

**Plan de identificación de movimientos en masa producto de las altas precipitaciones
en el municipio de salento quindío**



Felipe Andres Davila Correa

Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada

Diplomado en gestión ambiental

Sindy Rocio Prieto Mendoza

2022

Resumen

Sin duda alguna la responsabilidad civil que existe cuando se tienen herramientas y/o conocimiento que puedan contribuir al bien común, debería ser obligatoria. Por lo tanto, el enfoque que pretende dar a este ensayo investigativo, es el de detectar zonas de alta vulnerabilidad por medio de imágenes satelitales, combinando los diferentes campos involucrados como son: ambientales, geográficos, hidrológicos, topográficos y distribución territorial, representando en un plano los puntos críticos que se consideren importantes a evaluar, con la premisa de una posible eventualidad de índole natural generada por las altas lluvias. Sin duda alguna la pretensión de este documento radica en que la población Quindiana y en general, es merecedora de controles o de vigilancia del comportamiento de su territorio, donde la población ubicada en el municipio de Salento Quindío en esta oportunidad sea estudiada.

Palabras claves: SIG, cartografía base, cuenca hidrográfica, precipitaciones, modelo digital de elevaciones (DEM), isoyetas.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Planteamiento del Problema	13
2. Justificación	14
3. Objetivos	16
3.1. Objetivo general	16
3.2. Objetivos específicos	16
4. Marco de referencial	17
4.1. Desastres naturales	17
4.2. Cuenca hidrográfica	17
4.3. La precipitación como responsable de amenazas naturales.....	18
4.4. ¿Que son los sistemas.....	18
4.5. Integración de herramientas SIG con modelos hidrológicos e hidráulicos para la generación de mapas de áreas susceptibles de inundación	19
4.6. Clasificación de movimientos.....	19
4.7. Estudio de vulnerabilidad ante.....	20
4.8. Documento metodológico	20
4.9. Predicción de la susceptibilidad	21
4.10. Guía metodológica para.....	21
5. Diseño metodológico	22
5.1. Gestión de información base	23
5.1.1. Área de estudio	23
5.1.2. Modelo digital de elevación (DEM)	24
5.1.3. Precipitación media Mensual.....	24
5.2. Carpeta raíz, almacenamiento de la información	24
5.3. Cuenca hidrográfica de Salento.....	25

5.4.	Conexión con carpeta de trabajo	25
5.4.1.	Delimitación de la zona de estudio.....	26
5.4.2.	Delimitación de la zona de estudio.....	26
5.4.3.	Configuración sistema de referencia espacial.....	27
5.4.4.	Rellenar campos de Raster.....	29
5.4.5.	Calculo de la dirección de flujo.....	30
5.4.6.	Identificación de imperfecciones sobre el modelo de dirección de Flujo.	31
5.4.7.	Cálculo de la acumulación de flujo	31
5.4.8.	Clasificación de las corrientes de flujo.....	32
5.4.9.	Realizar un filtrado al raster de clasificación de Arroyos.....	33
5.4.10.	Crear la red hidrográfica de la cuenca	34
5.4.11.	Punto de Cierre.....	35
5.4.12.	Delimitacion de la cuenca hidrografica.....	36
5.5.	Parametros morfometricos de la cuenca de salento Quindio	38
5.5.1.	Area de la cuenca	38
5.5.2.	Perimetro de cuenca.....	38
5.5.3.	Longitud del rio principal	38
5.5.4.	Coeficiente de Compacidad	39
5.5.5.	Densidad de drenaje	40
5.5.6.	Curva hipsometrica.....	40
5.5.7.	Red hidrográfica de Salento Quindío.....	41
5.6.	Procedimiento paso a paso para realizar un modelo de pendientes y reclasificarlo a datos cualitativos	42
5.6.1.	Delimitar el área de estudio	43
5.6.2.	Crear modelo de pendientes.....	44
5.6.3.	Reclasificación modelo de pendientes	45

5.7.	Modelo de Isoyetas de Precipitacion.....	50
5.7.1.	Archivo de Puntos.....	50
5.7.2.	Obtencion Modelo de Isoyetas mediante el metodo IDW	51
5.8.	Obtencion Modelo de pendientes Reclasificado.....	54
5.9.	Modelo de Susceptibilidad, Matriz ponderada.	56
5.9.1.	Proyectar modelos raster a datos vectoriales de tipo poligono	57
5.9.2.	Union espacial Modelo de Pendientes y Precipitacion.....	58
5.9.3.	Agregar atributos cualitativos al modelo de susceptibilidad	60
5.10.	Geoproceso Dissolver capa.....	63
5.11.	Validacion del modelo de susceptibilidad de deslizamientos de masa en base al tipo de relieve y la precipitacion.....	65
6.	Resultados	67
6.1.	Cuenca hidrográfica Salento Quindío	67
6.2.	Modelo de pendientes y tipos de relieve cuenca Salento Quindío	68
6.3.	Modelo de isoyetas de precipitación método IDW	69
6.4.	Modelo de susceptibilidad de deslizamientos en masa Salento Quindío.....	70
7.	Impacto.....	71
8.	Conclusiones.....	73
9.	Referencias Bibliográficas	75

Lista de imágenes

Imagen 1. Movimiento en masa Dosquebradas Risaralda	11
Imagen 2. Distribución porcentual de daños ocasionados por movimientos en masa en Colombia desde 1998 a 2007.....	14
Imagen 3. Estructura de una cuenca hidrográfica	18
Imagen 4. Variables utilizadas en la generación de modelo de susceptibilidad de movimientos en masa por precipitaciones.....	22
Imagen 5. Descarga de información en plataforma.....	23
Imagen 6. Descarga de mapa de división política-administrativa.....	23
Imagen 7. Descarga del Marco Geoestadístico Nacional (MGN).....	24
Imagen 8. Descarga de registros de precipitaciones en el departamento del Quindío	24
Imagen 9. Crear conexión a la carpeta de los insumos	25
Imagen 10. Modelo digital de elevación (DEM), Raster Departamento del Quindío	26
Imagen 11. Configuración del clip	27
Imagen 12. Delimitación de área departamental del Quindío (dem1.tif)	27
Imagen 13. Configuración del sistema de referencia	28
Imagen 14. Configuración del sistema de referencia para archivos vectoriales	28
Imagen 15. Delimitación del municipio de Salento	29
Imagen 16. Configuración para relleno de vacíos en la imagen raster.....	29
Imagen 17. Configuración de dirección de flujo.....	30
Imagen 18. Dirección de flujo.....	30
Imagen 19. Configuración de correcciones de errores en imagen raster	31
Imagen 20. Configuración para el cálculo de dirección del flujo	31
Imagen 21. Identificación de acumulación de flujo en raster	32
Imagen 22. Configuración para la clasificación de corrientes de flujo	32
Imagen 23. Corrientes de flujo	33
Imagen 24. Configuración para la clasificación de arroyos.....	33
Imagen 25. Clasificación de arroyos	34
Imagen 26. Configuración para la creación de red hidrográfica de la cuenca	34
Imagen 27. Red hidrográfica de la cuenca.....	35
Imagen 28. Configuración para la creación de punto de cierre.....	35

Imagen 29. Área de estudio de la cuenca.....	36
Imagen 30. Configuración para la delimitación de la cuenca hidrográfica paso 1	37
Imagen 31. Configuración para la delimitación de la cuenca hidrográfica paso 2	37
Imagen 32. Cuenca hidrográfica del municipio de Salento Quindío.....	37
Imagen 33. Esquema rio Quindío	38
Imagen 34. Curva hipsométrica	41
Imagen 35. Configuración para clip de red hidrográfica del municipio	41
Imagen 36. Clip de red hidrográfica municipio de Salento	42
Imagen 37. Superposición de capas.....	42
Imagen 38. Configuración de delimitación del área.....	43
Imagen 39. Delimitación del área.....	43
Imagen 40. Configuración del Modelo Digital de Elevación	44
Imagen 41. Modelo Digital de Elevación Salento.....	44
Imagen 42. Configuración para generar modelo de pendientes	45
Imagen 43. Modelo de pendientes Salento Quindío.....	45
Imagen 44. Parámetros base de modelación	46
Imagen 45. Reclasificación modelo de pendientes.....	46
Imagen 46. Modelo de pendientes reclasificado a datos vectoriales.....	47
Imagen 47. Tabla de atributos con datos de archivos multipoligonos	47
Imagen 48. Configuración de geo proceso	48
Imagen 49. Terreno reclasificado	48
Imagen 50. Configuración del paso	49
Imagen 51. Asignación del tipo de relieve.....	49
Imagen 52. Reclasificación dependiendo el tipo de relieve	50
Imagen 53. Insertar datos crudos de precipitación	50
Imagen 54. Sistema de referencia para información coordenadas insertadas	51
Imagen 55. Información georeferenciada	51
Imagen 56. Configuración para interpolación IDW	52
Imagen 57. Isoyetas modeladas.....	52
Imagen 58. Delimitación de municipio de Salento en Isoyetas	53
Imagen 59. Configuración de parámetros.....	54

Imagen 60. Clasificación de precipitación en el municipio de Salento	54
Imagen 61. DEM de pendientes reclasificadas	55
Imagen 62. Nueva reclasificación de pendientes	56
Imagen 63. Configuración de formato vectorial para precipitación	57
Imagen 64. Formato vectorial para precipitación.....	57
Imagen 65. Formato vectorial para modelo de pendientes	58
Imagen 66. Configuración para la unión de modelos	58
Imagen 67. Unión de modelo de precipitación y de pendientes.....	59
Imagen 68. Modelo raster de la cuenca a modelo vectorial.....	59
Imagen 69. Configuración para geo proceso de modelo de susceptibilidad	60
Imagen 70. Geoproceso de modelo de susceptibilidad.....	60
Imagen 71. Configuración de atributos al modelo de susceptibilidad.....	61
Imagen 72. Configuración de condicionales al modelo de susceptibilidad	61
Imagen 73. Atributos de polígonos del modelo	62
Imagen 74. Calculadora de campos.....	62
Imagen 75. Tabla de atributos clasificada.....	63
Imagen 76. Configuración de formato vectorial de tipo polígono	63
Imagen 77. Modelo de susceptibilidad	64
Imagen 78. Modelo de susceptibilidad por categoría de colores	64
Imagen 79. Movimientos en masa ocurridos en Salento	65
Imagen 80. Configuración de confrontación de modelos	65
Imagen 81. Nivel de susceptibilidad por punto de registro histórico de movimiento en masa.....	66
Imagen 82. Modelo de susceptibilidad en puntos de registro histórico de movimiento en masa.....	66

Lista de tablas

Tabla 1. Daños ocasionados por los movimientos en masa en Colombia, periodo 1998 a 2007.....	14
Tabla 2. Factor de forma.....	39
Tabla 3. Curva hipsométrica esquema.....	40
Tabla 4. Clasificación de la pendiente.....	45
Tabla 5. Tabla de valores máximos de precipitación en función de movimientos en masa	53
Tabla 6. Clasificación de topografía por grupo.....	55
Tabla 7. Matriz de susceptibilidad	56

Introducción

¿Qué harías a nivel técnico y de responsabilidad social si pudieras predecir una eventualidad catastrófica de índole natural?; De seguro esta es una pregunta llena de expectativa, ya que la intención de avisar, alertar, prever y sentir que se puede actuar por algo o alguien, es muy importante y es una labor altruista que incluso puede salvar vidas.

Cabe definir que, el Quindío está identificado en la categoría de los departamentos más pequeños de Colombia con un área de 1845 km², una población aproximada de 543.532 habitantes de las cuales el 87% vive en cabecera municipales y el 13% en zona rural, ubicado geográficamente en el Centro Occidente del país, distinguiendo dos tipos de relieve, en donde el primero es montañoso ubicado en el oriente, el cual corresponde al flanco occidental de la Cordillera Central demarcando una topografía con pendientes abruptas, esta zona enmarca lluvias en días de 150 a 200 mm promedio anual y el segundo con relieve ondulado en el Occidente, el cual corresponde al área cubierta con flujos volcánicos transportados por ríos, con una topografía suave de colinas bajas y registra lluvias en días de 150 a 100 mm promedio anual. (Gobernación del Quindío, 2020)

La mayor parte del departamento del Quindío presenta volúmenes anuales promedio de precipitación en el rango de 1500 a 2500 mm (IDEAM, 2015). Los índices que representan las más altas precipitaciones se identifican colindantes al departamento de Risaralda, para los municipios de Filandia con un área de 106.516 km² y una población aproximada de 13700 habitantes; y Salento con un área de 346.931 km² y una población aproximada de 7247 habitantes. En otros sectores del departamento como lo son Calarcá y Armenia, las precipitaciones son menores reduciéndose hasta los 2000 mm anuales promedio, y para los demás municipios del territorio cafetero, se identifican lluvias moderadas anuales de 1500 a 2000 mm anuales promedio. Colindante al departamento de Tolima se identifican precipitaciones anuales en promedio levemente inferiores. (IDEAM, 2015)

Para este caso identificaremos que, mediante la implementación de bases de datos informáticos, geográficos, hidrológicos, estadísticos, se pueden elaborar predicciones o modelaciones de posibles movimientos en masa a causa de las altas precipitaciones en el área de estudio del municipio de Salento en el departamento del Quindío.

Es de relevancia mencionar que las poblaciones más vulnerables de la zona, en pocas oportunidades se encuentran catastralmente bien ubicados, ya que, por razones de distinta índole, ha obligado a numerosas familias a asentarse en sitios que se denominan potencialmente inestables, adicional a esto, la urbanización sin planificación produce eventualidades que afectan la integridad de los pobladores, sus bienes e infraestructura. Dicho lo anterior, una de las medidas pertinentes para reducir los efectos negativos como, pérdidas de vidas, bienes, entre otros ocasionados por estos fenómenos de carácter natural, demanda identificar las características de estos y establecer las zonas o sectores en las cuales podría producirse una eventualidad, es decir, precisar la distribución de la amenaza en una región dada.

Recopilando lo mencionado en párrafos anteriores, da lugar para cuestionarse sobre situaciones reales tales como, ¿Se hubiera podido mitigar o alertar a la comunidad en Dosquebradas Risaralda de la tragedia del pasado 8 de febrero del 2022? Ésta catástrofe que se enmarca en el ámbito de los desastres naturales más grandes del departamento de Risaralda hasta el 2022, fue causada por el deslizamiento de un talud de gran magnitud provocado por las fuertes lluvias en el sector, represando el río Otún haciendo que se desbordara y destruyera viviendas aledañas y se tuvieran pérdidas de al menos 16 vidas. ¿Cómo evaluar estos movimientos en masa asociados a las altas precipitaciones?, ¿existe alguna metodología de identificación de desastres asociados a lluvias y/o a condiciones naturales del suelo como las pendientes agresivas?



Imagen 1. Movimiento en masa Dosquebradas Risaralda

Fuente. *Editorial La Republica, 2022.*

Los anteriores cuestionamientos, llevan a establecer la pertinencia del objeto de la realización de este documento, el cual se basa en la problemática de detección de riesgos de alta

magnitud como lo son los movimientos de tierra sin control de taludes, por ello, se determina una forma en la que estos eventos naturales pudieran pasar, no sean desapercibidas y se dé una alerta previa, para que las áreas encargadas gubernamentales tomen las medidas de aseguramiento pertinentes.

Esto se logra, utilizando una de las alternativas más diligentes o rápidas de detección de movimientos en masa basados en sistemas de información geográfica (SIG), con datos de bases históricas de precipitaciones registrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), entre otros apoyos de información.

1. Planteamiento del Problema

En los últimos años las altas precipitaciones y la vulnerabilidad frente a movimientos en masa en el municipio de Salento han ocasionado desastres de índole natural, teniendo como precedente lo sucedido el pasado 1 de marzo del 2022 en donde una pareja de turistas muere mientras residía en una cabaña de la vereda Cócora y las fuertes lluvias del sector saturaron el suelo y un alud de tierra arrasó con la vivienda (Publicaciones Semana, 2022); el 27 de Diciembre del 2021 las vías del municipio de Salento son declaradas en alerta roja por los constantes deslizamientos de tierra identificando por lo menos 50 puntos críticos, los cuales afectaron la movilidad de la población residente y la extracción de productos derivados del campo y la ganadería del sector (Caracol radio, 2021), otro caso puntual se origina el 15 de Junio del 2021, en donde los taludes nuevamente son partícipes en la obstaculización del paso de vías veredales en el municipio, restringiendo el paso de ciclistas, turistas transeúntes y habitantes locales por el alto riesgo de deslizamiento (La Crónica del Quindío, 2021); en este sentido, se evidencia por muchos más antecedentes que existe una falencia en la gestión o prevención gubernamental o municipal, cuando sucesos desafortunados asociados a la naturaleza nos deja como resultado pérdidas materiales, pérdidas de infraestructura y lo más importante pérdida de vidas. Es por ello, que el presente documento estructura procedimentalmente factores inherentes en el suelo, plantea una revisión de las bases de datos históricos y cartografías, sobre una eventualidad natural a raíz de las altas precipitaciones en el municipio de Salento Quindío, que mediante una metodología de detección computacional optimice el tiempo, los recursos y se elaboren alertas de identificación temprana del riesgo, con la pretensión que las entidades municipales evalúen la pertinencia de un plan de contingencia en la población implicada.

2. Justificación

Geográficamente hablando, Colombia es un país el cual se encuentra en una zona intertropical, contando con la cordillera de los andes que lo atraviesa longitudinalmente. Por su posición en la esquina noroccidental de Sur América, lo hace un país que tiene costas en ambos océanos como lo son el atlántico y el pacífico, esto quiere decir que cuenta con gran riqueza climatológica, ambiental, bio – diversa, y con un gran desafío demográfico. Según el banco mundial (2012) los movimientos en masa en el país son el segundo causante de más pérdidas de vidas hablando de un lapso de tiempo entre 1970 y 2011, después de las erupciones volcánicas (UNGRD, 2020). Por su naturaleza los movimientos en masa en el territorio, específicamente en la región andina, han generado afectaciones económicas, ambientales, de infraestructura muy marcadas, porcentualmente se categorizan dichas afectaciones de movimiento en masa en un intervalo de tiempo de 9 años desde 1998 hasta 2007, como se evidencia a continuación:

Tabla 1. Daños ocasionados por los movimientos en masa en Colombia, periodo 1998 a 2007

Tipo evento	N°. eventos	N°. dptos. afectados	N°. muertos	Heridos	Viviendas destruidas	Viviendas averiadas	Vías afectadas
Movimientos en masa	647	24	647	745	4094	13958	779

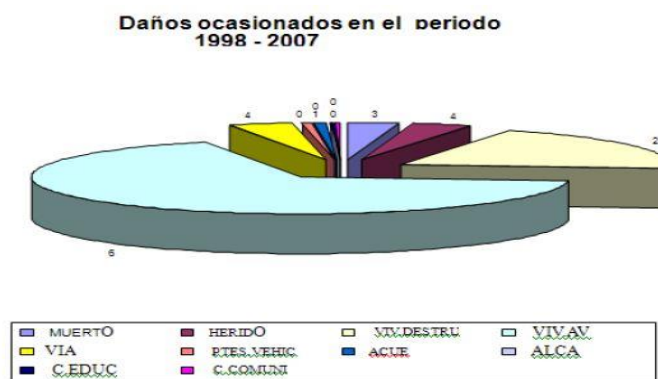


Imagen 2. Distribución porcentual de daños ocasionados por movimientos en masa en Colombia desde 1998 a 2007

Fuente. Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres, DGPAD,
- IDEAM 2008

Por ello la zona del país que más se ve afectada por los movimientos en masa es la región anteriormente mencionada en la cual se ubica más del 70% de la población colombiana (UNGRD, 2020).

Localizado en la región Oeste – Central del país encontramos al Quindío, que es uno de los 32 departamentos de Colombia, con colindancias como el norte de Risaralda, sur y este con Tolima y Caldas respectivamente, y al Oeste con el Valle del Cauca, haciéndolo participe de estudio por la incidencia en la zona descrita, en especial Salento, siendo uno de los municipios que por sus niveles de precipitación anual elevados comparados con los demás municipios del departamento, lo hacen aún más propenso a fenómenos de movimiento en masa.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Identificar mediante la implementación de los Sistemas de Información geográfica (SIG), las zonas del municipio de Salento que geológicamente representen un riesgo de movimiento en masa a causa de las altas precipitaciones, con la finalidad de elaborar una detección del riesgo potencialmente alto, a través de la revisión de los históricos de lluvias consultados por fuentes secundarias, cartografías geográficas, hidrológicas, hidrográficas y SIG del QUINDIO.

3.2.Objetivos específicos

- Obtener la imagen satelital “Raster”, cartografía base del departamento del Quindío delimitando el municipio de Salento, mediante el uso del software ArcGIS.
- Generar modelo digital de elevaciones (DEM) para las pendientes críticas del territorio de estudio en la imagen raster, otro para la cuenca hidrográfica de Salento y otro para las precipitaciones, a partir de bases de datos históricas de lluvias obtenidos del (IDEAM).
- Elaborar plano para el modelo de la cuenca hidrográfica, para el modelo de pendientes y tipos de relieve de la cuenca, para el modelo de isoyetas de precipitación mediante el método distancia inversa ponderada (IDW) y para el modelo de susceptibilidad de movimientos en masa, determinando por colores el grado de importancia, todo esto en el municipio de Salento Quindío.

4. Marco de referencial

4.1.Desastres naturales

Un desastre es catalogado como tal, cuando ocurre un suceso repentino o imprevisto, que genera un impacto social negativo, monetario, de infraestructura y sufrimiento humano. Es tan grande su afectación que supera la capacidad local y requiere apoyo nacional y en algunos casos internacional. Los desastres pueden surgir por fenómenos de la naturaleza como también por factores antrópicos asociados regularmente con la tecnología. Se contempla una clasificación de fenómenos extremos dependiendo de su origen, en donde encontramos el geofísico, meteorológico, hidrológico, climatológico y biológico, el cual, para el caso se implementa el hidrológico, ya que está asociada a la ocurrencia, el movimiento y la distribución de agua dulce a nivel superficial y subsuperficial, ocasionando inundaciones, deslizamiento de tierras. (Bello et al., 2020).

4.2.Cuenca hidrográfica

Es definido como el territorio en donde las aguas fluyen a un mismo lago, río o mar, una cuenca hidrográfica es una porción de superficie en la cual las lluvias que caen sobre esta son drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida, los límites de una cuenca básicamente se describen como divisorias de agua que sería la línea punteada en las crestas del terreno por donde escurre el agua hacia el cauce principal, como se observa en la imagen 3. (García, 2012).

