	186,848
19	Polyline	17755	3,081443	Falla	Falla de Caramba		5	10111	56,335
20	Polyline	17758	3,085297	Falla	Falla de Tona		5	8808	25,04
21	Polyline	17767	3,150181	Falla			5	17482,8	52,4704
22	Polyline	17825	3,288883	Falla de rumbo normal			5	32816,6	88,6556
23	Polyline	18624	3,076252	Falla			5	1797,36	5,38502
24	Polyline	18618	3,100022	Falla	Falla de Rio Chorro		5	18663,6	55,9958
25	Polyline	19253	3,090749	Falla			5	11836,4	35,6915
26	Polyline	19254	3,081964	Falla			5	7480,28	22,4411
27	Polyline	19255	3,119118	Falla			5	17172	59,118
28	Polyline	19264	3,185452	Falla	Falla de Surubi		5	28204,8	119,814
29	Polyline	20165	3,025358	Falla			5	2785,67	8,36701

Figura 29 Ejemplo de la tabla de atributos que relaciona las características de las fallas en el área de las cuencas de los ríos Surata y Tona. El peso se asigna según la cinemática de cada estructura.

Una vez calculada la zona de daño según lo indicado en la guía, se sugiere realizar un *buffer* en las estructuras presentes en el área de estudio, el cual debe expresar el espesor aproximado de las zonas de daño de las estructuras presentes en el área evaluada. Esto se realiza utilizando la herramienta *Buffer*, ubicada en la ruta *Geoprocessing/Buffer*, en *Input Features* se ingresa la capa temática que contiene los atributos previamente adicionados y calculados, en el campo *Field* se debe seleccionar el atributo que contiene la aproximación a las zonas de daño y en *Side Type* se selecciona *Full* para que la zona de influencia creada abarque la misma longitud a ambos lados de la falla, Figura 30.

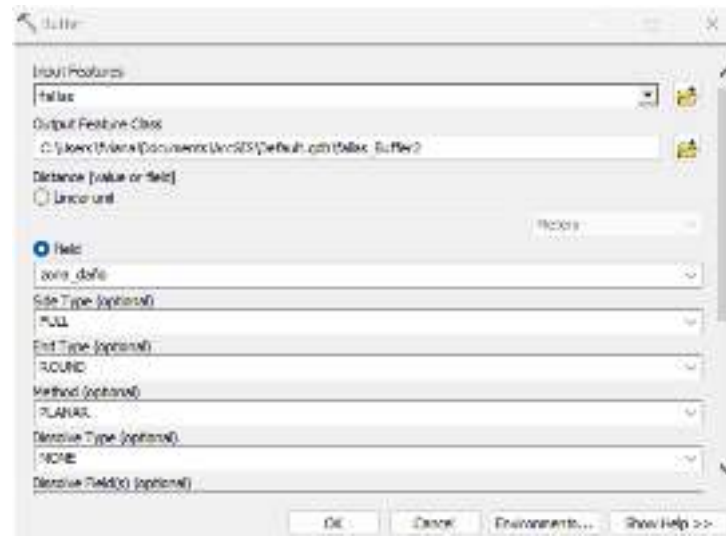


Figura 30 Ejemplo del uso de la herramienta de geoprocésamiento *Buffer*. La distancia por usar viene dada por el campo asociado a las zonas de daño en la tabla de atributos.

Posteriormente, la capa temática obtenida debe convertirse a ráster, utilizando como campo de conversión el relacionado con el peso de cada zona de daño.

Para convertir la capa temática a formato ráster se debe usar la herramienta *Polygon to Raster*, que se encuentra en la ruta *ArcToolbox/Conversion Tools/To Raster/Polygon to Raster*, como insumo de entrada se usa el shape resultado de ejecutar la herramienta *buffer*, en la casilla *Value field* se selecciona el atributo *Peso* y el tamaño de celda será de 30 m.

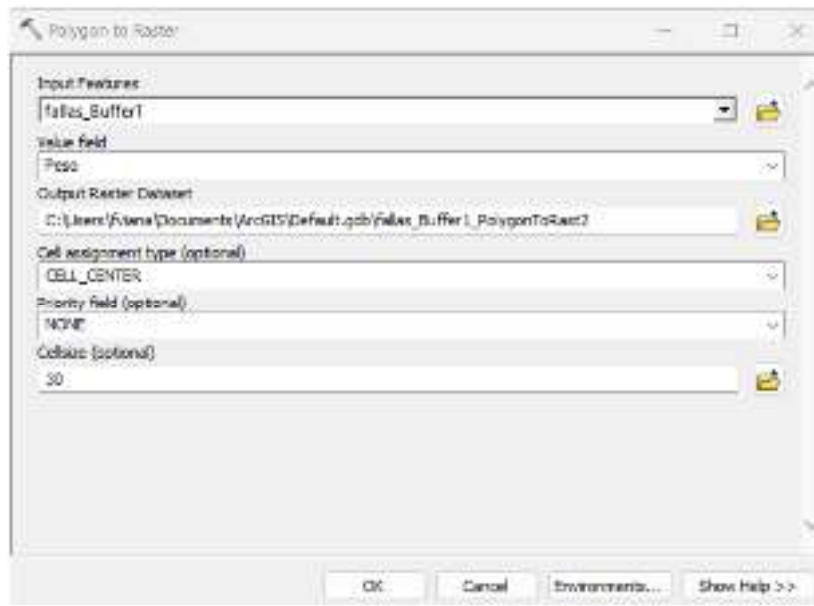


Figura 31. Conversión de la capa temática a ráster asignándole su valor según el peso asignado a la estructura.

Finalmente, el ráster resultante debe ser reclasificado mediante la herramienta *Reclassify*, ubicada en la ruta *ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify*. En el campo *Input Raster*, se debe seleccionar el ráster obtenido en el proceso anterior, asignando un peso de 1 a los píxeles que no presenten datos, *Figura 32*.

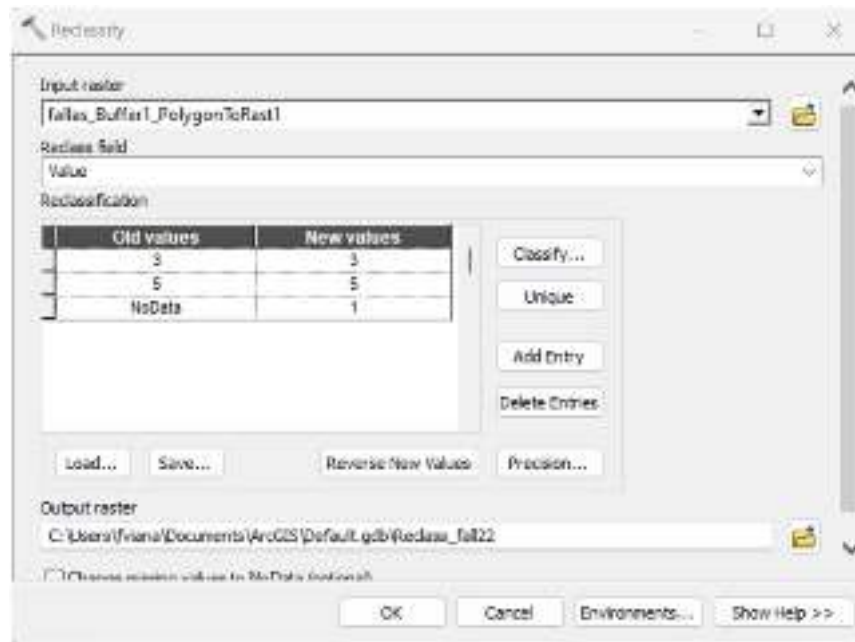


Figura 32 Ejemplo del mapa de zonas de daño y su calificación para el área de la cuenca del río Surata y Tona

5.3. COMPONENTE SUELO

5.3.1. Subcomponente cobertura de la tierra (C)

De no contarse con información de esta variable en los archivos de la entidad, se podrá consultar y descargar de la página WEB del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC www.siac.gov.co, del feature class coberturas de la tierra, para lo cual se selecciona y prioriza el área de interés, (que para el presente ejemplo es el área de la cuenca del río Surata y Tona) aplicando la herramienta “Clip” del ArcGis, a fin de evaluar las categorías presentes para la correspondiente zona.

Posteriormente el experto realiza la clasificación de la temática por tipo de Cobertura Vegetal de acuerdo a lo estimado en la tabla de clasificación de la variable Cobertura Vegetal y Uso del Suelo de la “*Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Probables de Recarga de Acuíferos*”, la cual se vincula en la tabla del feature en un atributo nuevo, creado por el profesional SIG para la implementación de la presente guía, que para este ejercicio práctico, se denominó “Class_U” con formato tipo numérico (mantener el formato de clasificación tipo entero).

[illegible]

Figura 33 Tabla de atributos con la columna “Class_U” que corresponde a la clasificación de las coberturas vegetales

Se procede a exportar la capa a formato raster con la herramienta "Feature to Raster" en ArcToolBox / Conversion Tools / To Raster / Feature to Raster o consultarla en el buscador "Search" de ArcMap.

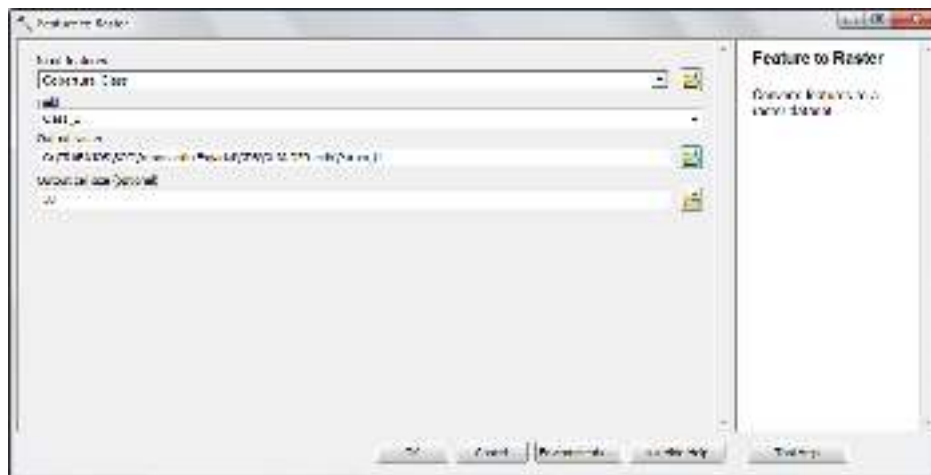


Figura 34 Ejemplo conversión a ráster de la capa cobertura vegetal.

En el campo "Input Features" se ingresa la capa de Cobertura clasificada (o la de interés); en el campo "Field" se selecciona el atributo en el cual se realizó la clasificación, que para el presente ejemplo es "Class_U"; para la salida del raster se recomienda almacenarlos en la misma GDB de trabajo y finalmente se aclara que el tamaño de la celda ha de ser igual en todos los raster generados, que

para el presente caso se utilizará la misma resolución del DEM utilizado para determinar la variable Relieve (30 en el campo "Output Cell Size").

Las variables de representación espacial serán categorizadas con un único dígito de acuerdo con los datos de la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"* que para la capa de Cobertura (parámetro C) es:

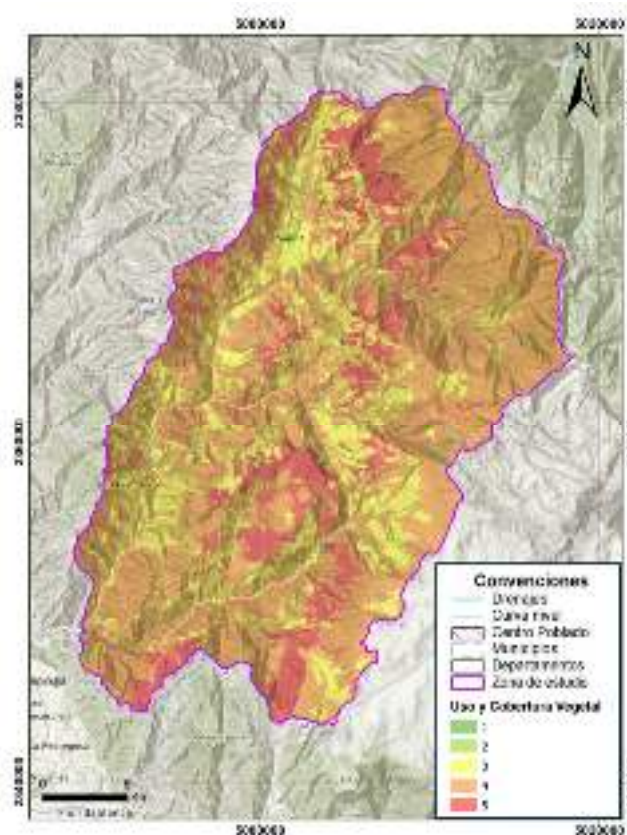


Figura 35 Mapa cobertura vegetal para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.

1.2 Suelos (Is)

De no contar con información de esta variable en los archivos de la entidad, se podrá consultar o solicitar al Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, correspondiente al mapa Geopedológico que se encuentra a escala 1:100,000, seleccionando y procesando el área de interés que para el presente ejemplo es

son las cuencas de los ríos Suratá y Tona y hacer lo correspondiente con la herramienta "Clip" del ArcGis, la cual se utilizó al inicio de la presente guía.

5.3.1.1. Textura

El experto realiza la clasificación de la temática por tipo de Textura del Suelo de acuerdo a lo estimado en la tabla de clasificación de la variable Textura del Suelo de la "Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos", la cual se vincula en la tabla del feature en un atributo nuevo, creado por el profesional SIG para la implementación de la presente guía, qué para este ejercicio práctico, se denominó "Class_T" con formato tipo numérico. Para la calificación es indispensable tener en cuenta lo consignado en apartado 7.1.3.1 Grupo Textural.



Valor al	Valor Acifre	Valor Arena	Valor Limo	Textura	Class_T	Shape Length	Shape Area
4	4	34	62	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084
4.1	24	46	30	Fríasol	3	1418,11812	280134,4084
4.1	12	46	42	Fríasolomero	3	1581,88152	314184,4084
4.5	52	34	14	Fríasolomero	3	2173,11064	434621,8208
4.5	28	30	42	Fríasolomero	3	1282,90842	256581,6816
4.1	22	66	12	Fríasolomero	3	2,985,00502	597001,0040
4.1	12	46	42	Fríasolomero	3	1148,11812	229621,8208
4.1	12	46	42	Fríasolomero	3	1148,11812	229621,8208
4	4	34	62	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084
4.5	28	42	30	Fríasolomero	3	182,00502	36401,0040
4.7	28	30	42	Fríasolomero	3	700,00502	140001,0040
4.1	28	30	42	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084
4.1	28	30	42	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084
4.5	28	30	42	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084
4	28	30	42	Fríasolomero	3	1408,76555	280013,4084

Figura 36 Tabla de atributos con la columna "Class_T" que corresponde a la clasificación de Suelos

5.3.1.2. Drenaje natural

Para la evaluación del drenaje natural es indispensable la clasificación de la temática según lo estimado en la tabla de clasificación de la variable Drenaje Natural del Suelo de la "Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos", la cual se vincula en la tabla del feature en un atributo nuevo, creado por el profesional SIG para la implementación de la presente guía, qué para este ejercicio práctico, se denominó "Class_D" con formato tipo numérico. Para la calificación es indispensable tener en cuenta lo consignado en apartado 7.1.3.2 Drenaje natural.

Una vez se desarrolla la calificación de las variables grupo textural y drenaje natural, se implementa lo definido en el apartado 7.1.3 Subcomponente Suelos y la ecuación 2.

Se procede a exportar la capa a formato raster con la herramienta "Feature to Raster" en ArcToolBox / Conversion Tools / To Raster / Feature to Raster o consultarla en el buscador "Search" de ArcMap.

Teniendo en cuenta los dos procesos anteriores, el tamaño de celdas iguales (30x30) y las categorías con un único dígito de acuerdo con los datos que determina la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"*, se elabora la capa de Suelo (parámetro S):

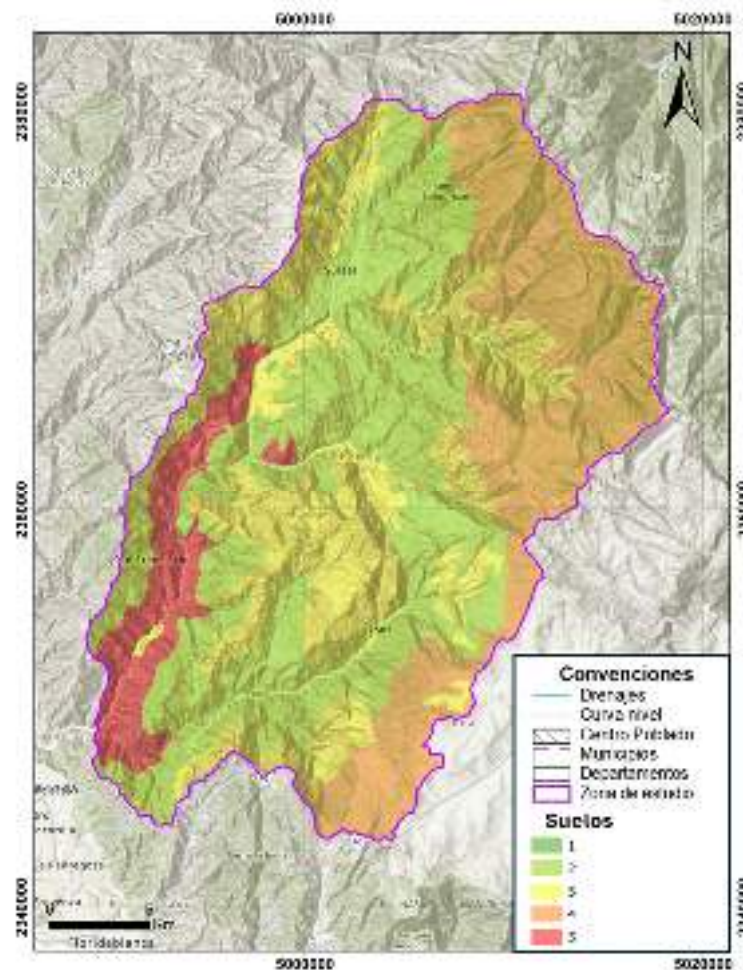


Figura 37 Mapa Suelos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.

6.PROCESO PARA EL CÁLCULO DE FACTORES DE PONDERACIÓN OBJETIVOS.

Preparación de los insumos y escalado de las variables.

