

**Evaluación de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa en el Municipio de Bucaramanga a una Escala 1:25.000, Partiendo del Modelamiento de una Red Neuronal Artificial.**

**Trabajo de grado en modalidad de práctica empresarial para optar el título de Geólogo**

**Convenio de Apoyo Interinstitucional # 7120-08**

**Autor:**

**Edinson Fabian Tarazona Serrano**

**Director:**

**Juan Diego Colegual Guitierrs**

**Geólogo, PhD.**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas**

**Escuela de Geología**

**Bucaramanga**

**2017**

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>1. GENERALIDADES DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL</b> .....	17
<b>1.1. Objetivos</b> .....	17
<b>1.1.1 Objetivo general</b> .....	17
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	17
<b>1.2. Planteamiento del problema</b> .....	18
<b>1.3. Justificación</b> .....	19
<b>1.4. Área de estudio</b> .....	20
<b>1.4.1 Localización</b> .....	20
<b>1.4.2 Vías de acceso</b> .....	21
<b>1.5 Geología</b> .....	22
<b>1.5.1 Unidades Litoestratigráficas</b> .....	22
<b>1.5.2 Geomorfología</b> .....	25
<b>1.5.3 Neotectónica</b> .....	26
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	27
<b>2.1 Susceptibilidad a Movimientos en Masa</b> .....	27
<b>2.2 Técnicas para evaluar la susceptibilidad a Movimientos en masa</b> .....	28
<b>2.3 Redes Neuronales Artificiales</b> .....	28
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	31
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	34
<b>4.1 Recopilación de información</b> .....	35
<b>4.1.1 Revisión bibliográfica</b> .....	35

<b>4.1.1.1 Primer grupo</b> .....	36
<b>4.1.1.2 Segundo grupo</b> .....	37
<b>4.1.2 Análisis bibliográfico</b> .....	39
<b>4.1.3 Síntesis bibliográfica</b> .....	41
<b>4.2 Definición de variables</b> .....	42
<b>4.2.1 Verificación de datos</b> .....	44
<b>4.2.1.1 Modelo Digital del Terreno (MDT)</b> .....	44
<b>4.2.2 Clasificación y obtención de mapas</b> .....	46
<b>4.2.2.1 Cobertura y Uso Actual del Suelo</b> .....	46
<b>4.2.2.2 Conflicto de Uso del Suelo</b> .....	48
<b>4.2.2.3 Curvatura</b> .....	49
<b>4.2.2.4 Distancia a vías, ríos y fallas</b> .....	51
<b>4.2.2.5 Evaporación</b> .....	54
<b>4.2.2.6 Geología</b> .....	55
<b>4.2.2.7 Orientación</b> .....	57
<b>4.2.2.8 Pendiente</b> .....	59
<b>4.2.2.9 Precipitación</b> .....	60
<b>4.2.2.10 Rugosidad</b> .....	62
<b>4.2.2.11 Zona dinámica</b> .....	64
<b>4.2.2.12 Zona geotécnica</b> .....	66
<b>4.3 Obtención de datos de entrenamiento, simulación y validación</b> .....	67
<b>4.3.1 Normalización</b> .....	68
<b>4.3.2 Puntos de entrenamiento</b> .....	71
<b>4.3.3 Creación de las matrices</b> .....	72

<i>4.3.3.1 Matriz de entrenamiento</i> .....	73
<i>4.3.3.2 Matriz de objetivos</i> .....	73
<i>4.3.3.3 Matriz de simulación</i> .....	74
<b>4.4 Ejecución de la RNA, entrenamiento y procesamiento</b> .....	75
<b>4.4.1 Entrenamiento</b> .....	75
<b>4.4.2 Procesamiento</b> .....	79
<b>4.5 Generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa</b> .....	80
<b>4.5.1 Obtención del mapa se susceptibilidad</b> .....	82
<b>4.6 Validación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa</b> .....	85
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	94
<b>5.1. Primer conjunto de datos</b> .....	94
<b>5.2. Visualización de datos</b> .....	96
<b>5.3. Análisis de los métodos de evaluación</b> .....	99
<b>5.3.1 Grafica de relación de frecuencia</b> .....	100
<b>5.3.2 Curva de éxito</b> .....	100
<b>5.3.3 Curva de predicción</b> .....	100
<b>5.4. Mapa de susceptibilidad a Movimientos en masa del municipio de Bucaramanga</b> ..	101
<b>5.4.1 Categoría de susceptibilidad 1, Muy baja</b> .....	102
<b>5.4.2 Categoría de susceptibilidad 2, Baja</b> .....	103
<b>5.4.3 Categoría de susceptibilidad 3, Moderada</b> .....	104
<b>5.4.4 Categoría de susceptibilidad 4, Alta</b> .....	104
<b>5.4.5 Categoría de susceptibilidad 5, Muy alta</b> .....	105
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	108
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	110

**LISTA DE FIGURAS**

<i>Figura 1</i> , Municipio de Bucaramanga.....	21
<i>Figura 2</i> , Unidades litológicas del Area Metropolitana de Bucaramanga tomado de INGEOMINAS (2001).....	24
<i>Figura 3</i> , Arquitectura de Red Neuronal Artificial utilizada en este estudio, tomado y modificado de Tien et al., 2012.....	29
<i>Figura 4</i> , Metodología.....	34
<i>Figura 5</i> , acercamiento del primer mapa de curvatura utilizado.....	45
<i>Figura 6</i> , Mapa de Cobertura y Uso Actual de la tierra.....	48
<i>Figura 7</i> , Mapa de Conflicto de Uso del Suelo.....	49
<i>Figura 8</i> , Mapa de curvatura.....	50
<i>Figura 9</i> , Mapa de distancia a vías.....	51
<i>Figura 10</i> , Mapa de distancia a drenajes.....	52
<i>Figura 11</i> , Mapa de distancia a fallas.....	53
<i>Figura 12</i> , Mapa de evaporación anual.....	55
<i>Figura 13</i> , Mapa de geología.....	57
<i>Figura 14</i> , Mapa de orientación.....	58

<i>Figura 15</i> , Mapa de pendiente.....	60
<i>Figura 16</i> , Mapa de Precipitación anual.....	61
<i>Figura 17</i> , Mapa de rugosidad.....	64
<i>Figura 18</i> , Mapa de zonas dinámicas.....	66
<i>Figura 19</i> , Mapa de zonas geotectónicas.....	67
<i>Figura 20</i> : Matriz de entrenamiento.....	73
<i>Figura 21</i> , Matriz de objetivos.....	74
<i>Figura 22</i> : Matriz de simulación.....	75
<i>Figura 23</i> , Creación de la RNA en la herramienta nntool de MATLAB R2014A.....	76
<i>Figura 24</i> , Entrenamiento de la RNA en la herramienta nntool de MATLAB R2014A.....	77
<i>Figura 25</i> , Matriz de salida de la RNA visualizada en MATLAB R2014A.....	80
<i>Figura 26</i> , Matriz de resultados con coordenadas, visto en MATLAB R2014A.....	81
<i>Figura 27</i> , Visualización de datos de la RNA.....	82
<i>Figura 28</i> , Mapas de susceptibilidad clasificados con diferentes métodos.....	84
<i>Figura 29</i> , Mapa de susceptibilidad clasificado por el método Quantile.....	85
<i>Figura 30</i> , Diagrama de Relación de frecuencia.....	88
<i>Figura 31</i> , Curva de éxito.....	93

<i>Figura 32</i> , Curva de predicción.....	93
<i>Figura 33</i> , Entrenamientos de RNA.....	97
<i>Figura 34</i> , Proceso de entrenamiento con tamaño de celda de 56x56.....	99

**LISTA DE TABLAS**

<i>Tabla 1. Leyenda de clasificación de la cobertura y uso del suelo.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2. Categorías de conflicto de Uso del Suelo.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3. Clasificación de curvatura.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4. Categorías de Distancia de vías.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 5. Categorías de Distancia de fallas.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 6. Categoría de Distancia de drenajes.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 7. Clasificación de la evaporación anual.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Valor de ID de las formaciones Geológicas.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Clasificación de la orientación según los grados.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 10. Clasificación de la pendiente según grados.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11. Clasificación de la precipitación anual.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12: Tabla de Rugosidad.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 13: Clasificación utilizada de Rugosidad.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 14. Clasificación e ID de Zona dinámica.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 15. Clasificación e ID de Zona geotécnica.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 16. Valores normalizados.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 17. Resultados de diferentes entrenamientos.....</i>	<i>77</i>

<i>Tabla 18. Resultados de RNA con diferentes matrices de entrenamiento.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 19. Grados de susceptibilidad.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 20. Porcentaje y porcentaje acumulado de los pixeles que conforman el mapa de susceptibilidad.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 21. Distribución por categorías de susceptibilidad de los movimientos en masa de la fase de entrenamiento de la red.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 22. Proporción de frecuencia acumulada según índice de susceptibilidad.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 23. Tabla de contingencia.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 24. Número de pixeles de entrenamiento clasificados en las categorías de susceptibilidad.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 25. Número de pixeles de validación clasificados en las categorías de susceptibilidad.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 26. Tabla de contingencia para la curva de éxito.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 27. Tabla de contingencia para la curva de éxito.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 28. Tabla de contingencia para la curva de éxito.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 29. Tabla de contingencia para la curva de éxito.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 30. Tabla de contingencia para la curva de éxito.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 31. Tabla de contingencia para la curva de predicción.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 32. Tabla de contingencia para la curva de predicción.....</i>	<i>91</i>

<i>Tabla 33. Tabla de contingencia para la curva de predicción.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 34. Tabla de contingencia para la curva de predicción.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 35. Tabla de contingencia para la curva de predicción.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 36, valores de especificidad, sensibilidad y 1-especificidad para la curva de éxito. ....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 37. Valores de especificidad, sensibilidad y 1-especificidad para la curva de predicción.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 38, Resultados de RNA con diferentes matrices de entrenamiento.....</i>	<i>96</i>

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA A UNA ESCALA 1:25.000, PARTIENDO DEL MODELAMIENTO DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL\*.

**AUTOR:** EDINSON FABIAN TARAZONA SERRANO\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** REDES NEURONALES ARTIFICIALES, SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA, BUCARMANGA.

### DESCRIPCIÓN:

El municipio de Bucaramanga está ubicado en la parte septentrional de la cordillera de los andes, en el área de su jurisdicción tienen incidencia de las fallas Bucaramanga, Suárez, y Rio de oro, lo cual se ve reflejado en pendiente elevadas y constantes movimientos sísmicos, esto sumado a los fenómenos climatológicos ocasionales, ocasiona una alta susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio y zonas aledañas.

Partiendo de la necesidad de contar con la identificación más precisa y objetiva que se pueda tener frente a la zonificación de movimientos en masa, y buscando mejorar aspectos como la subjetividad presente en el método heurístico, la cantidad de datos que necesitan los métodos probabilísticos, la presente práctica empresarial obtendrá la susceptibilidad a movimientos en masa para el municipio de Bucaramanga por medio del modelamiento de una Red Neuronal Artificial con el fin de involucrar características como, objetividad en la evaluación de variables, autoevaluación de resultados, capacidad de procesar grandes volúmenes de información, y aprendizaje según los datos utilizados.

Para lo cual se desarrolló una metodología con base en diferentes autores, en la cual se contemplan etapas de recolección, implementación y desarrollo de información en Sistemas de Información Geográficos (SIG), verificación de las variables a utilizar, obtención de datos de entrenamiento, simulación y validación de la RNA así como la creación y procesamiento de la misma, generación y validación del mapa de susceptibilidad. Al final de la práctica se realiza un análisis a todo el proceso metodológico y se concluyen diferentes aspectos del proceso realizado.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, Geólogo PhD.

**ABSTRACT**

**TITLE:** EVALUATION OF SUSCEPTIBILITY BY MASS MOVEMENTS IN THE MUNICIPALITY OF BUCARAMANGA AT A SCALE 1: 25,000, STARTING FROM MODELING OF AN ARTIFICIAL NEURONAL NET \*.

**AUTHOR:** EDINSON FABIAN TARAZONA SERRANO\*\*.

**KEYWORDS:** ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, SUSCEPTIBILITY TO MASS MOVEMENTS, BUCARMANGA.

**DESCRIPTION:**

The municipality of Bucaramanga is located in the northern part of the Cordillera de los Andes, in the area of its jurisdiction have incidence of Bucaramanga, Suárez, and Rio de Oro, which is reflected in high slopes and constant seismic movements, This added to the occasional climatological phenomena, causes a high susceptibility to mass movements in the municipality and surrounding areas.

Starting from the need to have the most precise and objective identification that can be faced with the zoning of mass movements, and seeking to improve aspects such as the subjectivity present in the heuristic method, the amount of data needed by probabilistic methods, This business practice will obtain the susceptibility to mass movements for the municipality of Bucaramanga through the modeling of an Artificial Neural Network in order to involve characteristics such as objectivity in the evaluation of variables, self-evaluation of results, ability to process large volumes of information , And learning according to the data used.

For this, a methodology based on different authors was developed, in which steps are contemplated for the collection, implementation and development of information in Geographic Information Systems (GIS), verification of the variables to be used, obtaining training data, simulation and Validation of RNA as well as the creation and processing of the same, generation and validation of the map of susceptibility. At the end of the practice an analysis is made to the entire methodological process and different aspects of the process are concluded.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, Geologist PhD.

## INTRODUCCIÓN

El municipio de Bucaramanga está ubicado en la parte septentrional de la cordillera de los andes, en él, tienen incidencia las fallas Bucaramanga, Suárez, y Rio de oro, lo cual aporta una compleja geología que se ve traducida en pendiente elevadas y constantes movimientos sísmicos. Esto, sumado a los fenómenos climatológicos, ocasiona una alta susceptibilidad a eventos naturales en el municipio y zonas aledañas. Los movimientos en masa (MM) son fenómenos naturales que resultan de la interacción de varios elementos, entre ellos la Geomorfología, la Geología, los usos y conflictos de uso del suelo, al igual que la acción antrópica. Con el fin de identificar y medir la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa que se presenta en la zona, se han realizado diferentes estudios como los de Delgado y Rivera (2010), Blanco y Jiménez (2012), Rodríguez y Rueda (2014), y de organismos estatales, como la Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, (CDMB), la alcaldía municipal y el Servicio Geológico Colombiano, (SGC), con el fin de determinar la susceptibilidad y la amenaza a MM en los trabajos anteriores se han implementado metodologías, como la heurística, determinística y la estadística, cada una de ellas aportan ventajas y desventajas en la identificación de susceptibilidad a MM.

En la presente práctica empresarial suscrita en el convenio de apoyo interinstitucional número 7120-08 entre la CDMB, y la Universidad Industrial de Santander (UIS), se utilizan las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para identificar la susceptibilidad a MM en el municipio de Bucaramanga, esta técnica está comprendida en la inteligencia artificial, utiliza algoritmos para copiar habilidades animales como identificación de patrones, auto aprendizaje, evaluación de criterios y toma de decisiones. Para lo cual se desarrolló una metodología con base en autores como

Chauhan, Sharma, Arora, Gupta (2010), Gomeza & Kavzoglu (2005), Londoño (2007), Negnevitsky (2002), Prabhan y Lee (2010), Prabhan y Lee (2010c), Tien Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug, Dick, (2012), Tunusluoglu Gokceoglu, Sonmez, Nefeslioglu (2007),

Valdés, González, Will (2011),

en la cual se contemplan etapas de recolección, implementación y desarrollo de información de Sistemas de Información Geográficos, (SIG), verificación de las variables a utilizar, obtención de datos de entrenamiento, simulación y validación de la RNA así como la creación y procesamiento de la misma, y por último la generación y validación del mapa de susceptibilidad. Al final de la práctica se realiza un análisis a todo el proceso metodológico y se realizan conclusiones del proceso realizado.