Según García (2012):

“En términos simples, una cuenca hidrográfica es la superficie de terreno definida por el patrón de escurrimiento del agua, es decir, es el área de un territorio que desagua en una quebrada, en un río, en un lago, en un pantano, en el mar o en un acuífero subterráneo. En un valle, toda el agua proveniente de lluvias y riego, que corre por la superficie del suelo (lo que se denomina agua de escurrimiento) desemboca en corrientes fluviales, quebradas y ríos, que fluyen directamente al mar. Tal como lo describe Maas (2005), una cuenca es una especie de embudo natural, cuyos bordes son los vértices de las montañas y la boca es la salida del río o arroyo. Puede ser tan pequeña como la palma de la mano, o tan grande como un continente completo.”, (García, 2012).



Imagen 3. Estructura de una cuenca hidrográfica

Fuente. García, 2012

4.3. La precipitación como responsable de amenazas naturales

La precipitación es definida como la caída de hidrometeoro o agua que viene de la atmosfera en lluvia, granizo, nieve o en otras formas y llega a la superficie terrestre. Esta ocurre cuando el vapor de agua se condensa en el aire y cae en estado líquido o solido a la tierra.

Pero ¿cómo ocurren las precipitaciones?, el encargado de este fenómeno es llamado ciclo hidrológico, el cual es un proceso de circulación continuo del agua a través de lagos, ríos, mares, entre otros, cambiando su estado físico constantemente, el cual da origen a las lluvias de condensación. (Zapata, 2020).

El problema recae cuando hay presencia en exceso de lluvias en cualquier territorio, conocido como fenómeno de la “niña”, ya que sumado a las alteraciones del suelo producidas por el ser humano tales como la degradación ambiental (talas indiscriminadas), el mal manejo de las basuras, el desplazamiento de población de las zonas rurales a las urbanas sin control, el cambio indiscriminado de los usos del suelo, promueven la probabilidad de ocurrencia de eventualidades naturales, dentro de las que se encuentran las inundaciones producto del desbordamiento de afluentes, los deslizamientos de tierra, asentamientos, entre otros. (Zapata, 2020).

4.4. ¿Que son los sistemas de información geográfica o SIG?

Es una herramienta que permite integrar información alfanumérica y espacial y que tiene la finalidad recopilar, administrar, organizar, compartir y distribuir información geográfica pertinente.

“Los mapas representan colecciones lógicas de información geográfica como capas de mapa. Constituyen una metáfora eficaz para modelar y organizar la información geográfica en forma de capas temáticas. Así mismo, los mapas SIG interactivos ofrecen la interfaz de usuario principal con la que se utiliza la información geográfica.”(ArcGis, 2022)

La optimización de los procesos es definitiva a la hora de resolver problemas o necesidades de gran escala, que, realizándose de manera manual sería muy dispendioso. El enfoque de los sistemas de información geográfica, está dado por intervenir a la planificación y administración al manejo de la información espacial y responder de forma más precisa a los objetivos de enfoque. (ArcGis, 2022)

4.5.Integración de herramientas SIG con modelos hidrológicos e hidráulicos para la generación de mapas de áreas susceptibles de inundación

Esta tesis define por medio de la implementación de los SIG una zona de vulnerabilidad de inundación, la cual, está basada en el análisis de precipitación que incluye un modelo hidrológico e hidráulico, en la cuenca del río Acacias en el Meta. Este documento es base para la incorporación del concepto de identificación de una cuenca hidrográfica para el presente documento; Aunque el enfoque es la identificación de vulnerabilidad de deslizamientos en masa por precipitaciones y esta tesis refiere a la vulnerabilidad por inundaciones, ambos intereses dependen de igual forma del comportamiento, la delimitación, la importancia de cada flujo de agua en la composición de un flujo principal hidrológico del sector de estudio. (Calderón & Montoya, 2016)

4.6.Clasificación de movimientos en masa en terrenos geológicos de Colombia

La definición específica de la clasificación de movimientos en masa tiene variaciones según los autores, países de origen, escuelas o perfil profesional de quienes abordan la temática como lo son Sharpe (1938), Varnes (1958 y 1978), Hutchinson (1988), Cruden y Varnes (1996) y Hungr et al. (2001), pero en una vista conjunta se adopta como criterios de clasificación los mecanismos de falla de los movimientos, la actividad, suelos identificados y velocidad; desde otras perspectivas consideran pertinente mencionar factores como la edad, formas del relieve, ubicación geográfica, clima y la afectación de laderas, causes o taludes construidos por el ser humano.

En recopilación de conceptos se adquiere cinco tipos de movimientos como los de mayor recurrencia en el territorio colombiano como lo son; caídas y rodamientos, volcamientos, deslizamientos, flujos y reptación. (Montero, 2017)

4.7. Estudio de vulnerabilidad ante deslizamientos de tierra en la microcuenca Las Marías. Telica, León

Este estudio es realizado en la microcuenca Las Marías en el país de Honduras, demarcando la importancia de evaluar los riesgos asociados a los deslizamientos de tierra, mediante la metodología Heurística geomorfológica. La cual consiste en evaluar análisis espaciales de coberturas temáticas, como lo son los geológicos, antrópicos, edáficos y climáticos mediante la implementación de SIG, obteniendo como uno de los resultados finales un mapa de erosión de la microcuenca, siendo parte de una de las cinco etapas que influyen a deslizamientos en masa, categorizados desde el nivel muy bajo hasta el muy alto. De forma tal que al superponerse se obtienen dos mapas uno relacionando los factores intrínsecos que refieren a la susceptibilidad y el otro a los factores extrínsecos que refiere a lo detonante, posteriormente se superponen estos mapas mencionados dando como resultado el mapa de amenaza relativa por fenómenos de deslizamiento de tierras identificando la zona con el mayor riesgo. Finalmente se abstraer que los factores que inciden en el aumento de vulnerabilidad ante movimientos en masa son los geológicos, las pendientes del terreno, la erosividad y la incidencia antrópica reflejada en los usos del suelo. (Pérez & Rojas, 2005)

4.8. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500.000

Este documento para la zonificación de susceptibilidad y riesgo, hace parte de la actualización del mapa nacional colombiano de amenaza relativa de movimiento en masa, el cual, es acompañado interinstitucionalmente por INGEOMINAS Y el IDEAM, al igual que lo descrito en el numeral 4.6, este documento implementa parámetros y procesos similares para la determinación de zonas específicas con mayor vulnerabilidad a siniestros naturales de remoción en masa, tales como la metodología heurística, variables geométricas, geológicas, cobertura de tierra y geomorfológicas. (INGEOMINAS, 2010)

4.9. Predicción de la susceptibilidad a deslizamientos en una montañosa cuenca hidrográfica: La cuenca del Río Naranjo, occidente de Guatemala

Los deslizamientos provocados por lluvias son sinónimo de amenaza natural en particular donde se encuentren huracanes constantemente como lo es el caso de Guatemala, ubicada geográficamente en el cinturón de fuego del pacífico, donde, adicionalmente hay presencia de alta sismicidad, siendo aun mayor la sensibilidad de los movimientos en masa. Este documento evalúa cuantitativamente los deslizamientos de tierra, mediante la metodología estadística multivariada como la regresión logística. Identificando dos tipos de modelos uno que vincula los deslizamientos superficiales y otro los flujos de detritos. La comparación de estos modelos con la asociación de mapas de susceptibilidad, dan relevancia a 6 variables muy marcadas vinculadas a movimientos en masa como lo son las elevaciones, pendientes, orientación de la pendiente, plano de la curvatura, perfil de la curvatura y la distancia a los caminos. (Estrada, 2017)

4.10. Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000

Dentro de los alcances de precisión que tiene la modelación de amenaza por movimientos en masa existen variedad de propuestas metodológicas y herramientas para su alcance, ya que es dependiente del nivel de complejidad que se quiera alcanzar, la escala de trabajo, la disponibilidad de la información, la destreza técnica y capacidad económica.

Esta propuesta tiene un conjunto de aspectos empezando desde la destreza del evaluador en términos de calidad y gradualidad de su conocimiento, replicabilidad de la metodología y viabilidad técnica, determinando así, aspectos puntuales para el análisis de amenaza por deslizamientos, implementando sistemas de información geográfica, desde el punto de levantamiento y análisis a la escala de trabajo en procesos morfo dinámicos, geomorfología, usos del suelo, hidrología, información geológica, sísmica y cobertura del suelo. Es de resaltar que la metodología que presenta este documento no establece un sentido único para su aplicación y da lugar a variaciones según sean las necesidades y alcances a la información, por lo mencionado, la pretensión es de brindar una herramienta para la unificación de conceptos y la elaboración de estudios uniformes con la aplicación de criterios claros y homogéneos. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

5. Diseño metodológico

Para la generación de un modelo de áreas de vulnerabilidad o susceptibilidad a movimientos en masa, en este caso para el municipio de Salento Quindío, se dispone de las variables mostradas en la imagen 4 y que serán detalladas en la consecución del documento:

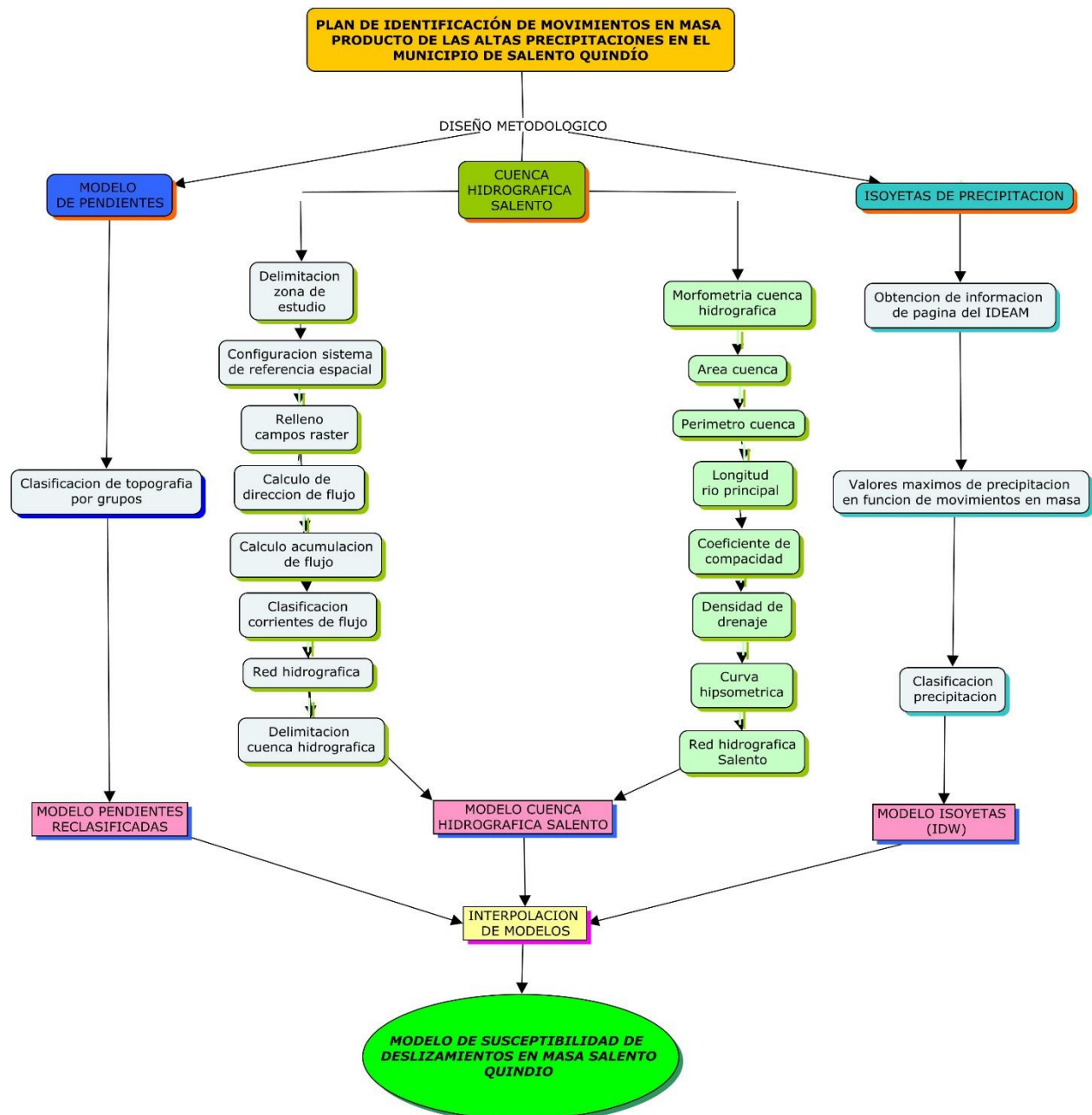


Imagen 4. Variables utilizadas en la generación de modelo de susceptibilidad de movimientos en masa por precipitaciones

Fuente. Propia

5.1. Gestión de información base

Toda la información geoespacial que se utiliza en el procedimiento, ya sean datos de tipo vectorial o ráster, fueron obtenidos de los datos abiertos al público por diferentes entidades, tales como el IGAC, DANE y el Departamento del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

5.1.1. Área de estudio

Los límites geográficos de los municipios de Salento y Circasia Quindío, se descargaron del DANE, como se indica a continuación en la imagen 5:

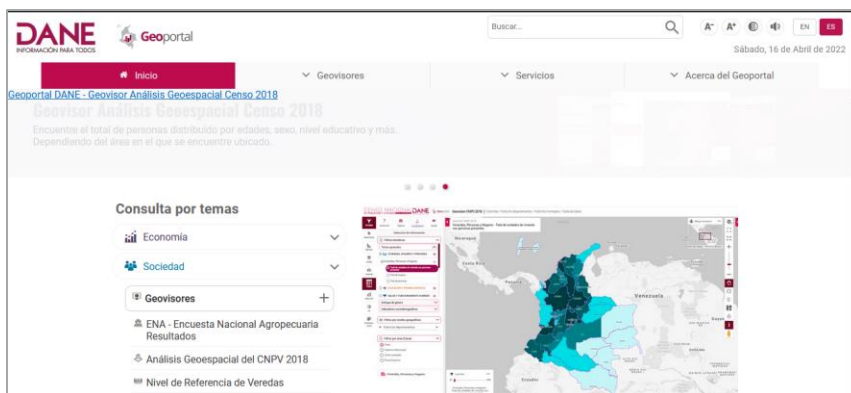


Imagen 5. Descarga de información en plataforma

Fuente. DANE, 2022

Ahora en el apartado de servicios, nos dirigimos a la opción del Marco Geoestadístico Nacional (MGN). En la ventana emergente existen diferentes mapas de Colombia en formato Shapefile de descarga libre, posteriormente descargamos el mapa de división política-administrativa a nivel municipal como se indica en la imagen 6.

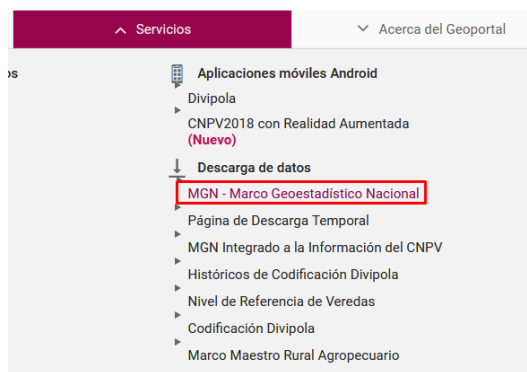


Imagen 6. Descarga de mapa de división política-administrativa

Fuente. DANE, 2022

Posteriormente descargamos nivel geográfico municipio como se indica en la imagen 3:

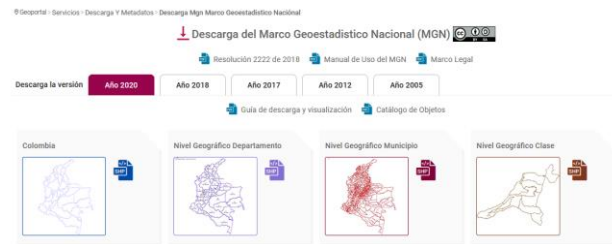


Imagen 7. Descarga del Marco Geoestadístico Nacional (MGN)

Fuente. DANE, 2022

5.1.2. Modelo digital de elevación (DEM)

Para la obtención del mapa de susceptibilidad se utilizó un Modelo Digital de Elevación con resolución o tamaño de pixel de 30 metros en la componente de horizontal ofrecido por la USGS.

5.1.3. Precipitación media Mensual

Los datos de precipitación que se utilizan para el mapa de susceptibilidad son datos abiertos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Y también se utilizaron los datos abiertos de la corporación autónoma regional del Quindío, como se identifica en la imagen 8:



Imagen 8. Descarga de registros de precipitaciones en el departamento del Quindío

Fuente. Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), 2022

5.2. Carpeta raíz, almacenamiento de la información

Para el almacenamiento, administración y procesamiento de la información recolectada se utilizó el software SIG ArcMap versión 10.8., en primera instancia creo una carpeta raíz en el

disco duro (C) la denominamos “proyecto”, para facilitar el manejo de rutas y ejecución de las diferentes herramientas del software.

Ahora se creó una carpeta “InsumosBase”, la cual contendrá las carpetas denominadas “ráster” y “shape”, y finalmente se ubicó cada uno de los insumos en la carpeta según corresponda el tipo de dato.

5.3.Cuenca hidrográfica de Salento

El proceso para obtener el mapa de susceptibilidad que determinó el relieve o las elevaciones del terreno es obtenido mediante un modelo digital de elevaciones con resolución o tamaño de pixel de 30 metros en la componente horizontal que contempla el observatorio geológico de los Estados Unidos (USGS) y el Software utilizado para el desarrollo de la identificación del problema a abordar fue el ArcGIS versión 10.8, plataforma que tiene la finalidad recopilar, administrar, organizar, compartir y distribuir información geográfica. Con el apoyo esencial de esta plataforma se procedió a ejecutar los lineamientos para identificar susceptibilidades del suelo por las altas precipitaciones con la siguiente estructura:

5.4.Conexión con carpeta de trabajo

Como punto de partida, se crea una conexión a la carpeta de los insumos, en el apartado de catálogo, damos clic sobre “Connect To Folder” y se buscó la carpeta de insumos como se muestra en la siguiente imagen:

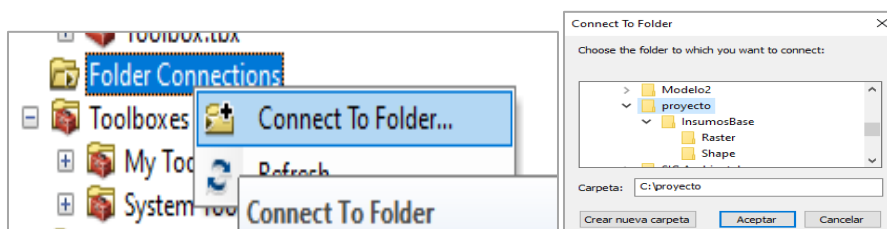


Imagen 9. Crear conexión a la carpeta de los insumos

Fuente. Propia

5.4.1. Delimitación de la zona de estudio

Posteriormente se realizó el procesamiento de información cartográfica bajo un sistema de referencia nacional como lo es MAGNA SIRGAS, que tiene ubicadas las coordenadas del departamento del Quindío en el origen Oeste, por tanto, el parámetro de entrada fue MAGNA_COLOMBIA_OESTE (ArcGis), para el modelo digital de elevaciones mostrado a continuación:

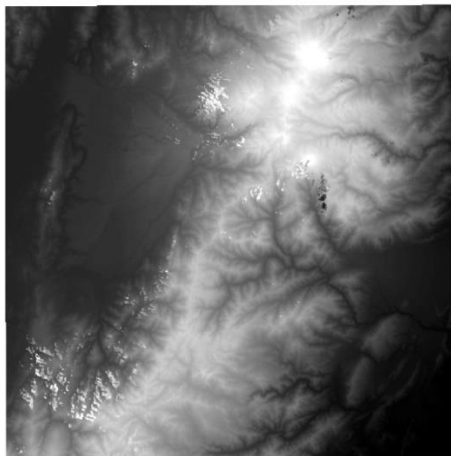


Imagen 10. Modelo digital de elevación (DEM), Raster Departamento del Quindío

Fuente. Observatorio geológico de los Estados Unidos (USGS)

5.4.2. Delimitación de la zona de estudio

Dado que la extensión en área del Modelo Digital de Elevación es muy grande, se hace necesario realizar un geo proceso de recorte (Clip) con el área del departamento del Quindío, con el objetivo de no ingresar valores ajenos a la zona de estudio para facilitar el procesamiento de la información, evitar errores, y disminuir el tiempo de ejecución de cada una de las herramientas del software ArcMap.

Por ello, se direcciona al **ArcToolBox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing, Clip**. En **input Raster** se carga el dem.tif, en **Output Extend**, se ingresa el límite departamental del Quindío, el resultado queda almacenado en la carpeta de insumos raster, como se muestra en la imagen 11.

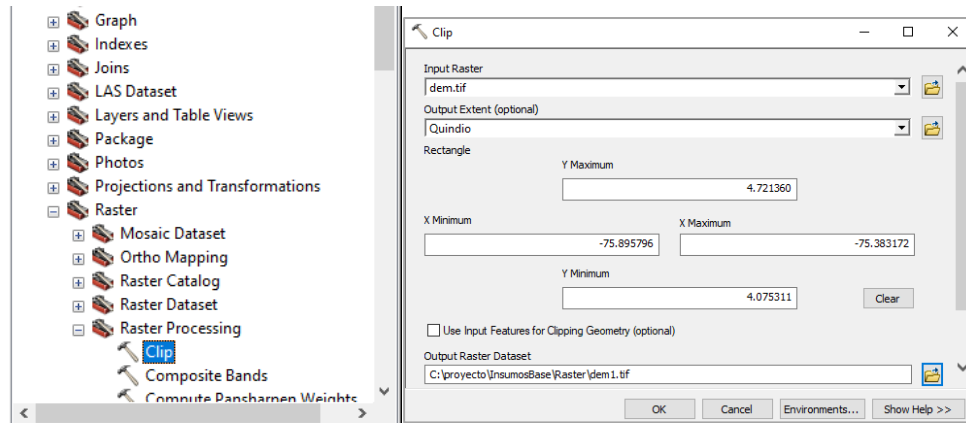


Imagen 11. Configuración del clip

Fuente. Propia

Por la configuración anteriormente descrita se obtiene lo visualizado en la imagen 12 (dem1.tif):

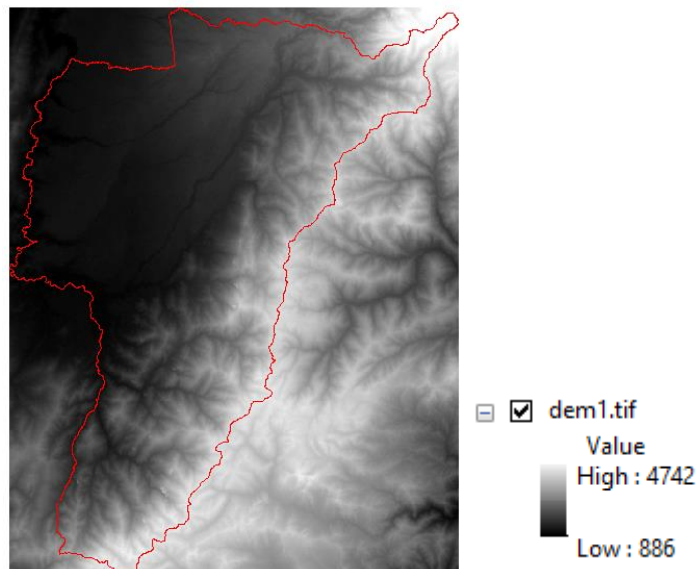


Imagen 12. Delimitación de área departamental del Quindío (dem1.tif)

Fuente. Propia

5.4.3. Configuración sistema de referencia espacial

Se verifico el sistema de coordenadas en el cual se descargaron los insumos ráster y vectorial, por lo tanto, se procedió a realizar la proyección del sistema de coordenadas WGS984 con EPSG 4326 a el sistema de Coordenadas MAGNA COLOMBIA OESTE con EPSG 3115.