Una vez se cuenta con las variables definidas a una escala de trabajo homogénea, bien sea 1:100.000 o con mejor detalle, el primer paso a considerar para hallar los factores de ponderación objetivos mediante la aplicación del método Criteria Importance Trough Inter-Criteria (CRITIC), es llevar los criterios a escalas comparables; esto fundamentado en que las escalas originales de las variables se encuentran en medidas y unidades diferentes. Se debe recordar que la guía metodológica contempla el uso de cuatro criterios categóricos (litología, suelos, cobertura vegetal y zonas de daño asociadas a las estructuras) y cuatro criterios continuos (densidad y conectividad de lineamientos, densidad de drenaje e Índice Topográfico de Humedad).

Para escalar los criterios continuos se debe utilizar la herramienta *Raster calculator*, ubicada en: *ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Map Algebra / Raster Calculator*. En el campo asociado con la expresión a utilizar en el álgebra de mapas se debe colocar la siguiente ecuación:
$$\frac{("ITH" - "ITH".minimum)}{("ITH".maximum - "ITH".minimum)}$$
, y se asigna la ruta de salida en la carpeta de trabajo de preferencia con un nombre adecuado para el ráster de salida. +

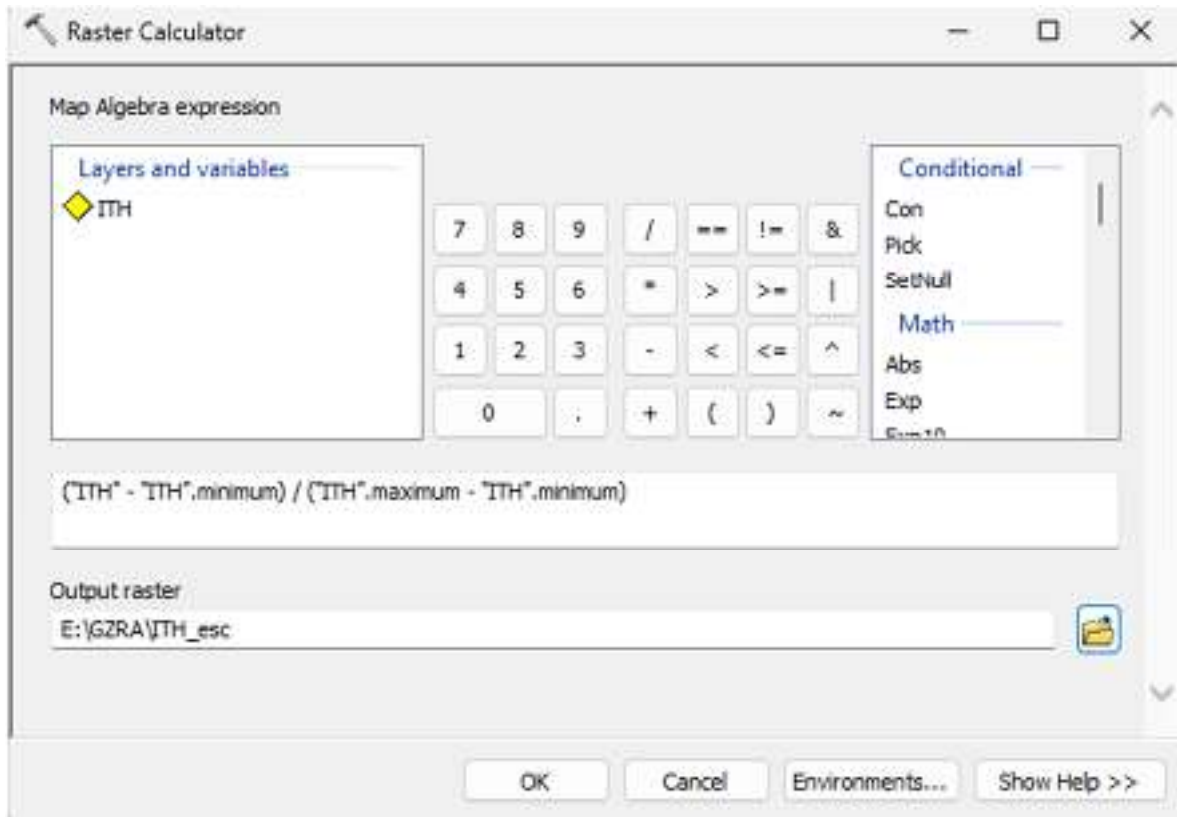


Figura 38. Herramienta Raster Calculator y la expresión asociada al escalamiento de las variables aplicada sobre la variable litología.

El resultado de este proceso es un ráster que varía en una escala de 0 a 1 basado en una función de pertenencia. Para el ejemplo se usó el criterio Índice Topográfico de Humedad (ITH), pero el mismo proceso debe ser ejecutado para cada criterio continuo considerado en la guía.

Para escalar los criterios categóricos se debe usar la herramienta Reclassify, ubicada en: ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Reclass/ Reclassify, Figura?. Los valores de reclasificación se presentan en la tabla (¿) de la memoria explicativa de la guía metodológica. Se debe asignar la ruta de salida en la carpeta de trabajo de preferencia con un nombre adecuado para el ráster producto del proceso.

Reclassify

Input raster
Litologia

Reclass field
Value

Reclassification

Old values	New values
1	0
2	0.25
3	0.5
4	0.75
NoData	NoData

Classify...
Unique
Add Entry
Delete Entries

Load... Save... Reverse New Values Precision...

Output raster
E:\GZRA\lit_esc

OK Cancel Environments... Show Help >>

El resultado será un ráster reclasificado en una escala de 0 a 1 conforme el potencial de recarga asignado en la fase de calificación de las variables.

Con la variable densidad de drenaje hay que tener una consideración adicional ya que la relación con el proceso de recarga los valores originales de este criterio son inversos, es decir, a mayor valor de densidad de drenaje menor probabilidad de infiltración del agua, por lo cual, los valores normalizados deben ser invertidos usando la expresión mostrada en la Figura 39, en la herramienta *Raster calculator*.



Figura 39. Inversión de los valores escalados del criterio densidad de drenaje mediante el uso de la expresión adecuada en la herramienta Raster Calculator.

En el campo donde se introduce la expresión a utilizar en la operación sobre el ráster, debe restarse a la unidad los valores escalados que fueron el resultado del paso anterior. El ráster resultante de este proceso relaciona los menores valores de densidad de drenaje con una alta probabilidad de infiltración reflejada por valores cercanos a uno según la función de pertenencia. De igual forma, se debe asignar un nombre adecuado y una ruta de almacenamiento de fácil acceso, o en el espacio de trabajo asociado con una base de datos geográfica (*geodatabase*).

Es importante resaltar que las capas temáticas que representan a los criterios deben tener la misma extensión (*extent*) y la misma resolución espacial, que para el caso de la escala 1:100.000 debe ser un tamaño de celda de 30m × 30m.

Apilamiento de los criterios y obtención de la matriz de correlación.

Con las variables escaladas en un intervalo de [0,1] y adecuadamente alineadas, se procede a apilarlas en un solo ráster compuesto en el que cada criterio corresponde a una banda del mismo. Para tal fin se debe usar la herramienta *Composite Bands*, ubicada en *ArcToolBox / Data Management Tools / Raster / Raster Processing / Composite Bands*.

En la herramienta *Composite Bands*, en el campo *Input Rasters* deben ir todos los criterios debidamente escalados y con la misma extensión, además, se debe asignar la ruta de salida y el nombre adecuados, Figura 40.

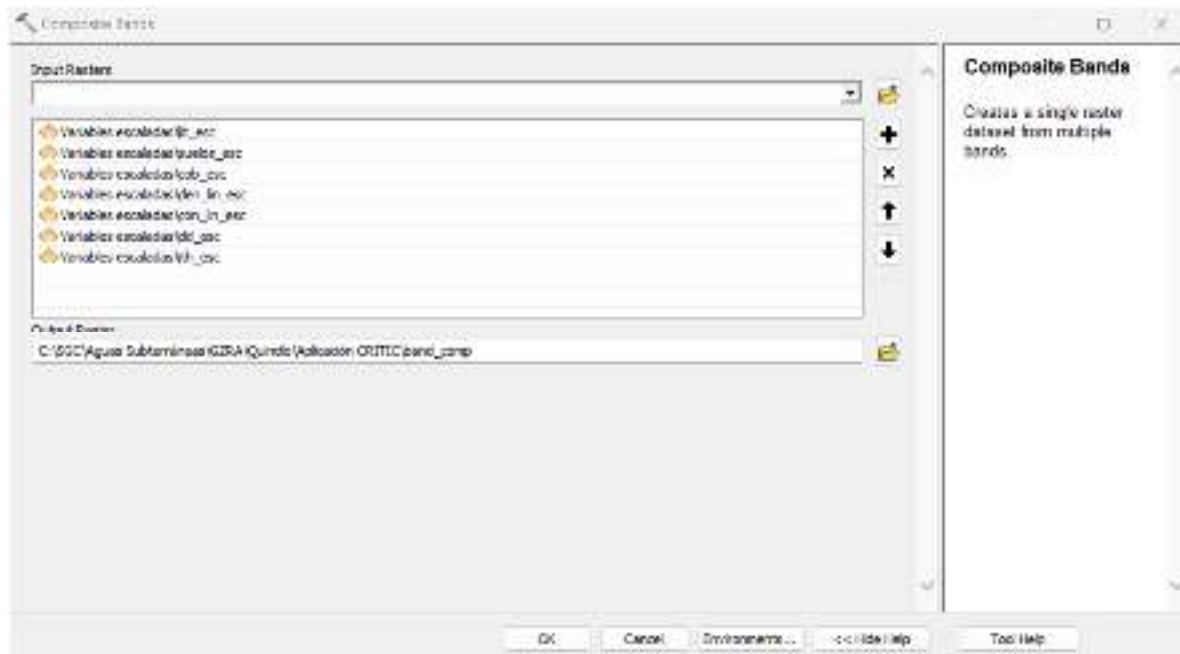


Figura 40. Ejemplo del uso de la herramienta *Composite Bands* para siete criterios.

Nota: solo es un ejemplo del uso de la herramienta, para la aplicación de la guía deben usarse todos los criterios contemplados.

El resultado de este proceso es un ráster único que contiene múltiples bandas que representan a cada uno de los criterios contemplados en la guía metodológica. El orden en que se adicionan las capas temáticas al campo *Input Rasters* es importante y debe ser tenido en cuenta para la interpretación y uso de la matriz de correlación que se halla en el siguiente paso.

Para la obtención de la matriz de correlación que es el insumo base para la aplicación del método CRITIC, se debe usar la herramienta *Principal Components*, localizada en *ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Multivariate / Principal Components*.

En el campo *Input Raster Bands* se ingresa el ráster compuesto resultado del proceso de apilamiento a través del uso de la herramienta *Composite Bands*; la herramienta genera un ráster de salida con la cantidad de componentes principales que se asignen, para el caso de la aplicación de la guía metodológica el resultado importante es el archivo de texto donde se presenta la matriz de correlación entre los criterios, la cantidad de varianza que explican los componentes principales y la matriz de covarianza; para tal efecto, en el campo

Number of Principal Components se debe dejar el valor que se asigna por defecto, el cual coincide con la cantidad de bandas que contiene el ráster compuesto, a su vez, en el campo *Output Data File* se debe asignar una ruta de salida para el archivo de texto, adicionando al final del nombre asignado la extensión *.TXT* (Figura 41).

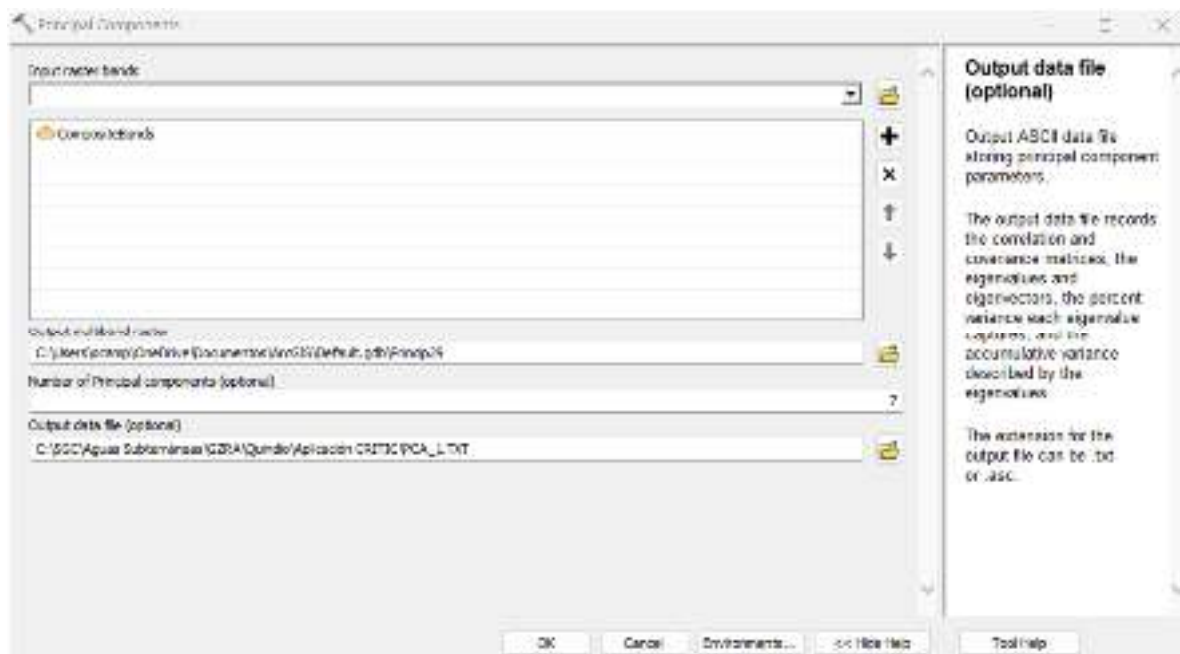


Figura 41. Uso de la herramienta Principal Components para hallar la matriz de correlación entre los criterios.

El resultado de esta aplicación es un ráster compuesto en el que cada banda responde a los componentes principales, el cual puede ser omitido para efectos de la guía; de igual forma, se obtiene un archivo de texto en el que se presenta la matriz de correlación entre los criterios, cuya diagonal representa los coeficientes de correlación lineal intercriterio (Figura 42).

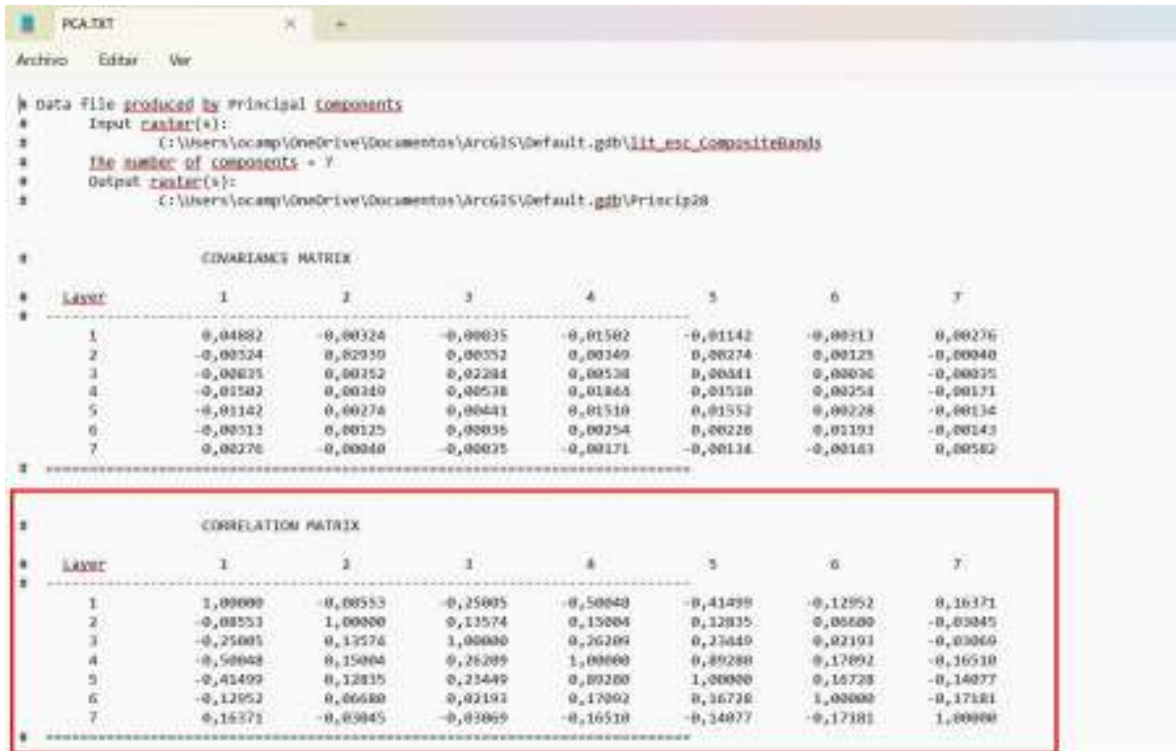


Figura 42. Ejemplo de parte del contenido del archivo de texto obtenido al ejecutar la herramienta Principal Componentes. La matriz de correlación marcada por la caja roja es el insumo fundamental para la obtención de los pesos objetivos. El contenido restante puede ser omitido.

Aplicación de las fórmulas y obtención de factores de ponderación objetivos.

Una vez obtenida la matriz de correlación se debe calcular la desviación estándar de las variables escaladas, para hacerlo de manera expedita se sugiere cargar las capas temáticas en el programa de acceso libre QGis, una vez cargados los datos ráster se accede a las propiedades de la capa dando click derecho sobre la capa de interés y seleccionando propiedades; en el ítem información / información del proveedor, se presentan algunas estadísticas descriptivas de los datos que contiene la capa temática incluyendo la desviación estándar (Figura 43), esta debe ser consignada en una tabla aparte para cada criterio utilizado.