## **1. GENERALIDADES DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL**

### **1.1 Objetivos**

#### **1.1.1 Objetivo general de la práctica empresarial**

Zonificar la susceptibilidad a movimientos en masa para el municipio de Bucaramanga, partiendo del procesamiento de una red neuronal artificial.

#### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Recopilar datos e información geológica, geomorfológica y edafológica del municipio de Bucaramanga.
- Determinar los criterios adecuados y necesarios para la determinación de la susceptibilidad a movimiento en masa, según la escala de trabajo y la metodología utilizada.
- Generar un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para el municipio de Bucaramanga.
- Analizar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa y la metodología empleada para su generación.

## 1.2 Planteamiento del problema

Los movimientos en masa pertenecen al normal desarrollo de la geomorfología terrestre, en estos, influyen factores intrínsecos del terreno como pendiente, drenaje natural, densidad de fracturamiento, entre otros; como también factores extrínsecos asociados al hombre y al clima, entre los que se destacan, avenidas torrenciales, usos de suelo, cortes y sobrecargas a taludes. La diversidad de factores aporta dificultad para el análisis de estos eventos. Siendo la identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa necesaria para poder medir la amenaza y el riesgo que presenta una zona frente a MM, es necesario una metodología clara y precisa para su definición. Al momento de evaluar la susceptibilidad el profesional que realiza la tarea puede utilizar diferentes metodologías, Aristizábal y Shuichiro, en el 2006 las agrupan en tres, heurísticas, estadísticas y determinística, la metodología empleada en cada trabajo depende de la información con que se cuenta, la escala de trabajo y el alcance de este.

El método heurística, utilizada por el SGC, Leiva 2012, se basa en la experiencia y el conocimiento de quien lo implementa, aportando así altos grados de subjetividad a los trabajos, aunque se facilita el trabajo en grandes zonas. El método determinística requiere información precisa de la zona de estudio y no tolera incertidumbre en la información, este se utiliza en gran medida para la evaluación de la amenaza. El método estadística requiere inventarios precisos de zonas donde hayan ocurrido movimientos en masa.

Los mapas de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa son utilizados tanto en la planificación de los municipios, al ofrecer un instrumento para identificar fenómenos de remoción en masa, como en la mitigación de la amenaza, siendo el insumo principal para el análisis, aunque los mapas de zonificación de susceptibilidad a MM son parte fundamental en el ordenamiento del

terreno, en ocasiones se presentan dificultades metodológicas por no contar con información de las variables o los resultados no se ajustan a la realidad por no implementar una metodología apropiada en su obtención o no saberla desarrollar.

Buscando mejorar los inconvenientes antes mencionados se propone la utilización de Redes Neuronales Artificiales para la elaboración de un mapa de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Bucaramanga, este método al estar comprendido en la inteligencia artificial basa sus cálculos en algoritmos e intenta copiar el proceso de aprendizaje del cerebro al comparar, identificar y clasificar las zonas susceptibles, de esta forma se espera que el método aporte: flexibilidad en la información con que se realiza el análisis, objetividad que se pierden con otros métodos, evaluación de datos obtenidos, y capacidad de procesar grandes volúmenes de información.

### **1.3 Justificación**

En el reglamento de la UIS, el objetivo de una práctica empresarial es la adquisición de experiencia académica de interacción a través de proyectos según las necesidades de la entidad y comunidades donde se realiza la práctica. El crecimiento indiscriminado de las ciudades colombianas, causado en su mayor parte por el conflicto armado interno, la situación de pobreza extrema en el país y la falta de oportunidades, ha conllevado al asentamiento de numerosas familias en sitios potencialmente inestables, aumentando así el riesgo asociado de fenómenos naturales. La CDMB como autoridad ambiental del municipio de Bucaramanga es el organismo del estado encargado del control de amenazas hacia el medio ambiente y fenómenos naturales que en él se presenten.

Al valorar la necesidad que presenta cualquier zona con influencia antrópica, como el municipio de Bucaramanga, de contar con la identificación más precisa y objetiva que se pueda tener frente a la zonificación de fenómenos naturales como movimientos en masa, y buscando mejorar aspectos

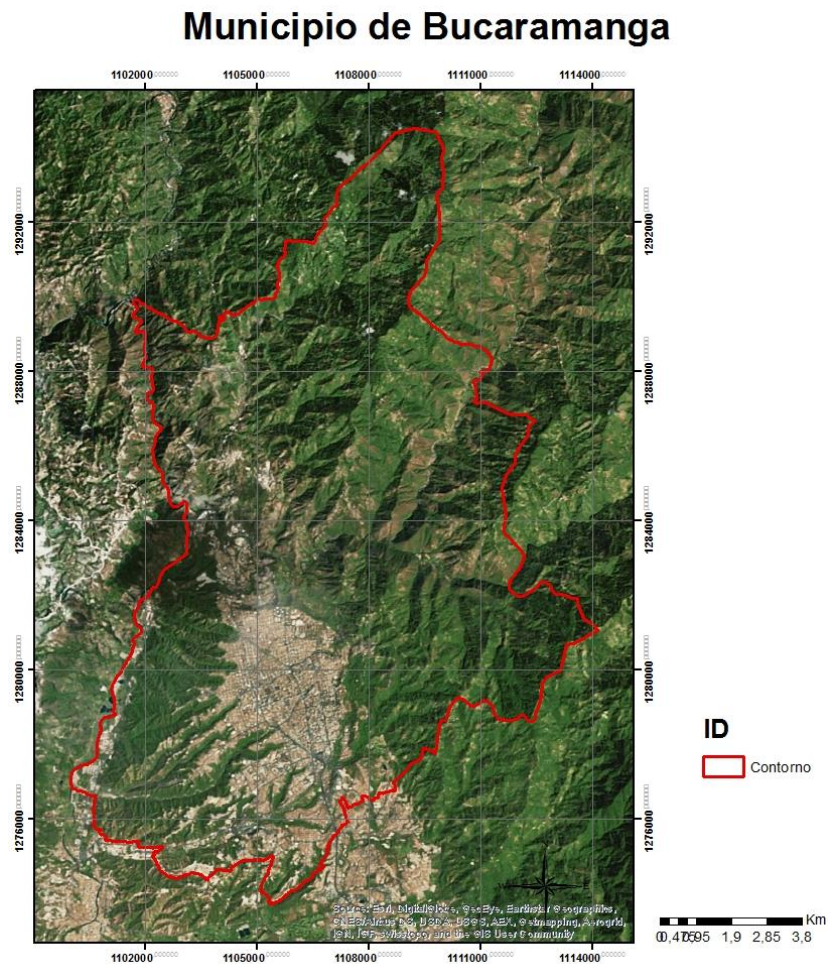
como la subjetividad presente en el método heurístico, la cantidad de datos que necesitan los métodos probabilísticos, así como incluir en la metodología características como: objetividad, autoevaluación, capacidad de procesar grandes volúmenes de información, aprendizaje según los datos utilizados, la presente práctica empresarial que se plantea realizar con la CDMB, autoridad ambiental del municipio, obtendrá la susceptibilidad a movimientos en masa para el municipio de Bucaramanga a escala 1:25.000 por medio del modelamiento de una RNA.

Aunque las RNA son relativamente nuevas en trabajos con sistemas de información geográficos, ya se han elaborado estudios como Negnevitsky (2002), Gomeza & Kavzoglub (2005), Londoño (2007), Tunusluoglu et al, (2007), Valdés et al, (2011), Fernández (2013) en los que el grado de precisión, en la zonificación, alcanza hasta el 90%, como es el caso de Gómeza & Kavzoglub (2005), esto sumado a características descritas en los estudios antes señalados como, la no linealidad de trabajo, paralelismo en la evaluación de los criterios, robustez de datos que puede procesar, tolerancia a fallos, aprendizaje por medio de algoritmos, aumenta el interés por esta metodología y argumenta su propuesta en el presente estudio, pues la perfila como una técnica idónea para afrontar los inconvenientes que se pueden presentar al momento de zonificar la susceptibilidad a movimientos en masa con otras metodologías.

## **1.4 Área de estudio**

**1.4.1 Localización.** El área de estudio es el territorio del municipio de Bucaramanga, figura 1, en el departamento Colombiano de Santander, esta abarca aproximadamente 165 km<sup>2</sup>. La circunscripción de la municipalidad de Bucaramanga comprende sectores de las planchas 109-Rionegro y 120-Bucaramanga del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). El municipio de Bucaramanga limita por el Norte con el municipio de Rionegro, por el Oriente con los municipios

de Matanza, Charta y Tona, por el Sur con el municipio de Floridablanca y por el Occidente con el municipio de Girón.



*Figura 1. Municipio de Bucaramanga.*

**1.4.2 Vías de acceso.** Al ser la capital del departamento de Santander, el municipio de Bucaramanga tiene una importancia considerable para el oriente Colombiano lo que se traduce en un sistema vial que la interconecta con ciudades aledañas como Barrancabermeja, Ocaña, Cúcuta, Bosconia, Valledupar y Bogotá, la capital del país a 365 Km de distancia.

También tiene vías que la interconectan con los otros municipios del área metropolitana como Girón, Piedecuesta y Floridablanca, además de un sistema de carreteras que conectan la ciudad con

sus tres corregimientos y 25 veredas. Aunque no posee aeropuerto está conectado al Aeropuerto Internacional Palonegro, por la vía Bucaramanga-Barrancabermeja a 20 minutos de distancia de la ciudad de Bucaramanga.

## **1.5 Geología**

En este capítulo se describen las características de las formaciones geológicas desde el punto de vista litoestratigráfico y geomorfológico, así como un breve vistazo a aspectos neotectónicos regionales, esta descripción se realiza con base en el estudio de Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga realizado por el antiguo INGEOMINAS en el 2001.

**1.5.1 Unidades Litoestratigráficas.** En este apartado se realiza una descripción basada en las características litológicas del cuerpo de rocas presentes en el área de estudio.

Las Unidades Litoestratigráficas más antiguas, de origen metamórfico e ígneo, son neis, esquisto, migmatita y pequeños intrusivos de granodiorita, y están agrupadas en la formación Neis de Bucaramanga (PEb) de edad Precámbrico. Esta unidad, junto con Stocks de composición ácida de edad Jurásico y Triásico (JRcg, TRt) aflora en el bloque montañoso levantado por tectónica ubicado al nororiente del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta conformando un extenso volumen rocoso llamado el Macizo de Santander.

Afloramientos de rocas metamórficas del Paleozoico inferior, que conforman la formación Silgará (PDs), aparecen en pequeñas franjas al nororiente de Bucaramanga, asociadas al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. Al extremo norte del Área Metropolitana de Bucaramanga afloran también rocas sedimentarias de la formación Floresta (PDf), abarcando una delgada franja de dirección norte sur.

Rodeando el perímetro del Area Metropolitana de Bucaramanga, se presentan extensiones notables de rocas sedimentarias clásticas, de edad Jurásico, conformando la formación Jordán (Jj), ver figura 2, ubicada al noroccidente de Bucaramanga, norte de Floridablanca y alrededores de Piedecuesta. La formación Girón (Jg) se ubica principalmente al occidente del Area Metropolitana de Bucaramanga, noroccidente de Piedecuesta y Norte de Floridablanca constituyendo en su mayor parte, el basamento que subyace los depósitos aluviales sobre los cuales está construida la ciudad de Bucaramanga.

Otras rocas sedimentarias de edad Triásico hacen parte de la formación Bocas (TRb) que se presenta al norte de Bucaramanga. Rocas sedimentarias Cretácicas de la formación Tambor (Kita) se encuentran al sur y suroccidente del Area Metropolitana de Bucaramanga.

TIPO	NOMBRE	CONVENCION
ROCAS METAMORFICAS	Neis de Bucaramanga Formación Silgará	Peb PDs
ROCAS IGNEAS	Diorita y Tonalita del Area del río Suratá Cuarzomonzonita de La Corcova Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso	TRt  JRcl  JRCg
ROCAS SEDIMENTARIAS	Formación Floresta Formación Diamante Formación Tiburón Formación Bocas Formación Jordán Formación Girón Formación Tambor Formación Bucaramanga: Miembro Organos Miembro Finos Miembro Gravoso Miembro Limos Rojos Depósitos de Flujos de Escombros Depósitos Aluviales: <i>Terrazas Medias</i> <i>Terrazas Bajas</i> <i>Llanura de Inundación</i> Depósitos Coluviales Depósitos de Deslizamiento: Deslizamiento Activo Deslizamiento Inactivo Llenos Mecánicos	Df Pcd TRPt TRb Jj Jg Kita  Qbo Qbf Qbg Qblr Qfe  Qal <sub>2</sub> Qal <sub>1</sub> Qal Ql Qd Qda Qdi Qllm

*Figura 2, Unidades litológicas del Municipio de Bucaramanga tomado de INGEOMINAS (2001).*

En el norte de Bucaramanga han sido reconocidas dos unidades litológicas, de extensión relativamente pequeña, denominadas formación Diamante (PCd) y formación Tiburón (TRPt). Se trata de rocas calcáreas, de edad Carbonífero y Pérmico respectivamente, utilizadas como materia prima por la industria cementera.

Suprayaciendo las rocas anteriores se presentan depósitos detríticos de edad Cuaternaria. Estos son los materiales geológicos más importantes en el estudio de Microzonificación Sísmica,

ya que cubren más de la mitad del área y sobre estos se encuentra construida gran parte de la ciudad de Bucaramanga, así como las poblaciones de Girón, Floridablanca y Piedecuesta. Los depósitos Cuaternarios están formados por bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas, mezclados en proporciones variables, provenientes en su mayor parte de la acción denudatoria sobre las rocas del Macizo de Santander. Entre estos materiales se destaca el gran depósito de la formación Bucaramanga conformada de base a techo por el miembro Organos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr).

Existen también depósitos aluviales (Qal, Qal1 y Qal2), distribuidos de acuerdo a su posición en los valles de los principales ríos, donde se localiza parte de la población de Girón. Localmente se presentan depósitos coluviales de ladera (Ql), la mayoría de pequeña extensión, provenientes en gran parte de fenómenos de remoción en masa o por efectos de la gravedad los cuales se acumulan en las laderas o pie de éstas. Dentro de los fenómenos de remoción en masa se separó la unidad de Deslizamientos (Qd) ubicada en el escarpe norte de Bucaramanga, y de acuerdo a su actividad se dividió en Deslizamientos Activos (Qda) y Deslizamientos Inactivos (Qdi) y por último se separaron las zonas de Llenos Mecánicos (Qllm) y Sanitarios (Qlls), correspondiendo a este último el relleno de basuras del Carrasco (INGEOMINAS, 2001, p2).

**1.5.3 Geomorfología.** La Geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la superficie terrestre, para ello estudia diferentes factores como tipo de litología, procesos erosivos, drenaje, tectónica, entre otros. El criterio geomorfológico es importante en estudios de fenómenos naturales ya que juega un papel determinante en la génesis y desarrollo de procesos que esculpen el paisaje, algunos de los cuales pueden llegar a representar un peligro para la población.

El origen de las diferentes unidades geomorfológicas del terreno está relacionado a procesos tanto Exógenos como Endógenos. De este modo ciertas formas estructurales tales como escarpes

de falla, anticlinales y sinclinales se clasifican dentro de un origen causado por procesos endógenos o internos en la tierra. Para las formas exógenas o externas, el origen principal se relaciona con el tipo de roca y el producto de meteorización residual (suelos), dando un perfil de terreno característico; por ejemplo formas como terrazas, planicies de inundación o partes superiores de deltas se asocian con depósitos aluviales.