Para el caso del DEM1.tif, se dirigió a **ArcToolBox, Data Management Tools, projections and transformations, raster, Project Raster**, de tal manera se obtuvo (dem1-MCW.tif), como se muestra en la imagen 13.

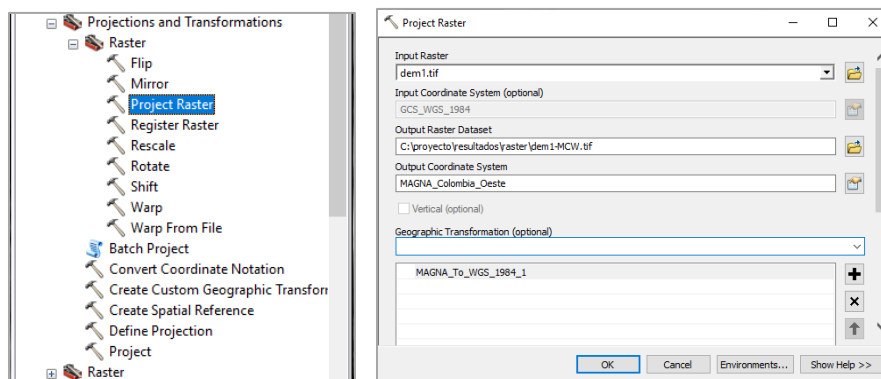


Imagen 13. Configuración del sistema de referencia

Fuente. Propia

Para el caso de los archivos vectoriales, el shapefile del Quindío y Salento, se dirige a **ArcToolBox, Data Management Tools, projections and transformations, Project (imagen 14).**

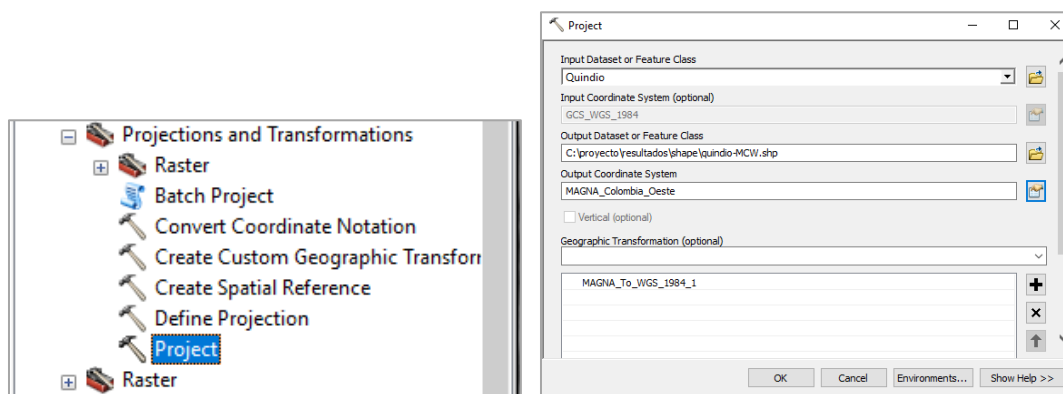


Imagen 14. Configuración del sistema de referencia para archivos vectoriales

Fuente. Propia

Por lo anteriormente mencionado, se obtiene (quindio-MCW.shp) y (Salento-MCW.shp) identificados en la imagen 15 de la siguiente manera:

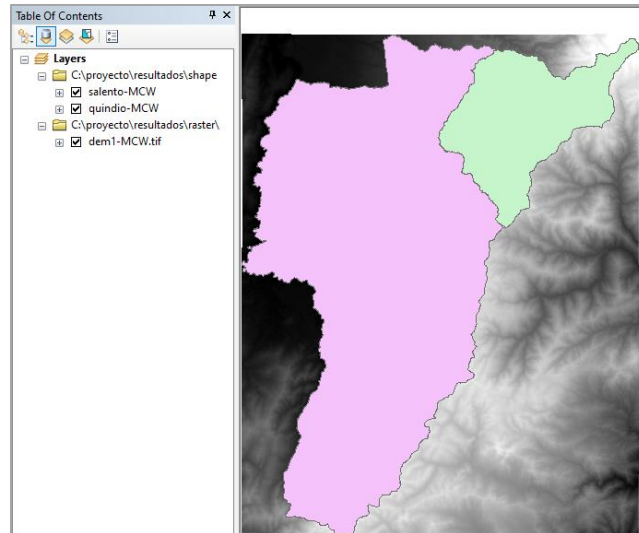


Imagen 15. Delimitación del municipio de Salento

Fuente. Propia

5.4.4. Rellenar campos de Raster

Dado a que los modelos digitales de elevación que son obtenidos a través de una imagen satelital contienen errores debido a efectos de nubosidad o por interferencia de la atmosfera, se hace necesario realizar la corrección de estas imperfecciones en los datos.

Para ello se utilizó la función **Fill**, la cual hace una comparación de los valores adyacentes en cada una de las celdas donde no existe información, y por un método de ponderación, rellena el valor del pixel que no contiene datos.

Ahora se dirige a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, fill**, como se muestra en la imagen 16, obteniendo el (dem2.tif).

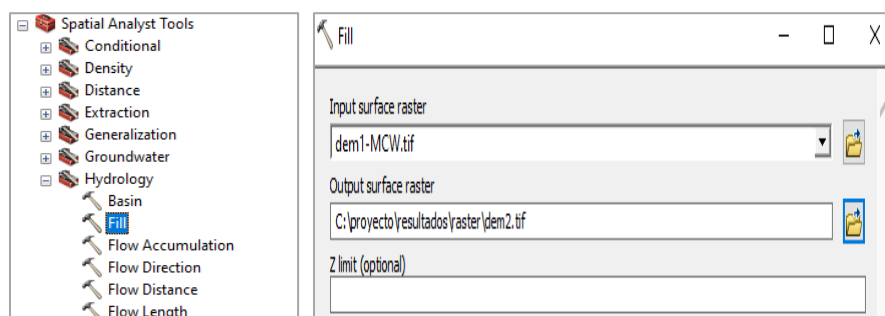


Imagen 16. Configuración para relleno de vacíos en la imagen raster

Fuente. Propia

5.4.5. Cálculo de la dirección de flujo

La dirección de flujo permite identificar en qué sentido se va a dirigir las corrientes o cuerpos de agua, ya que esta función lo que hace es determinar para cada una de las celdas o pixel del raster, cuál es la mayor pendiente descendente con cada una de las celdas adyacentes.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, Flow accumulation**, como se muestra en la imagen 17, obteniendo dem3-dir-flujo.tif (ver imagen 18).

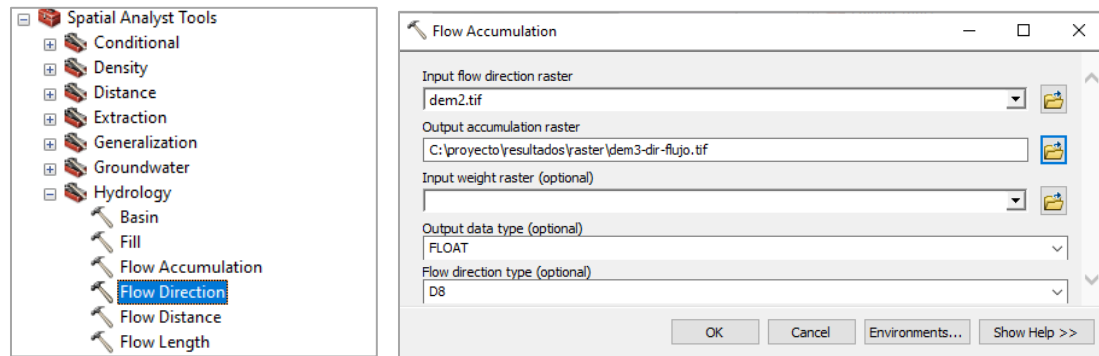


Imagen 17. Configuración de dirección de flujo

Fuente. Propia

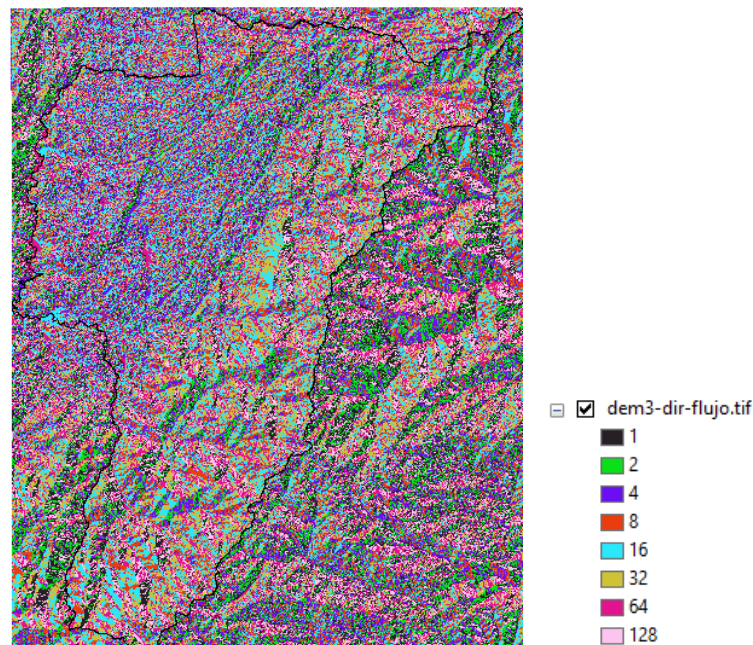


Imagen 18. Dirección de flujo

Fuente. Propia

5.4.6. Identificación de imperfecciones sobre el modelo de dirección de Flujo.

Ahora se realiza una corrección al modelo digital de dirección de flujo, ya que este puede contener valores de elevación donde posiblemente puede quedar represada el agua con respecto a las celdas adyacentes del modelo, entonces la función **Sink** lo que hace es modificar sustancialmente el valor del pixel, hasta permitir que la lámina de agua tenga un flujo constante sobre la superficie.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, sink**, como se muestra en la imagen 19 obteniendo (dem4-dir-flujo-sink.tif).

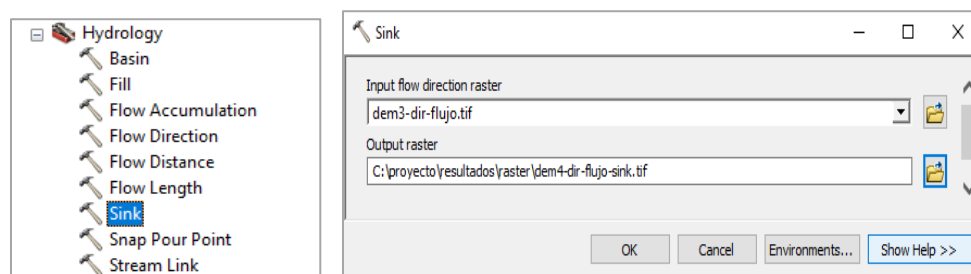


Imagen 19. Configuración de correcciones de errores en imagen raster

Fuente. Propia

5.4.7. Cálculo de la acumulación de flujo

La acumulación de flujo permite identificar el peso o valor acumulado de todas las celdas que fluyen por pendientes descendientes máximas hacia una celda o lugar de salida del cauce principal.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, Flow Accumulation**, obteniendo lo que se muestra en la imagen 21.

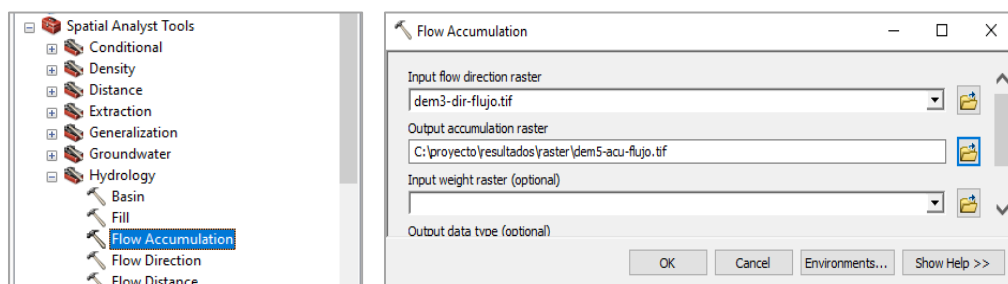


Imagen 20. Configuración para el cálculo de dirección del flujo

Fuente. Propia

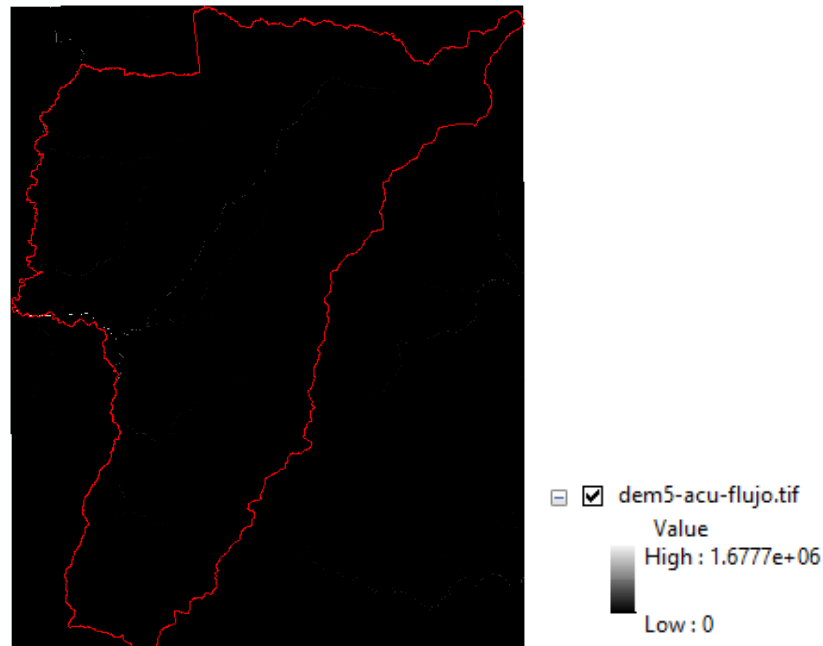


Imagen 21. Identificación de acumulación de flujo en raster

Fuente. Propia

5.4.8. Clasificación de las corrientes de flujo

La clasificación de arroyos consistió en asignar un valor numérico a los vínculos adyacentes en una red de arroyos, que permite identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes que llegan al cauce principal. Para este caso se utilizó el método de Strahler.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, Stream Order** (ver imagen 22), obteniendo lo identificado en la imagen 23 (dem6-stream-order.tif).

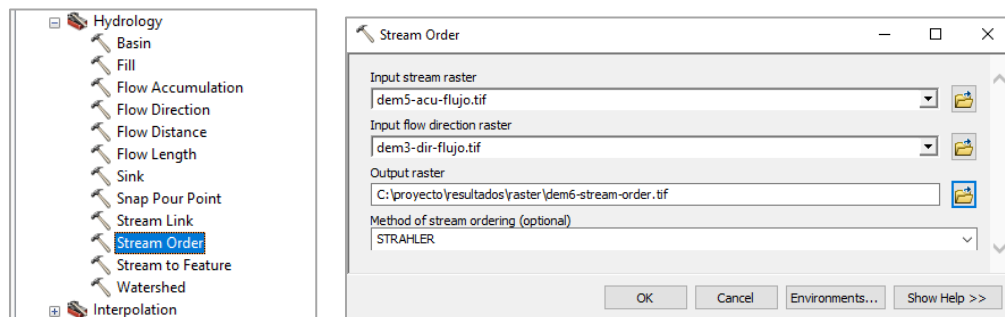


Imagen 22. Configuración para la clasificación de corrientes de flujo

Fuente. Propia

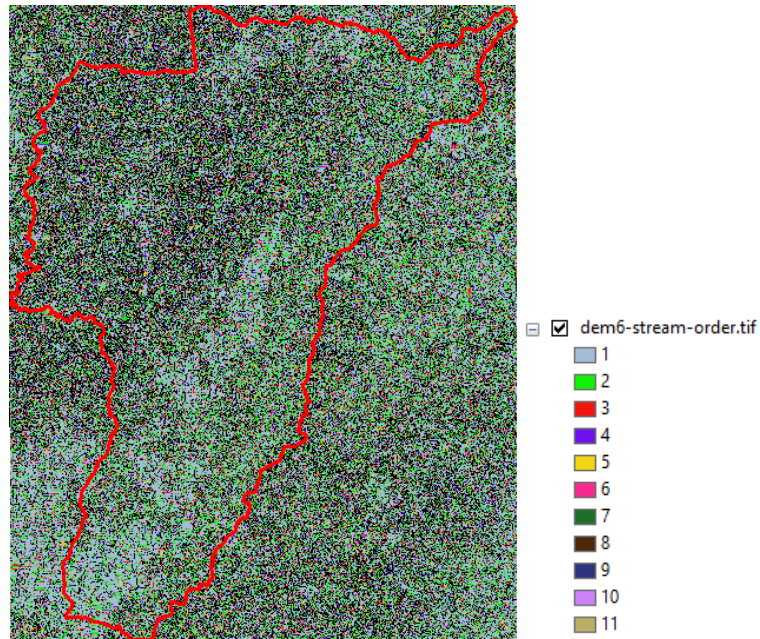


Imagen 23. Corrientes de flujo

Fuente. Propia

5.4.9. Realizar un filtrado al raster de clasificación de Arroyos

Como el método de Strahler clasifica los arroyos en valores de 1 en adelante, se realizó un filtro a la cantidad de datos obtenidos en el raster de Stream Order. Solo se tiene en cuenta los cauces mayores o iguales al nivel cuatro.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Conditional, Con**, configurándolo como se muestra en la imagen 24 y obteniendo el resultado identificado en la figura 25.

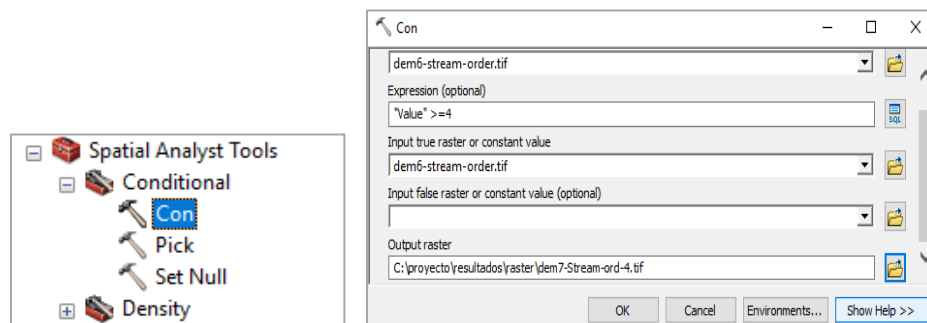


Imagen 24. Configuración para la clasificación de arroyos

Fuente. Propia

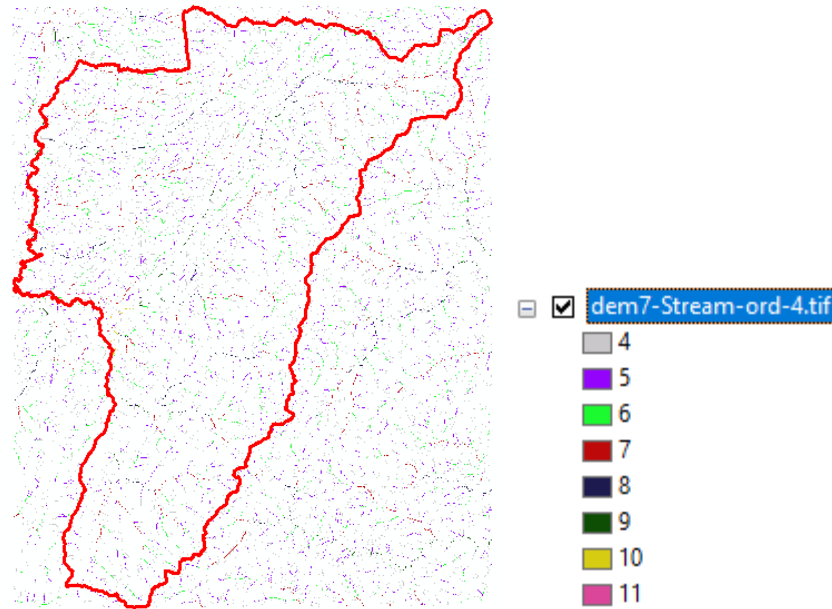


Imagen 25. Clasificación de arroyos

Fuente. Propia

5.4.10. Crear la red hidrográfica de la cuenca

A partir del modelo Raster filtrado de la clasificación del orden del cauce, se procedió a realizar la conversión de datos raster a polilíneas.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Conversion Tools, From Raster, Raster to Polyline**, configurándolo como se muestra en la imagen 26 y obteniendo el resultado identificado en la imagen 27.