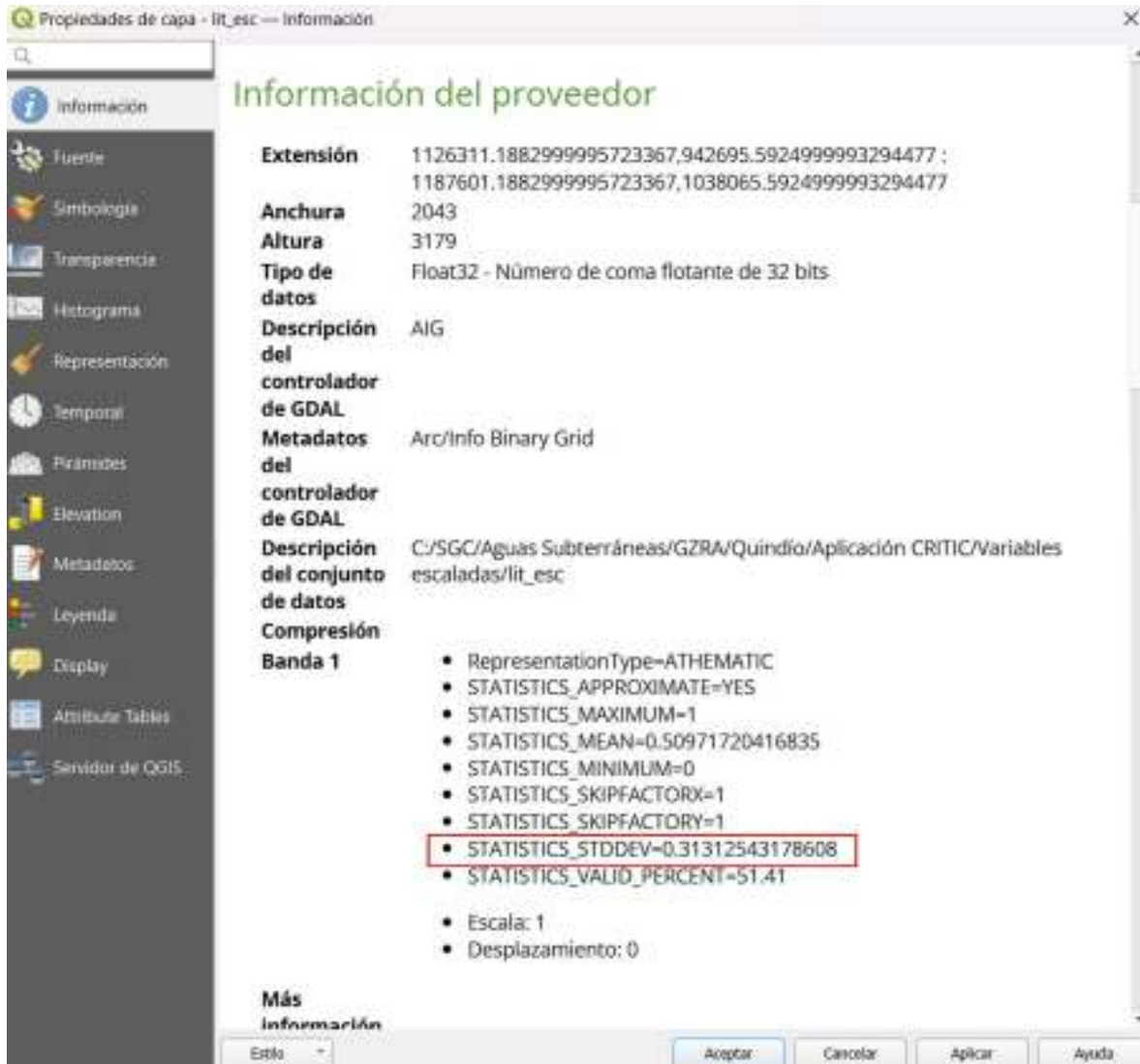


Figura 43. Ejemplo del proceso para hallar la desviación estándar de la variable litología escalada en el programa QGIS. Debe realizarse para cada criterio.

Finalmente, los valores de los factores de correlación intercriterio y la desviación estándar deben ser consignados en una hoja de cálculo (Figura 44) y aplicar las fórmulas indicadas en el apartado 8.3 Método objetivo. Importancia de los criterios a través de la correlación intercriterio (CRITIC), presente en el documento principal de la Guía metodológica. El resultado de este proceso son los pesos obtenidos mediante la distribución estadística de los datos originales, los cuales deben ser promediados con los pesos obtenidos mediante la aplicación del método de Saaty, explicado en el apartado 8.4 Método subjetivo. Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), del documento principal.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Variables	Urbología	Suelos	Cobertura	Densidad de lineamientos	Conectividad de lineamientos	Densidad de drenaje	ITM	Recomendaciones
2	Urbología	1	0,08993	0,25005	0,90048	0,41420	0,32392	0,16030	0,313125422
3	Suelos	-0,24820	1	0,42529	0,15004	0,15025	0,3966	-0,02045	0,34571262
4	Cobertura	0,29305	0,19920	1	0,29319	0,29349	0,09706	0,14383	0,290721087
5	Densidad de lineamientos	0,27348	0,15534	0,28239	1	0,2735	0,33390	0,1963	0,196944614
6	Conectividad de lineamientos	0,47799	0,12940	0,19493	0,0904	1	0,19705	0,12147	0,107129722
7	Densidad de drenaje	0,32392	0,0888	0,05715	0,0889	0,0879	1	0,17981	0,168956884
8	ITM	0,42371	-0,02345	-0,02229	-0,1651	-0,46077	-0,27501	1	0,115347425
9									
10		0	1,08993	1,25005	1,90048	1,41420	1,16992	0,84030	
11		1,24820	0	0,06420	0,34960	0,67025	0,9323	1,09045	
12		1,29305	1,09920	0	1,29319	1,29349	0,19706	1,14383	
13		1,27348	0,04936	0,72391	0	0,2375	0,82908	1,1963	
14		1,47799	0,02940	0,19493	0,0904	0	0,19705	0,12147	
15		1,32392	0,0888	0,05715	0,0889	0,0879	0	0,17981	
16		0,42371	1,02345	1,02229	1,1651	1,14277	1,27501	0	
17	Sumatoria coeficientes de correlación	0,21420	1,91993	1,91993	1,91993	1,91993	0,8291	1,42039	
18									
19	Cantidad de información	0,25005	0,08993	0,25005	0,90048	0,41420	0,32392	0,16030	0,313125422
20	Peso de los criterios	0,10	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10	0,10	

Figura 44. Ejemplo de hoja de cálculo en la que se aplican las fórmulas del método CRITIC explicadas en detalle en la sección 8.3 del documento principal de la guía metodológica.

7. RESULTADO IZPR

Una vez obtenidos los factores de ponderación mediante la integración de los métodos explicados en detalle en el apartado 8 de la guía metodológica, el paso final consiste en la integración de las capas temáticas mediante una sumatoria lineal ponderada a través de un proceso de álgebra de mapas, siguiendo la expresión dada por:

$$IZPR = \sum_{j=1}^7 W_j * S_j$$

Donde, IZPR corresponde al índice de zona potencial de recarga que evidencia la potencialidad de cada celda para favorecer el proceso de recarga de acuíferos, j responde al número de criterios, Wj es el peso individual de cada criterio determinado mediante la integración de los métodos anteriormente descritos y Sj corresponde al ráster de cada criterio calificado en función del potencial de recarga.

Para tal fin, se usa la herramienta *Raster calculator*, localizada en la ruta *ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Map Algebra / Raster Calculator*. La expresión a usar en la entrada está definida por los factores de ponderación obtenidos para cada criterio, los cuales son relativos a cada área evaluada, en la *Figura 45*, se presentan como ejemplo los factores de ponderación hallados para el área de las cuencas de los ríos Surata y Tona. Los factores de ponderación van multiplicados

[illegible]

Este ráster resultante debe ser reclasificado en cinco categorías, usando la herramienta Reclassify, ubicada en la ruta *ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify*. Como Input raster se debe seleccionar la capa resultado de la combinación lineal, en el campo Reclass field se debe seleccionar Value (aunque se selecciona por defecto), el método de clasificación debe ser ajustado a la distribución de los datos, cuando esta se aproxime a una distribución normal se aconseja el uso del método de Cuantiles, finalmente se asigna una ruta de salida adecuada al mapa de zonas potenciales de recarga, Figura 46.

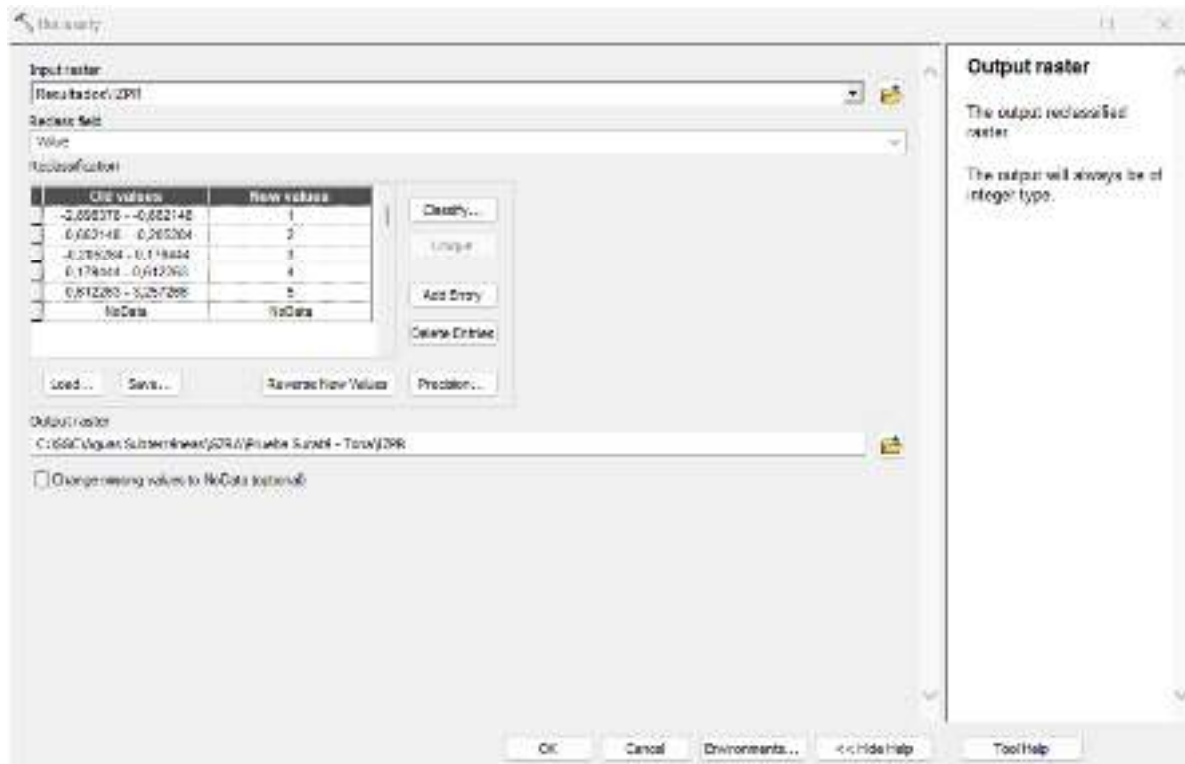


Figura 46. Ejemplo de reclasificación de la capa producto de la combinación lineal de los criterios.

8. SOFTWARE LIBRE - ALGUNAS HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

Teniendo en cuenta que los ejemplos de cálculos realizados se han dado principalmente en ARCGIS, esta sección busca dar una alternativa al lector para la construcción de las variables usadas para definir las zonas de recarga. La herramienta que se va a desarrollar con mayor detalle es Qgis acoplada en algunos casos con GRASS.

Qgis

Este software es un sistema de información geográfica con funcionalidades similares a las de ArcGIS, sin embargo, es un sistema con licencia tipo GNU, lo que lo hace de libre acceso. En la siguiente figura se puede ver la interfaz del programa muy similar a la de Arc-GIS, Figura 47.

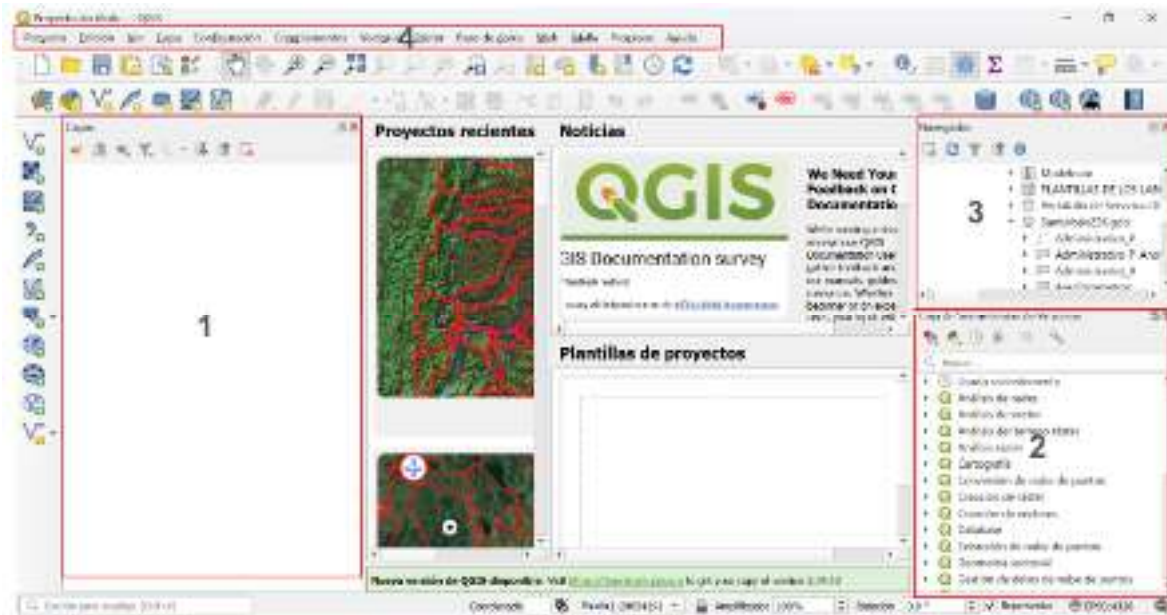


Figura 47. Interfaz gráfica de Qgis.

Algunos de los elementos importantes del programa destacados en la Figura 41 van a permitir una transición con facilidad de ArcGIS a Qgis:

- En el caso de que algunos de los paneles no se encuentren o se hayan cerrado involuntariamente, se puede dar clic derecho sobre la banda intermedia en cualquier parte y activar los paneles que se requieran, Figura 48.



Figura 48. Menú de paneles

Adicionalmente, al ser software libre permite la construcción de herramientas propias basadas en Python. A continuación, se presenta un compendio de herramientas elementales y comunes en todas las variables consideradas en la definición de zonas de recarga, estas herramientas se encuentran fácilmente en la banda 4.

Herramientas básicas

- **Clip Capas vectoriales**

Cortar elementos tipo vectorial ayuda a disminuir los tiempos de cálculo y restringir el análisis a la zona de interés, en este caso la zona mínima de interés es la cuenca y se orienta a determinar estadísticas de zonas como la distancia promedio de los centroides de drenajes, Figura 49 .

Para cortar los elementos vectoriales siga la siguiente ruta:

Herramienta de geoprocso>Cortar



Figura 49. Ruta Cortar

Se abre el siguiente menú en donde es importante recordar que la capa de entrada es la capa que se desea cortar, y la capa de superposición es la que define la geometría de corte, Figura 50.

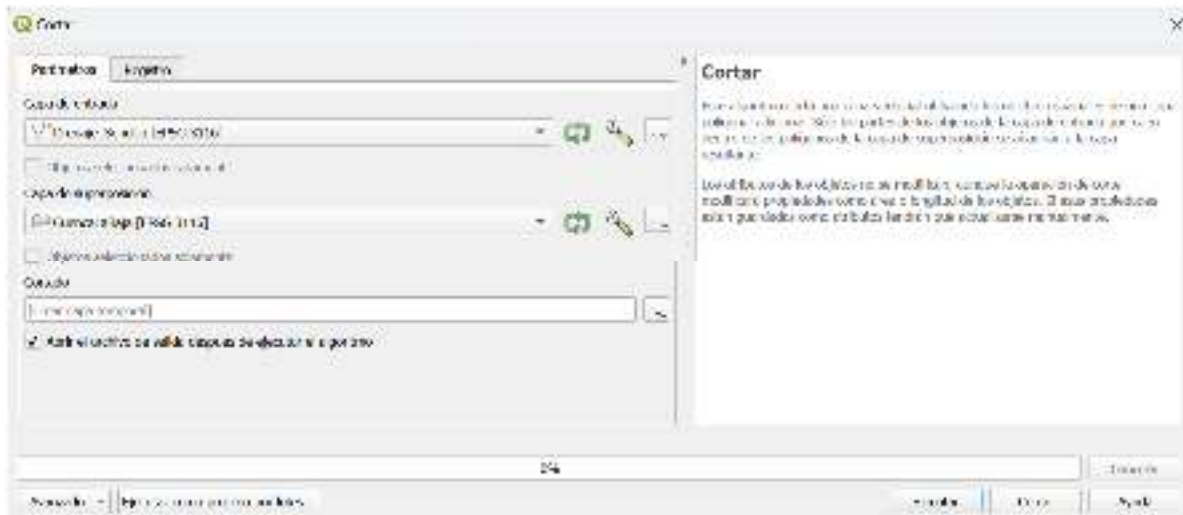


Figura 50. Herramienta Cortar

En el caso anterior (Figura 50), la capa que se desea cortar es el drenaje y la capa de corte es la cuenca.

- **Centroides**

Una vez se tiene definida la extensión de la capa de interés, se procede a construir los centroides, para esto siga la siguiente ruta.

Vectorial> Herramienta de Geoproceso> Centroides, Figura 51.



Figura 51. Ruta Centroides

Esta herramienta únicamente requiere que se especifique la capa de entrada de procesamiento.

- **Estadística distancia**

Con los centroides definidos se procede a estimar la distancia promedio entre centroides, para esto se usan dos herramientas del menú vectorial>herramientas de análisis.

- Matriz de distancia.
- Estadísticas básicas para campos

Inicialmente vayamos a matriz de distancias (Figura 52), se abre el siguiente menú

Figura 52. Interfaz de la herramienta Matriz de distancia

En capa de puntos de entrada, y capas de puntos objetivo se selecciona centroides, al ejecutar esta herramienta se obtendrá una capa vectorial, especifique el nombre de la capa si lo desea o puede trabajar con capas

temporales, Figura 53 (importante: las capas temporales se pierden una vez se cierra el programa).