La formación de las formas y perfiles del terreno en el municipio de Bucaramanga es esencialmente el resultado de los procesos tectónicos relacionados a la cuña tectónica que se forma de los sistemas de fallas del Suárez y Bucaramanga-Santa Marta. La geoforma más relevante en el área de estudio es el abanico aluvial que cubre diferentes niveles de terrazas formadas por los ríos Frío y de Oro, donde la ciudad de Bucaramanga fue construida.

Un abanico aluvial es la última fase de un sistema erosivo deposicional en el cual los sedimentos arrancados de una montaña original son transportados al frente de ésta. Este es un depósito análogo a un cono o a un cuerpo en forma de abanico, formado por depósitos de flujos de escombros y materiales de aluvión. El flujo de la corriente es la conexión entre las partes erosionadas y depositadas del sistema, el paleo río Suratá tiene una influencia significativa sobre la morfología del abanico aluvial de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2001, p37).

**1.5.3 Neotectónica.** El término Neotectónica es aplicado a la tectónica actuante a partir del Neógeno, es decir a partir del Mioceno. En el estudio de Zonificación Sísmica Indicativa del Área metropolitana de Bucaramanga desarrollado por el antiguo INGEOMINAS en el 2001, el término se aplica al estudio de la tectónica en el Cuaternario, incluyendo tanto el Pleistoceno como el Holoceno.

La forma del abanico aluvial de Bucaramanga refleja tasas de variación de procesos tectónicos tales como levantamiento de la montaña o inclinación de la superficie del abanico a

lo largo de un amplio rango limitando la falla, la morfología de este indica una importante actividad tectónica durante el Pleistoceno.

Las fallas que mayor influencia sísmica tienen y que más directamente están relacionadas con el municipio de Bucaramanga y el Área Metropolitana son el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y la falla del Suárez, esto no quiere decir que el Área Metropolitana sísmicamente no podría estar influenciada por otras fallas regionales como las de Boconó en Venezuela, el Borde Llanero, Yopal, Guaicáramo, Pajarito, Chitagá, La Salina, Palestina, Abrego y Soapaga entre otras (INGEOMINAS, 2001, p49).

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se muestra un repaso de conceptos más relevantes para la presente práctica, se aborda los temas de susceptibilidad a movimientos en masa, la forma de clarificarlos y al final se expone los aspectos más notables en el funcionamiento, estructura y desarrollo de las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

### **2.1 Susceptibilidad a Movimientos en Masa**

La primera definición de susceptibilidad de un terreno es realizada por Brabb en 1984, como la tendencia de un deslizamiento a ser generado en el futuro en un área específica, Posteriormente, Soeters y van Westen (1996) definen susceptibilidad como la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno en una zona de acuerdo con las condiciones locales del terreno, y especifican que factores detonantes tales como precipitación o sismicidad no son considerados, visto en Peña (2014).

Edier Aristizabal & Shuichiro Yokotat, en el 2006, especifican que en los mapas de susceptibilidad se zonifica el terreno de acuerdo a la favorabilidad de este a fallar, con el propósito de analizar posteriormente la amenaza de los mecanismos detonantes y definen amenaza como la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en áreas susceptibles involucrando frecuencia y magnitud.

## **2.2 Técnicas para evaluar la susceptibilidad a Movimientos en masa**

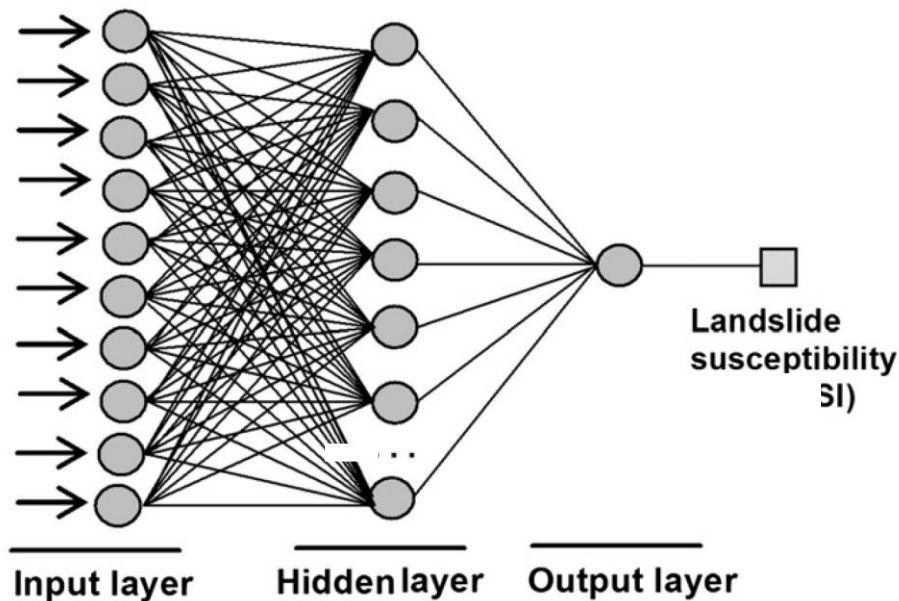
Las técnicas utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos se pueden clasificar en tres: heurísticas, estadísticas y determinísticas, Aristizabal & Shuichiro, (2006); Rodríguez & Rueda (2014); Peña, (2014). Aristizabal & Shuichiro, (2006), aclaran que el tipo de metodología es determinado por el alcance del estudio.

Los métodos heurísticos han sido ampliamente utilizados para evaluar susceptibilidad, estos se basan en procedimientos que usan el sentido común, la experiencia o el conocimiento de quien implementa la metodología, Delgado y Rivera, (2013), aportando así altos grados de subjetividad a los trabajos; los métodos determinísticos han sido restringidos para evaluar amenaza, por otro lado, los métodos estadísticos son utilizados para ambos casos de acuerdo con el desarrollo metodológico y la información con que cuente.

Las técnicas para la zonificación no se restringen solo a estas, las redes neuronales artificiales (RNA) son un nuevo método que ha implementado en diversos trabajos, como en, Negnevitsky, (2002), Gomez & Kavzoglu (2004), Londoño, (2007), Tunusluoglu, et al, (2007), Valdés., et al, (2011), Fernández, (2013). En Gomez & Kavzoglu (2004), el grado de precisión del método alcanza el 90%.

## **2.3 Redes Neuronales Artificiales**

Las RNA son descritas en Zhou j y Civco, (1996) como sistemas de interconexión de elementos de procesamiento (nodos o neuronas) conectadas entre sí, ver figura 3, en una red que transforma un conjunto de datos de entrada en valores de salida deseados. La estructura de la RNA consta de unos datos de entrada definidos como variables conectados a un número determinado de neuronas ocultas que se encargan de hacer una transformación y reajuste de los datos así como interconectar las capas de entrada y salida.



*Figura 3, Arquitectura de Red Neuronal Artificial utilizada en este estudio, tomado y modificado de Tien Tien Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug, Dick., 2012*

Para obtener los datos de salida cada neurona tiene un valor numérico modificable llamado peso, (Fernández, 2013), la actividad que cada unidad de procesamiento realiza en una RNA consiste en la suma de los valores de las entradas que son recibidos de otras neuronas conectadas a ella en paralelo, (Tunusluoglu, et al., 2007), después, compara esta cantidad con el valor de entrenamiento si lo iguala o supera, envía una señal que activa la salida a las unidades de la capa a la que esté

conectada, (Fernández, 2013), las entradas y las salidas que cada unidad recibe dependen del peso de las conexiones.

Finalmente, basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona por medio de un algoritmo, de manera que la siguiente vez que se presenten los valores, la salida esté más cercana a la realidad, esto se realiza por un número definido de iteraciones hasta que estabiliza los pesos sinápticos según la configuración de la RNA.

En el trabajo de Tunusluoglu, et al., del 2007, se utiliza el método de entrenamiento más utilizado para el campo de las Geociencias, backpropagation o propagación hacia atrás, este consiste en comparar el resultado obtenido con la salida que se debería, y calcula el error que comete la neurona de la capa de salida, en la fase de adaptación, este error se propaga hacia atrás, capa por capa, recibiendo cada neurona un error que describe su aporte relativo al error global que comete la red, (Londoño., 2007).

Aunque en el área de trabajo no se han llevado a cabo estudios de RNA en otros lugares ya se han realizado diferentes trabajos como en Venezuela, en la que Gomez & Kavzoglu (2005), evalúan la susceptibilidad a deslizamientos superficiales usando redes neuronales artificiales, o en Turquía que Tunusluoglu et al (2007), evalúan la susceptibilidad a caídas de rocas, en algunas ciudades Colombianas también se han realizado trabajos con RNA, como Manizales en la que Londoño en el 2007 realizan una evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas;

Autores como Negnevitsky, (2002), Chacón, (2005), Valdés., et al, (2011), Fernández, (2013) señalan características en las RNA como, paralelismo en la evaluación de los criterios, robustez de datos que puede procesar, identificación de patrones, aprendizaje por medio de algoritmos, capacidad de manejar información imprecisa y una alta precisión en los resultados finales. Haciendo

que las RNA se muestren como una metodología nueva que podría aportar bajas tasa de subjetividad y altos grados de precisión en la zonificación de movimientos en masa.

### 3. ANTECEDENTES

En el área de trabajo se han realizado diferentes estudios con el ánimo de zonificar la susceptibilidad a movimientos en masa entre ellos; los mapas de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa a escala 1:100.000 de la plancha 119- Rio negro y 120 – Bucaramanga que realizó en el 2012 el servicio geológico colombiano (SGC); los planes y esquemas de ordenamiento territorial de los municipios involucrados en su apartado dedicado amenazas naturales; los trabajos realizados por la corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB) cumpliendo su función de autoridad ambiental en la zona rural del municipio.

En la ciudad de Bucaramanga se han elaborado estudios puntuales que tienen como finalidad la zonificación de los movimientos en masa, entre ellos, Delgado & Rivera, que en el 2007 utilizan el método de talud infinito para modelar la susceptibilidad en parte de la micro cuenca de la quebrada Guacamaya al sur occidente de la ciudad, Blanco & Jiménez, (2012), en el que evalúan la amenaza por MM utilizando un método estadístico con el ánimo de involucrar variables extrínsecas, el estudio es realizado en la comuna 14 de la ciudad de Bucaramanga y arroja un área total de amenaza alta de 44%, en el 2014 Rodríguez & Rueda analizan la amenaza por MM en la comuna 14 utilizando un método heurístico arrojando en amenaza alta un 67% del área de estudio.

A continuación se exponen los estudios tenidos en cuenta en la realización de la presente práctica empresarial, así como la utilidad que estos presentaron para el desarrollo de la misma. Los trabajos

que se muestran son elaborados por entidades estatales y su recolección se hizo directamente con la entidad que los desarrollaron:

- Consorcio zonas inundables 2011: El estudio se realiza en el área de influencia de la CDMB a escala 1:100.000, tiene mapas como coberturas de suelos, intensidad de pendiente y orientación de pendiente. También realizan un inventario de MM. El informe incluye información de las estaciones meteorológicas del área, precipitaciones medias por estaciones y mes, un mapa de distribución de precipitación, valores medios de temperatura, humedad relativa, evaporación, radiación solar y nubosidad.

- Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga 2001: El objetivo de este estudio es definir parámetros para el diseño y construcción sismo resistente de acuerdo con la respuesta sísmica local del subsuelo. Para ello se caracterizó el subsuelo del área metropolitana mediante estudios detallados de geología, geofísica y geotécnica, también se determina espesores y geometría de las capas más relevantes sobre las cuales está asentada la ciudad. Entre los archivos entregados hay mapas a escala 1:5000 como geología, geomorfología.

- Plan de ordenación y manejo ambiental subcuenca Rio de Oro 2007: En el Plan de ordenación y manejo ambiental de la subcuenca del Rio de Oro se intenta planificar el uso sostenible de la cuenca y la ejecución de programas y proyectos específicos dirigidos a prevenir el deterioro de los recursos naturales, cuenta con información cartográfica escala 1:100.000.

- Estudio General de suelos y Zonificación de tierras 2003: Este es un estudio realizado por el IGAC aborda el tema suelo desde un punto de vista teórico, no cuenta con mapas que se puedan utilizar, aporta tablas de los valores de las estaciones climatológicas en Santander.

- Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, girón y Piedecuesta 2009: En este informe recopilan los resultados

del estudio realizado en el marco del convenio Interinstitucional 058/2005 firmado entre la CDMB y los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta; y el INGEOMINAS, cuyo objeto es la zonificación de la amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta; en un área aproximada de 5.000 Ha. Algunos mapas se encuentran anexos como los utilizados en la clasificación de algunas laderas a escalas 1:17.000 y 1:5.000.

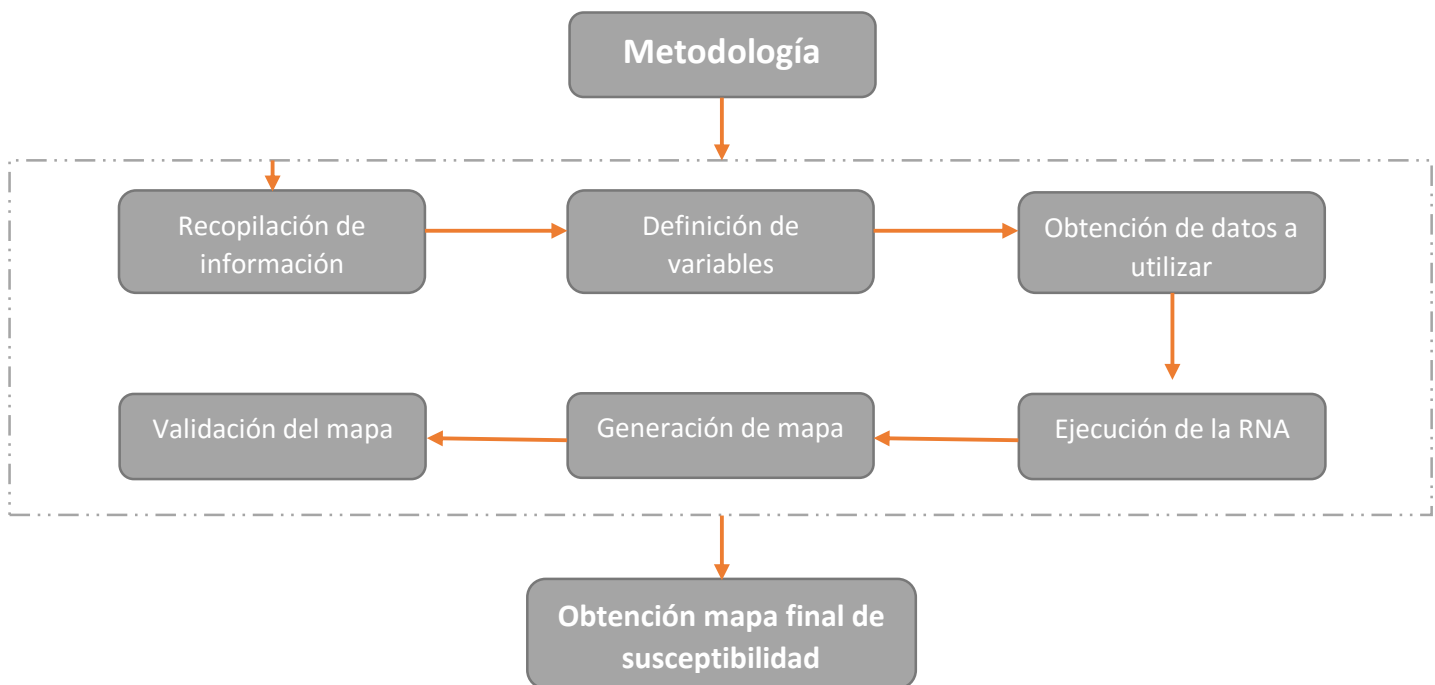
También se exponen otros trabajos de investigación realizados de una manera menos detallada, los cuales a pesar de su relevancia en el tema, no portaron mucho al objetivo de la presenta practica pues se elaboran a escalas bastantes superiores.

- Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa INGEOMINAS 2001: INGEOMINAS en cumplimiento de su misión institucional desarrolló en el año 2001 el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, escala 1:1'500.000, el cual muestra la distribución espacial de los movimientos en masa en el territorio colombiano y es utilizado por la Dirección de Gestión de Riesgo como base para sus sistemas de información en gestión de riesgo.

- Mapa Nacional de Susceptibilidad a Movimientos en Masa IDEAM 2009: El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, en el Plan Operativo 2009 de la subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental del IDEAM, contempló la actualización del mapa nacional de escenarios de susceptibilidad a los deslizamientos a escala 1:500.000, como insumo básico para el seguimiento, monitoreo y pronóstico de la amenaza por deslizamientos de tierra, para alertas tempranas. En convenio institucional INGEOMINAS e IDEAM un trabajo interinstitucional con el fin de elaborar los mapas nacionales de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa a escalas 1:500.000.

#### 4. METODOLOGIA

En el desarrollo de esta práctica empresarial se utilizaron seis fases para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Bucaramanga, ver figura 4, las cuales son: recopilación de información, producción de variables a tener en cuenta, obtención de datos, ejecución, entrenamiento y procesamiento de la RNA, generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa y validación del mapa producido.



*Figura 4, Metodología.*

Para la ejecución de estas seis etapas se utilizaron los programas ArcGIS, MATLAB. El primero se utilizó para las fases que se necesiten visualizar o manejar algún tipo de información matricial como la obtención de datos y la visualización de los resultados. El segundo para las etapas de entrenamiento y simulación de la red neuronal. También se utilizó Excel en la creación de las matrices y la validación de los resultados.

La metodología empleada se desarrolló para determinar los índices de susceptibilidad a deslizamientos en masa para el municipio de Bucaramanga, no obstante esta misma metodología, con las respectivas adecuaciones y recomendaciones dadas al final de esta práctica, se puede aplicar a otras zonas y otros tipos de desastre naturales.

#### **4.1 Recopilación de información:**

Esta fase empieza con una primera etapa llamada revisión bibliográfica, en la cual se hace una consulta de estudios técnicos y académicos que abordan las temática de redes neuronales artificiales y susceptibilidad a movimientos en masa, en especial del municipio de Bucaramanga, para este propósito, se contó con la información de estudios puntuales de diferentes entidades como el SGC, la CDMB, el IDEAM, el IGAC, también se consultó en base de datos académicas como bibliotecas, revistas científicas, libros virtuales.

Después de la revisión de la bibliografía se realizó un análisis de los resultados obtenidos y una subsiguiente síntesis de la información en la que se extrajo lo relevante para la investigación. También se incluye una búsqueda en torno al manejo adecuado de los programas a utilizar, ArcGIS y MATLAB. Cabe resaltar que aunque la recopilación de información está consagrada como la primera fase de trabajo, esta se hace presente a lo largo de toda la metodología.

**4.1.1 Revisión bibliográfica.** La revisión bibliográfica es la primera actividad de la metodología que empieza a realizarse, ésta, junto con análisis y síntesis bibliográfica, son

actividades que se siguió desarrollando a lo largo de toda la práctica. A continuación se presentará una breve descripción de la bibliografía consultada, para ello se tienen en cuenta dos subgrupos de información, uno concerniente a los trabajos investigativos de diferentes autores y otro que hace referencia a informe y trabajos técnicos realizados por entidades gubernamentales.

**4.1.1.1 Primer grupo.** En este grupo de información se mostrara los autores y la bibliografía más sobresaliente de las publicaciones científicas consultadas. La búsqueda se realizó con el fin de abundar en conceptos referentes a temas como RNA, MM y Susceptibilidad a MM, ésta es:

Tunusluoglu, Gokceoglu, Sonmez, Nefeslioglu, los autores abordan el problema de caídas de rocas en una región de Turquía, con la implementación de una RNA producen un mapa con una alta capacidad de predicción aportando una herramienta importante en la identificación de flujos de rocas en la zona. El artículo se llama “An artificial neural network application to produce debris source areas of Barla, Besparmak, and Kapi Mountains (NW Taurids, Turkey)”; Y es publicado en la revista Natural Hazards and Earth System Sciences, Pág. 557 – 570.

Negnevitsky, el autor elabora el libro, Artificial Intelligence A Guide to intelligent Systems, en el que aborda diferentes técnicas comprendidas en la inteligencia artificial, en el capítulo 6 aborda las RNA explicando sus conceptos básicos.

Gómez & Kavzoglu, Londoño, son autores regionales que han abordado los MM desde las RNA. Gómez & Kavzoglu evalúan el riesgo por deslizamientos de tierra, principalmente por deslizamientos superficiales, en la cuenca del río Jabonosa en los Andes Venezolanos; Londoño evalúa el riesgo a deslizamientos para la ciudad Andina de Manizales.

Tien Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug, Dick; evalúan la susceptibilidad a movimientos en masa en la provincia de Hoa Binh en Vietnam, para esto comparan dos modelos de redes neuronales, Levenberg-Marquardt junto a Bayesian, los autores tienen en cuenta los mismos 10 criterios en ambos casos y utilizando el método de tasa de predicción con el método de área bajo las curva para la validación de las redes.

Valdés, González, Will; Los autores utilizan las RNA en el campo edafológico, estiman la resistencia a la penetración radicular de suelos a diferentes profundidades, para lo cual se consideran variables como humedad, densidad, carga estática entre otras.

Con el fin de aclarar ciertos interrogantes frente a movimientos en masa y metodologías para hallar la susceptibilidad de un terreno a MM, se consultó también literatura científica como, Aristizábal & Shuichiro (2006), Bonachea (2006), Remondo (2001), los cuales hacen una exposición de motivos de las metodologías utilizadas en la zonificación a movimientos en masa así como de las variables utilizadas.

Con el ánimo de conocer la dinámica de los MM en el área de estudio se consultó a Blanco y Jiménez (2012), Rodríguez y Rueda (2014), quienes en sus estudios abordan la amenaza por fenómenos de remoción en masa de la comuna 14 de la ciudad de Bucaramanga. También se consultó a Leiva, (2012), quien elabora la Memoria explicativa del mapa de amenazas por movimientos en masa de la plancha 120 realizado por el SGC.

**4.1.1.2 Segundo grupo.** Con el fin de monitorear, clasificar y definir los fenómenos naturales que afectan el municipio y toda su jurisdicción, la CDMB ha realizado distintos proyectos en los que han utilizado información cartográfica, esta información se le fue solicitada a la CDMB

con el fin de utilizarla en el procesamiento de la RNA propuesta, la Corporación suministro información de los siguientes proyectos:

- Consorcio zonas inundables
- Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.
- Plan de ordenación y manejo ambiental subcuenca Rio de Oro
- Estudio General de suelos y Zonificación de tierras

Con el ánimo de complementar la información cartográfica suministrada por la CDMB, se realizó una búsqueda de información en institutos colombianos como el SGC, IDEAM y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), aunque este último no respondió a la solicitud.

El SGC facilito algunos estudios que ya se avían consultado pero apporto más datos en formato Shapefile; los proyectos aportados por el SGC son:

- Planchas geológicas 1,100.000 H12-120 Bucaramanga; H13-109 RIO 121 Cerrito
- Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, girón y Piedecuesta.
- Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.
- zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón - revisión

El IDEAM suministro información referente al Estudio Nacional de Aguas realizado en el 2014 el cual da cuenta del estado y la dinámica del agua como de los recursos hídricos en Colombia. El estudio se realiza a un escala 1:11.000.000 imposibilitando su utilización en el presente trabajo.

4.1.2 **Análisis bibliográfico.** Esta actividad se realiza con el ánimo de extraer los aspectos más relevantes de las publicaciones revisadas. Tunusluoglu, Gokceoglu, Sonmez, Nefeslioglu; Los autores construyen una RNA con el método backpropagation o propagación hacia atrás, el cual construyen con 22 variables entre las que incluye pendiente, curvatura y geología. Resaltan características de las RNA como el paralelismo en el trato de los datos, el “aprendizaje” gracias a algoritmos y la capacidad de generalizar. Concluyen que la capacidad de aprendizaje de la RNA se obtiene al modificar los pesos de las conexiones sinápticas (conexiones entre neuronas). Tunusluoglu et al, construyen graficas en las que se muestra la eficacia del método, como curvas de favorabilidad y curvas ROC, métodos en los que se muestra el grado de error al comparar los resultados del procesamiento de la RNA con datos sin utilizar en el entrenamiento, para ello los investigadores, toman un 20 % de los datos totales de entrenamiento.

En el libro, Artificial Intelligence A Guide to intelligent Systems, Negnevitsky, hace un recorrido por los conceptos fundamentales de las RNA, expone la importancia de elegir la arquitectura de la red pues esta define la forma de aprendizaje. El autor aclara que el “aprendizaje” de una RNA se realiza haciendo pequeños ajustes en los pesos sinápticos para reducir la diferencia entre las salidas reales y deseadas del perceptrón, el autor define perceptrón como la forma más simple de una red neural, con pesos sinápticos ajustables y un limitador; Negnevitsky aclara que los pesos iniciales son asignados al azar, por lo general en el rango de (-0,5 a 0,5) y que continuamente se actualizan de acuerdo con los ejemplos de entrenamiento para obtener la salida deseada.

Gómez & Kavzoglu, los autores describen un enfoque para evaluar el potencial de riesgo a deslizamiento de tierra, principalmente deslizamientos superficiales, los investigadores parten de la necesidad de un método en la zonificación más sofisticado debido a las restricciones que identifican en los enfoques heurísticos, determinísticos y estadísticos. El estudio se realiza en la cuenca del río

Jabonosa en los Andes Venezolanos y utilizan Redes Neuronales Artificiales (RNAs), específicamente el tipo Perceptron Multilayer con algoritmo de aprendizaje backpropagation, el estudio utiliza una amplia gama de parámetros de inestabilidad relacionados con la pendiente y derivados de modelos de elevación digital (DEM) e imágenes de teledetección, alcanzando una precisión cercana del 90%.

Londoño, Realiza una evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas andinas. Genera mapas asociados a 26 Factores de amenaza y de vulnerabilidad para la ciudad andina de Manizales, con los que genera una estructura correspondiente a 26 variables de entrada, 18 neuronas en la primera capa intermedia, 24 neuronas en la segunda y una neurona en la capa de salida que arrojará valores entre cero, si la celda estudiada es estable, y uno, si es inestable. El autor concluye que, con un modelo de este tipo y la información correcta, se tendría un sistema de prevención y alerta temprana para movimientos en masa en áreas urbanas.

Tien Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug, Dick; definen 10 variables, pendiente, orientación, amplitud de relieve, litología, usos del suelo, tipo de suelo, precipitación, distancia a carreteras, distancia a ríos y la distancia a fallas; utiliza dos algoritmos de entrenamiento de back-propagación o propagación hacia atrás, estos son, Levenberg-Marquardt y regularización bayesiana; la validación la realiza por el método de la tasa de predicción y el método de área bajo la curva. La precisión de la predicción del mapa de susceptibilidad de deslizamientos producidos por la red neuronal bayesiana y la red neuronal Levenberg-Marquardt fueron 90,3% y 86,1%, respectivamente. En este estudio, se realiza un mapa de distancia a falla, las categorías se definieron como: 0-200, 200-400, 400-700, 700-1000, y > 1000 m. También se construye un mapa de distancia a carretera con las categorías 0-40, 40-80, 80-120 y > 120 m, y un mapa de distancia a redes hídricas, con las categorías 0-40, 40-80, 80-120 y > 120 m. En Tien Bui, et al. (2012), el inventario de

deslizamientos se repartió al azar en dos subconjuntos. Un compuesto por el 70% de los datos (82 deslizamientos de tierra con 684 celdas) que se utilizó en la fase de entrenamiento de la red neuronal. Otro conjunto de datos de validación con el 30% de los datos (36 deslizamientos de tierra con 315 celdas) para la validación de los modelos de redes neuronales.

Aristizabal y Shuichiro, los investigadores especifican que en los mapas de susceptibilidad se zonifica el terreno de acuerdo a la favorabilidad de este a fallar con el propósito de analizar posteriormente la amenaza de los mecanismos detonantes, los autores definen amenaza como la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en áreas susceptibles involucrando frecuencia y magnitud. Aristizabal & Shuichiro, (2006); Rodríguez & Rueda (2014); Peña, (2014) apuntan que las técnicas utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos se pueden clasificar en tres: heurísticas, estadísticas y determinísticas, al mismo tiempo aclaran que el tipo de metodología es determinado por el alcance del estudio.

Delgado y Rivera, los autores utilizan el método de talud infinito para modelar la susceptibilidad en parte de la micro cuenca de la quebrada Guacamaya al sur occidente de la ciudad de Bucaramanga, Blanco y Jiménez (2012), evalúan la amenaza por MM utilizando un método estadístico con el ánimo de involucrar variables extrínsecas, el estudio es realizado en la comuna 14 de la ciudad de Bucaramanga y arroja un área total en amenaza alta de 44%, en 2014 Rodríguez y Rueda se analiza la amenaza por MM en la comuna 14 utilizando una método heurístico arrojando en amenaza alta un 67% del área de estudio.

**4.1.3 Síntesis bibliográfica.** De la bibliografía analizada se sintetizo la ejecución de la RNA, ésta empieza con la obtención de los datos en forma matricial, que representen las variables definidas en la síntesis bibliográfica, con el fin de utilizarlos en las etapas de entrenamiento,

procesamiento y validación de la RNA. El procesamiento de la RNA se implementará, basándose en los autores consultados, en el software MATLAB. En la etapa de entrenamiento se utilizara información referente a zonas clasificadas como susceptibles y no susceptibles a movimientos en masa. La etapa de procesamiento involucra toda la información de los atributos de las variables tenidas en cuenta. La validación se realiza con una porción de 25% de los datos totales de entrenamiento, con el ánimo de utilizar un valor medio en las propuestas de Tien Bui et al (2012), que utilizan el 30% y Tunusluoglu et al (2007) los cuales utiliza el 20%, estos datos serán extraídos al azar.

Se optó por implementar el modelo más eficiente para el análisis de problemas multivariables no lineales asociados a las Geoamenazas según la literatura científica consultada, Negnevitsky (2002), Gomeza & Kavzoglu (2005), Londoño (2007), Tunusluoglu et al (2007), Valdés et al (2011), Tien Bui et al (2012), el modelo de perceptrón multicapa. Para la etapa de entrenamiento y según la bibliografía antes señalada, se utilizara el algoritmo de aprendizaje Back Propagation (MLP-BP) o propagación hacia atrás. Para la validación se construirá al igual que Tunusluolu 2007, Prabhan y Lee 2009, Chauhan et al 2010, Pradhan et al 2010, Prabhan y Lee 2010c, Tien et al 2012, graficas en las se muestre la eficacia del método, como gráfica de distribución de frecuencia acumulada, gráfica de relación de frecuencia y curvas ROC.