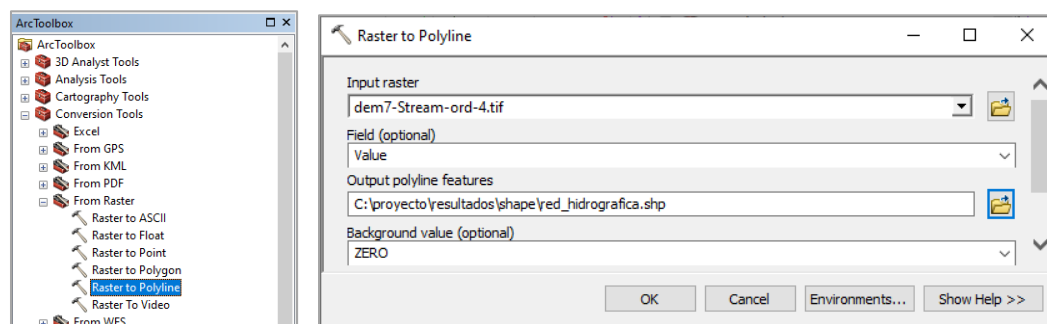


Imagen 26. Configuración para la creación de red hidrográfica de la cuenca

Fuente. Propia

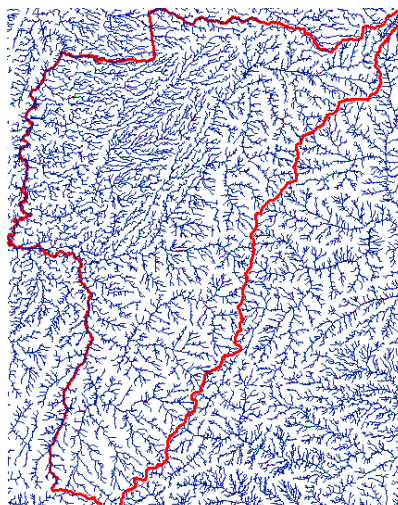


Imagen 27. Red hidrográfica de la cuenca

Fuente. Propia

5.4.11. Punto de Cierre

Para identificar el punto de cierre de la cuenca, se analizó la distribución de la red hidrográfica del municipio de Salento, y en base a los valores mínimos de elevación del DEM, se ubicó la parte más baja donde se acumula toda la lámina de agua que proviene de aguas arriba de la cuenca.

Se creó un nuevo archivo Shapefile de tipo Punto, activando la edición, se ubicó y agregó el punto, y se guardó en la edición de la capa.

Para ello se seleccionó en la carpeta de resultados, la carpeta “shape”, se da clic derecho y se selecciona “Shapefile”, se asignó el sistema de referencia espacial Magna Sirgas Oeste, con EPSG 3115, denominando la capa como “punto-cierre” (Ver imagen 28).

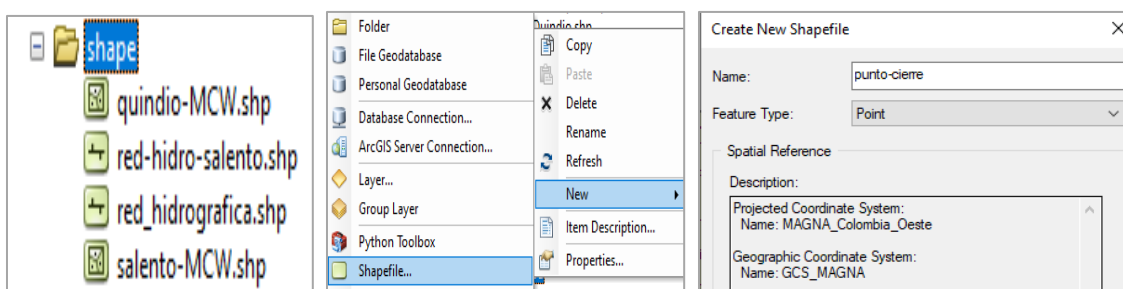


Imagen 28. Configuración para la creación de punto de cierre

Fuente. Propia

Se activo la edicion y se dibujo el punto sobre la red hidrografica completa, quedara como se muestra en la imagen 29, el shp de Salento solo lo agregamos para orientarnos sobre el area de estudio.

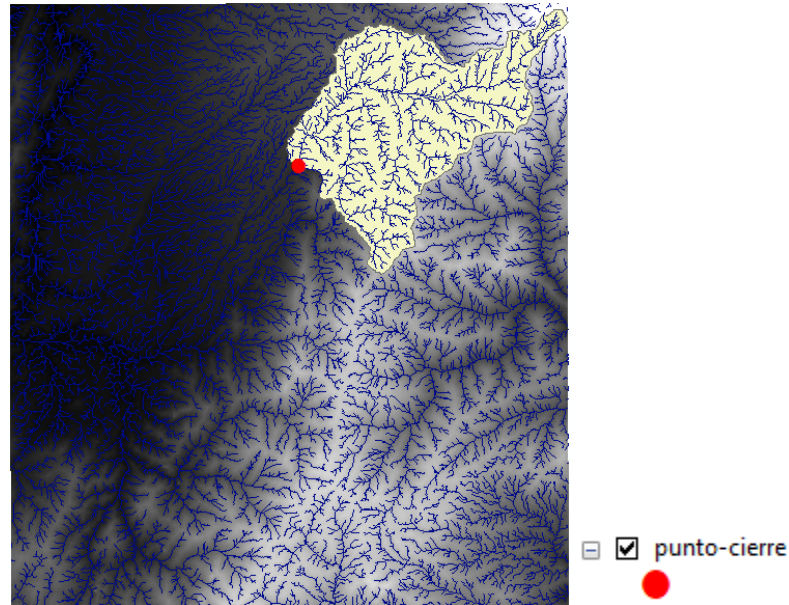


Imagen 29. Área de estudio de la cuenca

Fuente. Propia

5.4.12. Delimitacion de la cuenca hidrografica

Para poder identificar el punto de cierre de la cuenca se utilizo la funcion “Alinear punto de Fluidez” (Snap Pour Points). Lo que permite identificar esta funcion, es la de cuantificar la celda que contiene el mayor valor de acumulacion de flujo, dentro de una distancia especifica o un conjunto de redes hidrograficas.

Para ello se dirigio a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, Snap Pour Point**, como se evidencia en la imagen 30, en donde en primer instancia se selecciona el punto de cierre en formato shp, luego se selecciona el raster de acumulacion de flujo. Y se guarda el punto de cierre en formato raster.

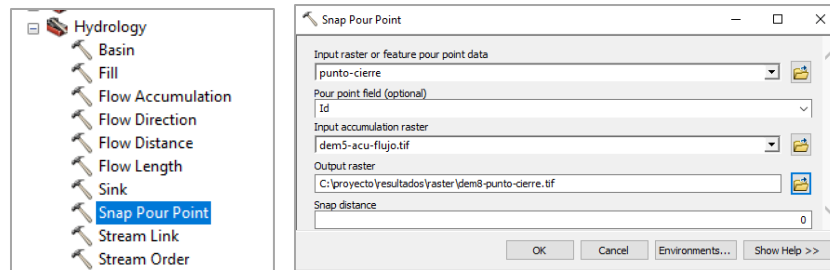


Imagen 30. Configuración para la delimitación de la cuenca hidrográfica paso 1

Fuente. Propia

Por ultimo se ejecutó la herramienta denominada Watershed, o cuenca hidrografica y se dirige a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Hydrology, Watershed**, en donde en primer instancia se ingresa la direccion de flujo y luego el punto de cierre en formato raster (ver imagen 31).

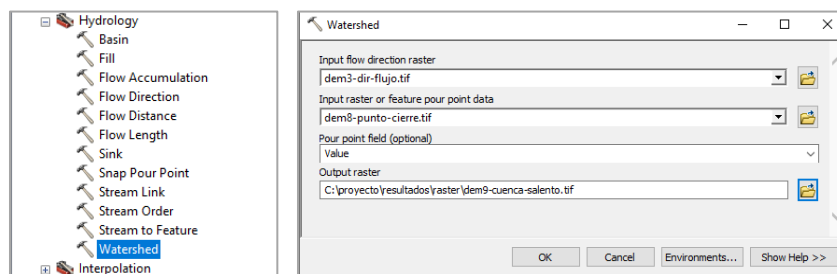


Imagen 31. Configuración para la delimitación de la cuenca hidrográfica paso 2

Fuente. Propia

Finalmente, se expone en el area de estudio del municipio de Salento la delimitacion de la cuenca hidrografica como se muestra en la imagen 32.



Imagen 32. Cuenca hidrográfica del municipio de Salento Quindío

Fuente. Propia

Porcentualmente se calculó que el área de la cuenca hidrográfica abarca más del 95% del área total del municipio de Salento Quindío, y se evidenció que, en el punto de cierre concluye la mayor acumulación de flujo de casi toda las redes hidrográficas del municipio.

5.5. Parametros morfometricos de la cuenca de salento Quindio

Para la cuenca de salento, se calculó los siguientes parametros con el objetivo de caracterizar a detalle la cuenca, y el área de estudio.

5.5.1. Área de la cuenca

La cuenca del municipio de salento cuenta con un área equivalente a 34339.73 hectáreas, y de acuerdo con el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos, citado por aguirre (2007), la cuenca de salento se clasifica como una microcuenca por tener una extensión en área menor a 10000.0 hectáreas.

5.5.2. Perimetro de cuenca

La cuenca cuenta con un perímetro de 112.89 kilómetros cuadrados.

5.5.3. Longitud del río principal

En el municipio de salento, el río principal del municipio tiene una longitud de 43925.06 metros de longitud, y este atraviesa todo el municipio, como se observa a continuación.

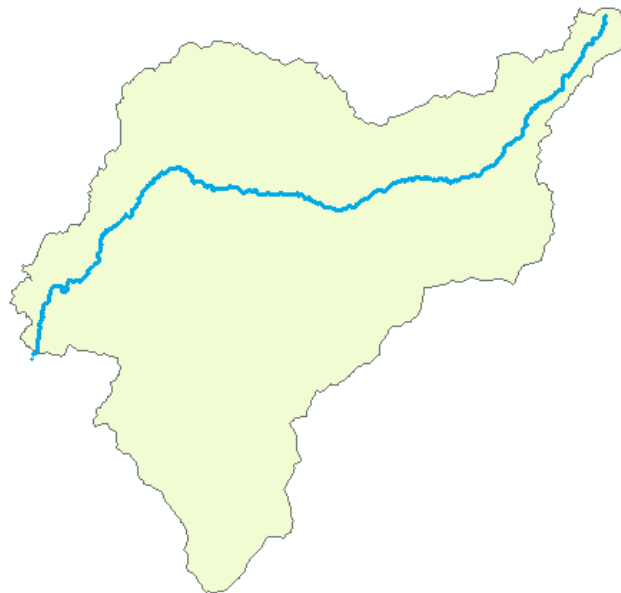


Imagen 33. Esquema río Quindío

Fuente. Propia

5.5.4. Coeficiente de Compacidad

“El coeficiente de compacidad realiza una comparacion de la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Este coeficiente adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular”. (Cardona, 2016)

Por definicion del concepto, los valores de este coeficiente por ningun motivo sera inferior a uno, ademas se menciona que el grado de aproximacion a que los valores tengan tendencia a uno significa que hay mayor concentracion de agua.

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuacion 1. Coeficiente de Compacidad, Morfometria de cuencas hidrográficas

Fuente. Aldemar Reyes, 2010.

En donde:

Kc= coeficiente de compacidad

P= Perimetro de la cuenca en Km

A= Area de la cuenca en Km²

Tabla 2. Factor de forma

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente. Diagnostico Morfométrico Cuenca Rio la Vieja, 2017.

De acuerdo con el valor del coeficiente de compacidad obtenido para la cuenca equivalente a 1.70, se observa que esta tiene una forma redonda que abarca el desagüe de la misma.

5.5.5. Densidad de drenaje

Es definido como la relacion entre la longitud total de los cauces de la cuenca y el area establecida para la misma, tal como se identifica en la siguiente ecuacion:

$$Dd = \frac{\sum Lc_i}{A}$$

Ecuacion 2. *Densidad de drenaje*

Fuente. Aldemar Reyes, 2010.

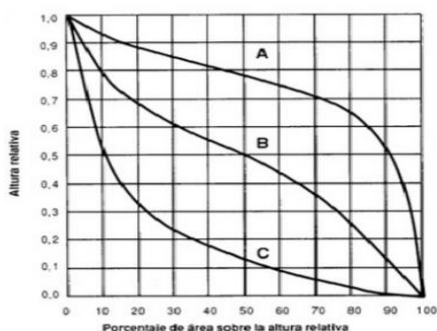
Para la cuenca se obtuvo un valor de densidad de drenaje igual a 1.85, para el cual se interpreta que es un valor alto, por lo tanto, esta cuenca es bien drenada, que puede presentar características de poca cobertura vegetal, baja permeabilidad y suelos facilmente erosionables.

5.5.6. Curva hipsometrica

El sentido de determinar la curva hipsometrica es porque permite caracterizar el relieve, mediante las cotas de altitud obtenidas en el modelo de elevaciones y la estimacion de la superficie acumulada por cada cota. En el analisis hipsometrico, se logra determinar el ciclo erosivo y la etapa de evolucion en la que se encuentra la cuenca. (Cardona, 2016)

Se calculó los valores de elevacion y valores de area acumulda, para una clasificacion de 15 intervalos iguales del modelo digital de elevacion. Con base en la siguiente tabla, se analizó el resultado, en donde se delimitan 3 tipos de curvas, nombradas curva A que refleja una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud), curva B que refleja una cuenca en equilibrio (fase de madurez) y curva C que refleja una cuenca sedimentaria (fase de vejez):

Tabla 3. Curva hipsométrica esquema



Fuente. *Diagnostico Morfométrico Cuenca Rio la Vieja, 2017.*

Para la curva hipsométrica obtenida de la cuenca del municipio de salento, y en base a la figura anterior, se observa que es una cuenca con curva tipo C, lo cual indica que es sedimentaria, y que se encuentra iniciando en fase de vejez.

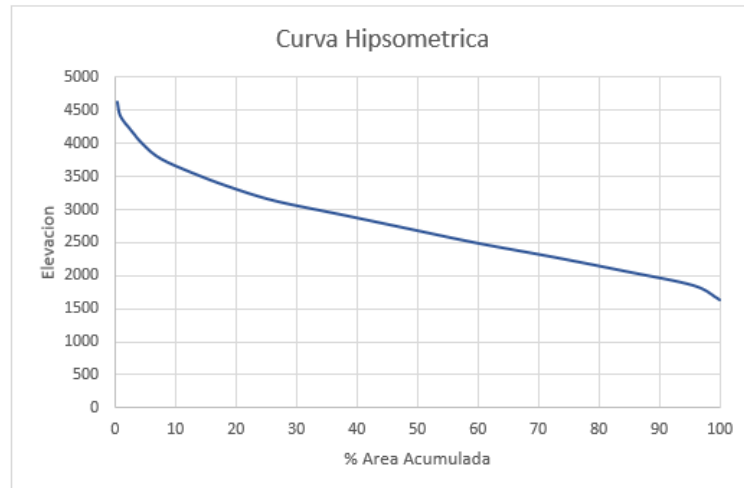


Imagen 34. Curva hipsométrica

Fuente. *Diagnostico Morfométrico Cuenca Rio la Vieja, 2017.*

5.5.7. Red hidrográfica de Salento Quindío

Ahora se realiza la delimitación de la red hidrográfica del municipio de Salento Quindío, utilizando el geo proceso de Recorte (Clip), con el área del municipio.

Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Analysis Tools, Extract, Clip**, como se muestra a continuación:

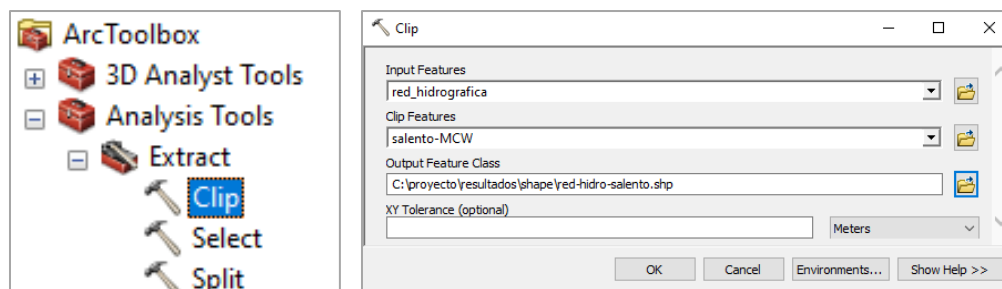


Imagen 35. Configuración para clip de red hidrográfica del municipio

Fuente. Propia

Obteniendo el siguiente resultado:

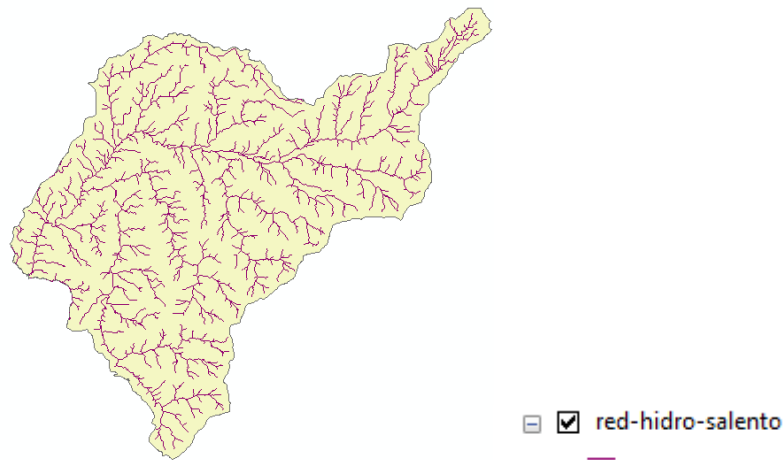


Imagen 36. Clip de red hidrográfica municipal de Salento

Fuente. Propia

5.6.Procedimiento paso a paso para realizar un modelo de pendientes y reclasificarlo a datos cualitativos

Para proceder a realizar un modelo de pendientes se cargó el Modelo Digital de Elevación (DEM) con los campos rellenos, es decir, el IDEM al cual se le aplicó la función **Fill (dem2.tif)**. Anexo a esto, se añadió la cuenca de Salento, procesando lo que se muestra a continuación:

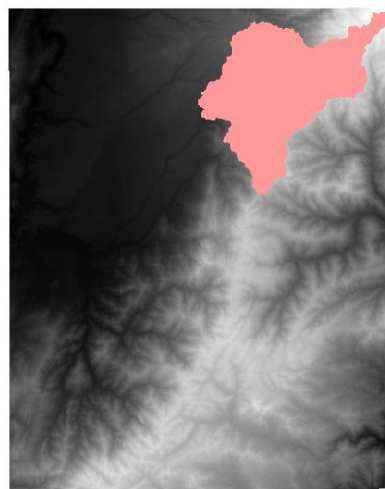


Imagen 37. Superposición de capas

Fuente. Propia

5.6.1. Delimitar el área de estudio

Ahora se debe delimitar el área de estudio con el objetivo de realizar el procesamiento de información únicamente de la zona de estudio.

Para ello, primero se convierte la cuenca de formato ráster a formato vectorial tipo polígono.

Dirigiéndose a **ArcToolBox, Conversion Tools, From Raster, Raster to Polygon**, como se muestra a continuación en la imagen 38.

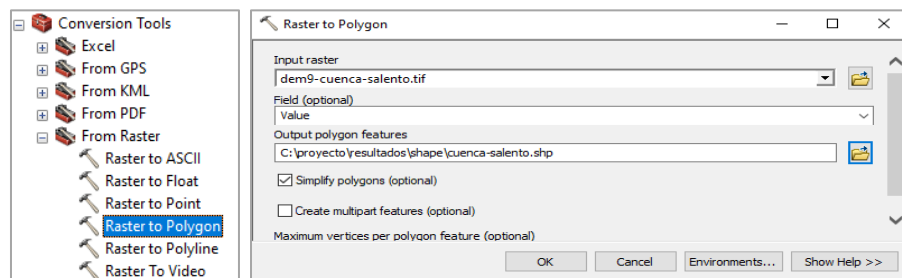


Imagen 38. Configuración de delimitación del área

Fuente. Propia

Por la configuración anteriormente demostrada se obtuvo lo que se evidencia en la imagen 39.

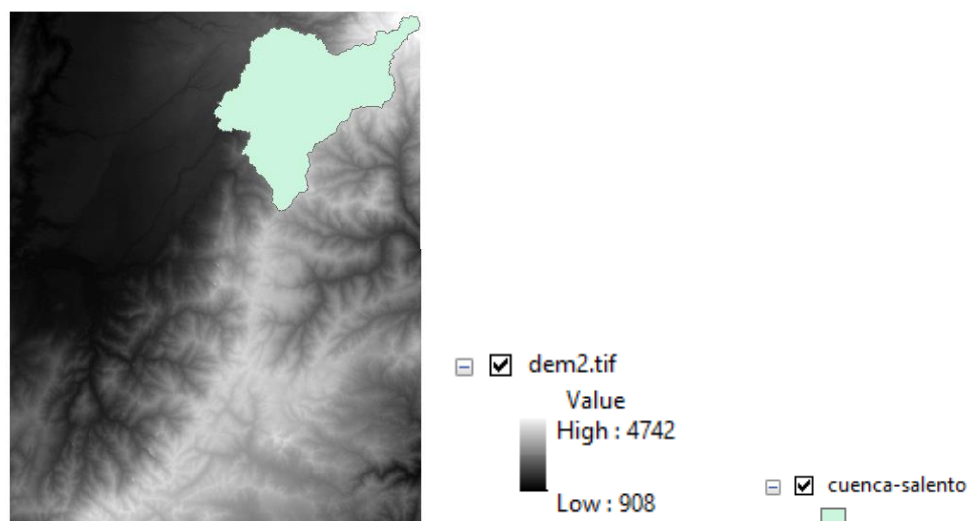


Imagen 39. Delimitación del área

Fuente. Propia

Ahora se ejecutó la función **Ráster Clip**, para obtener el Modelo Digital de Elevación del área de la cuenca de Salento. Seguidamente se dirigió a **ArcToolBox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing, Clip**, como se muestra en la imagen 40.

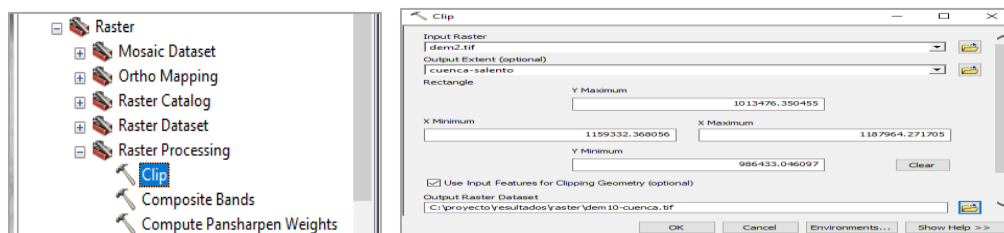


Imagen 40. Configuración del Modelo Digital de Elevación

Fuente. Propia

Por la configuración anteriormente demostrada se obtuvo lo que se evidencia en la imagen 41.