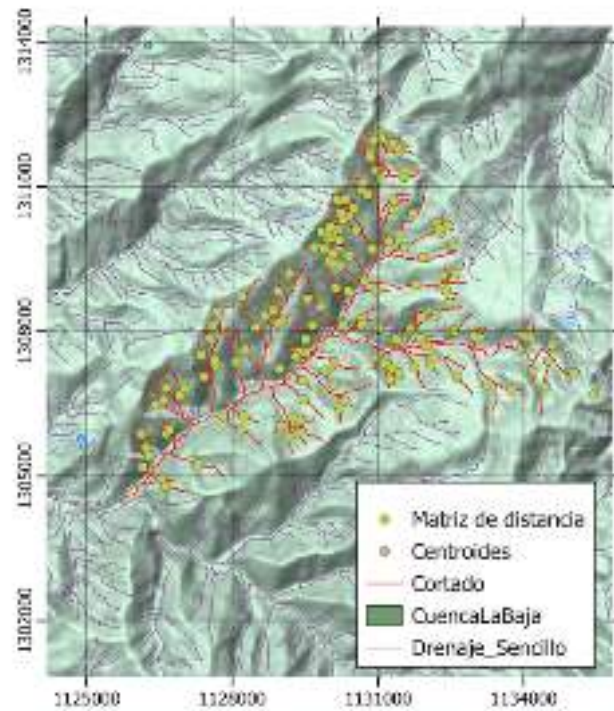


Figura 53. Mapa en donde se visualiza el corte de la capa vectorial de drenajes, y los centroides en el área del Páramo de Santurbán, cuenca la baja.

Al dar clic derecho en la capa de matriz distancia y seleccionar **abrir tabla de atributos**, se despliega una tabla en la que se puede ver cómo se realizó el cálculo, por capa punto se estima la distancia a cada uno de los vecinos, Figura 54.

Matriz de distancia — Objetos Totales: 21756, Filtrados: 21756, Seleccionados: 0




	InputID	TargetID	Distance
1	1912	2675	2575.39850158...
2	1912	2662	1690.29653196...
3	1912	2695	1305.02996688...
4	1912	2607	2187.77230110...
5	1912	2784	2921.30568314...
6	1912	2703	2459.57597755...
7	1912	2789	3828.07718090...
8	1912	2708	2474.16951032...

Figura 54. Atributos capa de centroides

Teniendo como base esta capa vectorial, se quiere estimar el promedio de distancia que hay entre centroides, entonces, damos click en vectorial>Estadísticas básicas para campos, con lo que se despliega el siguiente menú, Figura 55.

Estadísticas básicas para campos

Parámetros Registro

Capa de entrada
 " Matriz de distancia (EPSG:3146)   

☐ Objetos seleccionados solamente

Campo del que calcular estadísticas
 1-2 Distancia

Estadísticas [opcionales]
 [Guardar en archivo temporal]

Campo del que calcular estadísticas

Identificador de Python:
'FIELD_NAME'

Figura 55. Menú estadísticas básicas

En esta herramienta se selecciona como capa de entrada la capa de que tiene la matriz de distancias y seleccionamos el campo que tiene el parámetro de interés. Al ejecutar esta herramienta se tiene un resultado en formato html, que puede ser visibilizado al dirigirse a Registro en el mismo menú desplegable, Figura 56.

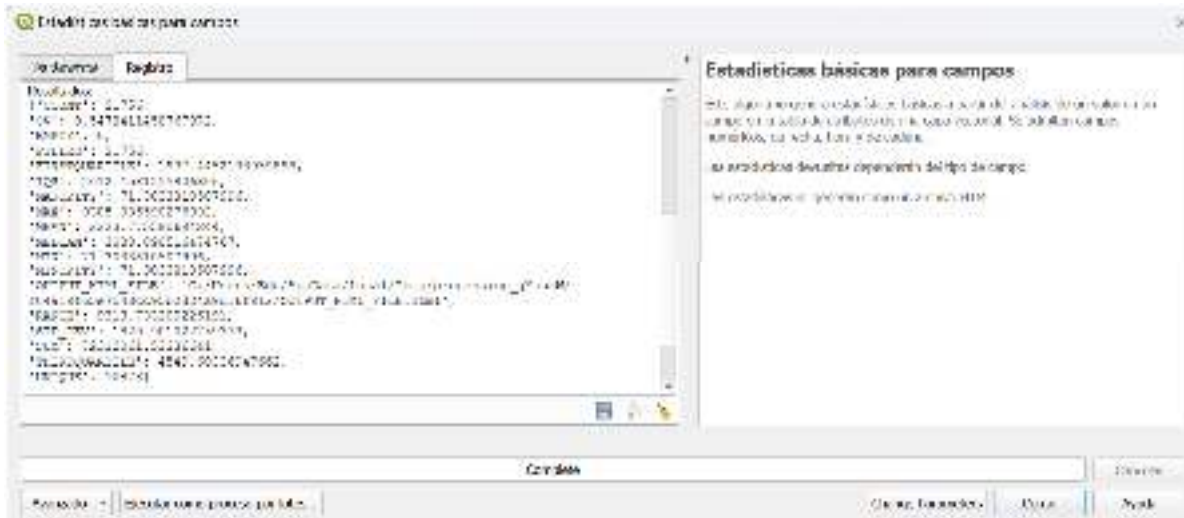


Figura 56. Resultados estadística básica

o, en la venta principal de Qgis aparecerá un visor de resultados, seleccione el resultado de interés y de doble clic.



Figura 57. Resultados de estadísticas básicas

Herramientas de densidad

Cortar capas Ráster y Mosaico Capas Ráster

Dos herramientas adicionales en el procesamiento de las capas ráster son cortar y armar mosaicos, a cada una de estas se puede acceder por el menú Ráster de la banda 4, por ejemplo, seleccionemos inicialmente la herramienta Cortar ráster por capa máscara, Figura 58.



Figura 58. Ruta de herramientas ráster

Al igual que en el caso de cortar una capa vectorial, se debe especificar la capa ráster de entrada, y la capa a la que se desea cortar y el resultado se puede guardar directamente en un directorio o se puede trabajar de forma temporal. Adicionalmente, es común que las imágenes o información raster no cubra toda la zona de interés, por lo que se deben combinar o pegar las capas buscando cubrir toda la zona de interés. Para hacer esto en el menú raster>Miscelánea>combinar, se puede ingresar la lista de imágenes a pegar.

Densidad de lineamientos

La densidad de lineamientos se puede estimar fácilmente en Qgis, para esto active la caja de herramientas y busque la función Densidad Lineal, como se muestra en la Figura 59.

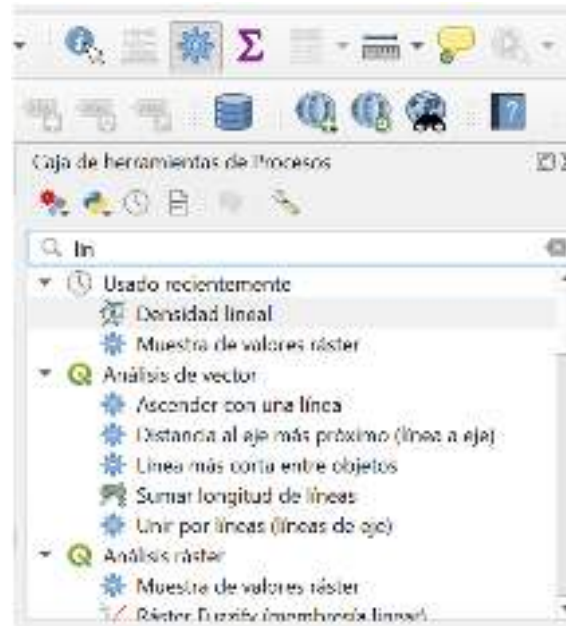


Figura 59. Caja de herramientas

En la Figura 54 se presenta un ejemplo de cálculo a partir del sistema de fallas identificadas el Páramo de Santurbán en los municipios de Suratá-Tona. Estas líneas pueden ser ponderados en función de la orientación, Figura 60.



Figura 60. Sistema de Fallas en la cuenca La Baja

Para estimar la densidad de líneas, vaya a la caja de herramientas y busque la función Densidad de Línea (Figura 61) se tendrá un resultado como el siguiente:

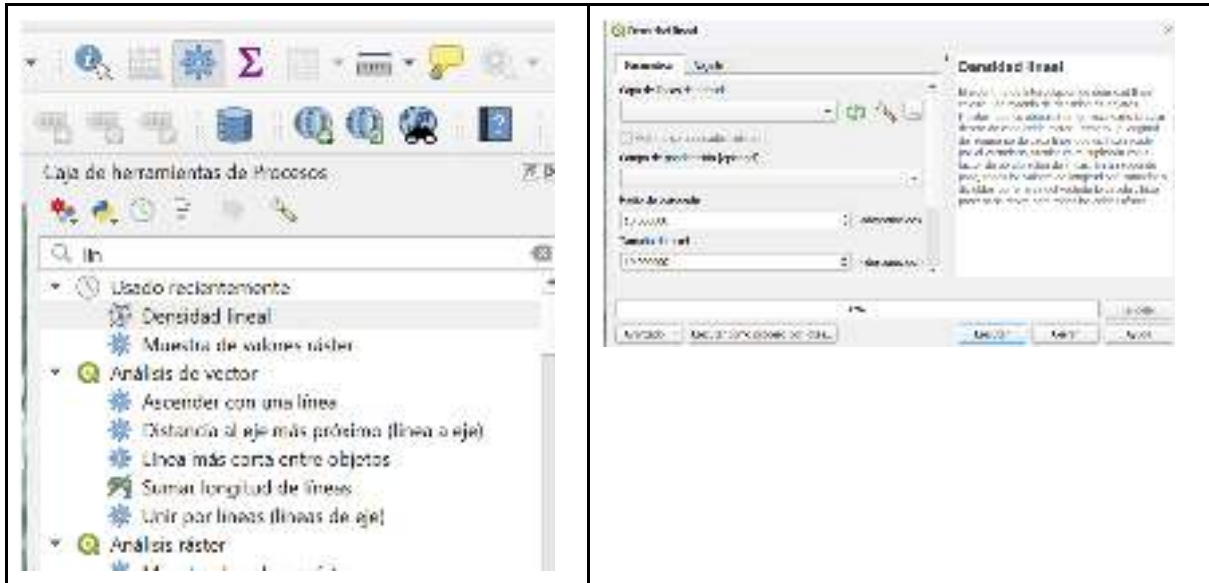


Figura 61. Ubicación y menú Densidad de líneas

La función tiene adicionalmente un campo de ponderación, se recomienda inicialmente agregar a los lineamientos la geometría (Banda 4 vectorial), y posteriormente agregar un campo de ponderación a la tabla, en el caso de la guía la ponderación se asigna en función de la orientación. Suponiendo que los lineamientos tengan todos los elementos deseados por el usuario, es importante que el radio de búsqueda no sea menor que el tamaño de píxel como mínimo, sin embargo, para definir el radio de búsqueda en la herramienta considere los lineamientos dados en la Guía, Figura 62. Los resultados de la guía para el caso mostrado son los siguientes.

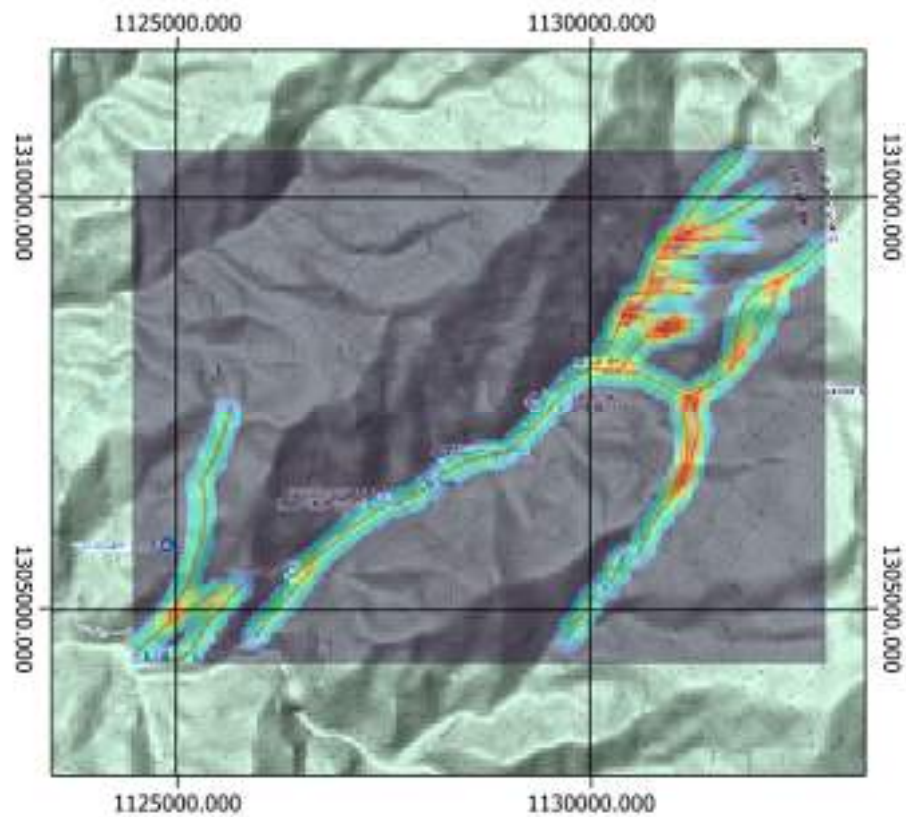


Figura 62. Densidad de Líneas a partir de sistema de fallas

Igual proceso se puede seguir para generar la densidad de drenaje.

Conectividad de Fracturas

Esta es una capa de densidad de puntos, lo que implica que se deben identificar los puntos de intersección de los lineamientos, Figura 63. Para determinar los puntos de intersección de líneas siga la siguiente ruta.

- Análisis vectorial >Herramientas de análisis>intersección de líneas

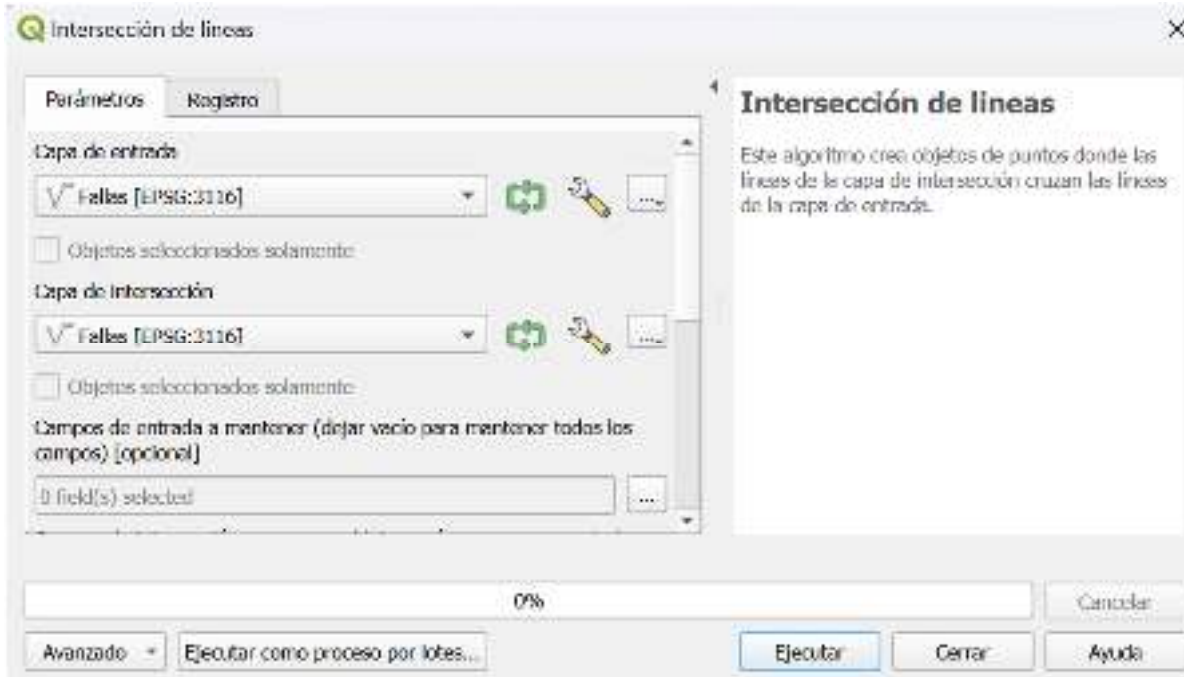


Figura 63. Menú intersección de líneas

En este menú se puede especificar dos capas. Así, en el caso de buscar la intersección de capas diferentes basta seleccionar cada una de ellas en cada campo, o en el caso de querer identificar los puntos de intersección de las líneas de un mismo shape se debe especificar como capa de entrada y de intersección la misma capa. Los resultados de esto se pueden ver en la siguiente imagen en donde se muestran las intersecciones de los puntos, Figura 64.

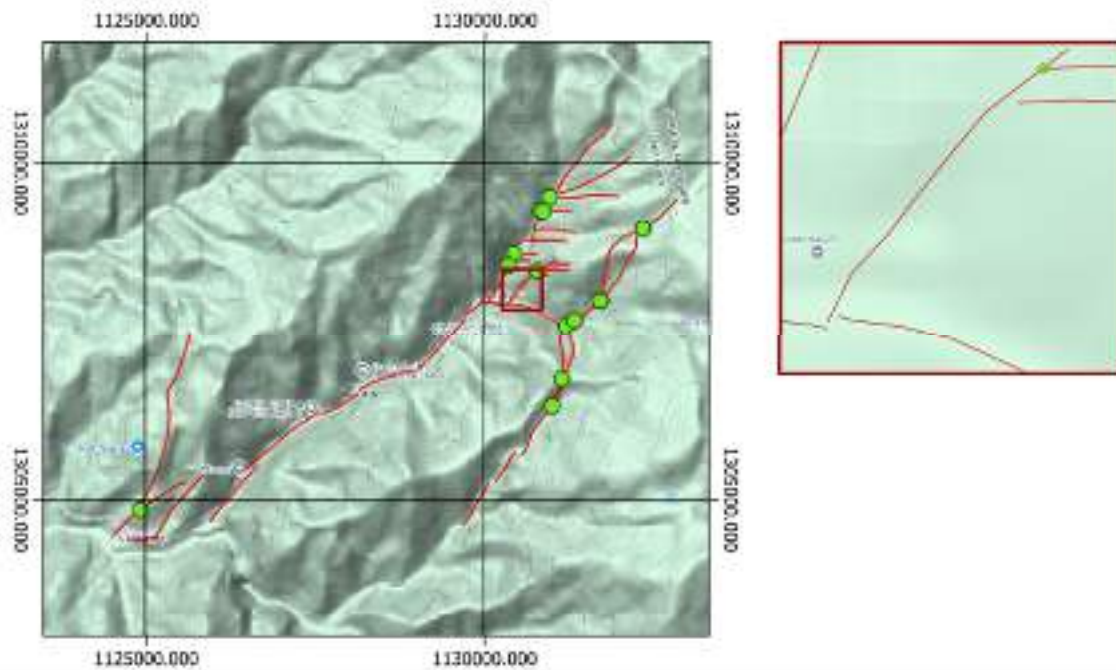


Figura 64. Resultado y detalle de intersección de líneas

En la figura 58 se ve las intersecciones de las líneas y un detalle de una zona en la que al parecer se tienen intersección de los lineamientos de la falla foto interpretados. Una vez se tiene esta capa de intersección de puntos se procede a calcular la densidad de puntos, para esto diríjase a **Caja de herramientas>interpolación>Mapa de Calor**. Se desplegará el siguiente menú, Figura 65.