#### **4.2 Definición de Variables**

Esta actividad consiste en la definición de los mapas que se tuvieron en cuenta para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa del municipio de Bucaramanga. Este proceso se realizó partiendo de los datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que se recolectaron de los diversos trabajos de entes gubernamentales como la CDMB o el SGC, y teniendo en cuenta variables utilizadas en otros trabajos investigativos.

Al momento de trabajar con la información se utilizó el sistema de referencia MAGNA Colombia Bogotá, también se estableció el tamaño de celda de 7x7 metros, para los archivos ráster como el óptimo según la escala de trabajo.

Según la literatura revisada y analizada y en base a la información adquirida en las diferentes fuentes bibliográficas se definió utilizar las siguientes variables como insumos en el entrenamiento de la RNA:

- Isolíneas de evaporación y precipitación, estos mapas se obtuvieron con el procesamiento de los datos climatológicos de las estaciones meteorológicas del IDEAM y de la CDMB en la herramienta Kriging de ArcGIS 10.1.
- Un modelo de elevación digital en base a un TIN generado de las curvas de nivel 1:25.000 del IGAC, el cual luego se cambió por un modelo digital de elevación que se descargó del satélite Alos palsar, de este modelo de elevación se extrajo en forma matricial los datos de pendiente, orientación, curvatura y rugosidad. Estos mapas se obtuvieron utilizando las herramientas del ToolBox 3D Analyst Tools del software ArcGIS 10.1.
- Mapas en los que se muestran la distancia a Fallas, Drenajes y Vías también se construyeron. Para ello se utilizaron buffers de 50, 100 y 150 metros sobre vías y drenajes y 4 categorías de búfer a 250 de distancia, para el caso de las fallas.
- De igual forma se refinaron Shapefiles de geología, zona geotécnica y zona dinámica del proyecto de Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Para esto, primero se importó y georeferenció la plancha Geológica H12 del IGAC en formato JPG, y se refinó con ésta el mapa de Geología del proyecto de Zonificación sismogeotécnica. Después de este proceso la

variable de Geología se utilizó para refinar las variables de Zona dinámica y Zonificación Geotécnica.

- Junto con esta cartografía ya mencionada, también se digitalizaron los mapas de cobertura y uso actual de la tierra y conflicto de uso del suelo, que se extrajeron de los anexos del POT de Bucaramanga 2014-2027.

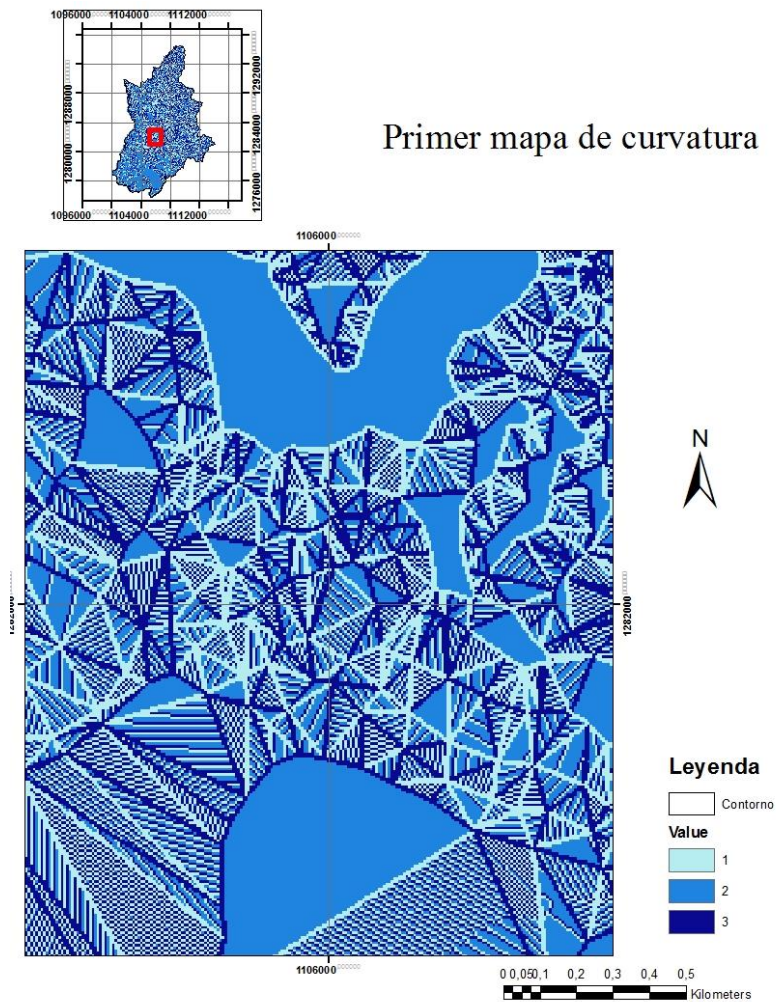
También se generó un Shapefile con 183 puntos de movimientos en masa, este se realizó con información refinada de los proyectos de; Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, girón y Piedecuesta; Consorcio zonas inundables 2011; del Sistema de información de movimientos en masa (SIMMA); y algunos puntos suministrados por oficina de amenazas de la alcaldía de Bucaramanga.

**4.2.1 Verificación de datos.** Este ítem se desarrolló en el transcurso de la práctica empresarial. Se realizó por incongruencias en los resultados obtenidos en una primera medida. Acá se tuvieron en cuenta las características del terreno con el fin de comparar, verificar y obtener nuevamente algunos de las variables a tener en cuenta en la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

**4.2.1.1 Modelo Digital del Terreno (MDT).** Un modelo digital de elevación es una imagen matricial en tres direcciones x, y, z, siendo z la altitud, “x” y “y”, latitud y longitud respectivamente, que permite clasificar las formas y perfil del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera partiendo software y equipo de cómputo especializados.

Debido a los resultados obtenidos con la primera RNA, se realizó el cambio del modelo digital del terreno, insumo del cual se derivan los mapas de pendiente, orientación, rugosidad y curvatura.

Esto debido a que dichos mapas presentaban distribuciones anómalas en sus datos ocasionando que se mostrarán geometrías rectas e irregulares al momento de ser visualizados, ver figura 5.



*Figura 5, acercamiento del primer mapa de curvatura utilizado.*

Con el fin de utilizar un mejor modelo digital del terreno se descargó la información del satélite. Al pasar, esta se utilizó como insumo para la elaboración de los mapas de pendiente, curvatura, rugosidad y orientación. A estos datos se les aplicó un tratamiento previo que consistió en subsanar minúsculas anomalías a forma de sobresaltos en la continuidad de los datos.

Utilizando las herramientas ofrecidas en el tool box de ArcGIS 10.1 se obtuvieron los mapas derivados del MDT, estos conservaron las dimensiones de los pixeles de 12.5x12.5, y fueron clasificados según se muestra en siguiente sud título.

**4.2.2 Clasificación y obtención de mapas.** Esta tarea se realizó con el propósito de visualizar y clasificar los datos con los que se cuenta, algunos de los mapas ya estaban clasificados, otros por el contrario, como los generados a partir del Modelo Digital de Elevación, y los generados con base en los datos climatologías de las estaciones del IDEAM, se requirió utilizar clasificaciones propuestas por el SGC, algunos autores y manuales de herramientas elaborados por ArcGIS. A continuación se presenta cada variable con su respectiva clasificación utilizada y mapa resultante.

**4.2.2.1 Cobertura y Uso Actual del Suelo.** Este mapa muestra el uso actual que se le tiene asignado al suelo del municipio de Bucaramanga. Se puede observar en la figura 6, y en la tabla 16 se puede extraer los valores de ID del mapa. La información cartográfica desde la cual se obtiene, procesa y digitaliza, el mapa de cobertura y uso actual del suelo procede de los anexos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), de Bucaramanga 2014-2027 publicado por la alcaldía del municipio de Bucaramanga en el 2014, en la tabla 1 se muestra la clasificación que se utiliza en esta variable.

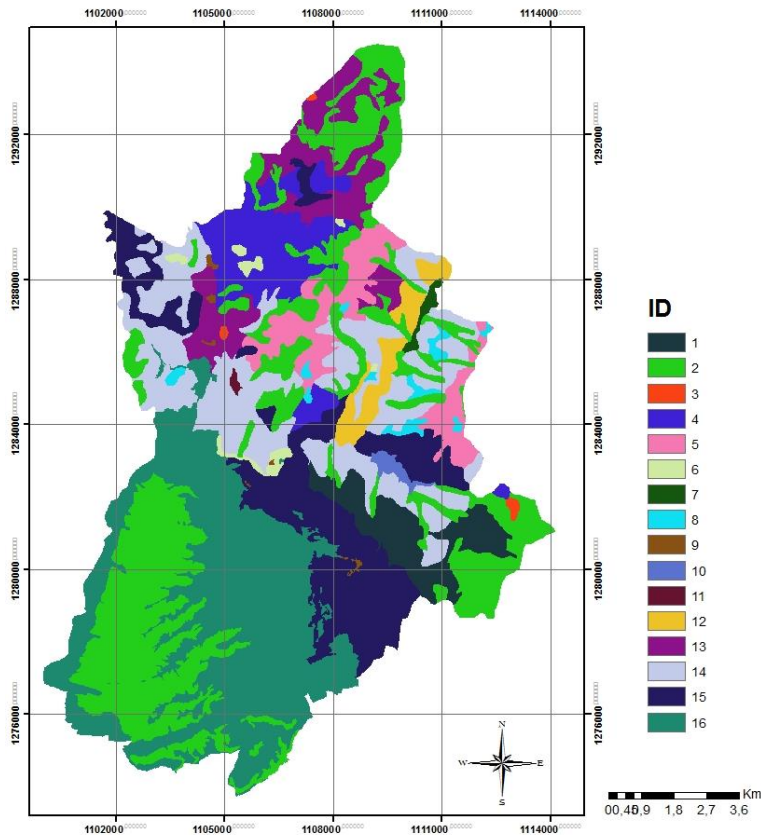
Tabla 1. *Leyenda de clasificación de la cobertura y uso del suelo.*

<b>LEYENDA DE CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA</b>				
<b>GRAN GRUPO</b>	<b>GRUPO</b>	<b>SUBGRUPO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>ID</b>
<b>TIERRAS AGROPECUARIAS</b>	<b>CULTIVOS AGRICOLAS</b>	Cultivos Transitorios	Ct	8
		Cultivos Permanentes	Cp	9
	<b>POTREROS ABIERTOS</b>	Pastos Naturales	Pn	14

	TIERRAS MIXTAS AGROPECUARIAS	Pastos Mejorados	Pm	13
		Cultivos Mixtos	Cm	5
		Cultivos y Pastos	C-P	4
<b>TIERRAS AGROFORESTALES</b>	SILVOAGRICOLA	Cultivos permanentes con Sombrío	Cps	7
	AGROSILVO-PASTORIL	Árboles en Cultivos y Pastos	Acp	1
<b>BOSQUES</b>	BOSQUE NATURAL	Secundario	BN-S	2
		Rastrojo	R	15
	BOSQUE PLANTADO	Introducido	BP	3
<b>FORMAS ESPECIALES DE VEGETACIÓN NATURAL</b>	HERBACEAS	Pajonales Secos	Pj	12
<b>TIERRAS ERIALES</b>	SUELO DESNUDO	Minería	Mi	11
<b>INFRAESTRUCTURA CONTRUIDA</b>	URBANA	Contracciones Dispersas	Dp	9
		Urbano	U	16

*Nota: Tomada y modificada de Mapa de cobertura y uso actual del suelo POT de Bucaramanga 2014-2027.*

**Mapa de cobertura y uso actual de la tierra**



*Figura 6, Mapa de Cobertura y Uso Actual de la tierra.*

**4.2.2.2 Conflicto de Uso del Suelo.** Esta variable también se digitalizó, ver figura 7, de un anexo del POT de Bucaramanga 2014-2027 publicado por la alcaldía del municipio de Bucaramanga en el 2014, este mapa muestra el contraste entre el uso actual del suelo y la conveniencia de uso del suelo, en la tabla 2 se observa la clasificación de esta variable y el ID del mapa utilizado.

Tabla 2. *Categorías de conflicto de Uso del Suelo.*

ID	CATEGORIAS	SÍMBOLO
1	Adecuado	A
2	Inadecuado	I
3	Urbano	Urbano

4	Mina	Mina
5	Muy Inadecuado	MI
6	Embalse	Embalse

Nota: Tomada y modificada del POT de Bucaramanga 2014-2027.

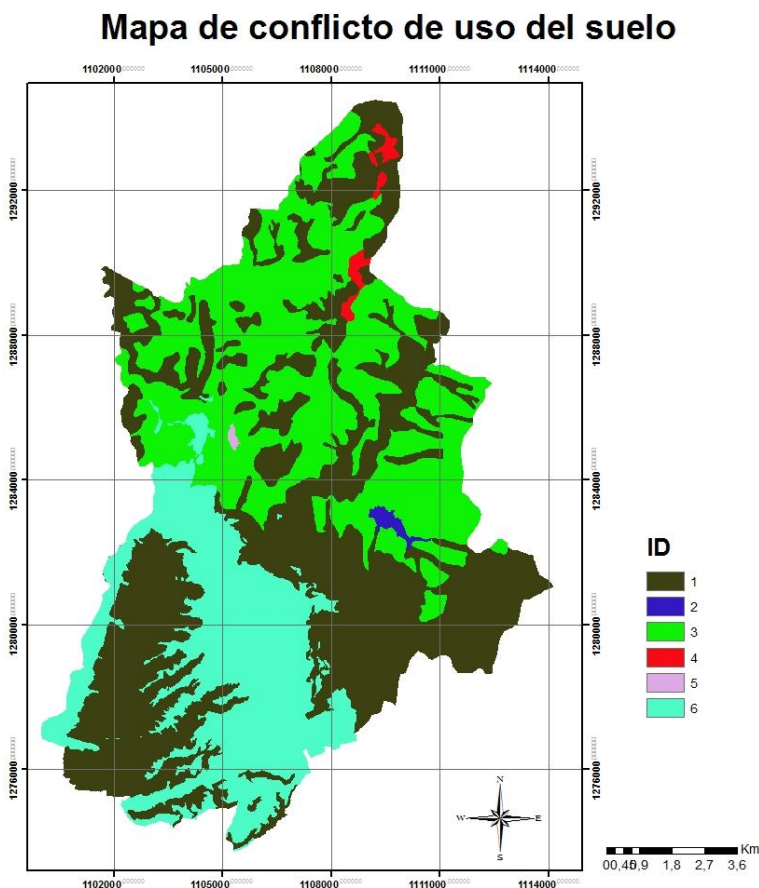


Figura 7, Mapa de Conflicto de Uso del Suelo.

**4.2.2.3 Curvatura.** Según lo consultado en Environmental Systems Research Institute, Inc. 2016, una curvatura positiva indica que la superficie es convexa hacia arriba en la celda, una curvatura negativa indica que la superficie es cóncava hacia arriba en la celda, un valor cero indica que la superficie es plana, bajo esta premisa se elaboró la clasificación consignada en la tabla 3.

El mapa de curvatura se muestra en la figura 8, en la tabla 3 está plasmado el valor ID correspondiente a cada categoría. La curvatura se obtiene al analizar las celdas contiguas de un pixel y se podría definir como la segunda derivada de la superficie, o como la pendiente de la pendiente.