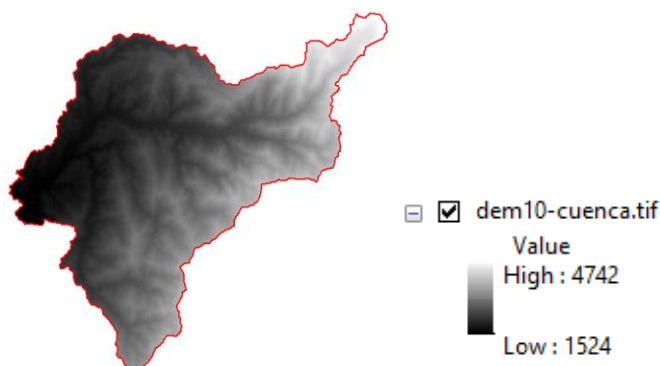


Imagen 41. Modelo Digital de Elevación Salento

Fuente. Propia

5.6.2. Crear modelo de pendientes

Un mapa de pendientes es aquel que permite clasificar e identificar diferentes atributos cualitativos en la distribución del terreno, en cuanto a sus formas y tipos de relieves presentes en el área de estudio. Para ello se dirigió a **ArcToolBox, Spatial Analyst Tools, Surface, Slope**, seguidamente se configura el cuadro de dialogo en “Input Raster”, se ingresa el DEM de la cuenca, en “Output Measurement” se define pendiente en porcentaje (PERCENT_RIZE), y se guarda el modelo de pendientes en la carpeta de resultados en Datos Raster, como se muestra a continuación:

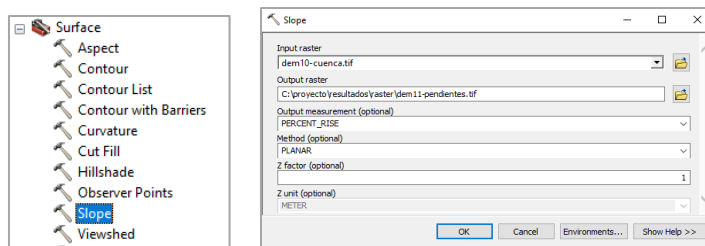


Imagen 42. Configuración para generar modelo de pendientes

Fuente. Propia

Por la configuración anteriormente demostrada, se obtuvo lo que se evidencia en la imagen 43.

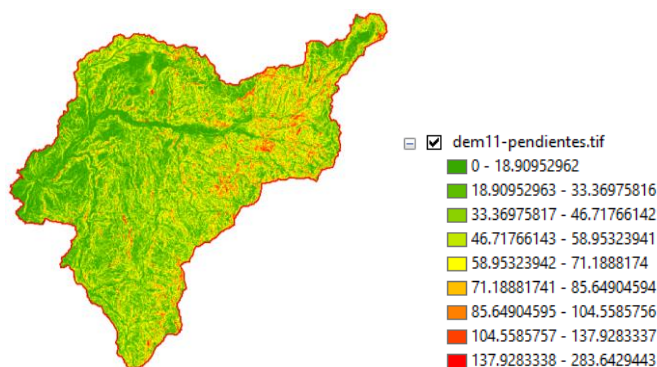


Imagen 43. Modelo de pendientes Salento Quindío

Fuente. Propia

5.6.3. Reclasificación modelo de pendientes

Para reclasificar el modelo de pendientes, se utilizaron los valores de referencia implementados en la clasificación del terreno según el valor de la pendiente en porcentaje, como se ilustra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de la pendiente

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE RELIEVE	SÍMBOLO
0-3	Plano	P1
3-7	Suave	P2
7-12	Medianamente Accidentado	P3
12-20	Accidentado	P4
20-35	Fuertemente Accidentado	P5
35-50	Muy Fuertemente Accidentado	P6
50-75	Escarpado	P7
>75	Muy Escarpado	P8

Fuente. Carvajal Escobar, Barroso; Fabián Trujillo, 2010

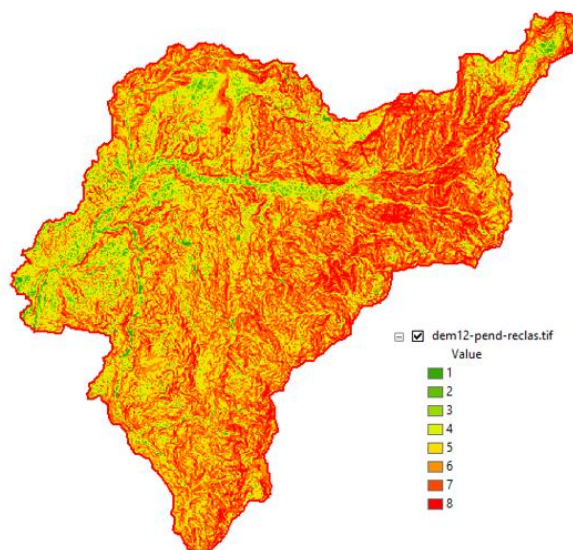
Aplicando los argumentos base para la delimitación de parámetros en el software, se realiza lo siguiente:

Old values	New values
0 - 3	1
3 - 7	2
7 - 12	3
12 - 20	4
20 - 35	5
35 - 50	6
50 - 75	7
75 - 283.642944	8

Imagen 44. Parámetros base de modelación

Fuente. Propia

Por lo anterior, se obtiene lo mostrado en la imagen 45.



FID	Shape	gridcode	relieve	area	procen
0	Polygon	1	Plano	3.54027	1.040689
1	Polygon	2	Suave	7.400335	2.175383
2	Polygon	3	Medianamente Accidentado	13.809316	4.059351
3	Polygon	4	Accidentado	30.557704	8.982663
4	Polygon	5	Fuertemente Accidentado	79.853216	23.473444
5	Polygon	6	Muy Fuertemente Accidentado	87.921744	25.845247
6	Polygon	7	Escarpado	89.813911	26.401464
7	Polygon	8	Muy Escarpado	27.28885	8.021759

Imagen 45. Reclasificación modelo de pendientes

Fuente. Propia

Ahora, se convierte el modelo de pendientes reclasificado a datos vectoriales de tipo polígono, para ello se utilizó la función de **Raster To Polygon**, por ende, se configura en “Input Raster” e ingresa el raster de las pendientes reclasificadas, y se guarda en la carpeta de resultados en datos Shape, obteniendo lo que se evidencia en la imagen 46.

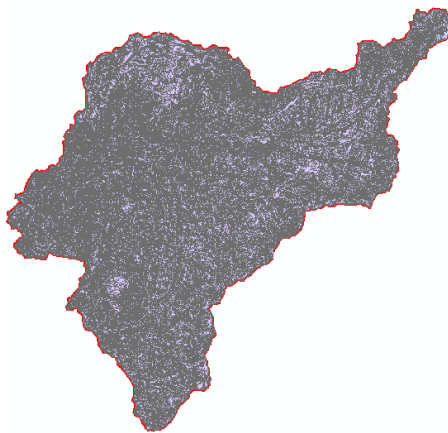


Imagen 46. Modelo de pendientes reclasificado a datos vectoriales

Fuente. Propia

Como se obtuvo un archivo en formato Shapefile de tipo Multipolígono con cada uno de los tipos de relieve clasificados en el modelo de pendientes, se aplicó un geoprocés “Dissolve”, para obtener un polígono independiente por cada tipo de terreno, por ello, se analizó los datos de la tabla de atributos, como se muestra a continuación:

pend-reclas				
FID	Shape *	Id	gridcode	
0	Polygon	1	5	
1	Polygon	2	5	
2	Polygon	3	5	
3	Polygon	4	6	
4	Polygon	5	6	
5	Polygon	6	7	
6	Polygon	7	8	
7	Polygon	8	6	
8	Polygon	9	8	
9	Polygon	10	8	
10	Polygon	11	8	
11	Polygon	12	5	
12	Polygon	13	5	
13	Polygon	14	5	
14	Polygon	15	6	
15	Polygon	16	6	

(0 out of 65483 Selected)

Imagen 47. Tabla de atributos con datos de archivos multipoligonos

Fuente. Propia

Como se observa en la imagen 47, se cuenta con 65483 poligonos registrados, entonces se aplico un Dissolve por medio del campo o atributo unico “gridcode”, es el campo clasificado en tipos de relieves. Para ello se dirigio a **Geoprocessing, Dissolve**, como se muestra a continuacion:

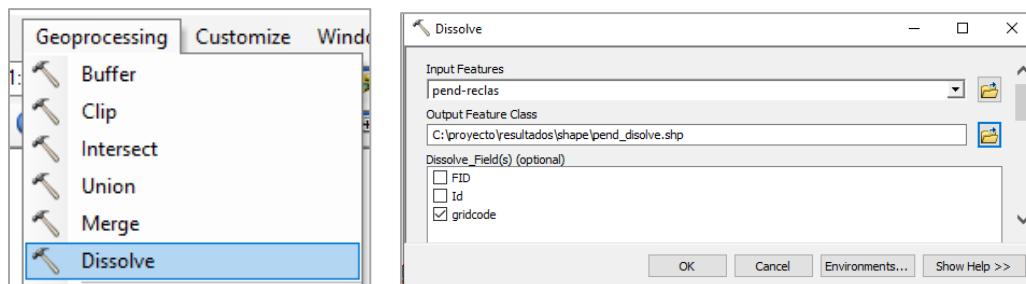


Imagen 48. Configuración de geo proceso

Fuente. Propia

Por lo mencionado, la capa resultante solo tendra los tipos de terreno o relieve reclasificados, evidenciandolo en la imagen 49.

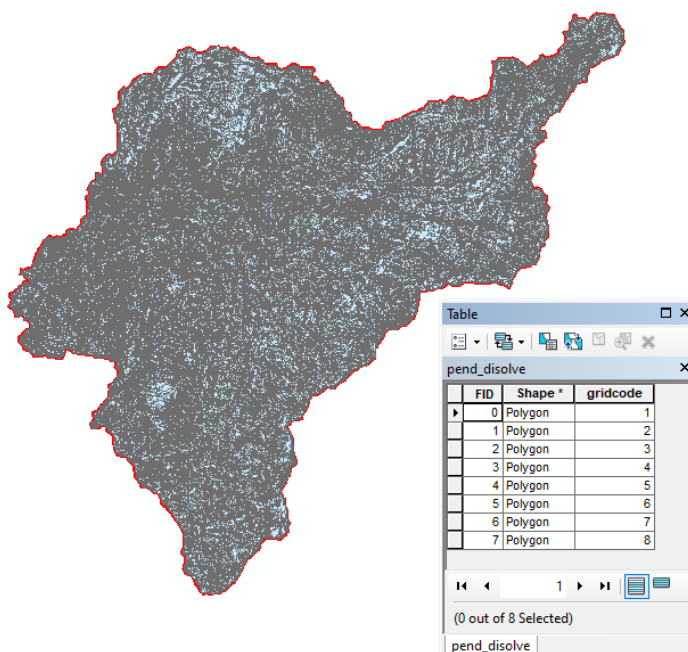


Imagen 49. Terreno reclasificado

Fuente. Propia

Se agrego un nuevo campo a esta tabla de atributos denominado relieve, y se editó, se le asignó a cada gridcode el tipo de relieve según la tabla de clasificacion de terreno por pendiente.

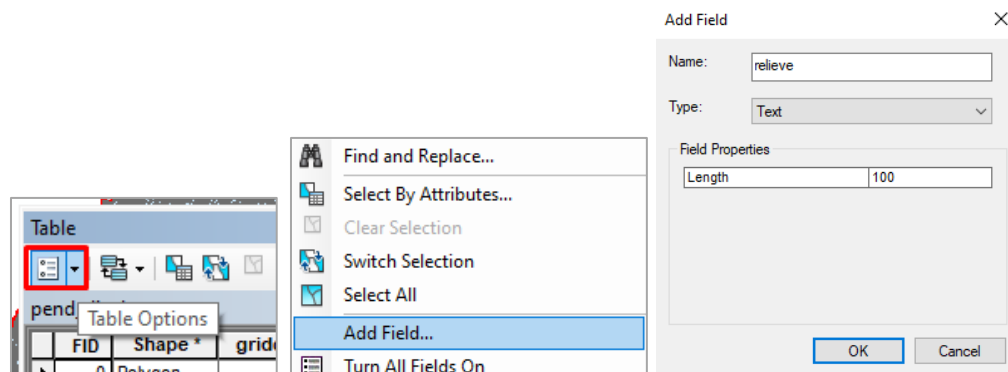


Imagen 50. Configuración del paso

Fuente. Propia

Ahora con la calculadora raster, se seleccionó por atributos y asignó el tipo de relieve según corresponda, obteniendo como resultado:

FID	Shape *	gridcode	relieve
0	Polygon	1	Plano
1	Polygon	2	Suave
2	Polygon	3	Medianamente Accidentado
3	Polygon	4	Accidentado
4	Polygon	5	Fuertemente Accidentado
5	Polygon	6	Muy Fuertemente Accidentado
6	Polygon	7	Escarpado
7	Polygon	8	Muy Escarpado

Imagen 51. Asignación del tipo de relieve

Fuente. Propia

Ahora, en el area de dibujo se puede clasificar por el tipo de relieve, como se evidencia en la imagen 52.

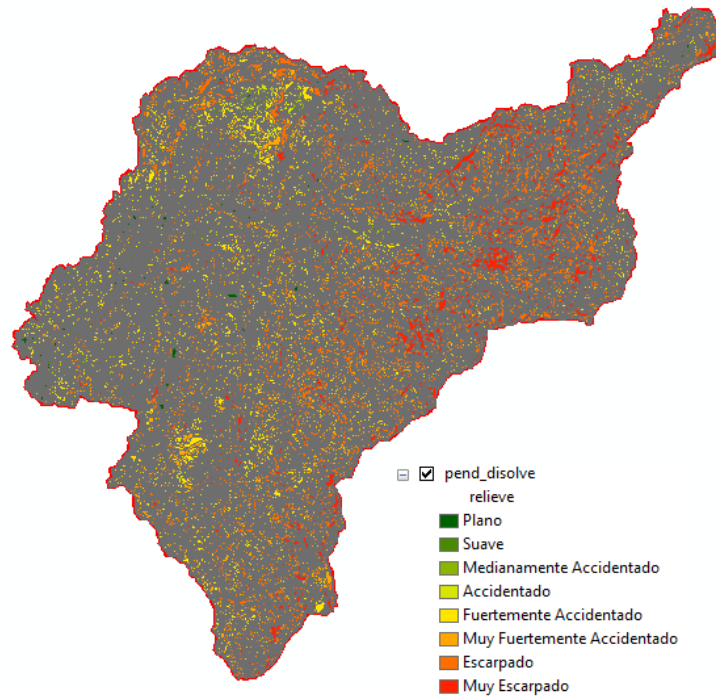


Imagen 52. Reclasificación dependiendo el tipo de relieve

Fuente. Propia

5.7. Modelo de Isoyetas de Precipitación

5.7.1. Archivo de Puntos

Ahora se construira un modelo de precipitacion a partir de los datos crudos que se obtuvo del IDEAM, los cuales se encuentran en excel (precipitacion.xls). Como se evidencia a continuacion, se carga la hoja al area de dibujo (ver imagen 53).

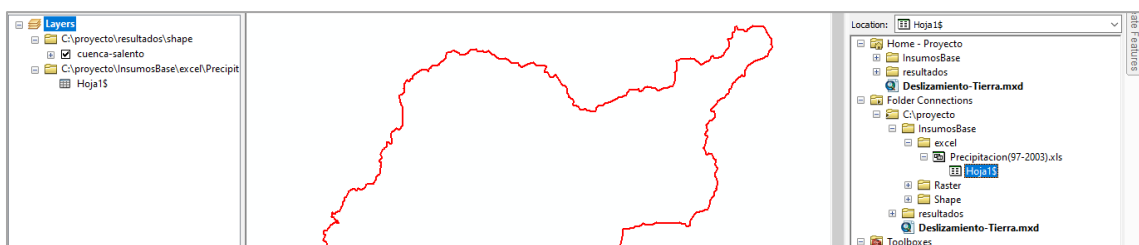


Imagen 53. Insertar datos crudos de precipitación

Fuente. Propia

Se asignaron las coordenadas de altitud y longitud, se creó el Shp de puntos, luego, se asignó el sistema de coordenadas WGS1984.

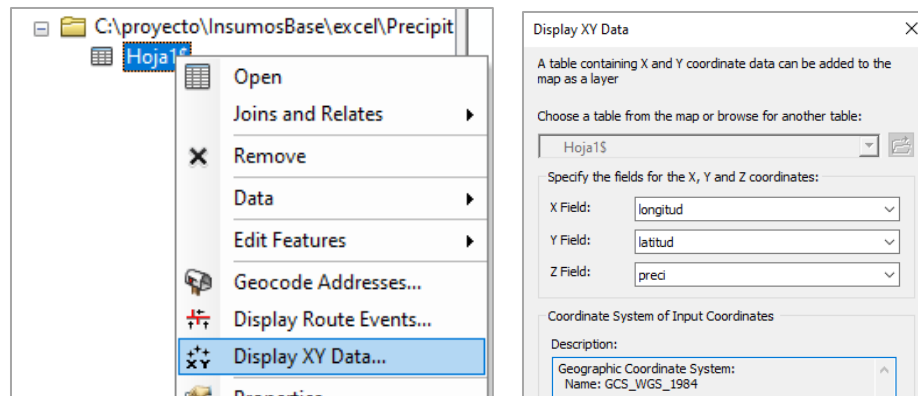


Imagen 54. Sistema de referencia para información coordenadas insertadas

Fuente. Propia

Por la metodología anteriormente mostrada, se obtiene lo evidenciado en la imagen 55.

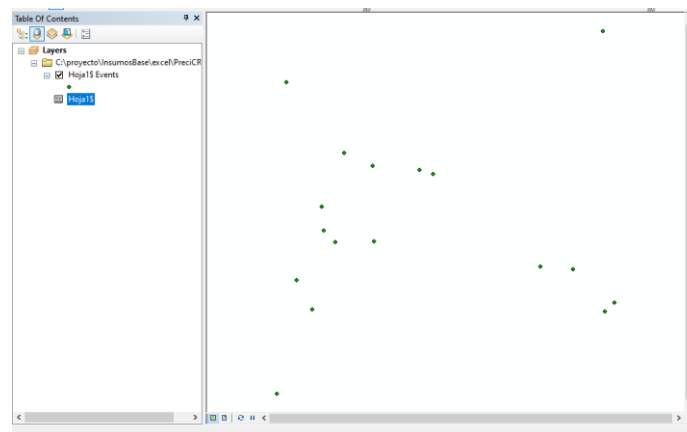


Imagen 55. Información georeferenciada

Fuente. Propia

Posteriormente se creó el shp de puntos y se guarda el resultado en la carpeta de insumos Shape.

5.7.2. Obtencion Modelo de Isoyetas mediante el metodo IDW

Como se conoce la distribucion espacial de las estaciones hidrometereologicas, se genera a partir del valor conocido de precipitacion un modelo interpolado por el metodo IDW, para obtener las isoyetas de precipitacion de la cuenca de Salento. Para ello, se dirige a **ArcToolBox, 3D Analyst Tools, Raster Interpolation, IDW (ver imagen 56).**

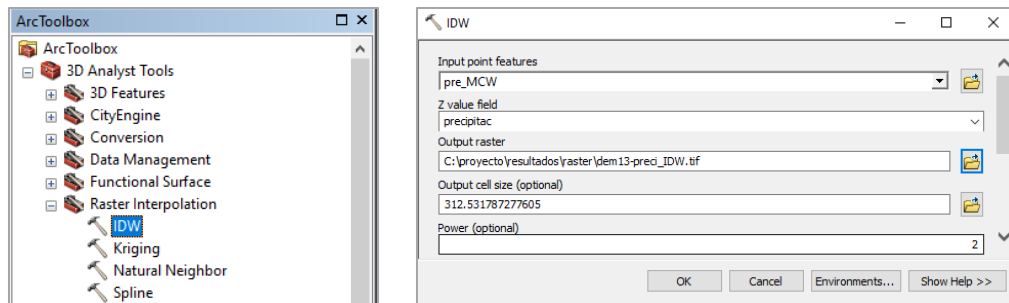


Imagen 56. Configuración para interpolación IDW

Fuente. Propia

Por la configuracion empleada con antelacion, se genera lo siguiente (ver imagen 57):

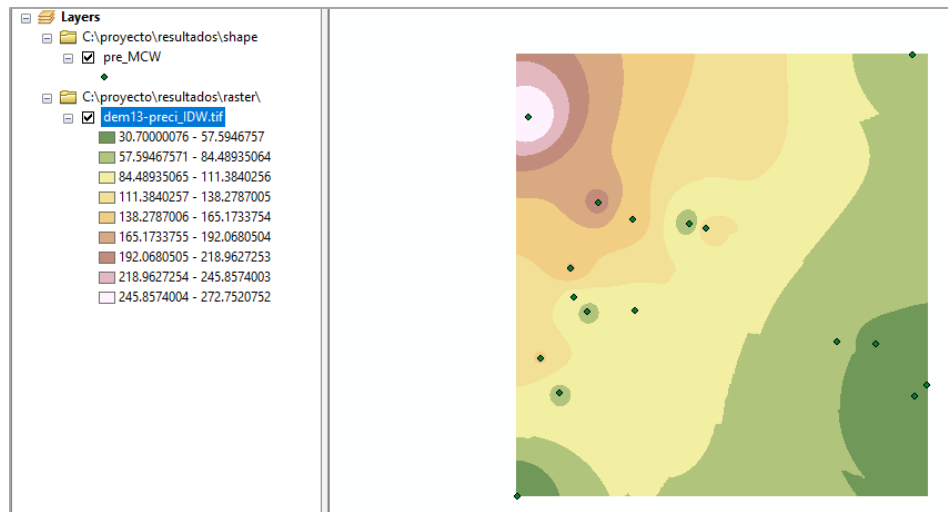


Imagen 57. Isoyetas modeladas

Fuente. Propia

A continuacion, se cargó el limite geografico del municipio de Salento y se realiza un recorte de la superficie de isoyetas de precipitacion para obtener especificamente los valores de precipitacion del municipio. Para ello se dirigió a **ArctToolBox, Data Management Tools, Raster, Raster Procesing, Clip.**

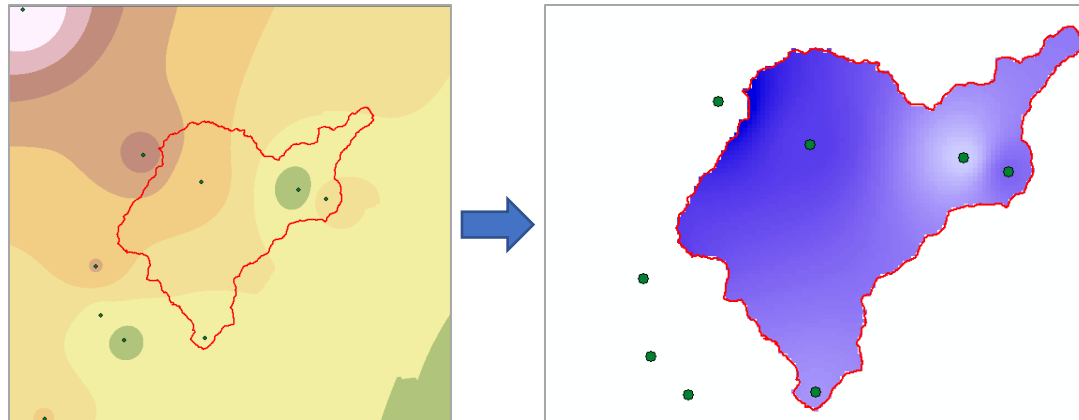


Imagen 58. Delimitación de municipio de Salento en Isoyetas

Fuente. Propia

A partir del modelo de isoyetas de precipitación de Salento Quindío, se procede a realizar una reclasificación en base a los intervalos de precipitación propuestos por el servicio geológico colombiano (SGC), los cuales, se encuentran en cinco intervalos de 1 a 5, dicha calificación representa el nivel de contribución a los movimientos en masa (ver tabla 5).