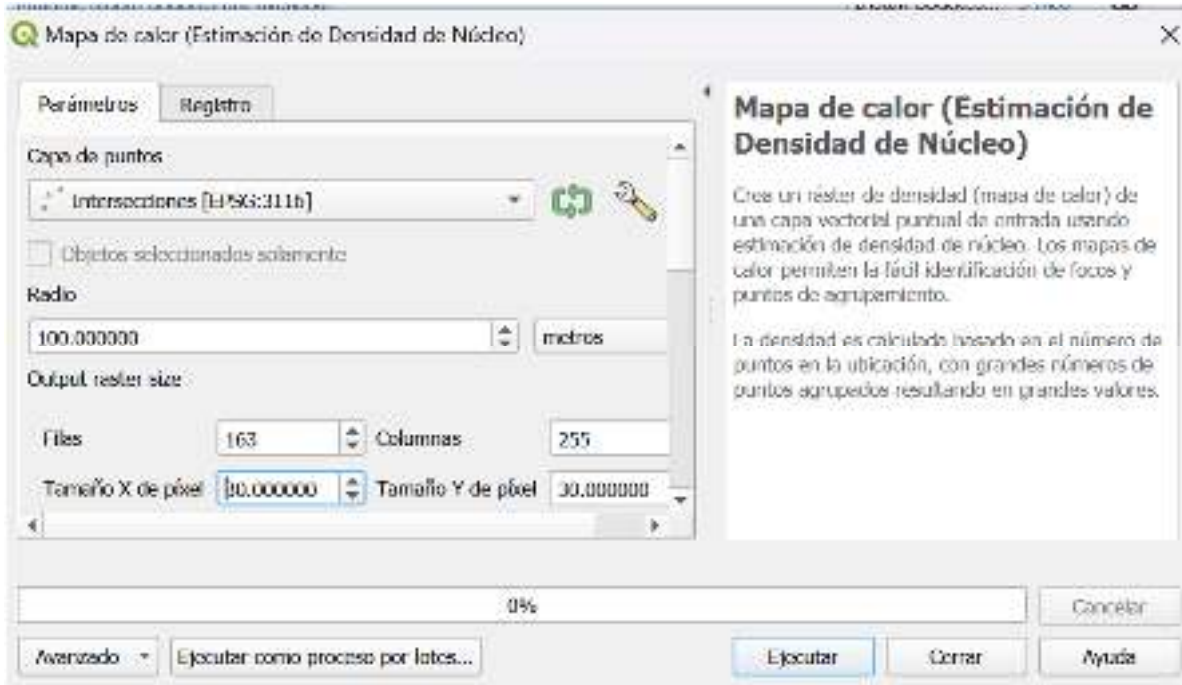


Figura 65. Menú herramienta para calcular la densidad de puntos

En la herramienta tenga en cuenta el tamaño del píxel y el radio de búsqueda, y al fijar el número de filas y columnas se define la extensión del raster. En la siguiente figura se muestra un caso en el que el número de puntos de intersección es muy bajo por lo que se obtiene un mapa de densidad con pocos valores Figura 66.

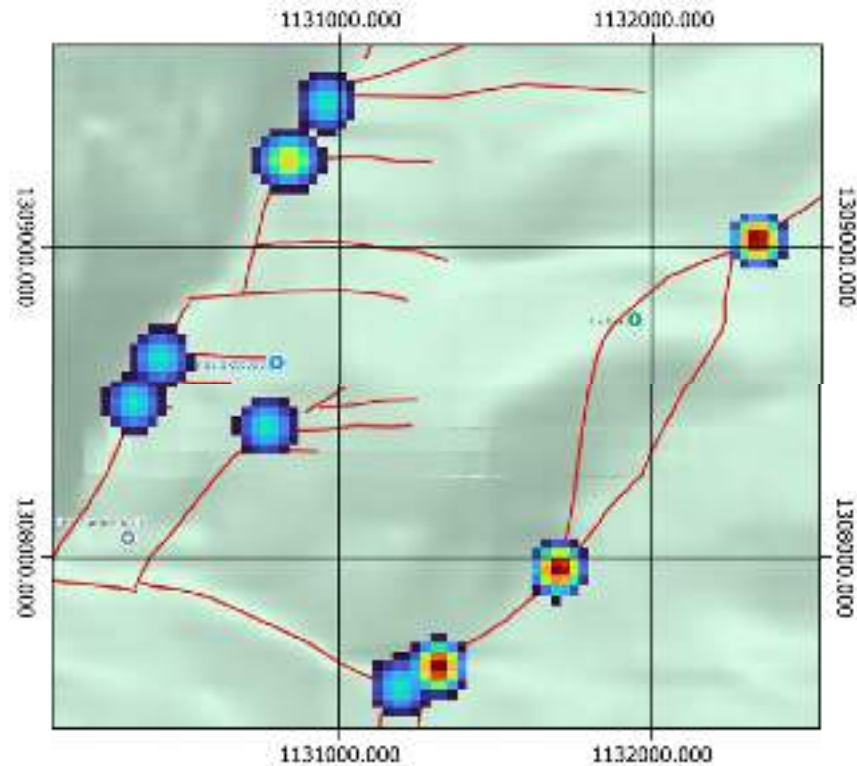


Figura 66. Densidad de puntos de intersección de sistema de fallas de la cuenca La Baja.

En efecto en este caso se tiene la sensación de que la capa de densidad no es continua, sin embargo, en este caso la herramienta donde no se tiene punto está asignando un valor nulo.

Detección de datos atípicos

Cálculo de los cuartiles

usar herramienta **r.quatile** de la caja de herramientas, para esto dirijase a la caja de herramientas y seleccione la herramienta r.quartile, se le desplegará la siguiente ventana.

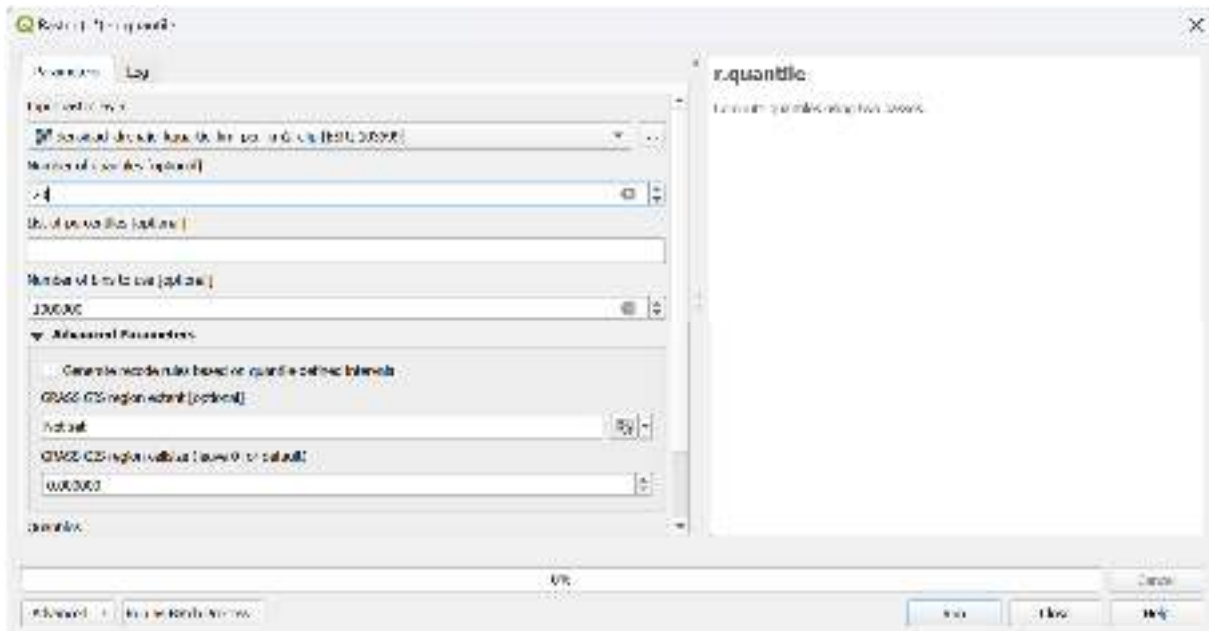


Figura : Menú para calcular los percentiles de una capa ráster, note el número cuantiles asignado.

Seleccione la capa a evaluar, y la dirección del archivo en donde lo desea guardar. En el archivo seleccione el percentil 95 el cual va ser el valor umbral.

12:65.000000:4.397212
13:70.000000:4.863997
14:75.000000:5.236951
15:80.000000:5.636382
16:85.000000:6.291412
17:90.000000:7.257566
18:95.000000:8.509053

Fijar valor no_data (retirar valores mayor a umbral o menores a cero)

Para fijar valores nulos en Qgis, use la calculadora raster

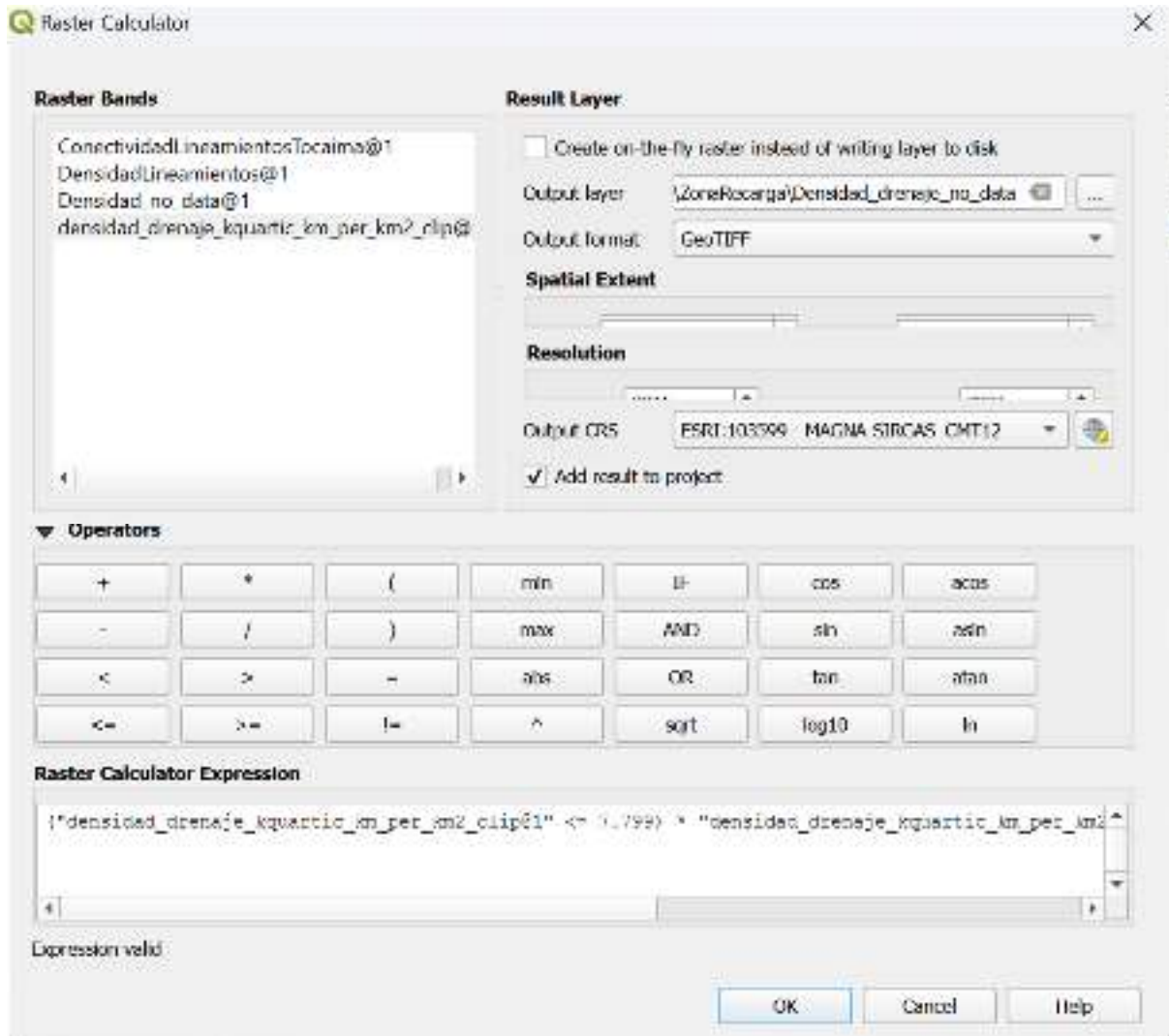


Figura .Menu en la calculadora raster, en el se detalla una expresión usada para identificar los valores que sobrepasan el umbral.

en raster calculator expresión considere la siguiente expresión:

$$("capa@1" \leq \text{umbral}) * "capa@1" / ("capa@1" \leq \text{umbral})$$

En donde *capa* se puede seleccionar de los raster disponibles en raster bands, y *umbral* se debe reemplazar por el valor numérico obtenido sin comillas.

Rellenar huecos

para esto se debe seleccionar la herramienta *r.null* en la caja de herramientas como se muestra en la siguiente figura:

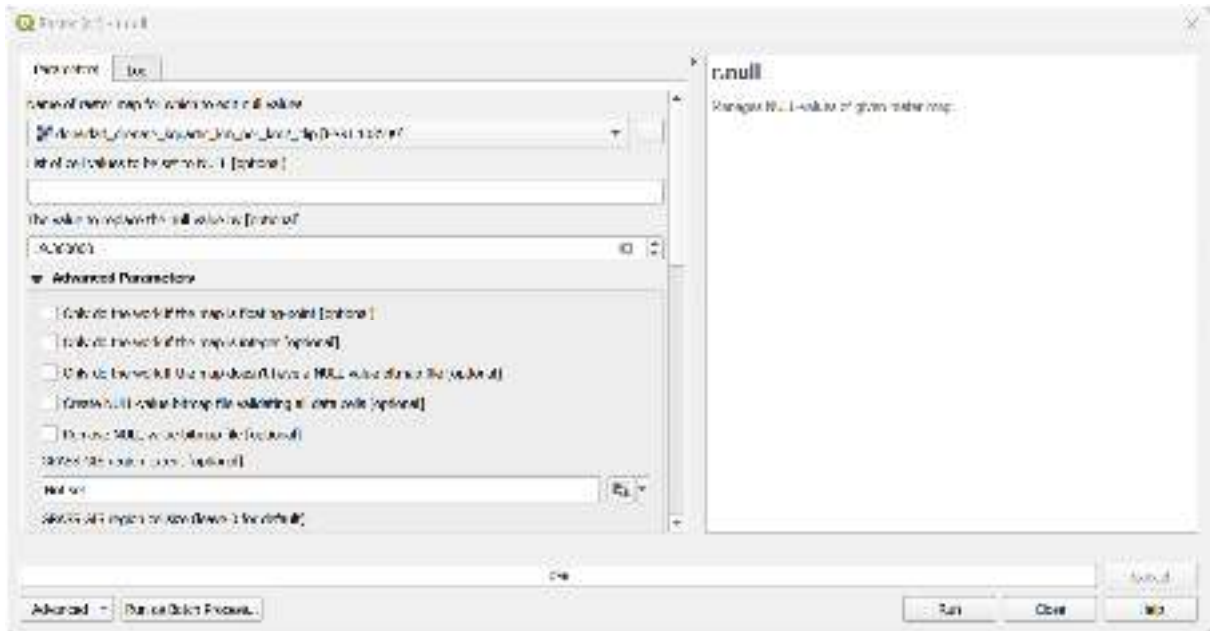


Figura . Menu función r.null, en donde se define el valor a remplazar en los valores sin datos.

el valor a remplazar en este caso será el valor umbral asociado a percentil 95.

Alineamiento de capas y Suma de capas

Esta herramienta se compone de varios subprocesos, entre los que se encuentra ajuste de la extensión, tamaño de celda, sistema de referencia, etc. Para usar dicha herramienta vaya a **ráster > alinear rásteres**, Figura 67. Con esto se puede incluir las capas que se desean considerar, al abrir el menú se encuentra la siguiente aplicación:

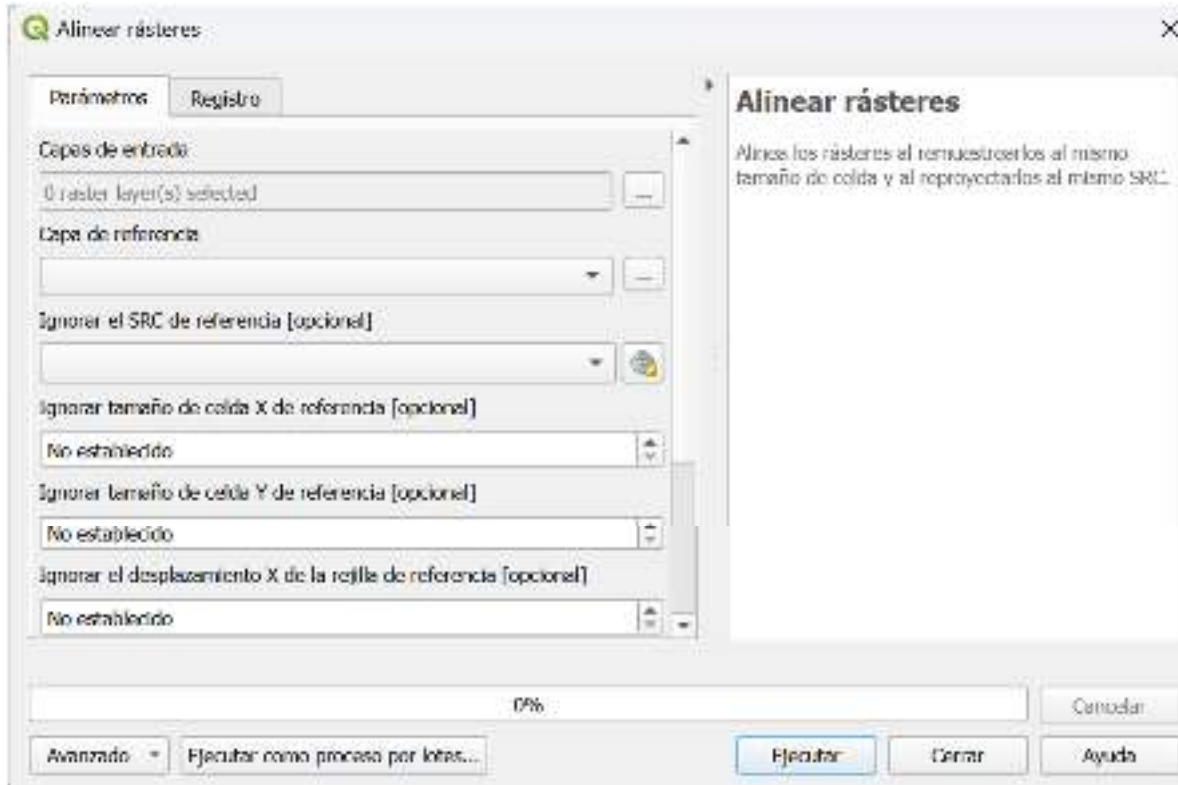


Figura 67. Menú alinear rásteres

Los campos que resultan indispensables para alinear las capas son indudablemente las variables de entrada del problema y una capa de referencia. Para incluir las capas debe dar clic en los tres puntos ubicados al costado derecho de, campo capas de entrada, se va a desplegar el siguiente menú en donde se puede incluir las capas., Figura 68.