Tabla 3. *Clasificación de curvatura.*

ID	Curvatura	Valor
1	Cóncava	Negativa
2	Plana	Cero
3	Convexa	Positiva

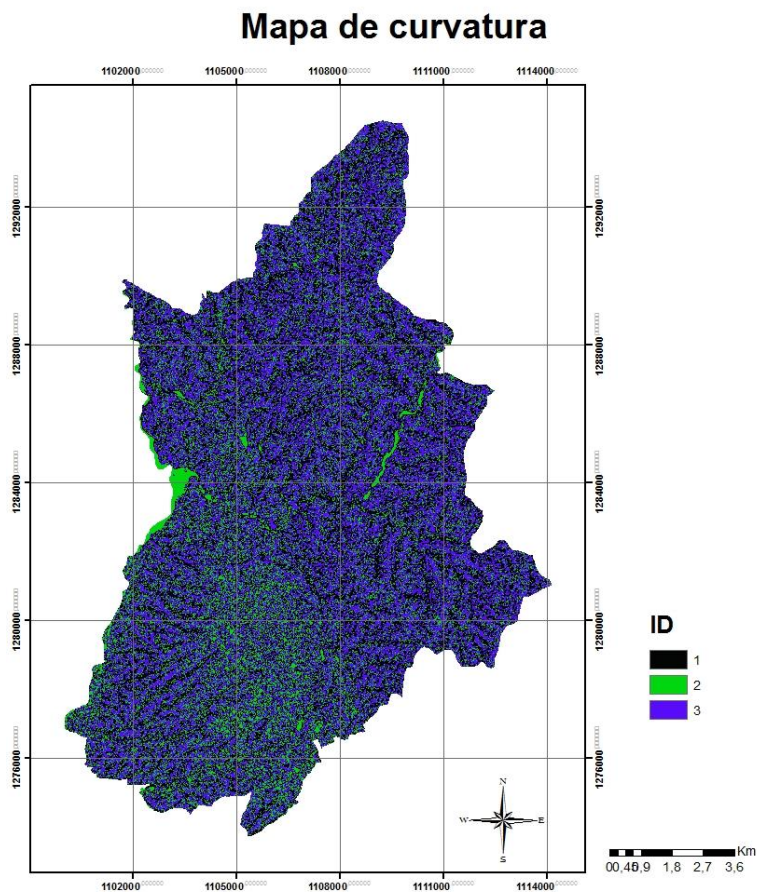
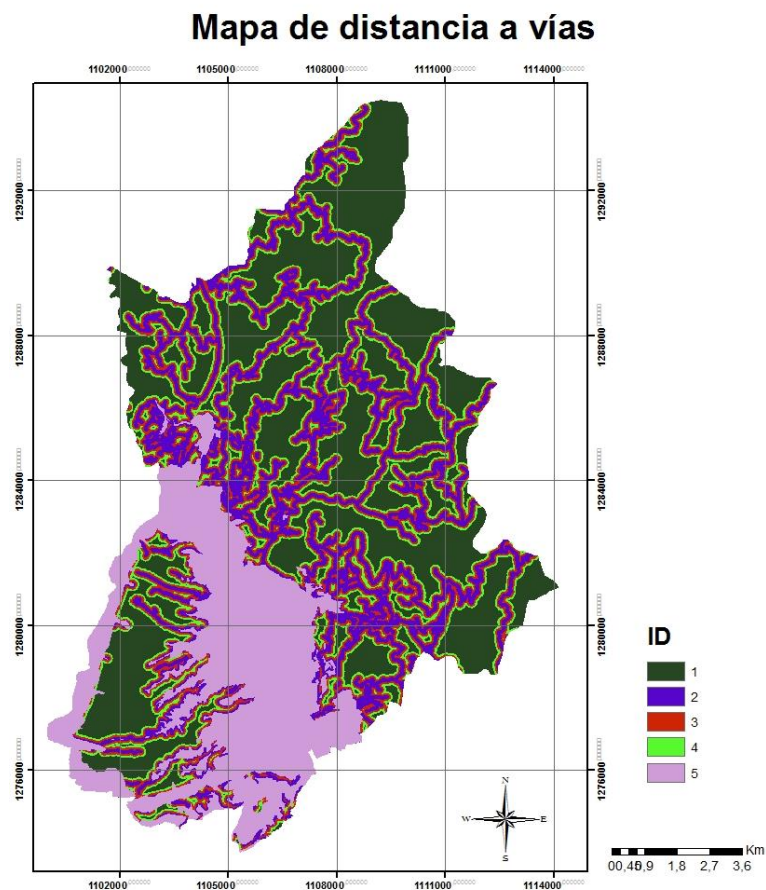


Figura 8, *Mapa de curvatura.*

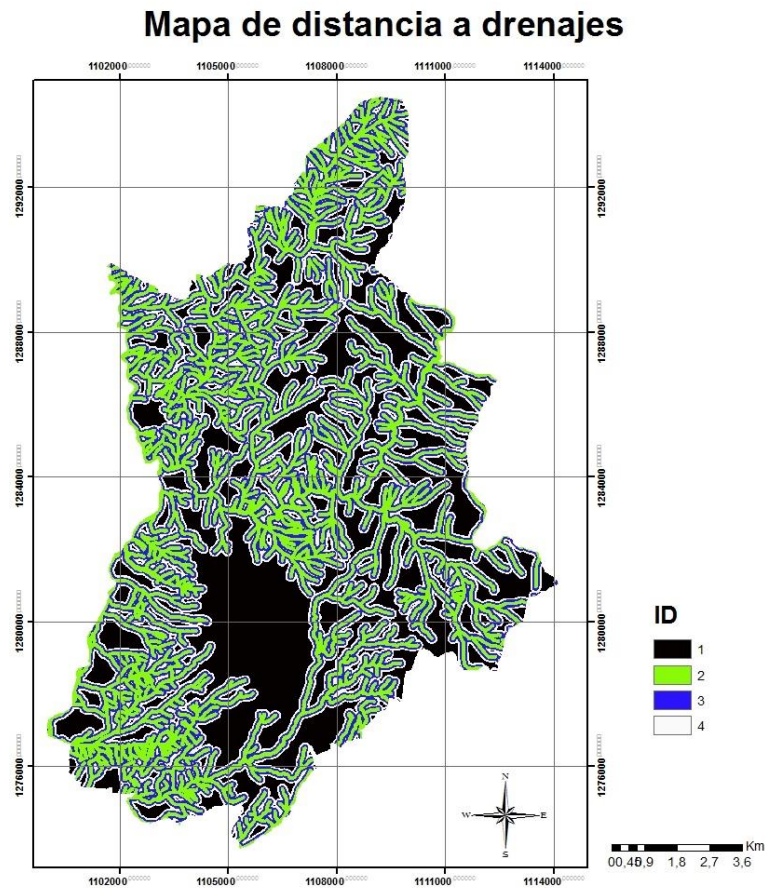
**4.2.2.4 Distancia a vías, ríos y fallas.** Para estos mapas se tuvo en cuenta el trabajo presentado por Tien et al (2012), del que se tomó la idea de crear un buffer a los mapas de falla, vías y drenajes, con el fin de representan las distancia a estas características.

Para la construcción del mapa de Distancia a vías, ver figura 9 (consultar tabla 4 para ver equivalentes de ID), se partió de una red de carreteras de la que se excluye la ciudad de Bucaramanga, para este se calculó la distancia a carreteras usando la herramienta de buffer en el software ArcGIS 10.1, las clases están definida como 0-50, 50-100, 100-150 y > 150 m, ver la tabla 4.



*Figura 9, Mapa de distancia a vías*

Del mismo modo, una red hidrológica se extrajo de las planchas topográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), a una escala de 1:25.000, las categorías de distancia a drenajes se muestran en la tabla 6 y se definieron como 0-50, 50-100, 100-150 y  $> 150$  m. El mapa resultante se muestra en la figura 10 (ver tabla 6 para consultar valores de ID).



*Figura 10, Mapa de distancia a drenajes*

También se consideró que las fallas son un factor que puede influir en los movimientos en masa, por ello, se construyó un mapa de distancias a ellas, las categorías se definen en la tabla 5, estas son: 0-250, 250-500, 500-750, 750-1000 y  $> 1000$  m. el mapa resultante se muestra en la figura 11 (ver tabla 5 para consultar valores de ID).

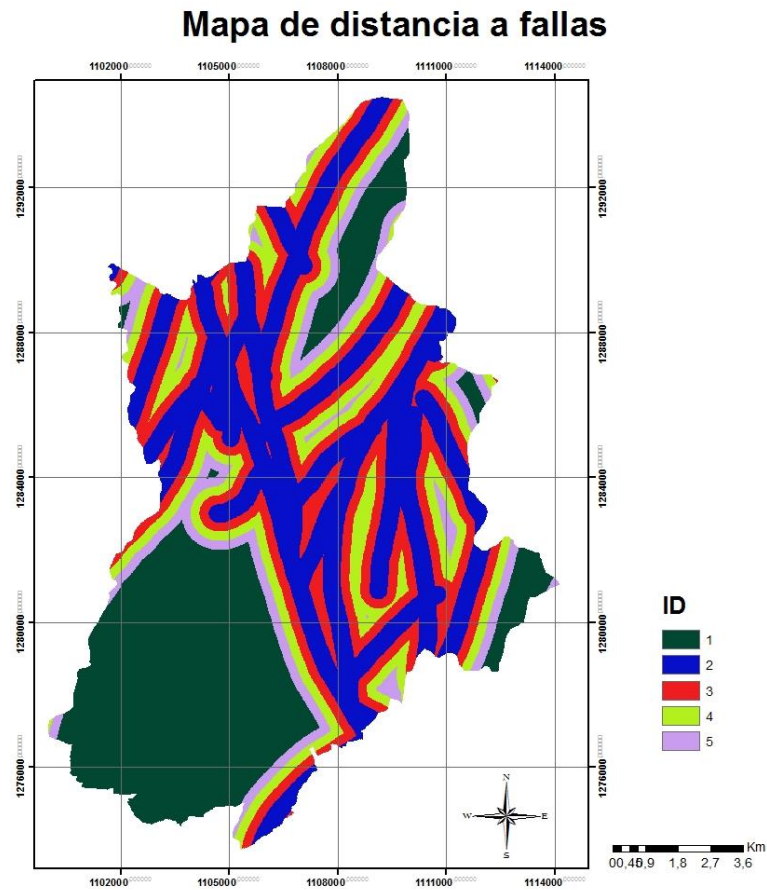


Figura 11, Mapa de distancia a fallas

Tabla 4. Categorías de Distancia de vías.

ID	Categoría
1	>150 m
2	0 – 50 m
3	50 – 100 m
4	100 – 150 m
5	Urbano

Tabla 5. Categorías de Distancia de fallas.

ID	Categoría (m)
1	>1000
2	0 – 250
3	250 – 500
4	500 – 750

<b>5</b>	750 – 1000
----------	------------

Tabla 6. *Categoría de Distancia de drenajes.*

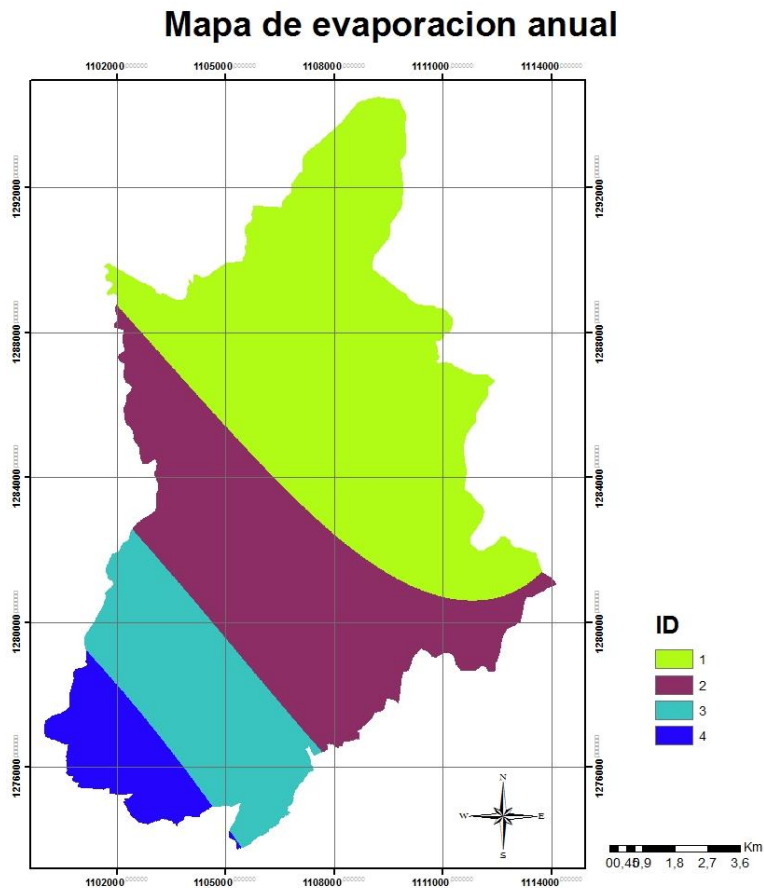
<b>ID</b>	<b>Categoría</b>
<b>1</b>	>150 m
<b>2</b>	0 – 50 m
<b>3</b>	50 – 100 m
<b>4</b>	100 – 150 m

**4.2.2.5 Evaporación.** La evaporación es la emisión de vapor de agua a la atmósfera desde una superficie húmeda a temperatura inferior al punto de ebullición. Se encuentra directamente relacionada con factores como el tipo de suelo, variables climáticas y la cantidad de agua contenida en la superficie.

Este mapa, ver figura 12 (consultar tabla 7 para los valores de ID), se elaboró con datos del Consorcio Zonas Inundables 2011, publicado por la CDMB en el 2011, se basa en diferentes histogramas que permiten definir distribuciones temporales a lo largo del año para cada una de las estaciones analizadas. De acuerdo con los registros de las estaciones analizadas en el área de influencia del proyecto se clasificó el mapa obteniendo 4 categorías mostradas en la tabla 7.

Tabla 7. *Clasificación de la evaporación anual.*

<b>ID</b>	<b>Categoría</b>	<b>Evaporación valor anual (milímetros)</b>
<b>1</b>	Baja	1165 -1265
<b>2</b>	Media	1265 – 1365
<b>3</b>	Moderadamente Alta	1365 -1465
<b>4</b>	Alta	1465 - 1565



*Figura 12, Mapa de evaporación anual*

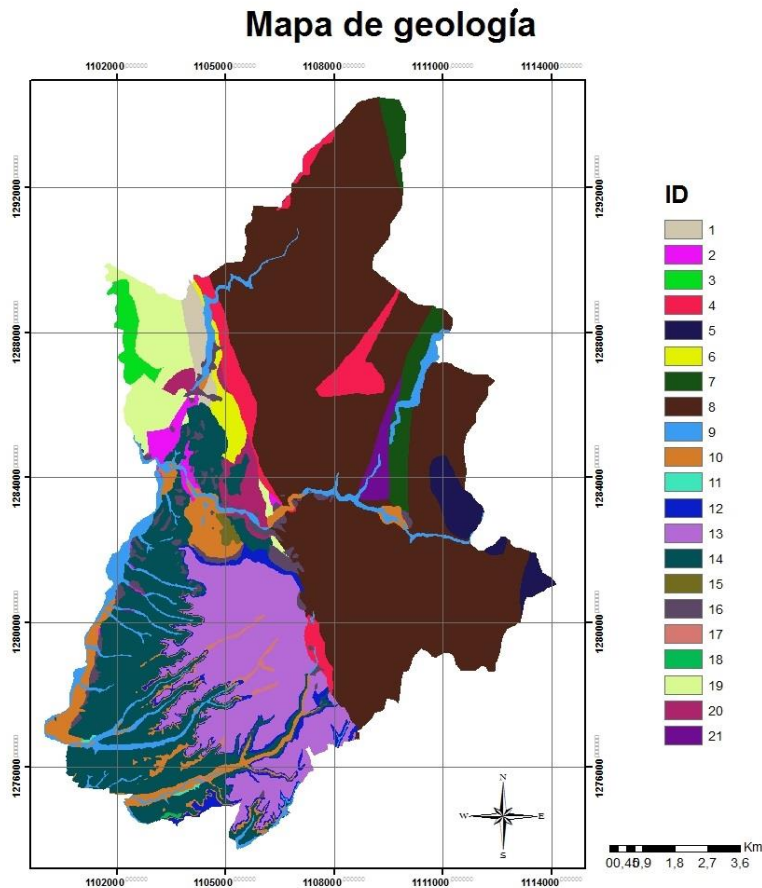
**4.2.2.6 Geología.** Esta variable se extrajo del proyecto de Zonificación Sismotectónica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, publicado por el antiguo Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero – Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS), en el 2001 y suministrado por el SGC, la clasificación que se utiliza y muestra en la tabla 8 es la misma del proyecto y responde a la cartografía de las unidades geológicas presentes en el área.