Tabla 5. Tabla de valores máximos de precipitación en función de movimientos en masa

Valores de Lluvia Maxima (mm)	Calificacion
0-50	1
50-100	2
100-150	3
150-220	4
>220	5

Fuente. Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2017

Para proceder con lo dicho, nos dirigimos a **ArcToolBox, 3D Analyst Tools, Raster Reclass, Reclassify**.

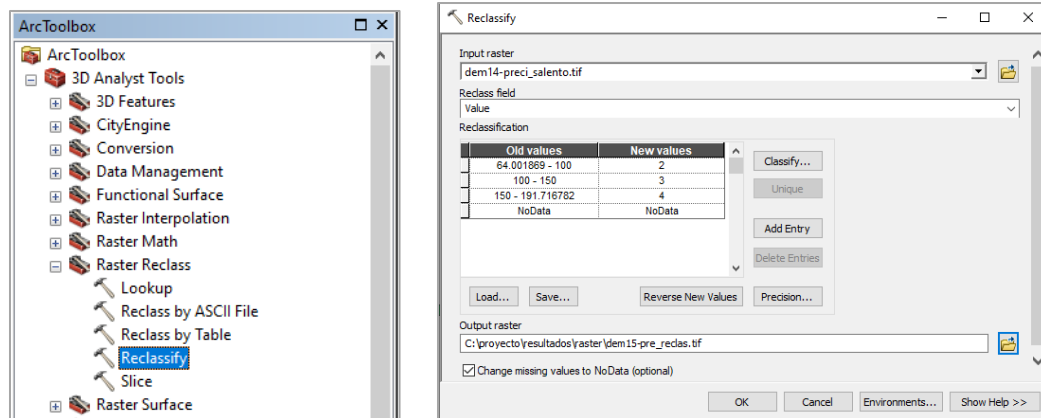


Imagen 59. Configuración de parámetros

Fuente. Propia

Por el procedimiento implementado, se obtiene (ver imagen 60).

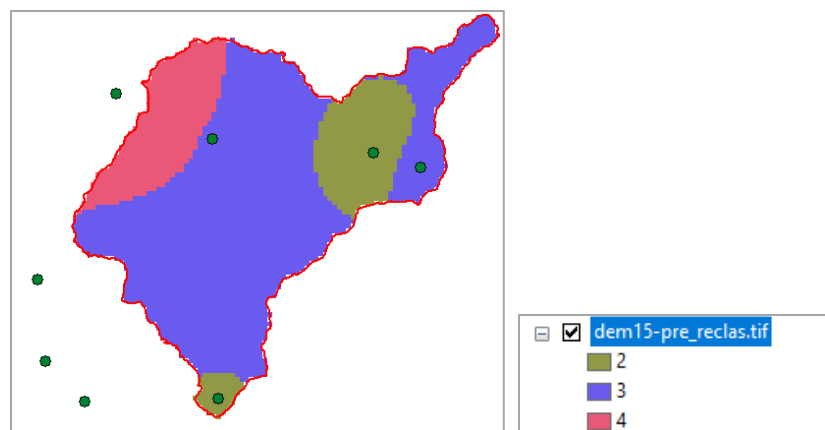


Imagen 60. Clasificación de precipitación en el municipio de Salento

Fuente. Propia

5.8. Obtención Modelo de pendientes Reclasificado

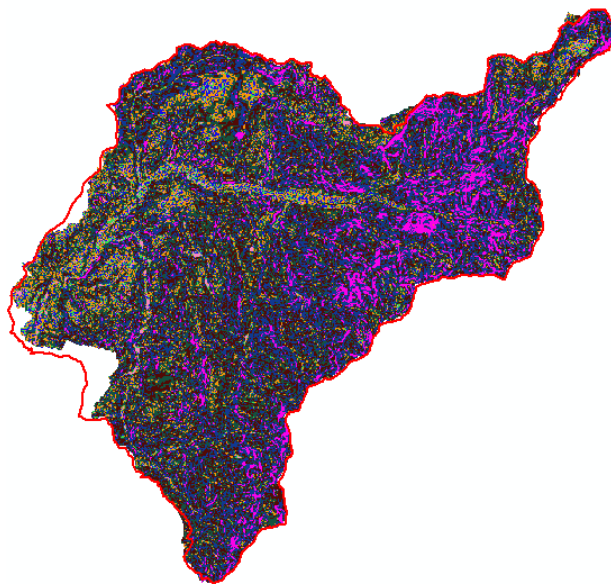
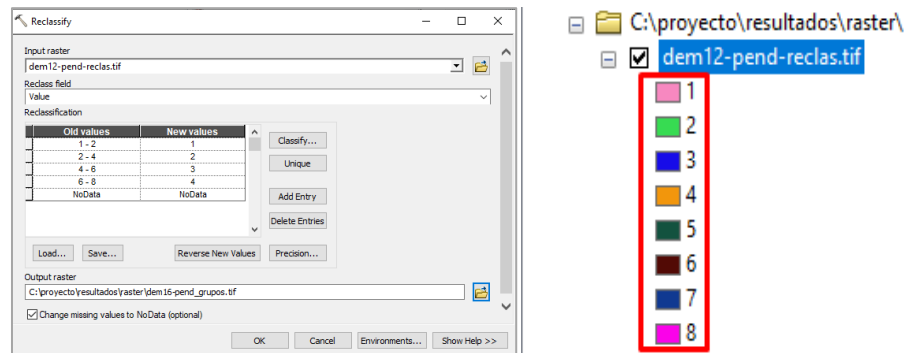
Para realizar una matriz ponderada entre las variables pendiente y precipitación, es conveniente realizar una reclasificación al modelo de pendientes obtenido anteriormente, en este caso, se trabajó con cuatro clases de tipo de relieve, en el primer grupo se unen terrenos planos y suaves, en el segundo grupo se unen los terrenos medianamente accidentado y accidentado, en el tercer grupo se incluyen los terrenos fuertemente accidentado y muy fuertemente accidentado, y en el cuarto grupo se encuentran los terrenos escarpado y muy escarpado (ver tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de topografía por grupo

Grupo	Contiene
1	Terrenos planos y ondulados
2	Terrenos medianamente accidentados y accidentados
3	Terrenos fuertemente accidentados y muy fuertemente accidentados
4	terrenos escarpados y muy escarpados

Fuente. Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2017

Para ello, primero se cargó el DEM de pendientes reclasificadas (ver imagen 61) y se utiliza nuevamente la funcion **Reclassify**, como se evidencia en la imagen 62.

**Imagen 61. DEM de pendientes reclasificadas**

Fuente. Propia

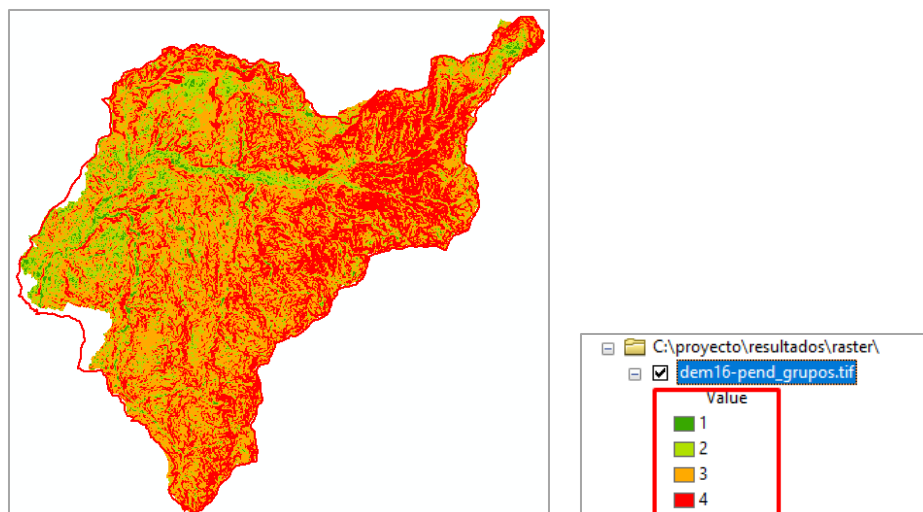


Imagen 62. Nueva reclasificación de pendientes

Fuente. Propia

5.9. Modelo de Susceptibilidad, Matriz ponderada.

A partir del modelo de precipitación reclasificado en los cuatro grupos de relieves, y usando el modelo de precipitación reclasificado en intervalos de acuerdo al nivel de significancia de la precipitación a los movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC), se realizará la unión espacial de estas capas, es importante tener en cuenta que ambas capas deben estar en formato vectorial tipo polígono.

El resultado de la unión espacial del modelo de pendientes por el modelo de precipitación, se reclasificará de acuerdo a la siguiente matriz de susceptibilidad (tabla 7).

Tabla 7. Matriz de susceptibilidad

		precipitación		
		2	3	4
pendiente	1	Bajo	Bajo	Moderado
	2	Bajo	Moderado	Moderado
	3	Moderado	Alto	Alto
	4	Alto	Alto	Alto

Fuente. Salcedo J. (2020). Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, matriz de riesgo adaptada de: Department of earth systems analysis, international institute for Geoinformation science and earth observation.

5.9.1. Proyectar modelos raster a datos vectoriales de tipo polígono

Para poder realizar un geoproceso de union espacial, es necesario tener los dos modelos empleados en formato de datos vectorial, para ello se dirigió a **Arctoolbox, Conversion Tools, From Raster, Raster to Polygon** (imagen 63), se seleccionó cada uno de los modelos, obteniendo para el caso del modelo de precipitación, lo evidenciado en la imagen 64, y para el caso del modelo de pendientes, lo evidenciado en la imagen 65.

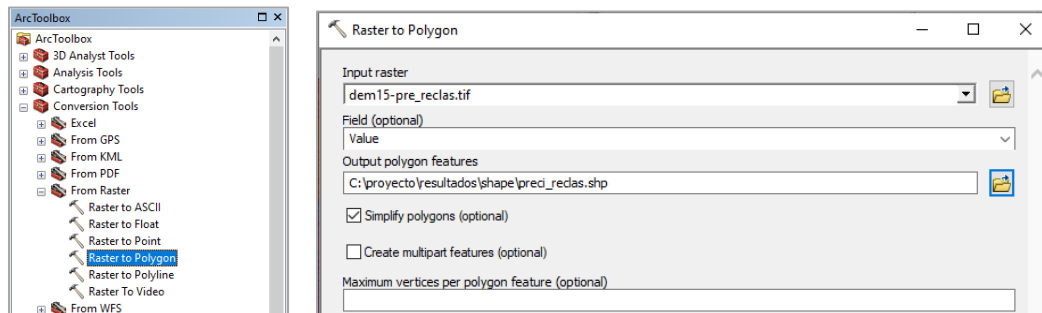


Imagen 63. Configuración de formato vectorial para precipitación

Fuente. Propia

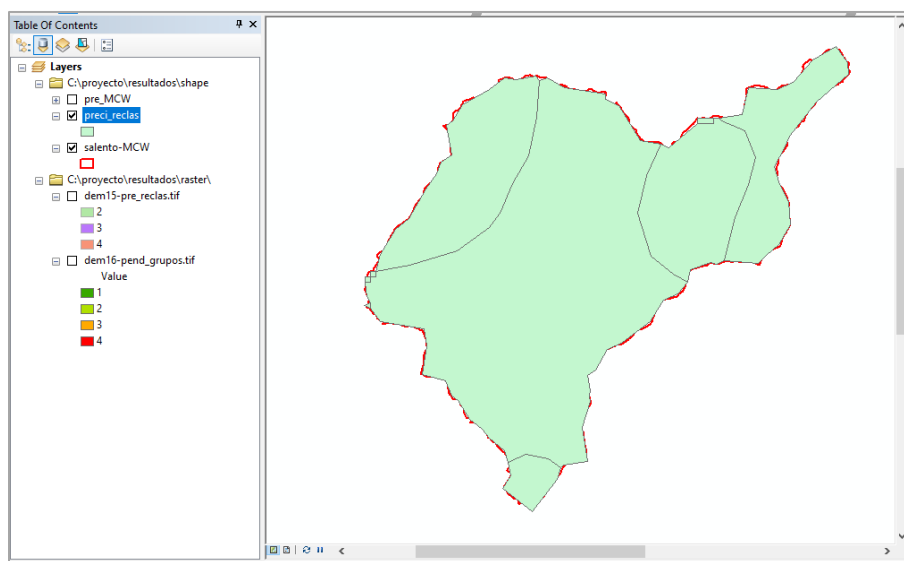


Imagen 64. Formato vectorial para precipitación

Fuente. Propia

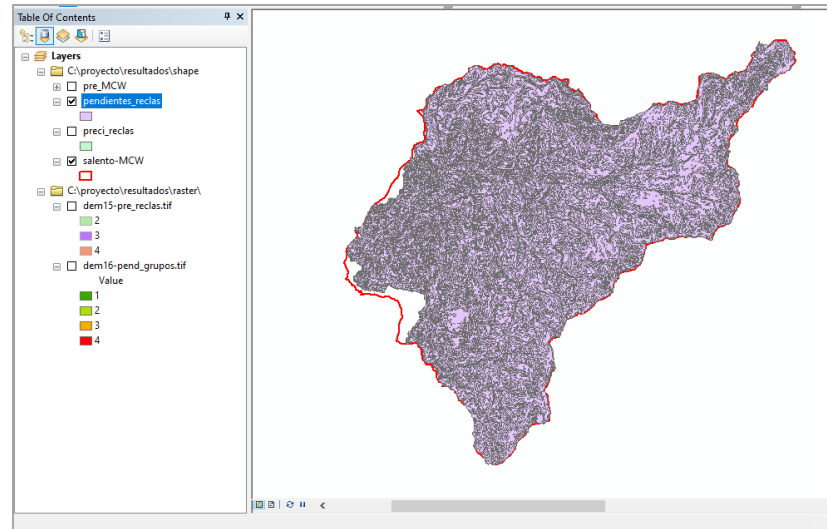


Imagen 65. Formato vectorial para modelo de pendientes

Fuente. Propia

5.9.2. Union espacial Modelo de Pendientes y Precipitación.

Para obtener en una sola capa vectorial la información que contienen los dos modelos empleados, es necesario realizar una unión espacial, la cual permite intersectar áreas comunes entre dos datos de tipo vectorial e incluir en la ventana de atributos la información alfanumérica de cada modelo, configurándolo como se evidencia a continuación (imagen 66).

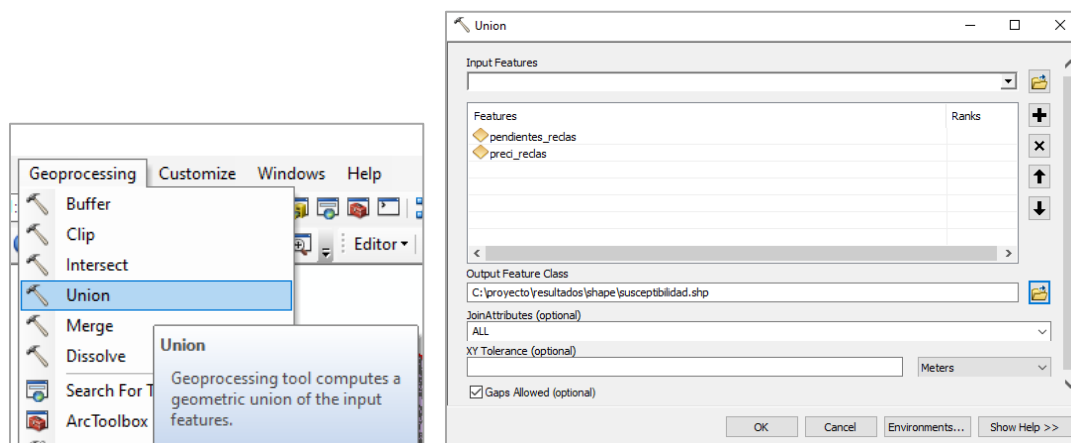


Imagen 66. Configuración para la unión de modelos

Fuente. Propia

Por lo procedido anteriormente, se obtiene como resultado lo mostrado en la imagen 67.



Imagen 67. Unión de modelo de precipitación y de pendientes

Fuente. Propia

Como se observa en la figura, existen algunas áreas donde no se realizó ninguna unión espacial, esto debido a que el modelo de pendientes de la cuenca del municipio de Salento, no abarca toda el área del municipio en su totalidad (recordar que la cuenca no cubre todo el municipio), entonces se hace necesario recortar el modelo de susceptibilidad con el perímetro de la cuenca.

Para ello se pasó el modelo raster de la cuenca a modelo vectorial de tipo polígono, utilizando nuevamente la función **Raster to Polygon** (ver imagen 68).

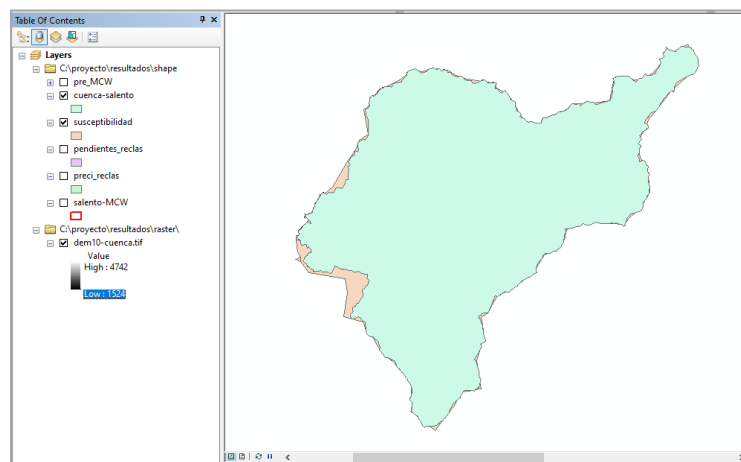


Imagen 68. Modelo raster de la cuenca a modelo vectorial

Fuente. Propia

Ahora se realiza el geoproceso de recorte (Clip), para obtener unicamente los datos del modelo de susceptibilidad del area de la cuenca, configurandolo como se muestra a continuacion. (ver imagen 69)

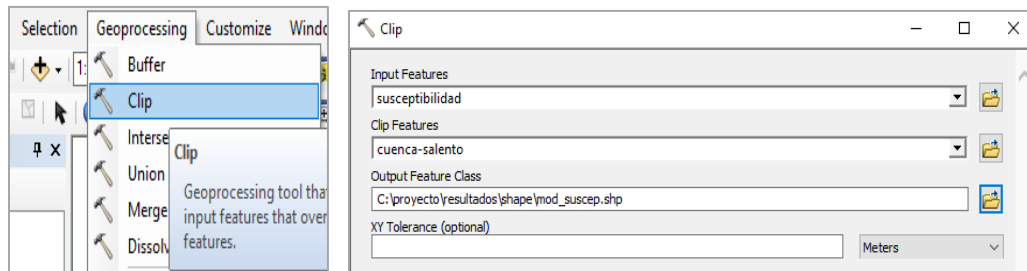


Imagen 69. Configuración para geo proceso de modelo de susceptibilidad

Fuente. Propia

Por lo realizado con antelación en el modelo de susceptibilidad, la resultante se muestra a continuación en la imagen 70.

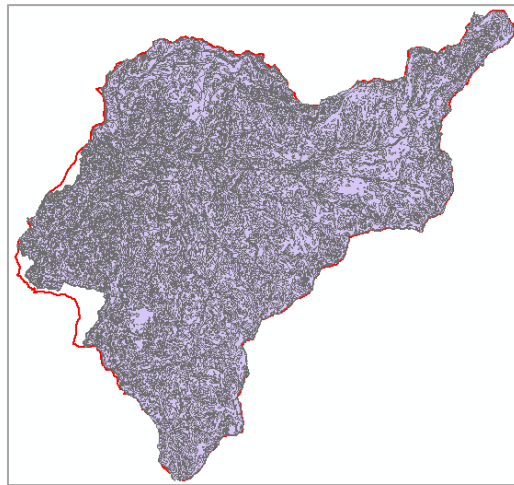


Imagen 70. Geoproceso de modelo de susceptibilidad

Fuente. Propia

5.9.3. Agregar atributos cualitativos al modelo de susceptibilidad

Ahora se agregó un nuevo atributo a la tabla de atributos de la capa del modelo, se asigna que sea de tipo texto para ingresar el nivel de susceptibilidad baja, media o alta. Para ello, se debe abrir la tabla de atributos de la última capa generada y se agrega un nuevo campo, como se muestra a continuación:

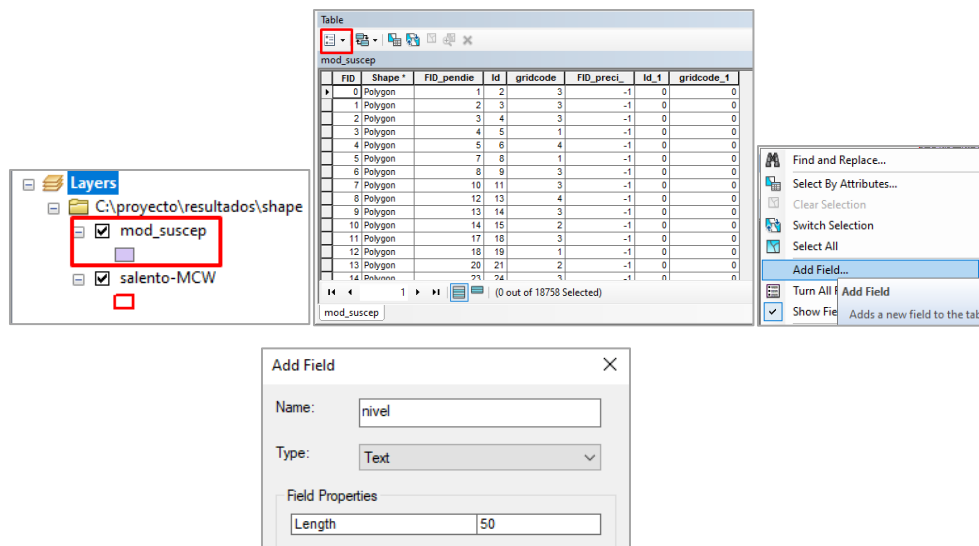


Imagen 71. Configuración de atributos al modelo de susceptibilidad

Fuente. Propia

Ahora, en base a la matriz ponderada se realiza una consulta por atributos, es decir, se busca los polígonos donde su valor para la pendiente sea igual a 1 y donde el valor de precipitación sea equivalente a 2, por lo tanto, se asignará un rango de susceptibilidad baja, un ejemplo de ello es el primer elemento de la matriz (1,1) (Ver tabla 7).