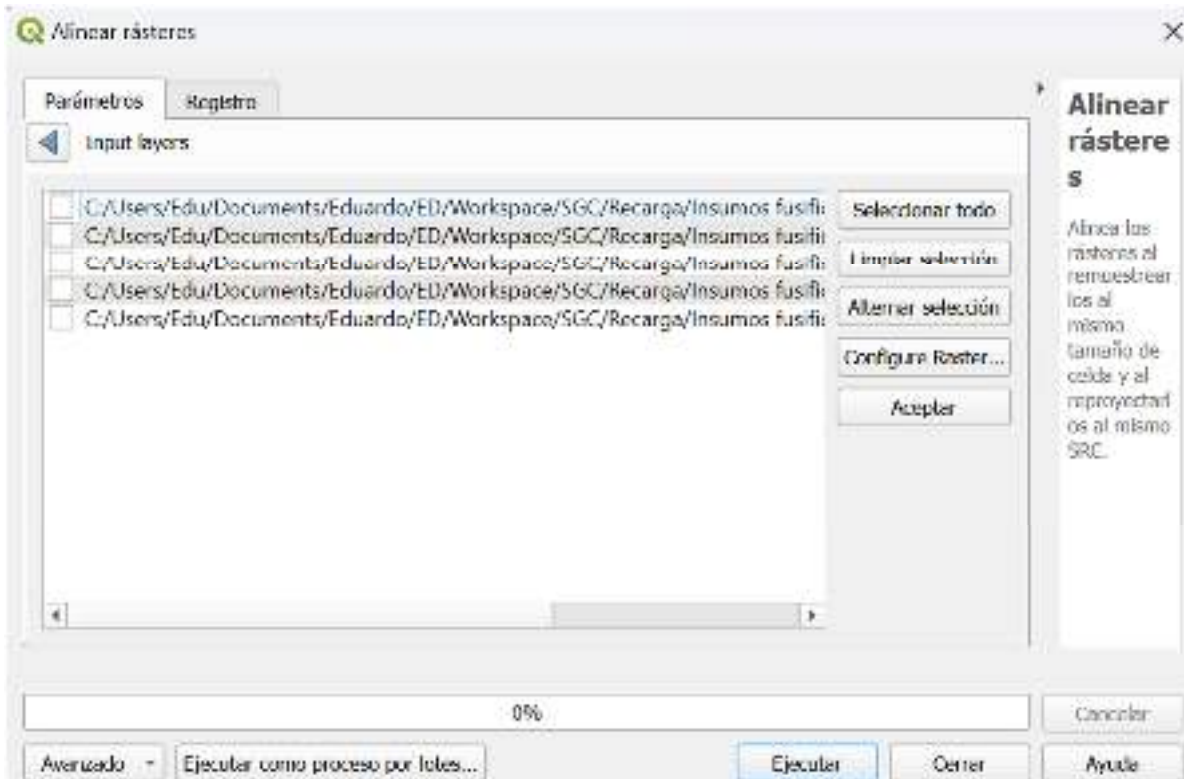


Figura 68. Lista de elementos a alinear

Se puede ejecutar la herramienta si se ha definido la capa de ajuste y las variables a ajustar. Por último, la suma de las capas se puede realizar en la calculadora ráster, esto se puede realizar en el menú **ráster>calculadora ráster**, Figura 69. El menú que se despliega es el siguiente:

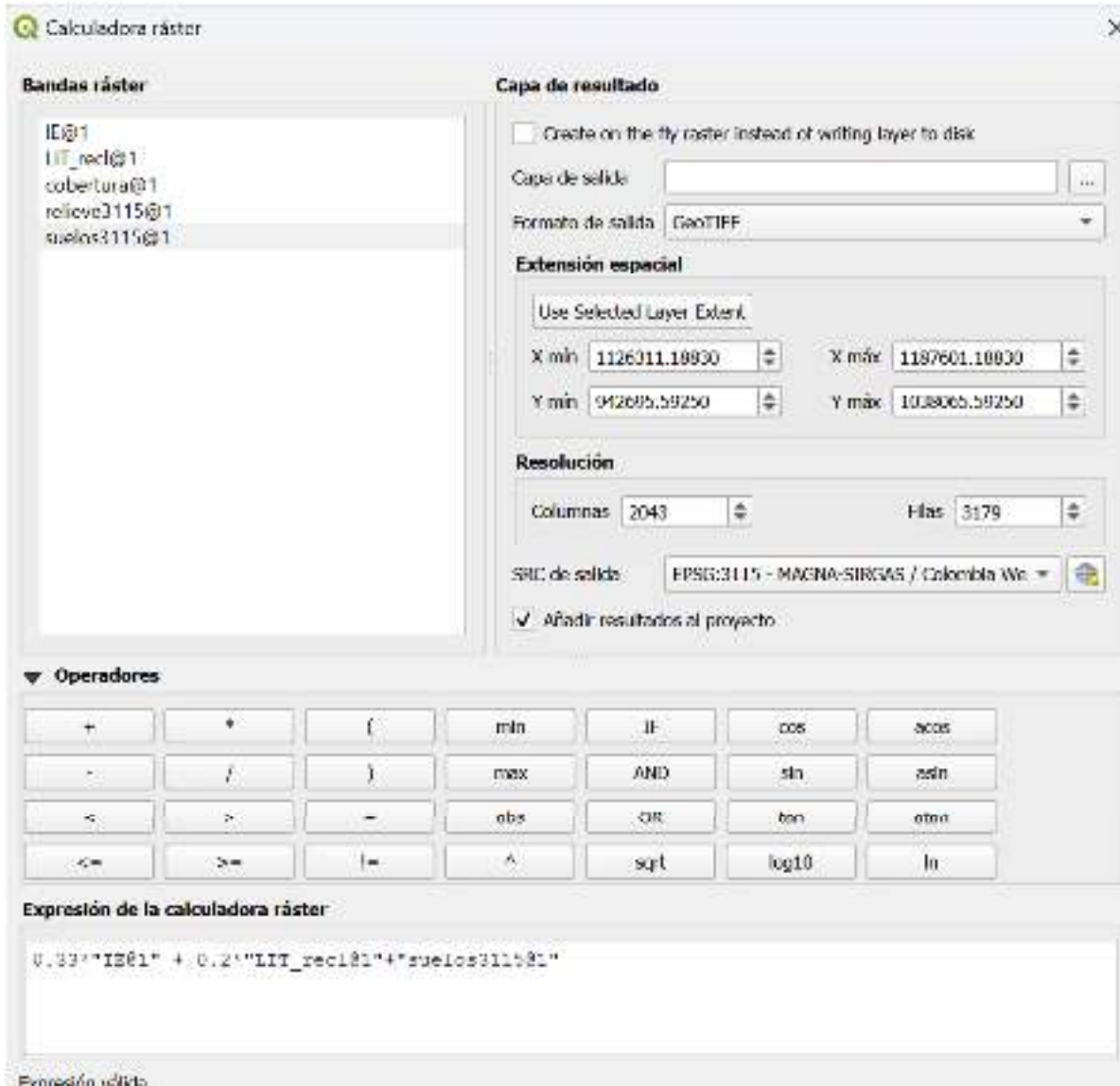


Figura 69. Calculadora ráster de Qgis, en la parte superior derecha las capas cargadas en Qgis y en la parte inferior la suma ponderada de tres de estas capas

Las capas que aparecen en **Bandas Ráster** son las cargadas previamente en el **panel de capas**, para definir la función se puede dar doble clic en alguna de las capas y esta se incluye en la expresión de la calculadora, en el caso ilustrado se han incluido tres capas para aplicar operaciones considere los **operadores**, y se puede incluir números reales en las expresiones.

Acoplamiento con GRASS

Grass GIS es una herramienta para cálculo con información “tipo ráster, vector, y procesamiento geoespacial”, con amplias capacidades en hidrología y procesamiento de imágenes y posibilidad de enlace a Python. Sin embargo, es de tener en cuenta que la interfaz del programa e interacción con el usuario requiere de un manejo elemental de una consola, pero específicamente, la creación de un directorio de trabajo, y definir un ambiente de trabajo. Una forma alternativa de usar las funcionalidades de GRASS es a través de Qgis como interfaz, lo que introduce facilidad en el manejo, para esto diríjase al menú de complementos, Figura 70.

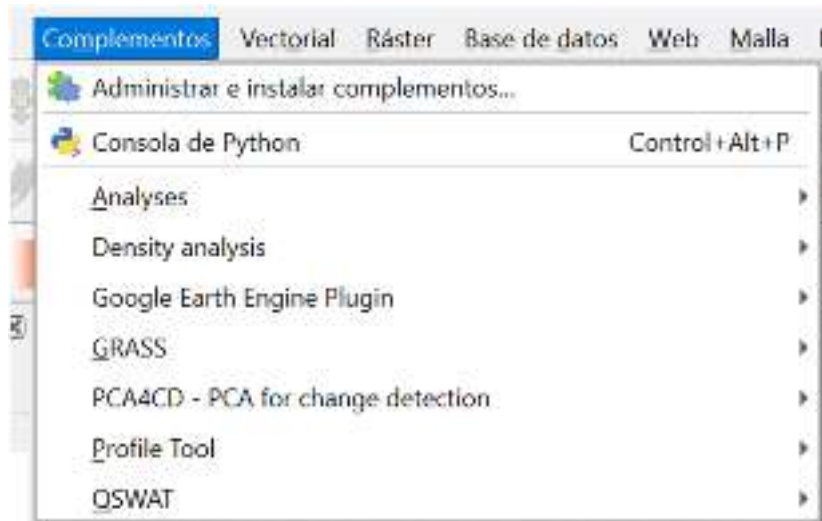


Figura 70. Ruta para instalar complementos, en la parte inferior se ven algunos complementos instalados

En administrar e instalar complementos se busca dentro de todos activar las opciones de GRASS, Figura 71.

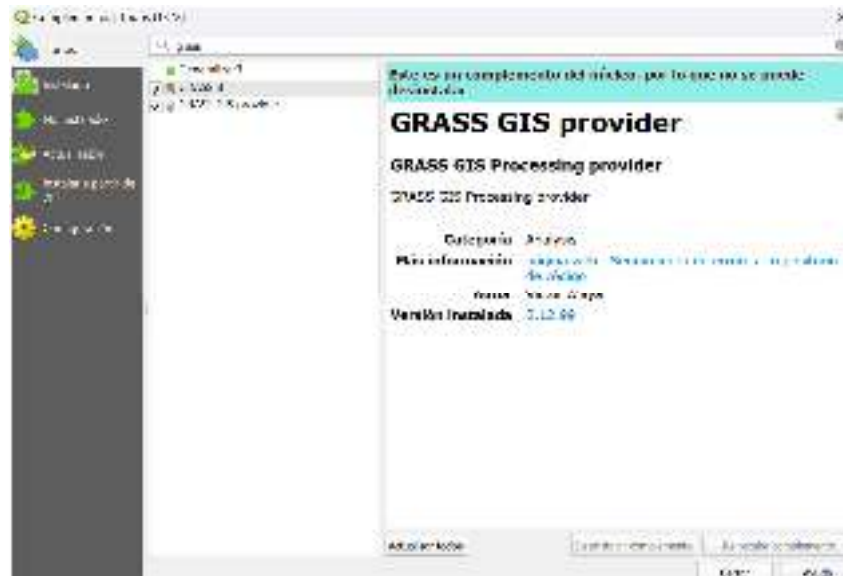


Figura 71. Despliegue de menú de instalar complementos

La primera de ellas es una interfaz que se genera dentro de Qgis para crear proyecto en Grass, la segunda de ellas es para activar las herramientas de Grass en la caja de Herramientas.

Índice Topográfico de humedad

Para estimar el índice topográfico de humedad diríjase a la caja de herramientas en las herramientas de grass, y seleccione r.terraflow, Figura 72.

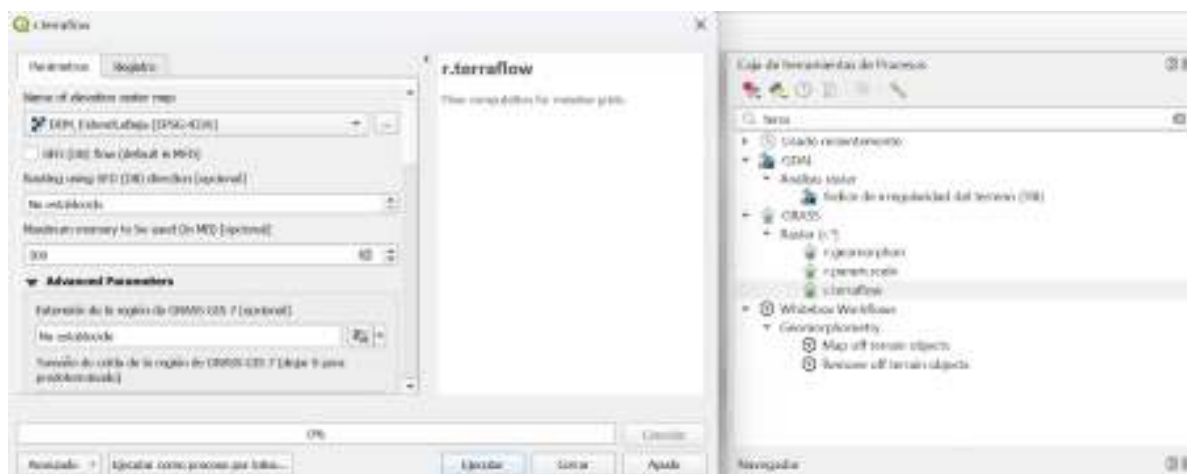


Figura 72. Uso de herramientas Grass desde Qgis.

En la figura 66 al costado derecho se puede ver la caja de herramientas, y al costado izquierdo se ve el panel que emerge cuando se selecciona la herramienta. Esta depende casi exclusivamente del DEM de entrada, las salidas de la herramienta van desde pendiente, aspecto, flujo acumulado hasta el índice topográfico de humedad. Todas estas son generadas de forma estándar porque se usan comúnmente en la modelación hidrológica (para mayor detalle ver Olaya (2004).

Reclasificación

Para reclasificar se puede usar la calculadora ráster de Qgis, sin embargo, para hacerlo de forma práctica en el módulo GRASS, busque la herramienta r.reclass donde aparecerá la siguiente ventana, Figura 73.

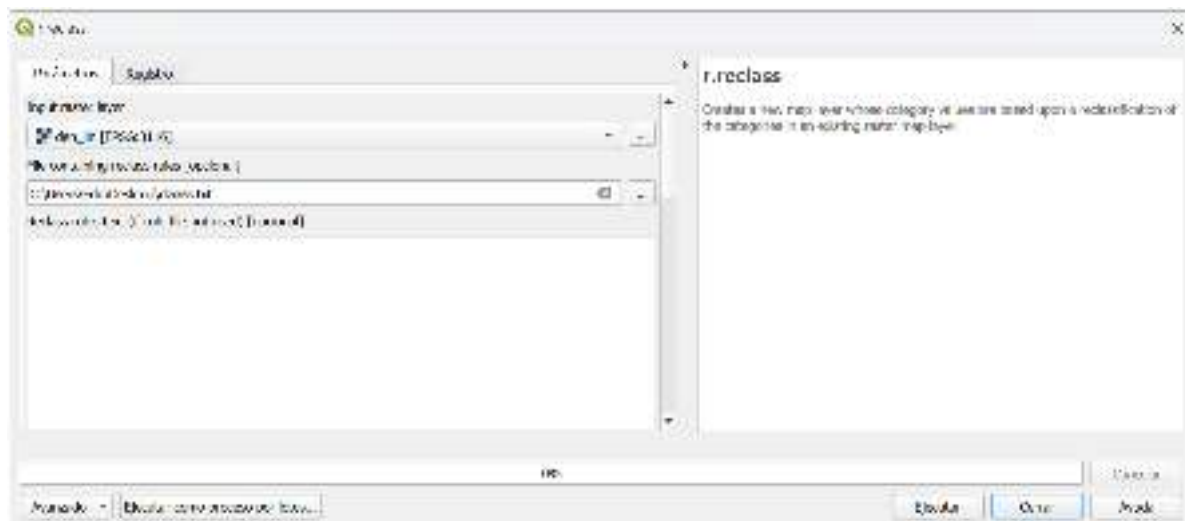


Figura 73. Menú herramienta r.reclass

La reclasificación requiere de un archivo de texto que presenta la siguiente estructura, en donde los límites de corte han sido definidos de acuerdo con el histograma, Figura 74.