El mapa resultante, ver figura 13 (consultar tabla 8 para conocer el valor de ID), se obtuvo después de que el Shapefile se refinara con base en la información Geología del cuadrángulo del IGAC H12-Bucaramanga

Tabla 8. *Valor de ID de las formaciones Geológicas.*

<b>ID</b>	<b>SIMBOLO</b>
1	Df
2	Jg
3	Jj
4	JRcg
5	JRcl
6	PCd
7	PDs
8	PEb
9	Qal
10	Qal1
11	Qal2
12	Qbg
13	Qblr
14	Qbo
15	Qda
16	Ql
17	Qllm
18	Qlls
19	TRb
20	TRPt
21	TRt

*Nota: Tomada y modificada del proyecto de microzonificación sismotectónica indicativa de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana.*



*Figura 13, Mapa de geología*

**4.2.2.7 Orientación.** La Orientación identifica la dirección de la pendiente descendente, la tasa de cambio máximo en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. Puede definirse como la dirección de la pendiente. Los valores de cada celda del ráster de salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación.

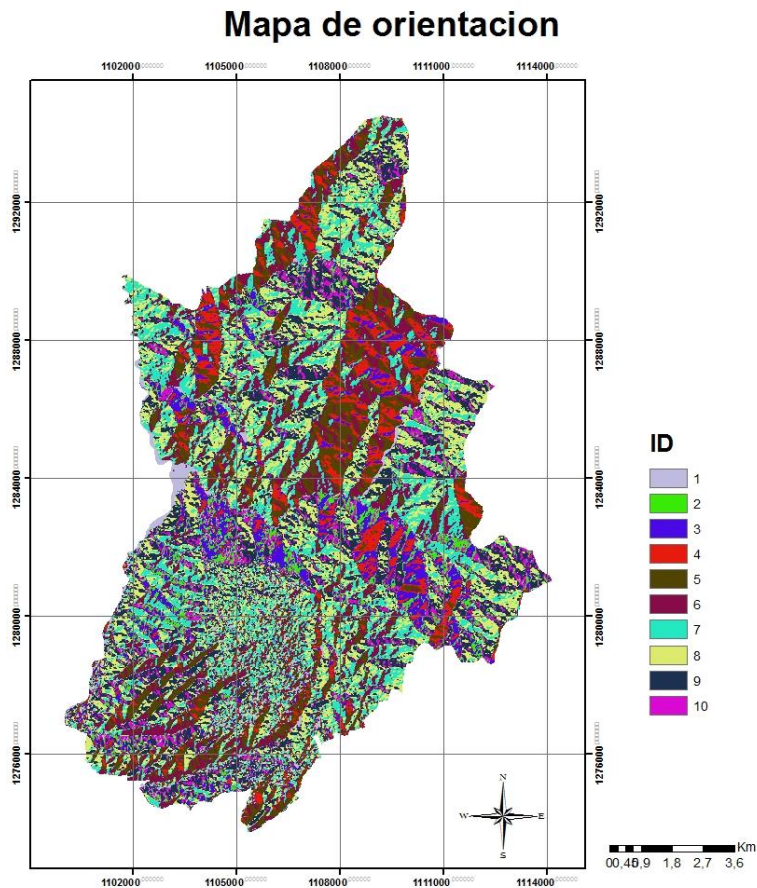
En el mapa de orientación los valores indican la dirección de la brújula a la que apunta la superficie del terreno. Esta es medida en sentido de las agujas del reloj, partiendo de  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ , formando así una circunferencia. Las áreas planas sin una dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1 como muestra la tabla 9 donde esta consignada la clasificación utilizada y extraída

de Environmental Systems Research Institute, Inc (2016). En la figura 14 (ver tabla 9 para conocer valores de ID), se muestra el mapa derivado del MDT.

Tabla 9. Clasificación de la orientación según los grados.

ID	Dirección de la pendiente	Grados
1	Plano	-1
2	Norte	0 – 22.5
3	Noroeste	22.5 – 67.5
4	Este	67.5 - 112.5
5	Sureste	112.5 – 157.5
6	Sur	157.5 – 202.5
7	Suroccidente	202.5 – 247.5
8	Occidente	247.5 – 292.5
9	Noroccidente	292.5 – 337.5
10	Norte	337.5 - 360

Nota: Extraída y modificada de Environmental Systems Research Institute, Inc (2016).



*Figura 14, Mapa de orientación*

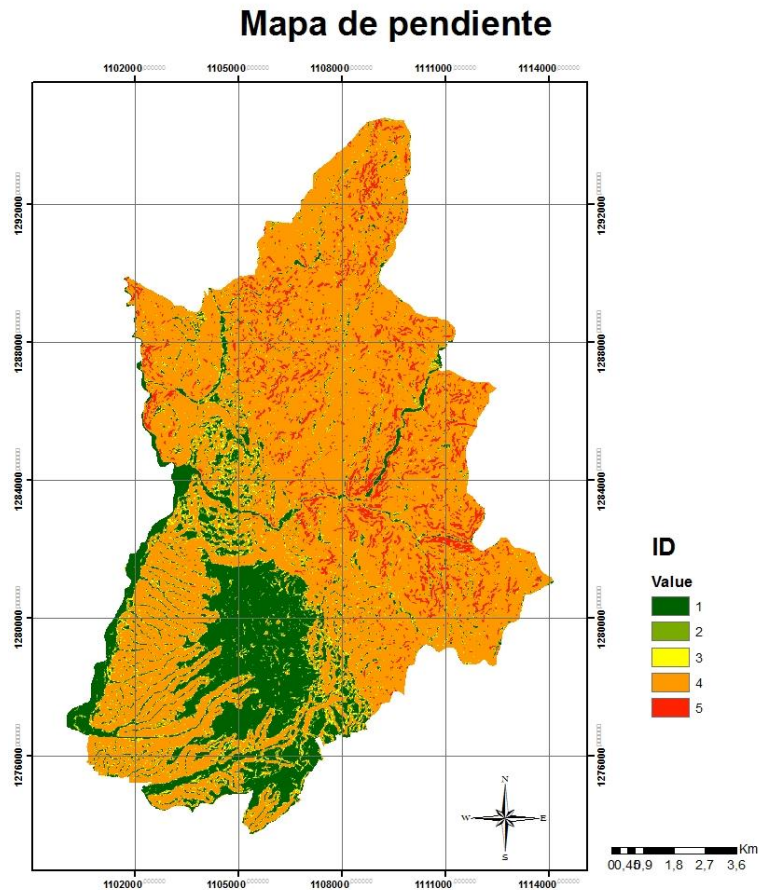
**4.2.2.8 Pendiente.** Identifica el gradiente o tasa de cambio máximo en el valor z de cada celda de una superficie ráster, según la literatura consultada, ésta es la variable con más incidencia en los MM. El mapa obtenido del MDT se muestra en la figura 15 (ver tabla 10 para conocerlos valores de ID).

Las categorías utilizadas para la variable Pendientes se muestra en la tabla 10, y son las propuesta por el SGC en el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000, elaborado en el 2013.

Tabla 10. *Clasificación de la pendiente según grados.*

<b>ID</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Grados</b>
<b>1</b>	Plana a suavemente inclinada	0 - 7
<b>2</b>	Inclinada	7 - 9
<b>3</b>	Muy inclinada	9 – 11
<b>4</b>	Abrupta	11 – 40
<b>5</b>	Escarpada	>40

*Nota: Tomado y modificado de SGC (2013).*



*Figura 15, Mapa de pendiente.*

**4.2.2.9 Precipitación.** Esta es una variable climatológica en la que se mide la cantidad de agua condensado en la atmosfera que cae a tierra en forma de lluvia, dependiendo de la composición de la superficie en la que caiga y su forma, servirá como agente erosivo o de sobrecarga, al igual que evaporación es una variable que cambia dependiendo de las características climáticas de las zonas.

Esta variable es construida con Valores medios históricos de precipitación anuales, estos son extraídos del Consorcio Zonas Inundables 2011 publicado por la CDMB en el 2011, en este se clasifica la precipitación anual media por intervalos de 200 milímetros. El valor máximo y

minimo del mapa obtenido son 1872,03 y 503,999, respectivamente, en la tabla 11 se pueden ver las 7 categorías creadas. El mapa resultante se muestra en la figura 16 (ver tabla 11 para conocer los valores de ID).

Tabla 11. *Clasificación de la precipitación anual.*

ID	Cantidad anual de precipitación (milímetros)
1	500 - 700
2	700 - 900
3	900 - 1100
4	1100 - 1300
5	1300 - 1500
6	1500 - 1700
7	1700 - 1900

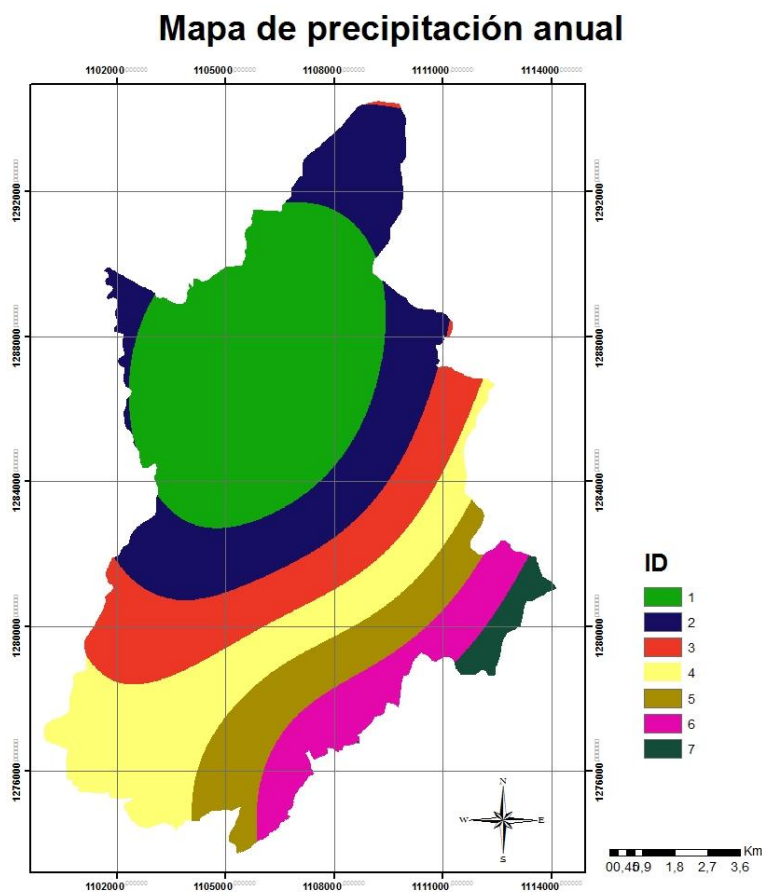


Figura 16, *Mapa de Precipitación anual*

**4.2.2.10 Rugosidad.** La rugosidad se define de forma diferente dependiendo del cálculo utilizado. En este trabajo se utilizó la posición topográfica relativa, también llamada Índice de Posición Topográfica definida por Jenness 2002. La posición topográfica de cada píxel se identifica con respecto a su vecindad local, por lo tanto su posición relativa, el índice es útil para identificar los patrones del paisaje y los límites que pueden corresponder con el tipo de roca, el proceso geomorfológico dominante, las características del suelo o de la vegetación, Jenness (2002), a continuación se muestra la ecuación utilizada.

$$Rugosidad = \frac{("10 \times 10" - "minDEM")}{("maxDEM" - "minDEM")}$$

*Figura 1, Ecuación de rugosidad, tomado y modificado de Jenness (2002).*

Donde, 10×10 = es el nombre del DEM suavizado, minDEM = es el nombre del ráster con la mínima elevación, maxDEM = es el nombre del ráster con la máxima elevación.

Para clasificar la variable rugosidad en una primer medida se tuvo en cuenta la propuesta del autor de la metodología, Jenness (2002), quien propone las categorías 1,2 y 3 que se muestran en la tabla 12, adicional para esta clasificación se creó una clase con el nombre de nula, cuyo propósito fue incluir los pixeles con pendiente poco pronunciadas en los que no se realizaba el cálculo de rugosidad.

Tabla 12: *Tabla de Rugosidad.*

ID	Rugosidad	Valores
1	Baja	0 – 0,45
2	Media	0,45 – 0,55
3	Alta	0,55 -1
4	Nula	Plana

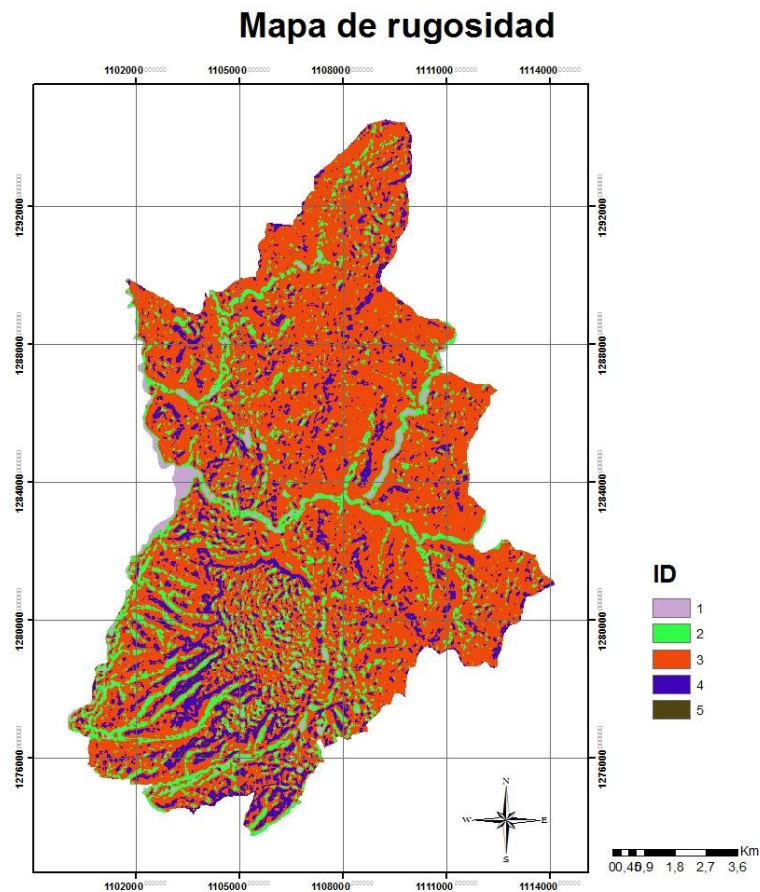
*Nota: Basada en Jenness (2002).*

Al momento de cambiar el MDT se optó por utilizar la clasificación utilizada por el servicio geológico colombiano en la elaboración del mapa de amenazas por movimientos en masa, plancha 120 – Bucaramanga departamento de Santander, ver tabla 13, en esta se crean cinco categorías para la variable rugosidad, el mapa resultante se muestra en la figura 17 (ver tabla 13 para conocer los valores de ID).