A continuación, se seleccionó por atributos y posteriormente escribimos la consulta o el condicional, como se muestra en la imagen 72.

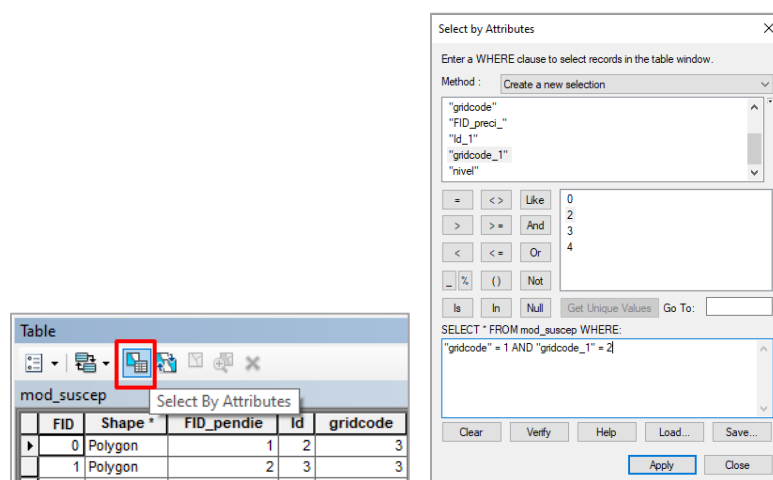


Imagen 72. Configuración de condicionales al modelo de susceptibilidad

Fuente. Propia

El desarrollo de todas las configuraciones anteriormente ejecutadas muestran que para este caso, hay 263 poligonos que cumplen la condicion de tipo de terreno plano, es decir, nivel 1 y el valor de la precipitacion es nivel 2.

FID	Shape	FID_pendie	Id	gridcode	FID_preci	Id_1	gridcode_1	nivel
2274	Polygon	1819	182	1	5	6	2	2
3037	Polygon	2597	259	1	5	6	2	2
3065	Polygon	2624	262	1	5	6	2	2
3218	Polygon	2788	278	1	5	6	2	2
3282	Polygon	2859	286	1	5	6	2	2
3379	Polygon	2961	296	1	5	6	2	2
3411	Polygon	2994	299	1	5	6	2	2
3515	Polygon	3099	310	1	5	6	2	2
3580	Polygon	3165	316	1	5	6	2	2
3621	Polygon	3206	320	1	5	6	2	2
3623	Polygon	3208	320	1	5	6	2	2
3715	Polygon	3299	330	1	5	6	2	2
3716	Polygon	3300	330	1	5	6	2	2
3744	Polygon	3328	332	1	5	6	2	2
3773	Polygon	3356	335	1	5	6	2	2

Imagen 73. Atributos de polígonos del modelo

Fuente. Propia

Ahora, en el campo de “nivel” se asignó el valor de susceptibilidad baja, para ello se usa la calculadora de campos, se da clic derecho sobre el campo a calcular y se selecciona la calculadora de campos y asi se configura como se muestra a continuacion:

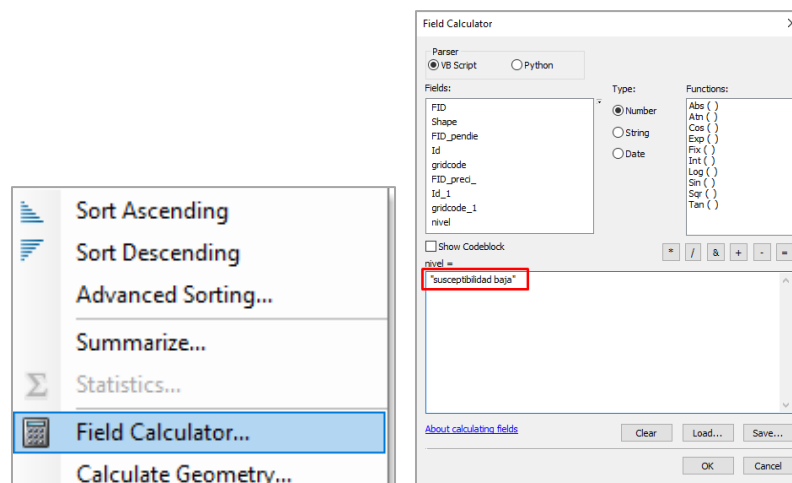
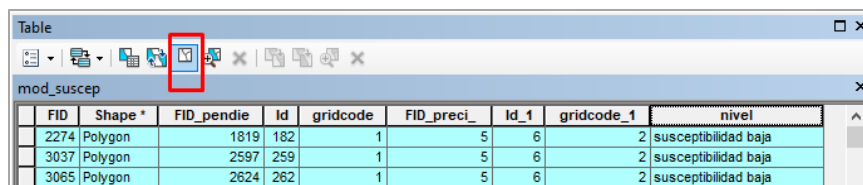


Imagen 74. Calculadora de campos

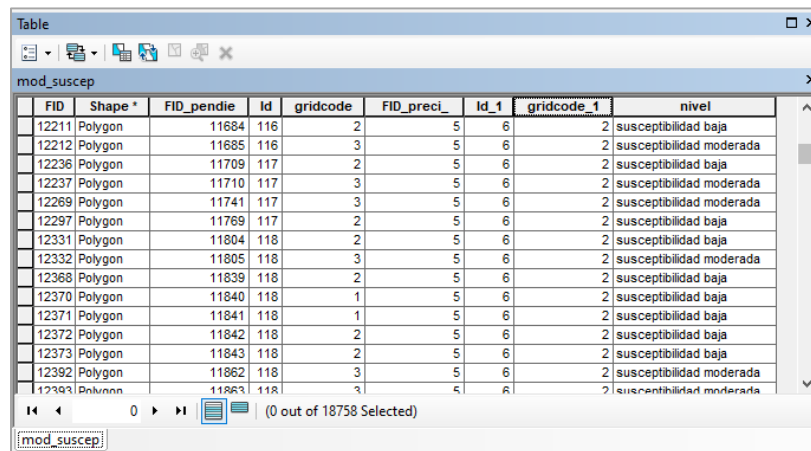
Fuente. Propia

Se realiza el mismo procedimiento para los demas elementos de la matriz (se recomienda una vez hecho el calculo, desactivar la consulta anterior o borrar seleccion de campos, para que no se ejecute la consulta sobre los campos seleccionados).



FID	Shape *	FID_pendie	Id	gridcode	FID_preci	Id_1	gridcode_1	nivel
2274	Polygon	1819	182	1	5	6	2	susceptibilidad baja
3037	Polygon	2597	259	1	5	6	2	susceptibilidad baja
3065	Polygon	2624	262	1	5	6	2	susceptibilidad baja

Finalmente, nuestra tabla de atributos debera quedar clasificada como se muestra a continuacion en la imagen 75.



FID	Shape *	FID_pendie	Id	gridcode	FID_preci	Id_1	gridcode_1	nivel
12211	Polygon	11684	116	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12212	Polygon	11685	116	3	5	6	2	susceptibilidad moderada
12236	Polygon	11709	117	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12237	Polygon	11710	117	3	5	6	2	susceptibilidad moderada
12269	Polygon	11741	117	3	5	6	2	susceptibilidad moderada
12297	Polygon	11769	117	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12331	Polygon	11804	118	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12332	Polygon	11805	118	3	5	6	2	susceptibilidad moderada
12368	Polygon	11839	118	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12370	Polygon	11840	118	1	5	6	2	susceptibilidad baja
12371	Polygon	11841	118	1	5	6	2	susceptibilidad baja
12372	Polygon	11842	118	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12373	Polygon	11843	118	2	5	6	2	susceptibilidad baja
12392	Polygon	11862	118	3	5	6	2	susceptibilidad moderada
12393	Polygon	11863	118	3	5	6	2	susceptibilidad moderada

Imagen 75. Tabla de atributos clasificada

Fuente. Propia

5.10. Geoproceso Dissolver capa

A partir de la tabla de atributos que contiene la característica de nivel de susceptibilidad en la imagen 75, se generó un dissolve para obtener unicamente una capa en formato vectorial de tipo polígono, que contiene un polígono por cada nivel. Para ello se usó la función **Dissolve** (imagen 76) y se configuró para obtener lo que se evidencia en la imagen 77.

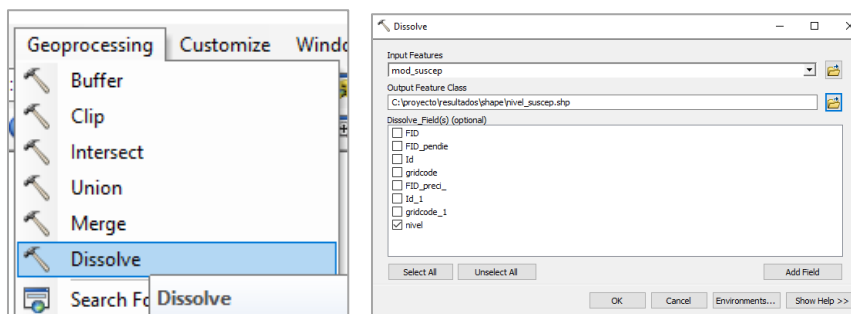


Imagen 76. Configuración de formato vectorial de tipo polígono

Fuente. Propia

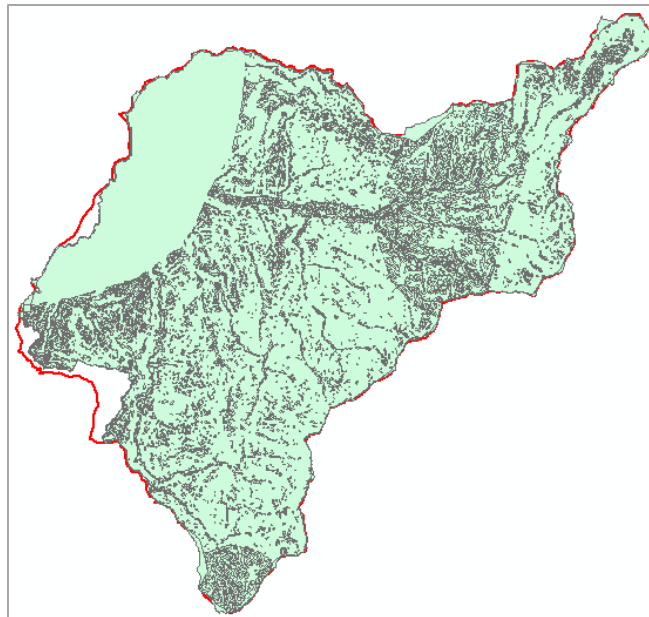


Imagen 77. Modelo de susceptibilidad

Fuente. Propia

Empleando colores semáforo se puede visualizar con mejor claridad los niveles de susceptibilidad en donde el verde es susceptibilidad baja, amarillo susceptibilidad moderada y rojo susceptibilidad alta.

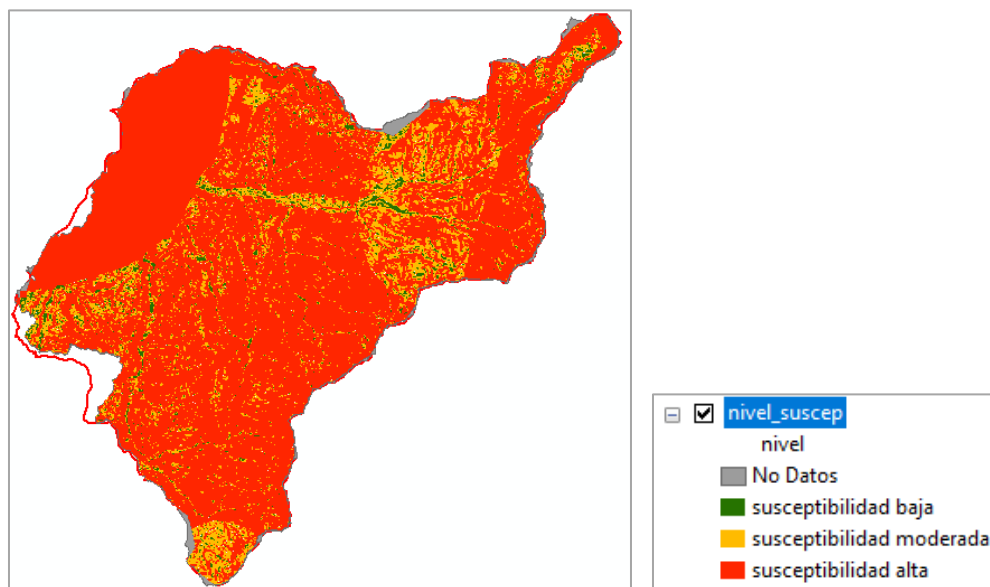


Imagen 78. Modelo de susceptibilidad por categoría de colores

Fuente. Propia

5.11. Validación del modelo de susceptibilidad de deslizamientos de masa en base al tipo de relieve y la precipitación

Para la validación del modelo, se emplearon datos abiertos ofrecidos por el sistema de información de movimientos en masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano, y según el SGC, “es un sistema que permite cargar, administrar y consultar los movimientos en masa ocurridos en Colombia”.

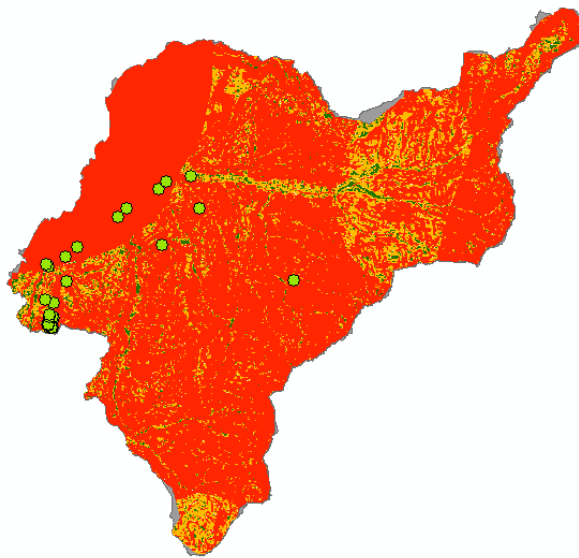


Imagen 79. Movimientos en masa ocurridos en Salento

Fuente. Propia

Para identificar cual es el nivel de susceptibilidad en que se encuentran los eventos ya ocurridos, se procede a realizar una interpolación con el modelo de susceptibilidad. Para ello se implementa el geoproceso de intersect (imagen 80), configurándolo de la siguiente manera:

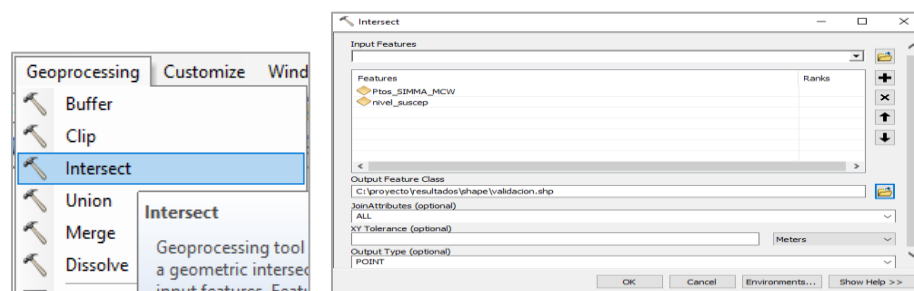


Imagen 80. Configuración de confrontación de modelos

Fuente. Propia

En la capa de puntos resultantes, se verificó la tabla de atributos, allí debera aparecer el nivel de susceptibilidad de acuerdo al resultado obtenido en el modelo.

FID	Shape *	FID_Ptos_S	pto	latitud	longitud	FID_nivel	nivel
0	Point	3	4	4.573611	-75.621389	1	susceptibilidad alta
1	Point	14	15	4.573694	-75.621722	1	susceptibilidad alta
2	Point	13	14	4.573806	-75.622425	3	susceptibilidad moderada
3	Point	18	19	4.574889	-75.622944	1	susceptibilidad alta
4	Point	19	20	4.575167	-75.623056	1	susceptibilidad alta
5	Point	6	7	4.575278	-75.623333	1	susceptibilidad alta
6	Point	20	21	4.575389	-75.623194	1	susceptibilidad alta
7	Point	5	6	4.578056	-75.6225	3	susceptibilidad moderada
8	Point	4	5	4.578333	-75.620556	1	susceptibilidad alta
9	Point	22	23	4.578583	-75.622583	2	susceptibilidad baja
10	Point	21	22	4.578611	-75.621111	3	susceptibilidad moderada
11	Point	12	13	4.578722	-75.621278	3	susceptibilidad moderada
12	Point	23	24	4.579667	-75.622667	1	susceptibilidad alta
13	Point	8	9	4.584978	-75.620919	1	susceptibilidad alta
14	Point	74	75	4.585188	-75.624556	1	susceptibilidad alta

Imagen 81. Nivel de susceptibilidad por punto de registro histórico de movimiento en masa

Fuente. Propia

Igual que en otra oportunidad, se dio la clasificacion del nivel de susceptibilidad por colores en los puntos de registro historico de movimiento en masa en el municipio de Salento Quindio, como se evidencia en la imagen 82.

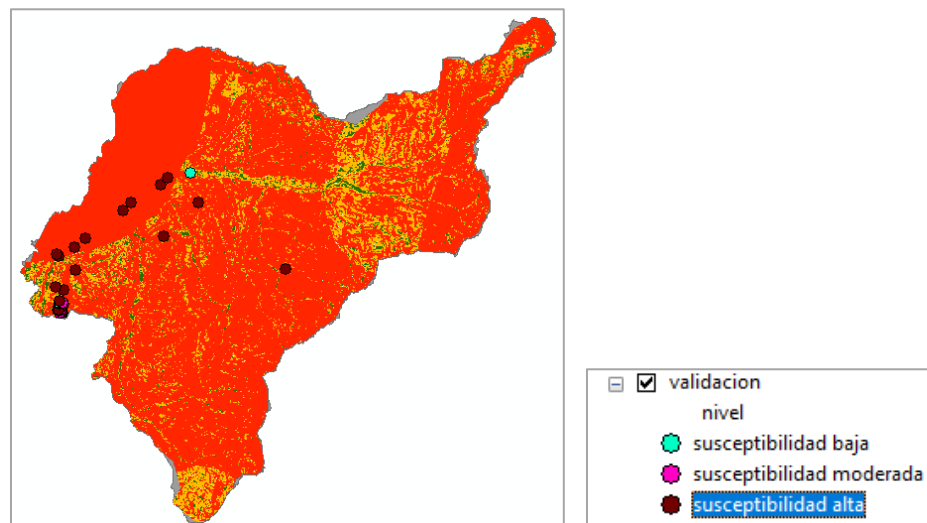


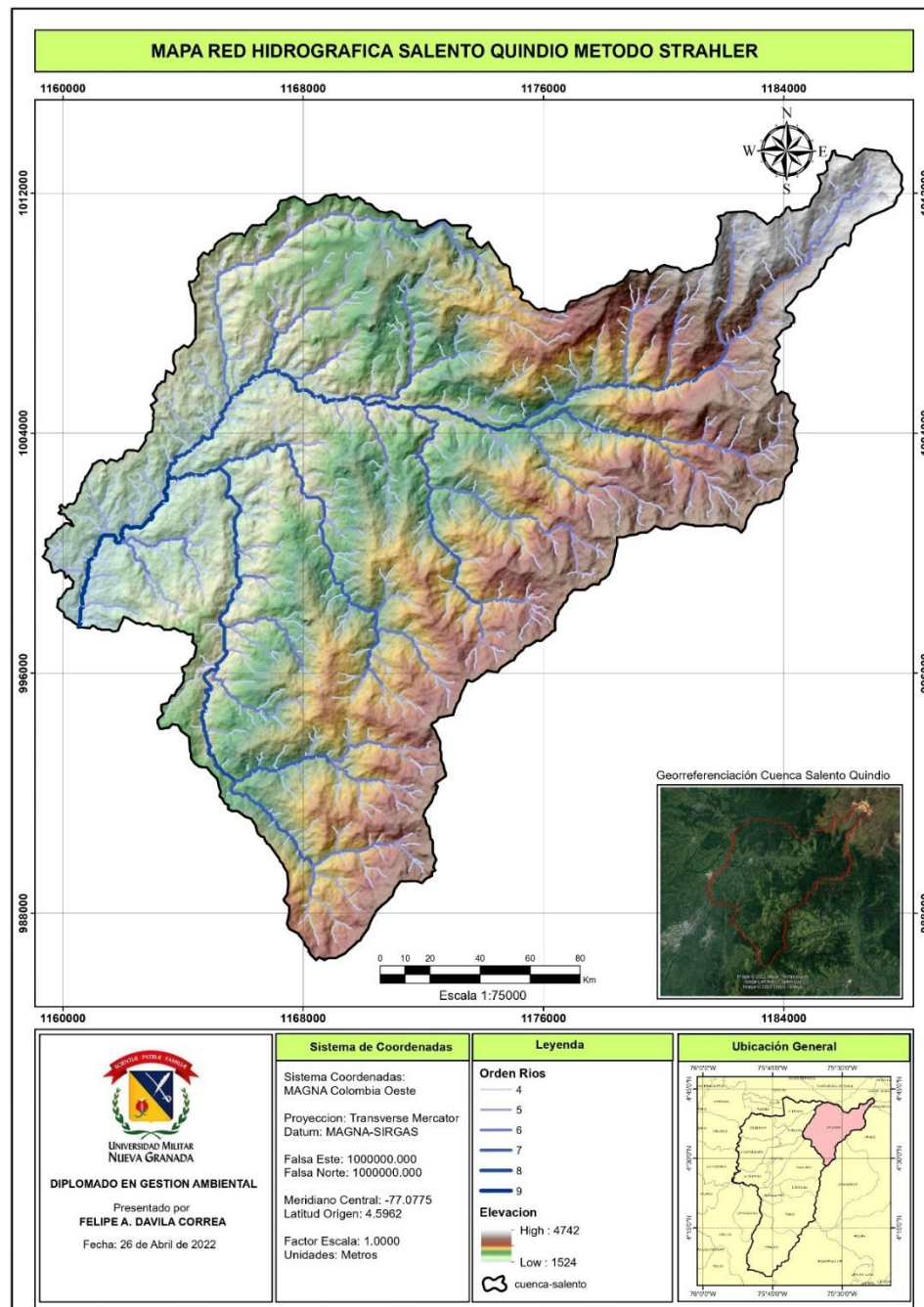
Imagen 82. Modelo de susceptibilidad en puntos de registro histórico de movimiento en masa