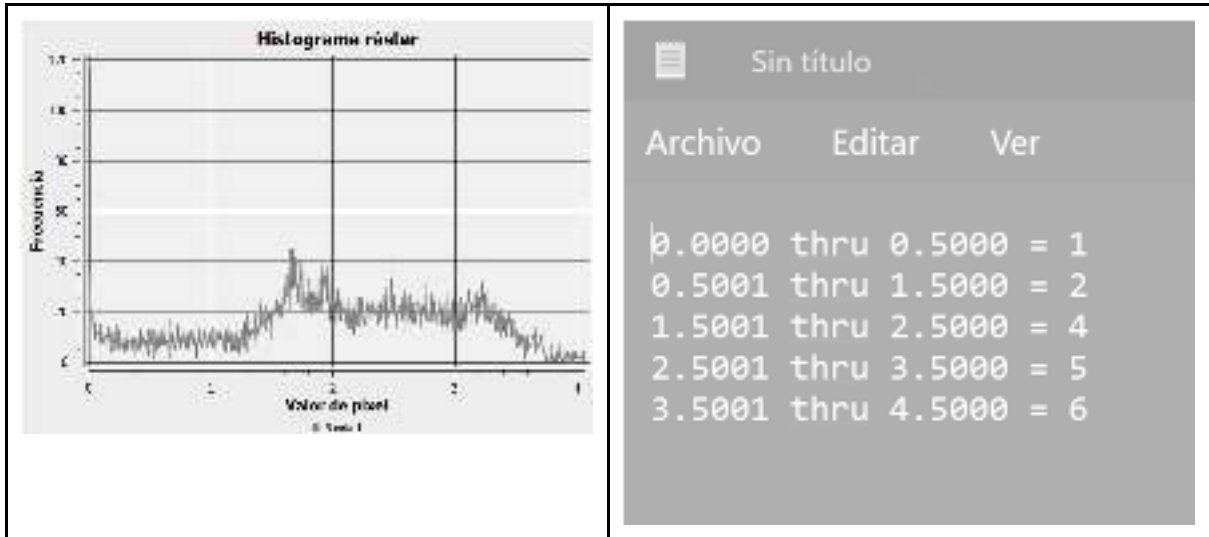


Figura 74. Ejemplo de archivo texto para reclasificación de capas

El documento de formato .txt ha sido guardado en formato ANSI, y se recomienda dejar en una ruta de fácil acceso para que r.reclass lo encuentre fácilmente. Luego de esto se puede dar ejecutar, y el resultado del ejercicio se puede ver en la figura 69, en donde al costado derecho se muestra una capa de densidad de lineamientos y a la derecha se muestra la reclasificación. Figura 75

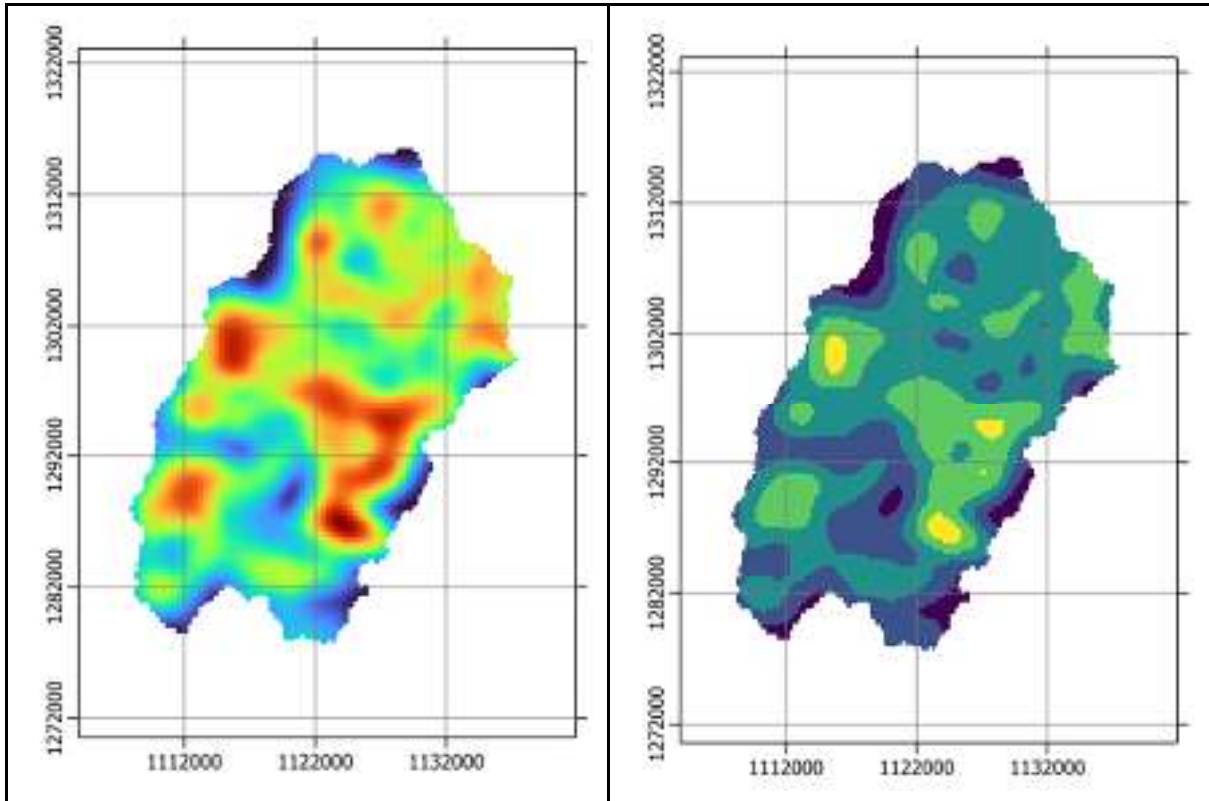


Figura 75. Ejemplo de reclasificación de capa de densidad, a la izquierda capa original a la derecha el resultado de la reclasificación

Estimación de pesos método CRITIC

La idea es generar puntos aleatorios dentro de la zona de estudio de tal forma que se obtenga un archivo tipo .xls, de tal forma que el procesamiento posterior no requiera de un uso específico de algún programa. En lo que sigue se hace una descripción del proceso considerado para generar los puntos dentro de un ambiente SIG, Figura 76. Posteriormente paso a paso se estiman la matriz de correlaciones y la varianza de cada una de las variables.

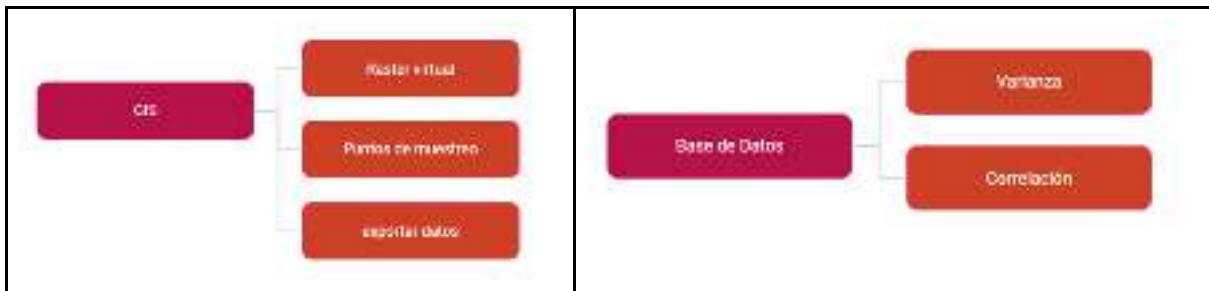


Figura 76. Método CRITIC, al costado parte de la metodología que se desarrolla en SIG, al costado Derecho parte de la metodología que se desarrolla en Excel.

- **GIS**

Alistamiento de información.

En este caso se parte de la existencia de la información, por ejemplo, en la siguiente Figura 77 se puede ver la información subida a QGIS.

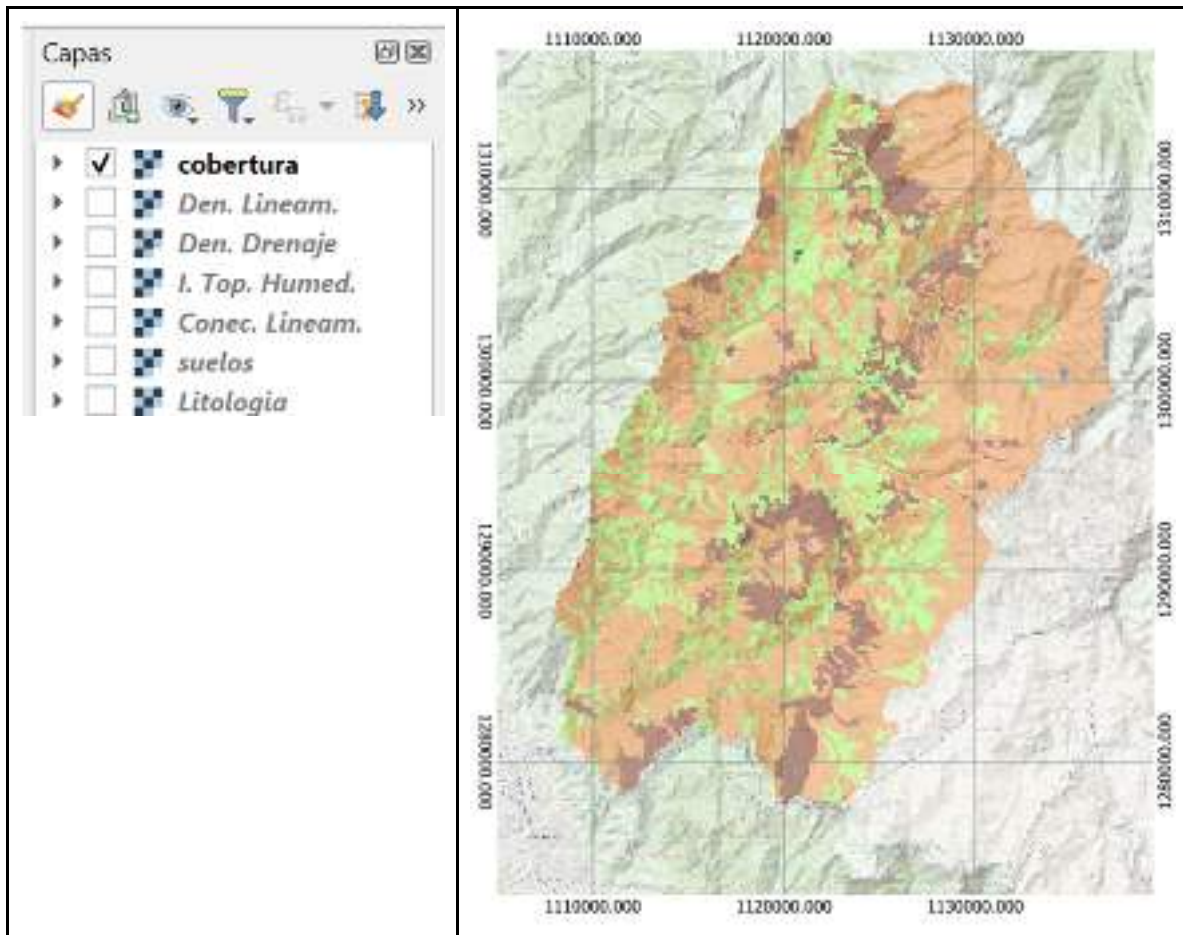


Figura 77. Variables para definir la zona de recarga

Generar Raster virtual o de apilado

Una vez definidas las capas de entrada se apilan las capas en un solo tipo de ráster, en el cual se colocarán cada una de las 7 variables, sea muy cuidadoso con el orden de las capas. Para apilar las capas diríjase a la siguiente ruta.

Ráster> Miscelánea>construir ráster virtual

En la herramienta se pueden definir las capas a apilar dando clic izquierdo en input layer, en los tres puntos ubicados al costado derecho, Figura 78.

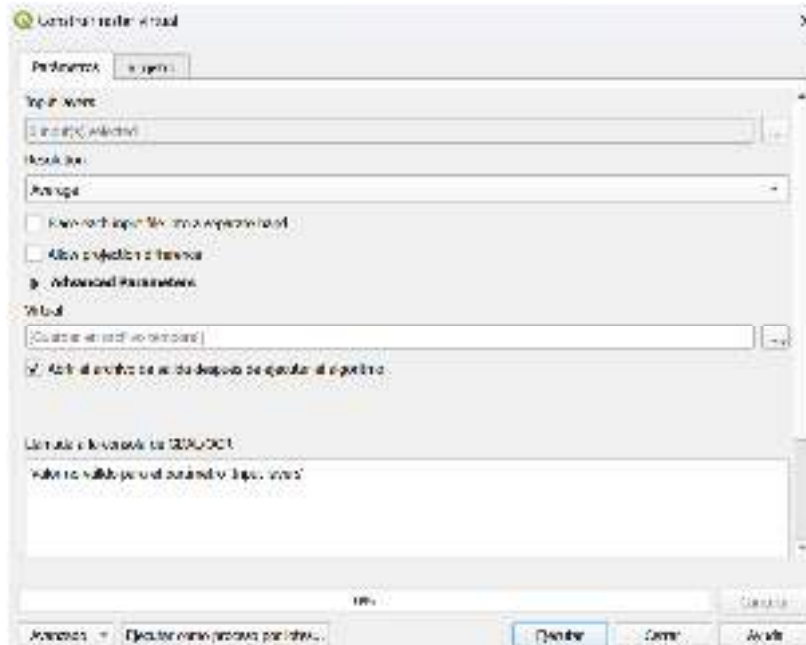


Figura 78. menú construir Raster virtual.

Aparecerá el siguiente menú, Figura 79.

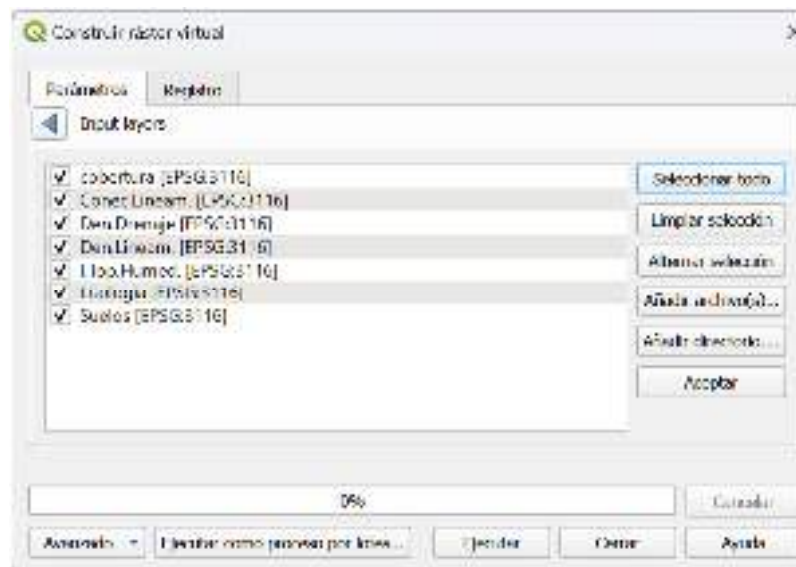


Figura 79. Capas listas para ser apiladas y conformar un ráster multibanda

En el caso de ejemplo se han seleccionado todas las capas y de acuerdo al orden en que aparecen en la ventana se asigna el orden de las bandas. Adicionalmente, es importante seleccionar *place each input file into a separate band*.

Generar puntos de muestreo

1- Se requiere definir un área de control, en este caso área de muestreo ubicada dentro de las cuencas de los ríos Suratá y Tona, como se muestra en la Figura 80.



Figura 80. Área de muestreo ubicada dentro de las cuencas de estudio.

Dentro de esta área se extraen los puntos de muestreo, para esto considere la siguiente ruta:

Vectorial>herramientas de investigación> Puntos aleatorios dentro de polígonos, Figura 81.

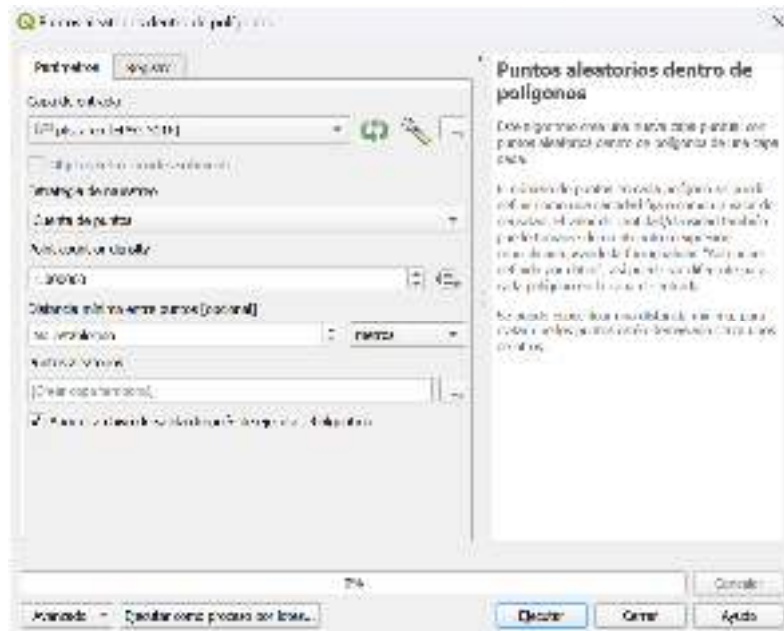


Figura 81. Muestreo de la capa y generación de puntos dentro del área de estudio

En esta herramienta se especifica el polígono dentro del cual se quiere generar los puntos y el número de puntos a generar. El resultado de esta operación se puede ver en la Figura 82.

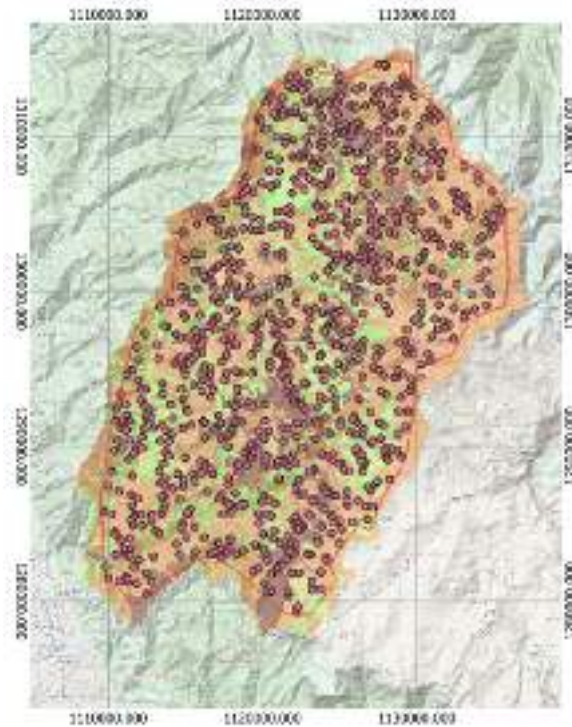


Figura 82. Puntos aleatorios generados dentro de área de estudio

Luego en **caja de herramientas>buscar en análisis de ráster>muestreo de valores de ráster**, se especifican los puntos aleatorios y el ráster multicapa, Figura 83.