Fuente. Propia

6. Resultados

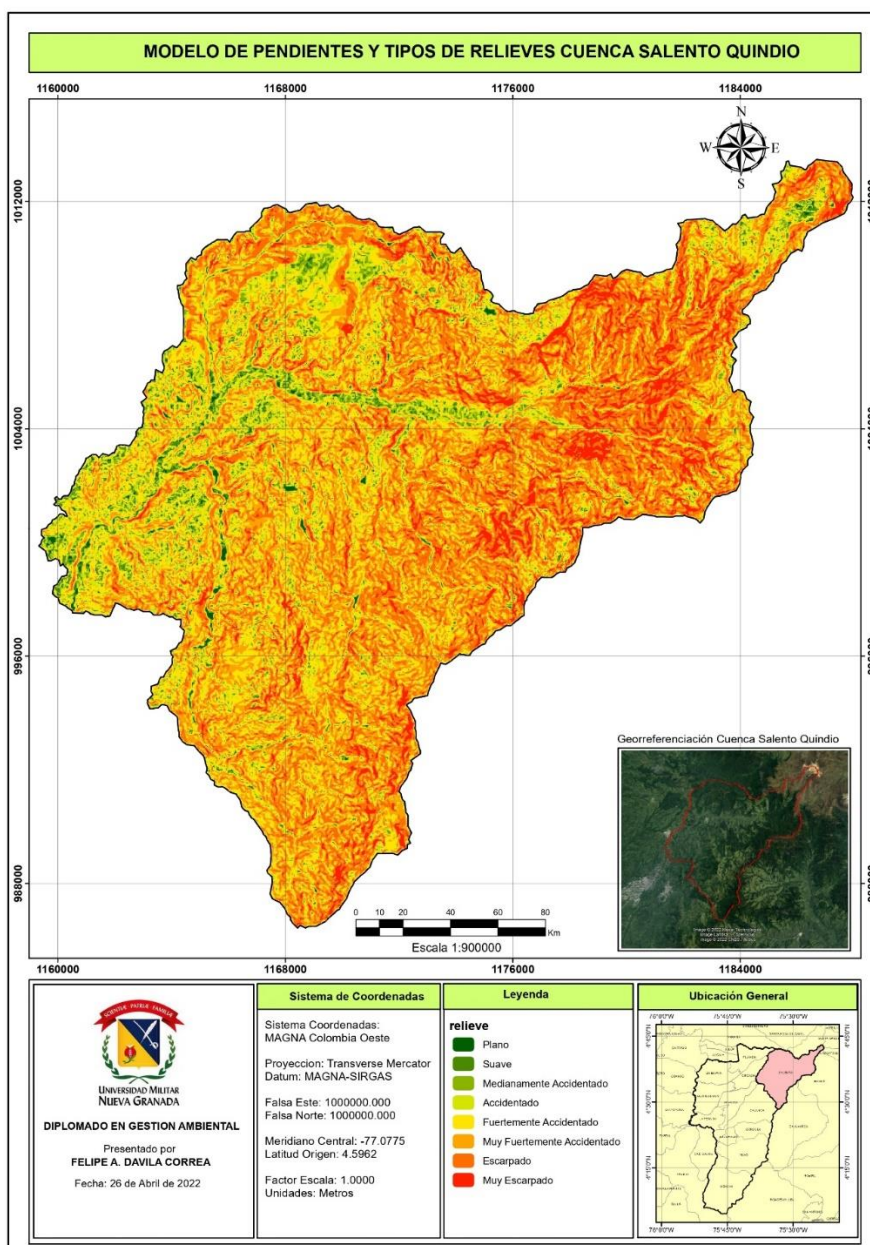
6.1.Cuenca hidrográfica Salento Quindío

La generación de este modelo digital resume que la cuenca del municipio de Salento cuenta con un area equivalente a 34,339.73 hectareas, un perimetro de 112.89 kilometros cuadrados y define que el rio Quindio, el cual es el principal del municipio, tiene una longitud de 43,925.06 metros.



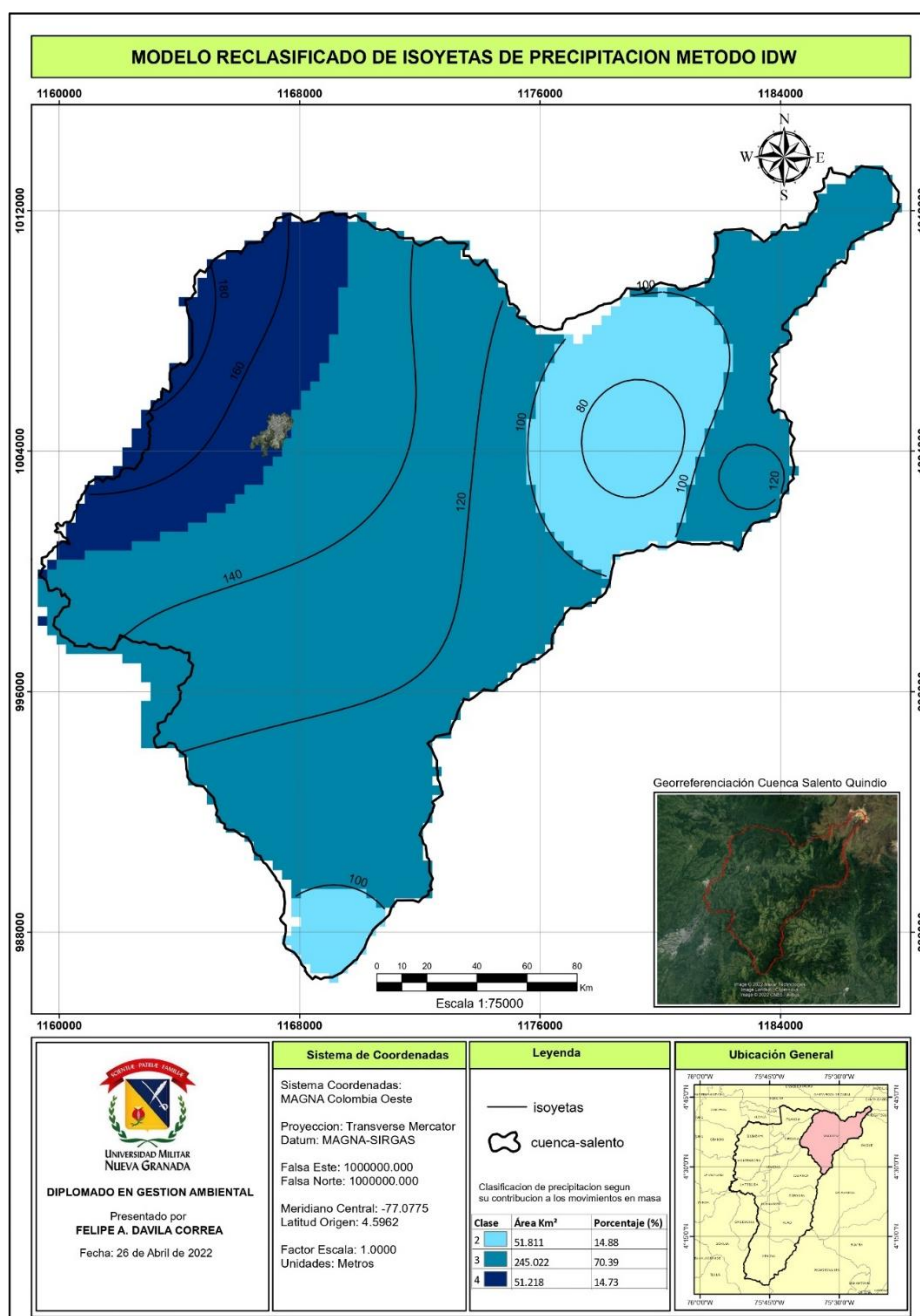
6.2. Modelo de pendientes y tipos de relieve cuenca Salento Quindío

Se generó el modelo digital de elevaciones (DEM) para las pendientes críticas del territorio de estudio, en la Imagen Raster, el cual se relaciona en la imagen 52, en donde los parámetros que establece la generación de un modelo digital de elevaciones para pendientes, está definido por 8 categorías como lo son plano, suave, medianamente accidentado, accidentado, fuertemente accidentado, muy fuertemente accidentado, escarpado y muy escarpado con intervalos de pendientes en porcentaje entre 0 y 3, 3 y 7, 7 y 12, 12 y 20, 20 y 35, 35 y 50, 50 y 75 y mayores a 75, correspondientemente.



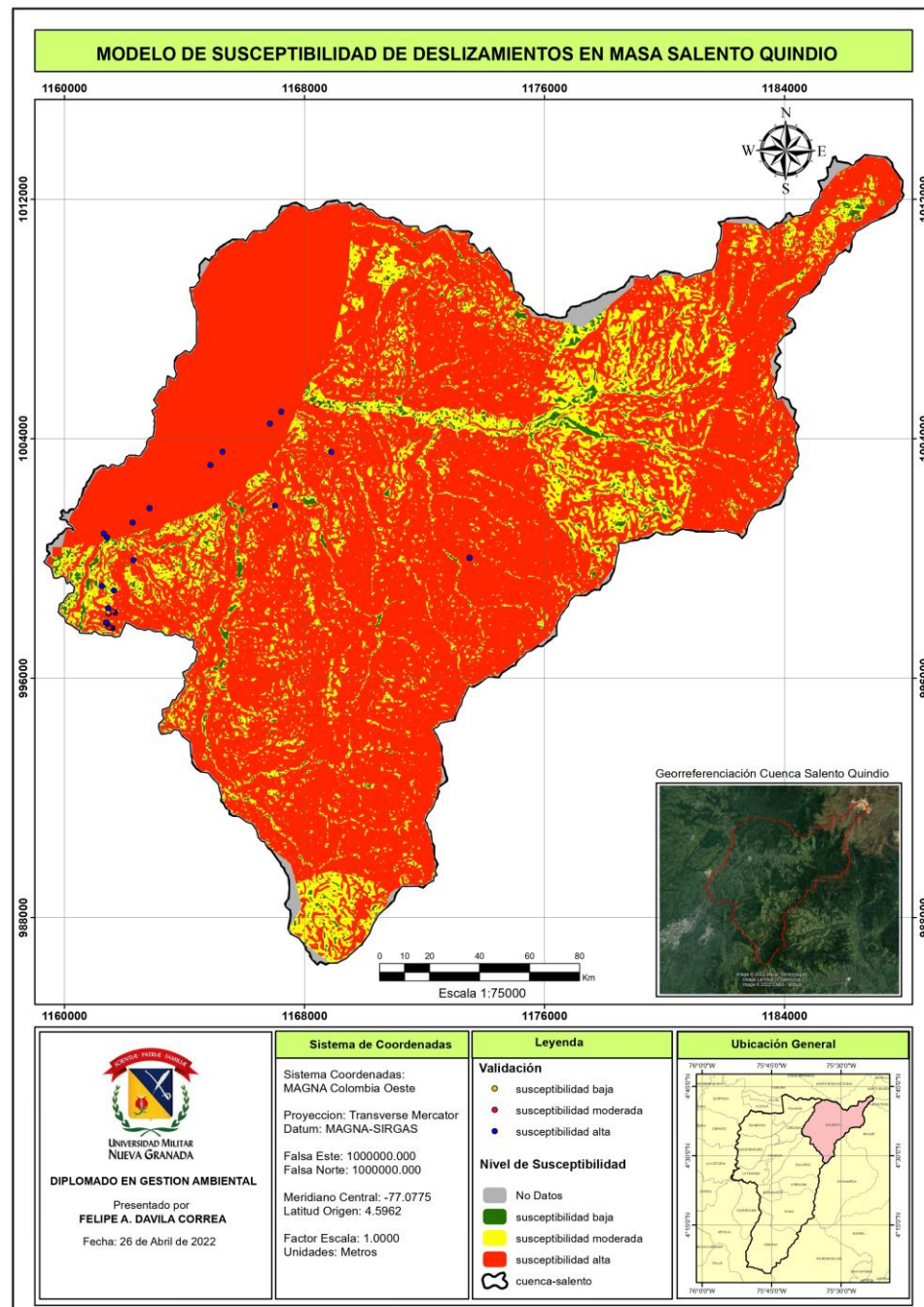
6.3. Modelo de isoyetas de precipitación método IDW

Se generó el modelo digital de elevaciones para las precipitaciones, a partir de bases de datos históricas de lluvias obtenidos del IDEAM, el cual se relaciona en la imagen 60, los intervalos que rigen la interpolación para el modelo de precipitación, categorizan cinco clases de nivel de contribución a los movimientos en masa llamados clase 1, clase 2, clase 3, clase 4 y clase 5, delimitados por valores máximos en milímetros entre 0 – 50, 50 – 100, 100 – 150, 150 – 220 y mayor 220, respectivamente.



6.4. Modelo de susceptibilidad de deslizamientos en masa Salento Quindío

La mayor parte del municipio de Salento está definido según el modelo de susceptibilidad en una vulnerabilidad alta, ya que la topografía de la región está marcada por fuertes inclinaciones categorizado como escarpado, con pendientes prevalecientes entre el 50% y 75%, adicional a ello la riqueza hídrica lo hace más vulnerable en temporadas altas de precipitaciones.



7. Impacto

La pretensión inicial del desarrollo del presente documento, hace un llamado a los entes gubernamentales, alcaldías, gestión del riesgo, no solo del municipio de Salento el cual fue enfoque de estudio, sino todos los departamentos del país, para que, mediante la identificación de una presunta zona de alerta, tomen las delimitaciones pertinentes para reducir, prevenir o mitigar la magnitud de un deslizamiento en masa. Es de resaltar que, todas las vidas son importantes y este tipo de análisis siendo aún más rigurosos incorporando parámetros adicionales para que sea más preciso, logre minimizar los impactos negativos en nuestras comunidades.

La oficina municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Salento, a partir de la entrega de los mapas que se obtuvieron en la ejecución del presente trabajo, puede implementar diferentes controles, que permitan un alcance positivo para abarcar mayores posibilidades en la responsabilidad de la prevención y mitigación previa a la atención de posibles eventos en su territorio a razón de movimientos de tierra, causados especialmente por las altas precipitaciones de la región y sus condiciones topográficas y demás variables evaluadas. Dentro de los controles que se pueden implementar están los siguientes:

- Recorridos periódicos de control y/o vigilancia por los lugares que determina el mapa como susceptibilidad moderada y alta; incluyendo los espacios de tiempo previos a las temporadas de lluvias de Colombia.
- Adelantar gestiones con la administración local, la gobernación del Quindío, la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo o cualquier otra entidad que se enfoque en apoyar proyectos relacionados con situaciones de riesgo, para así mitigar o eliminar el evento de ser posible.
- Realizar campañas de socialización y prevención con la comunidad que está cercana a los diferentes lugares que los mapas muestran riesgos, con el fin de preparar y alistar a la población ante cualquier remoción en masa.

- Generar grupos comunitarios de alertas tempranas a partir de los mapas y los lugares susceptibles que se identifican allí; logrando una comunicación fluida y en tiempo real para prevenir o atender eventos de esta naturaleza.
- Gestionar recursos y proyectos con autoridades ambientales y/o agrícolas con el fin de llevar a estos terrenos algunos procesos que permitan mayor estabilidad de los suelos a partir de reforestación adecuada o de modelos de siembra y productos acorde con las pendientes topográficas del lugar.
- Preparar a la comunidad ante posibles eventos de remisión en masa para cada uno de sus sectores que tenga exposición.
- Entrenar a los diferentes grupos de socorro y de atención de desastres del municipio o del departamento para que conozcan las rutas de ingreso o de salida según el lugar donde se presente el evento, logrando así una coordinación y respuesta oportuna.
- Poder actualizar permanentemente el mapa con los puntos de posibles eventos de remoción subsiguientes que se presenten en la localidad, llevando así un registro estadístico que permita su lectura rápida y la toma de decisiones ante los eventos registrados y su localización.

8. Conclusiones

- Se obtuvo la imagen satelital raster mediante información libre al usuario, ofrecida por el Departamento del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), determinando la posición del municipio de Salento obteniendo un Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución o tamaño de pixel de 30 metros en la componente de horizontal, el cual se relaciona en el capítulo 5.3 del presente documento.
- Se elaboró el plano de modelo de pendientes y tipos de relieve, relacionado en capítulo de resultados numeral 6.2, en donde, porcentualmente se define el municipio de Salento Quindío, en la categoría de relieve fuertemente accidentado, muy fuertemente accidentado y escarpado, determinando el 23.47%, 25.85% y el 26.40%, respectivamente; Por otra parte, se elaboró el plano de modelo de isoyetas de precipitación mediante el método distancia inversa ponderada (IDW), relacionado en capítulo de resultados numeral 6.3, en donde, lo establecido en los parámetros de nivel de contribución a los movimientos en masa, el modelo de interpolación categoriza el municipio en clase 2, clase 3 y clase 4, teniendo predominancia la clase 3 con un porcentaje del 70.39%, abarcando 245.022 km² de Salento.
- Finalmente, como resultado del análisis de los modelos generados, se observa principalmente en el modelo de susceptibilidad de movimientos en masa, que la mayoría de eventos de deslizamientos ya ocurridos, obtuvieron un nivel de susceptibilidad alto. En el modelo generado a partir de las variables de pendiente y precipitación, también se observa que la ocurrencia de este evento presenta una zona o región en el municipio de mayor frecuencia, en donde, tiende a concentrarse la manifestación del evento, lo que indica, que en estos lugares se debe realizar una intervención más detallada in situ e identificar cuáles son los factores detonantes del evento, y cuáles son las consecuencias o número de personas afectadas en la zona de alerta; Sin embargo, y acorde con la entrevista realizada vía telefónica el pasado 23 de agosto de 2022 al contratista encargado de la coordinación de gestión del riesgo del municipio a la fecha de suscripción del presente documento, el funcionario manifestó que, los recursos con los que dispone el municipio están enfocados especialmente a la atención de emergencias y en cuanto a los componentes de conocimiento y reducción del riesgo que hacen alusión a la prevención,

sus recursos son muy limitados, ya que no se cuentan con equipos, software, logística, recursos económicos ni personal especializado o con perfil idóneo para la realización de estos monitoreos. Sumado a ello, el funcionario manifestó que, no se lleva registro físico ni filmico que permita llevar una estadística para identificar los puntos más vulnerables y que se puedan utilizar en los procesos de análisis de vulnerabilidad de movimientos en masa en el modelo de predicción. Por lo anterior, y de acuerdo con el planteamiento del problema identificado en el presente documento, se evidenció a través de la revisión de las bases de datos históricos y cartografías, que el municipio de Salento presenta un riesgo alto ante eventualidades naturales de movimiento en masa a raíz de las altas precipitaciones.

- Se afirma que, este documento satisface parcialmente la visión de lo que se deseaba encontrar, esto debido a que se modeló una zonificación por nivel de susceptibilidad del municipio ante movimientos en masa debido a las altas precipitaciones con áreas de susceptibilidad alta que correspondía al 81.94%, es decir, a 280.33 Km² del territorio municipal y el modelo esperado al inicio del desarrollo del presente documento tuviera sectores de vulnerabilidad alta más sectorizados o específicos en el modelo; Esto debido a las variables que no pudieron ser consideradas en las que se encuentra la erosividad, usos de suelo, tipos de arcilla, textura, taxonomía densidad de fracturamiento, sistemas morfogénico, entre otros, por la escasez en la información registrada en el municipio.

9. Referencias Bibliográficas

Gobernacion del Quindio . (2020). Obtenido de GOV.CO: <https://quindio.gov.co/el-departamento/generalidades/datos-geograficos-basicos>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (16 de Abril de 2015). Obtenido de IDEAM: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/quindio_texto.pdf

Bello, O., Bustamante, A., & Pizarro, P. (2020). *Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
www.cepal.org/apps

García Charria, W. (2012). *El sistema complejo de la cuenca hidrográfica*.

Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*.

Zapata Buitrago, C. M. (2020). *Planes de gestión de riesgo aplicado a la amenaza de la inundación producido por las altas precipitaciones en la Orinoquia*.

Salcedo J. (2020). *Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, matriz de riesgo*.

Calderón Díaz, d. h., & Montoya García, j. (2016). *Integración de herramientas SIG con modelos hidrológicos e hidráulicos para la generación de mapas de áreas susceptibles de inundación. caso de estudio la cuenca del río Acacías – municipio de Acacías, Meta*.

ArcGis. (2022). *Introduccion a SIG*. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>

Cardona, B. L. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
<https://core.ac.uk/download/pdf/35294551.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2022). *Geoportal DANE*.
Geovisores. <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/>

Estrada Orozco, N. K. (2017). *Landslide susceptibility prediction in a mountainous catchment:*

the naranjo basin, western Guatemala. Liège Université.

INGEOMINAS. (2010). *Documento Metodológico De La Zonificación De Susceptibilidad Y Amenaza Relativa Por Movimientos En Masa Escala 1:500.000.* 2, 127.

Pérez, M., & Rojas, J. (2005). *Estudio de vulnerabilidad ante deslizamientos de tierra en la Microcuenca las Marías.* Telica, León. Universidad Nacional Agraria.

Servicio Geológico Colombiano, S. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. In *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.*
<https://doi.org/10.32685/9789585978225>

UNGRD/Unidad nacional para la gestion del riesgo de Desastres. (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia.*
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

Editorial La Republica, 2022. Deslizamiento de tierra en limites entre Pereira y Dosquebradas dejo 11 fallecidos. Recuperado el 17 de Marzo del 2022 de
<https://www.larepublica.co/economia/deslizamiento-de-tierra-en-limites-entre-pereira-y-dosquebradas-dejo-multiples-fallecidos-3299196>

Corporación Autónoma Regional del Quindío [CRQ],2022. Boletín hidrometereologico.
Recuperado el 22 de Abril del 2022 de <https://crq.gov.co/boletines-hidrometereologicos/>

Publicaciones Semana S.A, 2022. Tragedia en Quindío: pareja murió tras un deslizamiento de tierra en Salento. Recuperado el 28 de Abril del 2022 de
<https://www.semana.com/nacion/articulo/tragedia-en-quindio-pareja-murio-tras-un-deslizamiento-de-tierra-en-salento/202233/>

Caracol radio, 2021. Salento, Quindío en alerta roja por derrumbes debido a las lluvias.
Recuperado el 28 de Abril del 2022 de
https://caracol.com.co/emisora/2021/12/27/armenia/1640632659_670773.html

La Crónica del Quindío, 2021. Por lluvias, en Salento se presentaron derrumbes en vías terciarias. Recuperado el 29 de Abril de 2022 de

<https://www.cronicadelquindio.com/noticias/region/por-lluvias-en-salento-se-presentaron-derrumbes-en-vias-terciarias>