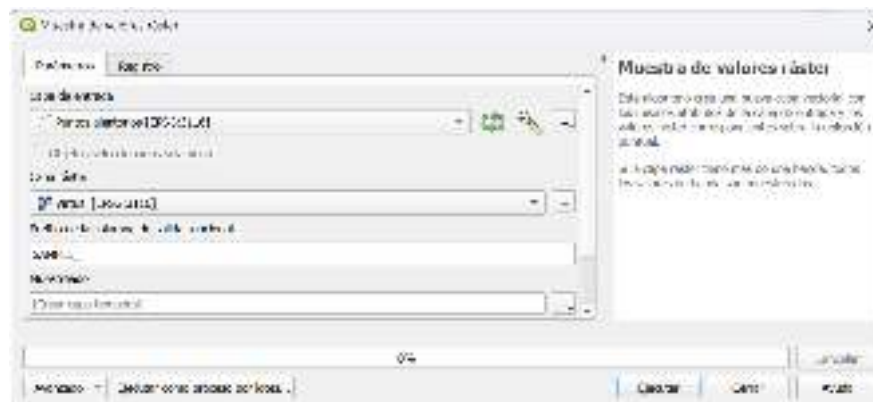
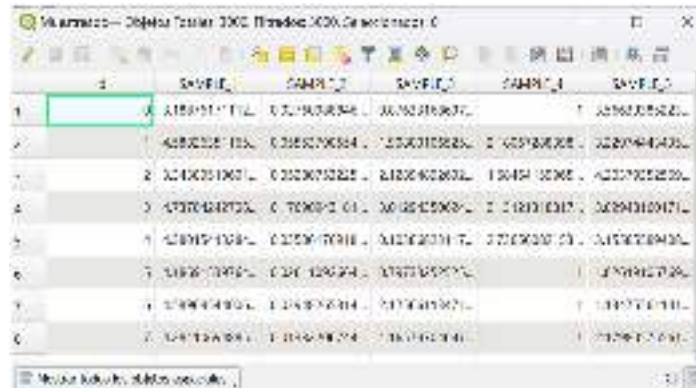


Figura 83. Muestreo de valores en el ráster multibanda.

El resultado de esto es un shape de puntos con los valores de cada una de las variables. Como ejemplo, en la Figura 84 se puede ver la tabla de atributos de shape generado en este apartado.



	ID	SAMPLE_1	SAMPLE_2	SAMPLE_3	SAMPLE_4	SAMPLE_5
1	0	1128951.171	0.211903834	0.002103637	1	0.002000021
2	1	1128952.111	0.210079634	0.002103637	2	0.002000021
3	2	1128953.067	0.210079634	0.002103637	3	0.002000021
4	3	1128954.023	0.210079634	0.002103637	4	0.002000021
5	4	1128955.079	0.210079634	0.002103637	5	0.002000021
6	5	1128956.035	0.210079634	0.002103637	6	0.002000021
7	6	1128957.091	0.210079634	0.002103637	7	0.002000021
8	7	1128958.047	0.210079634	0.002103637	8	0.002000021

Figura 84. Tabla de atributos de shape muestreado en los puntos aleatorios generados.

Exportar a Excel

Finalmente, exporte los resultados a Excel. para esto dar clic derecho a la capa con los valores muestreados. seguir la siguiente ruta: Exportar> Guardar objetos como aparecerá en el siguiente menú, Figura 85.

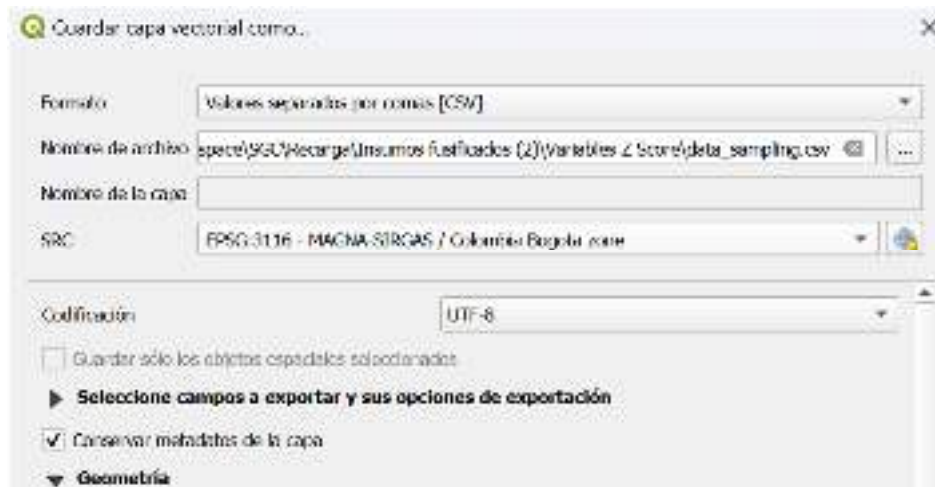


Figura 85. Exportar valores como archivo de texto.

Especificar formato separado por comas y el nombre del archivo, y guardar.

Excel

Lectura de archivo

Inicialmente se debe leer los datos en excel, lo cual únicamente requiere la opción abrir de excel y se selecciona el archivo nombre archivo exportado de Qgis.csv. Al abrir este archivo puede ocurrir que los datos se encuentren todos en una misma columna en tal caso solo se debe ir a datos>texto en columnas, Especifique el separador de los datos (puede ser coma, punto coma, etc...) y aceptar.

Activar opción análisis de datos

Dar clic derecho al final de la cinta y selecciona personalizar banda, Figura 86.

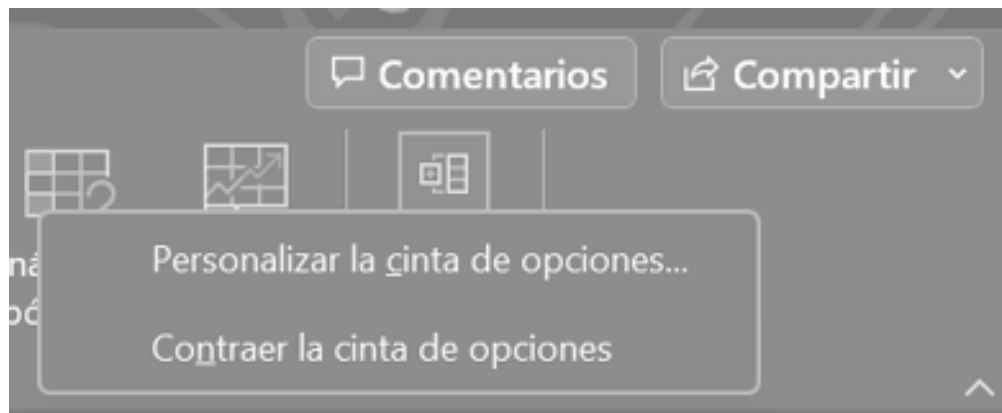
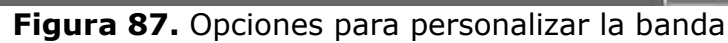


Figura 86. Personalizar la cinta de opciones

Al costado izquierdo seleccionar complementos y seleccionar el paquete de análisis el cual no se encuentra instalado, Figura 87.



Al lado de administrar dar clic en ir (verificar que se especifique complementos excel), aparecerá el siguiente menú en donde selecciona Herramienta para análisis y se da aceptar, Figura 88.

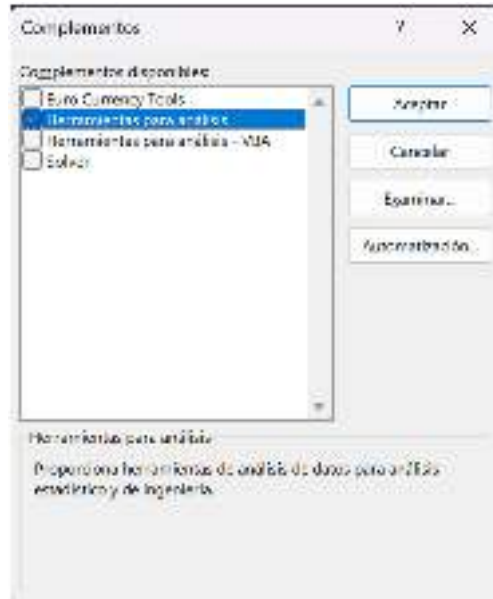


Figura 88. Activación de herramientas para análisis

Verifique que al costado derecho aparezca la variable Análisis de datos, Figura 89.



Figura 89 Vista de análisis de datos.

Normalización

Para la normalización es necesario calcular los máximos y mínimos de cada variable para esto use las funciones `min()`, `max()`. En el caso de las variables que se están trabajando se ubicaron estos dos resultados por variable en la siguiente tabla, en este caso el número de capas o variables es de 5.

Tabla 3. Valores máximos y mínimos por variable

2997	4.49704933	0.00782225	1.4026829	2.54897738	2.99686289
2998	3.74966717	0.11495277	2.26337075	1	4.68636703
2999	3.1699717	0.10599842	2.27933645	1.15865564	5
MIN	1	0	0.04365115	1	1
MAX	5	0.36480069	4.06110525	4.95078754	5

Con estos valores se puede normalizar cada una de las variables (recuerde las fórmulas detalladas en la guía). Entonces se parte de variables asociadas a la escala de medida de cada una de ellas y se aplica la fórmula de normalización dejando fijos los valores máximos y mínimos para cada variable, y se obtiene valores contenidos entre 0-1.

Tabla 4. Valores normalizados se detalla la formula considerada

H	I	J	K	L
SAMPLE_1	SAMPLE_2	SAMPLE_3	SAMPLE_4	SAMPLE_5
$=(B\$3003-B2)/(B\$3003-B\$3002)$			1	0.35840154
0.10293412	0.84775822	0.53593747	0.70115506	0.44256389

Matriz de correlación y medidas de dispersión

Para estimar la correlación en Datos>Análisis de datos > Coeficiente de correlación, Figura 90.

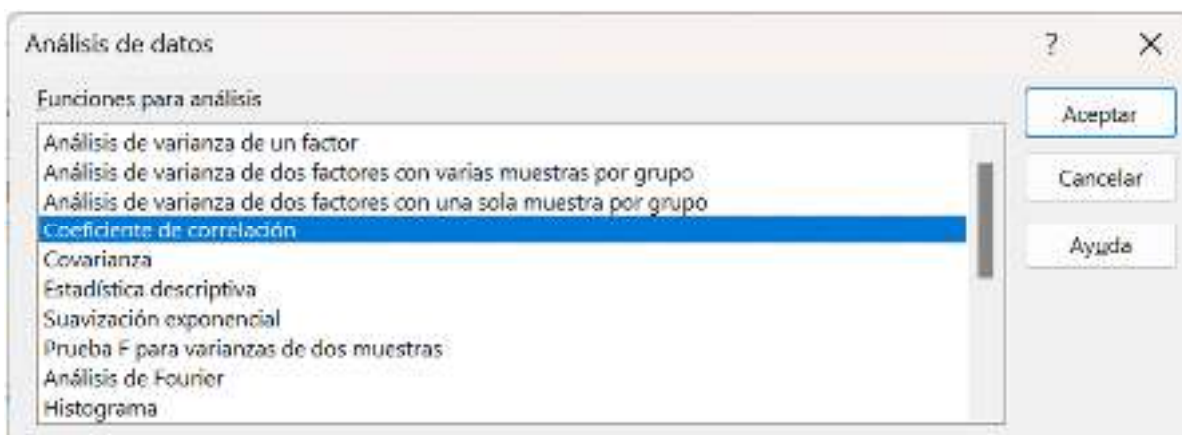


Figura 90. Herramientas de análisis de datos

Seleccione el rango de columnas de entrada de los datos, y el rango de salida de los datos (tienen que ser de iguales dimensiones) o permita que la salida se genere en una hoja nueva, Figura 91.

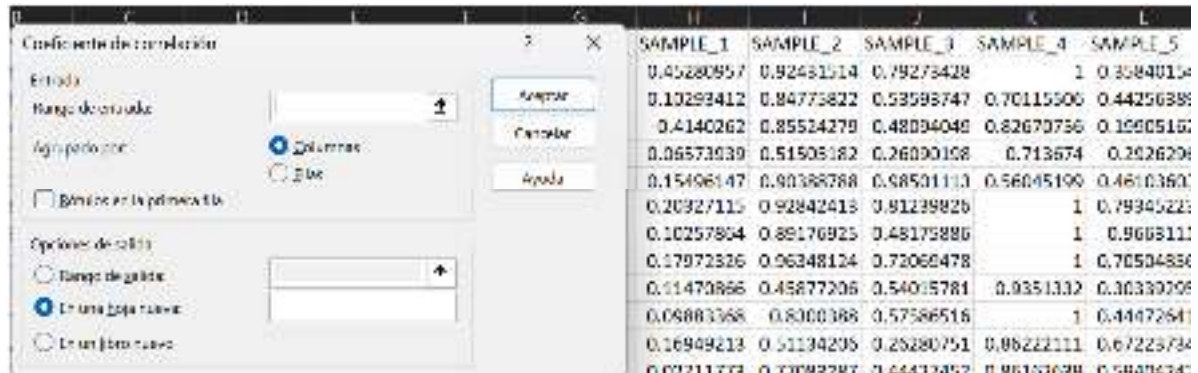


Figura 91. Menú de la herramienta coeficiente de correlación

El resultado obtenido para este caso es el siguiente se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Matriz de correlación para 5 variables de entrada

	SAMPLE_1	SAMPLE_2	SAMPLE_3	SAMPLE_4	SAMPLE_5
SAMPLE_1	1				
SAMPLE_2	-0.0446627	1			
SAMPLE_3	-0.0429019	0.64874913	1		
SAMPLE_4	-0.018057	-0.0045081	0.0510165	1	
SAMPLE_5	0.02491337	0.04064247	0.02153127	-0.086249	1

De igual forma por variable se debe calcular la varianza de los datos, lo que se hace con la función **desv.p** para cada una de las variables normalizadas, la desviación se debe ubicar igual que el caso del valor máximo y mínimo de cada variable.

Cantidad de información y pesos de ponderación

En esta sección basta seguir la guía en cuanto a la forma de cálculo presentada en la guía.

La suma sobre una matriz cuadrada que aplica en las matrices para estimar los pesos implícitamente se refiere a realizar en una fila o columna de la matriz de

correlación, en este caso como no se han colocado los valores de la matriz sobre la diagonal (sería llenarla con los valores traspuestos). Por ejemplo, en la siguiente figura en color azul se muestra los valores sumados en la matriz de correlación para estimar la cantidad de información o valor que se encuentra dentro de la suma.

Tabla 6. Cálculo de pesos de ponderación

	A	B	C	D	E	F
1		Coefficiente de Correlación				
2		V1	V2	V3	V4	V5
3	V1	1	-0.0446627	-0.0429019	-0.018057	0.02491337
4	V2	-0.0446627	1	0.64874913	-0.0045081	0.04064247
5	V3	-0.0429019	0.64874913	1	0.0510165	0.02153127
6	V4	-0.018057	-0.0045081	0.0510165	1	-0.086249
7	V5	0.02491337	0.04064247	0.02153127	-0.086249	1
8						
9						
10		v1	v2	v3	v4	v5
11	D. Estándar	0.19934939	0.18587971	0.18753287	0.19229297	0.2727799
12	CI	0.18326025	0.31318565	0.20113797	0.1757079	0.2727799
13	pesos	0.15990296	0.27326882	0.17550208	0.15331319	0.23801295
14						

En la figura anterior CI para V1 corresponde a la suma de la columna resaltada en verde (suma B3:B7) por la desviación estándar (B11). El peso de V1 se obtiene de dividir CI (B12) en la suma total de CI (suma(B12:F12)).

9. PRODUCTOS SIG ESPERADOS

1. Carpeta GDB - GeoDataBase personal, con feature class tipo vector y raster necesarios para el desarrollo de la guía, los productos raster alcanzados y los feature class utilizados como línea base para la representación espacial.
2. Carpeta MXD, con la representación visual en el software ArcGis 10.x de la información geográfica del estudio y la zona de recarga estimada (DZR).
3. Carpeta de imágenes y/o mapas finales, con la exportación de los JPG o PDF de cada uno de los parámetros y el resultado final de la *"Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos"*, lo que permite una visualización más accesible a cualquier usuario interesado.

10. RECOMENDACIONES

- Consultar y utilizar la información geográfica generada por las diferentes entidades como lo es el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, SIAC - IDEAM, Servicio Geológico Colombiano - SGC, la cual puede ser analizada y descargada de forma gratuita a diferentes escalas desde cada página web institucional.
- Manejar la misma escala de trabajo en todos los datos o archivos utilizados en la implementación de la *“Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos”*, para que los resultados alcanzados tengan consistencia y coherencia en su interpretación.
- Utilizar el mismo sistema de referencia para editar, digitalizar, relacionar, estructurar y procesar la información espacial en cada uno de los proyectos de interés, dando así consistencia y coherencia en los resultados generados, utilizando la *“Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos”*.
- Mantener los resultados de cada variable en la misma resolución o tamaño de celda, para que los productos finales generados sean acordes a lo esperado.
- Consultar páginas que permiten descargar información espacial de Modelos Digitales de Elevación (DEM) con mejor resolución (12,5x12,5), como por ejemplo <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>

11. BIBLIOGRAFÍA

- Documento CONPES 3585. Consolidación de la política nacional de información geográfica y la infraestructura colombiana de datos espaciales – ICDE. Bogotá, Colombia, 16 de febrero de 2009.
- Resolución 068. Diario Oficial de la República de Colombia 45812, Bogotá, Colombia, 28 de enero de 2005.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2017). Listado de Servicios Web Geográficos IGAC. Bogotá, Colombia.: IGAC. Recuperado de <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/MapasdeColombia/Descargas>
- Olaya-Ferrero, (2004). Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno —Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico.—. licencia Creative Common Attribution Share-alike
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Catálogo de Mapas. Bogotá, Colombia.: Sistema de información Ambiental de Colombia – SIAC. Recuperado de <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Glosarios de términos especializados. Sistemas de Información Geográfica - Fecha de creación: 2013-08-07 - Fecha de modificación: 2016-01-16. Recuperado de <https://glosarios.servidor-alicante.com/sistemas-informacion-geografica>
- Hellen Adriana Gutiérrez García. Agosto 12, 2011. Sistemas de Información Geográfica. Argentina. Recuperado de <https://sites.google.com/site/sigarcgis/>
- ESRI. Junio 2017. ArcGIS Desktop. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>