Tabla 13: *Clasificación utilizada de Rugosidad.*

DESCRIPCION	CLASIFICACION	VALOR NORMALIZADO
<b>Rugosidad muy baja o nula</b>	1	0.1
<b>Rugosidad baja</b>	2	0.3
<b>Rugosidad Media</b>	3	0.5
<b>Rugosidad Alta</b>	4	0.7
<b>Rugosidad Muy Alta</b>	5	0.9

*Nota: Tomado y modificado de Memoria explicativa del mapa de amenazas por movimientos en masa, plancha 120 – Bucaramanga departamento de Santander.*



*Figura 17, Mapa de rugosidad*

**4.2.2.11 Zona dinámica.** El mapa de Zona dinámica se extrajo del proyecto de Zonificación Sismotectónica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, publicado por el antiguo INGEOMINAS, en el 2001 y suministrado por el SGC, y se refinó, ver figura 18 (ver tabla 14 para conocer los valores de ID), con base en el mapa de geología utilizado en la presente práctica empresarial, la clasificación que se utiliza y muestra en la tabla 14 es la misma del proyecto de zonificación.

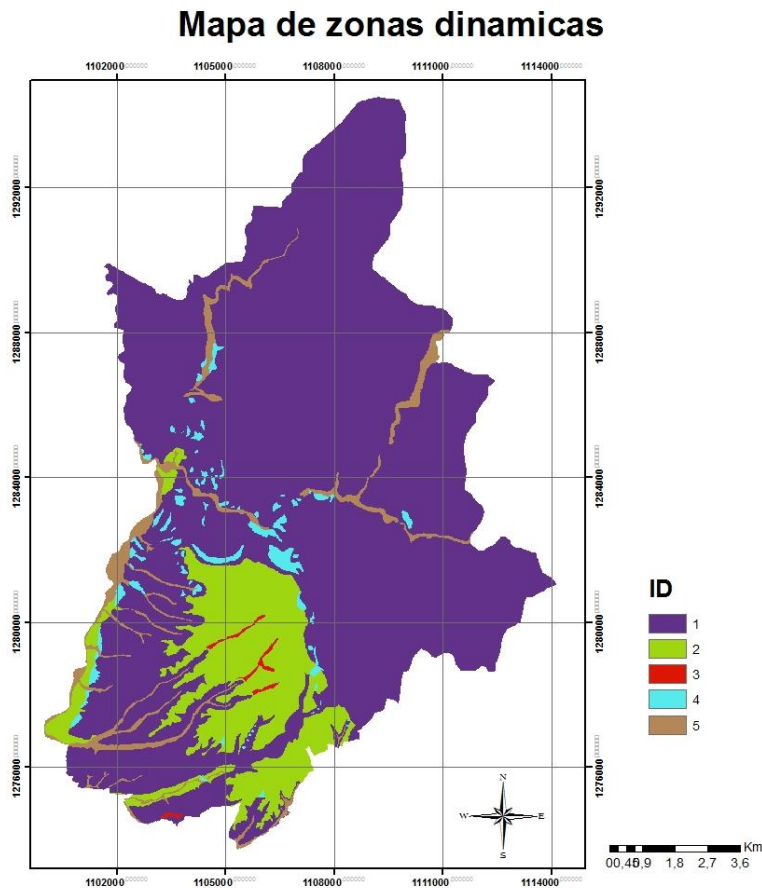
En total son tres zonas de respuesta dinámica diferente para las cuales se hacen las siguientes observaciones: Zona uno - Roca: Esta zona comprende los depósitos de roca correspondientes a cualquier depósito que se pueda considerar como roca pura; Zona dos – Suelo Rígido, símbolo 3:

donde se encuentra la mayor parte de la población del área metropolitana de Bucaramanga, corresponde a depósitos de suelo rígido; Zona tres – Llenos, símbolo 4: corresponde a los rellenos existen; y dos zonas adicionales para las cuales no se derivó un espectro de respuesta debido a que se encuentran en zonas de áreas restringidas para su uso en edificación como son la zona de coluviones (C) y las rondas de los ríos(R).

Tabla 14. *Clasificación e ID de Zona dinámica.*

<b>ID</b>	<b>SIMBOLO</b>
<b>1</b>	1
<b>2</b>	3
<b>3</b>	4
<b>4</b>	C
<b>5</b>	R

*Nota: Tomada y modificada del proyecto de Zonificación Sismotectónica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga.*



*Figura 18, Mapa de zonas dinámicas*

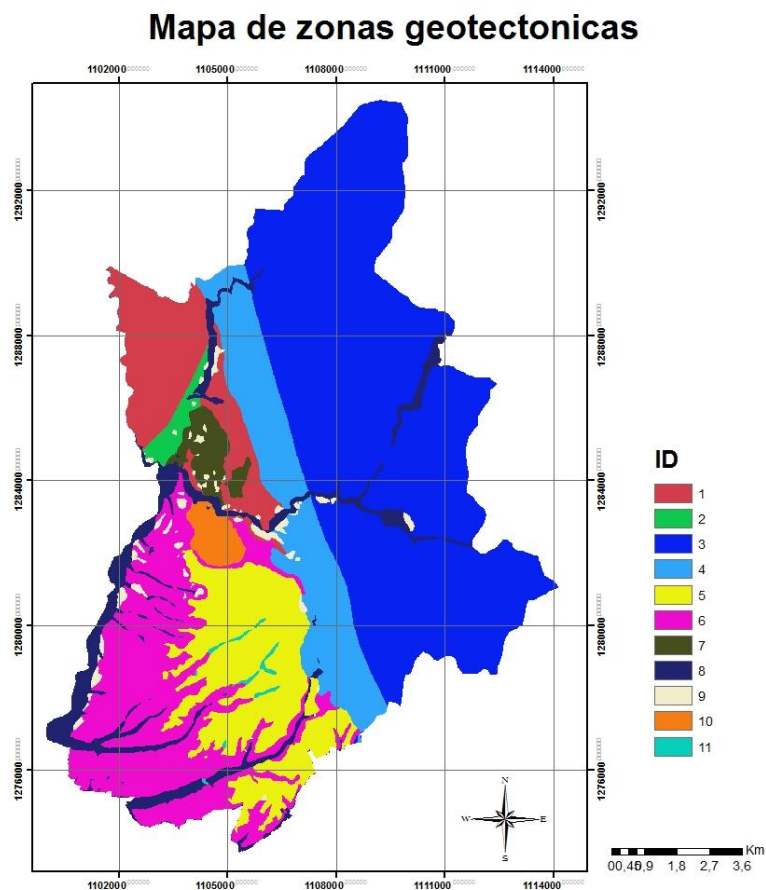
**4.2.2.12 Zona geotécnica.** Esta variable se extrajo del proyecto de Zonificación Sismotectónica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, publicado por INGEOMINAS en el 2001, y suministrado por el SGC, la clasificación que se utiliza y muestra en la tabla 15 es la misma del proyecto. El mapa utilizado, ver figura 19 (ver tabla 15 para conocer los valores de ID), se refino con base en el mapa de geología utilizado para el presente informe.

Tabla 15. *Clasificación e ID de Zona geotécnica.*

ID	ZONA
1	1 A
2	1 B
3	2 A

4	2 B
5	3 A
6	4 A
7	4 B
8	6
9	7
10	8
11	9

*Nota: Tomada y modificada del proyecto de Zonificación Sismotectónica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, (2001).*



*Figura 19, Mapa de zonas geotectónicas*

#### **4.3 Obtención de datos de entrenamiento, simulación y validación:**

Esta fase consiste en la obtención de los datos necesarios para las etapas de entrenamiento, simulación y validación de la red neuronal artificial, los cuales son extraídos en matrices numéricas

que representen los atributos de los mapas elegidos, refinados y utilizados en la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa para el presente trabajo.

En la etapa de entrenamiento se utilizara información referente a zonas clasificadas como susceptibles y no susceptibles a movimientos en masa. La etapa de simulación involucra toda la información de los atributos consignada en los mapas de las variables. La validación se realiza con ánimo de evaluar la RNA, en esta etapa se utilizan los datos producidos por la red, los datos de entrenamiento y una porción extraída al azar de los datos de entrenamiento.

Para la creación de las tres matrices fue necesario primero normalizar los datos y definir los puntos de entrenamiento, a continuación se explica estas dos actividades junto con la creación de las matrices.

**4.3.1 Normalización.** El propósito de esta etapa fue presentar de forma estandarizada las características de las variables utilizadas. Primero se definió la función de activación de la RNA, pues los límites de esta acotan a su vez los límites de la función de normalización, basándose en la bibliografía consultada, Negnevitsky, (2002), Gomeza & Kavzoglu, (2005), Londoño, (2007), Tunusluoglu, et al, (2007), Valdés., et al, (2011), Tien Bui, et al. (2012), la función de activación utilizada fue la función sigmoideal logarítmica, esta restringe la salida a valores entre cero y uno.

En la siguiente ecuación se muestra la fórmula de normalización Max-Min donde “v” es el dato normalizado, “v” el dato original, “U” el límite de normalización superior igual a 0.9 y “L” el límite de normalización inferior, igual a 0.1.

$$v' = \frac{v - \min(v)}{\max(v) - \min(v)} (U - L) + L$$

En la fórmula de normalización el valor “v” es el identificador de las categorías, el valor mínimo de “v” siempre es 1 mientras el máximo es el número de categorías de cada variable tenida en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa. En la tabla 16 se observa el valor normalizado para cada categoría de los catorce criterios seleccionados.

Tabla 16. *Valores normalizados.*

<b>Criterio</b>	<b>Categoría</b>	<b>ID</b>	<b>Id Normalizado</b>
<b>Cobertura y uso actual del suelo</b>	Acp	1	0,1
	BN-S	2	0,15333333
	BP	3	0,20666667
	C-P	4	0,26
	Cm	5	0,31333333
	Cp	6	0,36666667
	Cps	7	0,42
	Ct	8	0,47333333
	Dp	9	0,52666667
	Embalse	10	0,58
	Mi	11	0,63333333
	Pj	12	0,68666667
	Pm	13	0,74
	Pn	14	0,79333333
	R	15	0,84666667
	U	16	0,9
<b>Conflicto de uso del suelo</b>	A	1	0,1
	Embalse	2	0,26
	I	3	0,42
	MI	4	0,58
	Mina	5	0,74
	Urbano	6	0,9
<b>Curvatura</b>	Cóncava	1	0,1
	Plana	2	0,5
	Convexa	3	0,9
<b>Drenajes</b>	>150	1	0,1
	0-50	2	0,36666667
	50-100	3	0,63333333

	100-150	4	0,9
<b>Evaporación</b>	1165 - 1265	1	0,1
	1265 - 1365	2	0,36666667
	1365 - 1465	3	0,63333333
	1465 - 1565	4	0,9
	>1000	1	0,1
<b>Fallas</b>	0-250	2	0,3
	250-500	3	0,5
	500-750	4	0,7
	750-1000	5	0,9
	Df	1	0,1
<b>Geología</b>	Jg	2	0,14
	Jj	3	0,18
	JRcg	4	0,22
	JRcl	5	0,26
	PCd	6	0,3
	PDs	7	0,34
	PEb	8	0,38
	Qal	9	0,42
	Qal1	10	0,46
	Qal2	11	0,5
	Qbg	12	0,54
	Qblr	13	0,58
	Qbo	14	0,62
	Qda	15	0,66
	Ql	16	0,7
	Qllm	17	0,74
	Qlls	18	0,78
	TRb	19	0,82
	TRpt	20	0,86
	TRt	21	0,9
	<b>Orientación</b>	Plano	1
Norte		2	0,18888889
Noreste		3	0,27777778
Este		4	0,36666667
Sureste		5	0,45555556
Sur		6	0,54444444
Suroccidente		7	0,63333333
Occidente		8	0,72222222
Noroccidente		9	0,81111111
norte		10	0,9
<b>Pendiente</b>	0-7	1	0,1
	7-9	2	0,3
	9-11	3	0,5
	11-40	4	0,7

	>40	5	0,9
<b>Precipitación</b>	500-700	1	0,1
	700-900	2	0,23333333
	900-1100	3	0,36666667
	1100-1300	4	0,5
	1300-1500	5	0,63333333
	1500-1700	6	0,76666667
	1700-1900	7	0,9
<b>Rugosidad</b>	Muy baja	1	0,1
	Baja	2	0,3
	Media	3	0,5
	Alta	4	0,7
	Muy alta	5	0,9
<b>Vías</b>	>150	1	0,1
	0-50	2	0,3
	50-100	3	0,5
	100-150	4	0,7
	Urbano	5	0,9
<b>Zona dinámica</b>	1	1	0,1
	3	2	0,3
	4	3	0,5
	C	4	0,7
	R	5	0,9
<b>Zona geotécnica</b>	Zona 1 A	1	0,1
	Zona 1 B	2	0,18
	Zona 2 A	3	0,26
	Zona 2 B	4	0,34
	Zona 3 A	5	0,42
	Zona 4 A	6	0,5
	Zona 4 B	7	0,58
	Zona 6	8	0,66
	Zona 7	9	0,74
	Zona 8	10	0,82
	Zona 9	11	0,9

**4.3.2 Puntos de entrenamiento.** Para la fase de entrenamiento fue indispensable suministrar a la RNA puntos con los que pudiera generar una evaluación de los criterios que son tenidos en cuenta, el objetivo de estos es suministrar un ejemplo de comportamiento a la red, de esta forma y después de múltiples iteraciones se genera un aprendizaje basado en la comparación y reajuste de pesos iniciales establecidos por la herramienta nntool. En este proceso se confrontan las

características de lugares en los que se han presentado movimientos en masa y lugares considerados de baja probabilidad a que sucedan debido a sus características Geológicas, Edafológicas, Geomorfológicas.

Para que la fase de entrenamiento se desarrolle de forma adecuada es indispensable suministrar lugares considerados como baja y alta probabilidad a generar movimientos en masa, para esto se generaron dos mapas de puntos de extensión Shape; uno que representa los lugares en los que ha ocurrido remoción en masa dentro del municipio de Bucaramanga, elaborados con algunos datos de los proyectos de Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, girón, publicado en el 2009 por INGEOMINAS, Consorcio zonas inundables 2011, publicado por la CDMB en el 2011, Sistema de información de movimientos en masa, pagina web del SGC consultada en noviembre del 2016, y algunos puntos suministrados por la oficina de amenazas de la alcaldía de Bucaramanga en noviembre del 2016; En el otro mapa se eligieron zonas consideradas como baja susceptibilidad, para esto se tuvieron en cuenta los criterios de Geología, Pendiente, Zona dinámica, Zona geotécnica, Distancia a fallas, Uso y Conflicto del suelo.

Del conjunto de los puntos destinados para el entrenamiento, se extrajeron el 25% de los datos con el fin de utilizarlos en la validación de la RNA, este porcentaje se había definido anteriormente basándose en la bibliografía consultada. Con El 75% de los puntos restantes se generó un buffer de 25 metros de radio. De este modo se generaron 10650 pixeles para la fase de entrenamiento de los cuales 5325 son considerados como de baja susceptibilidad y 5325 como de alta.

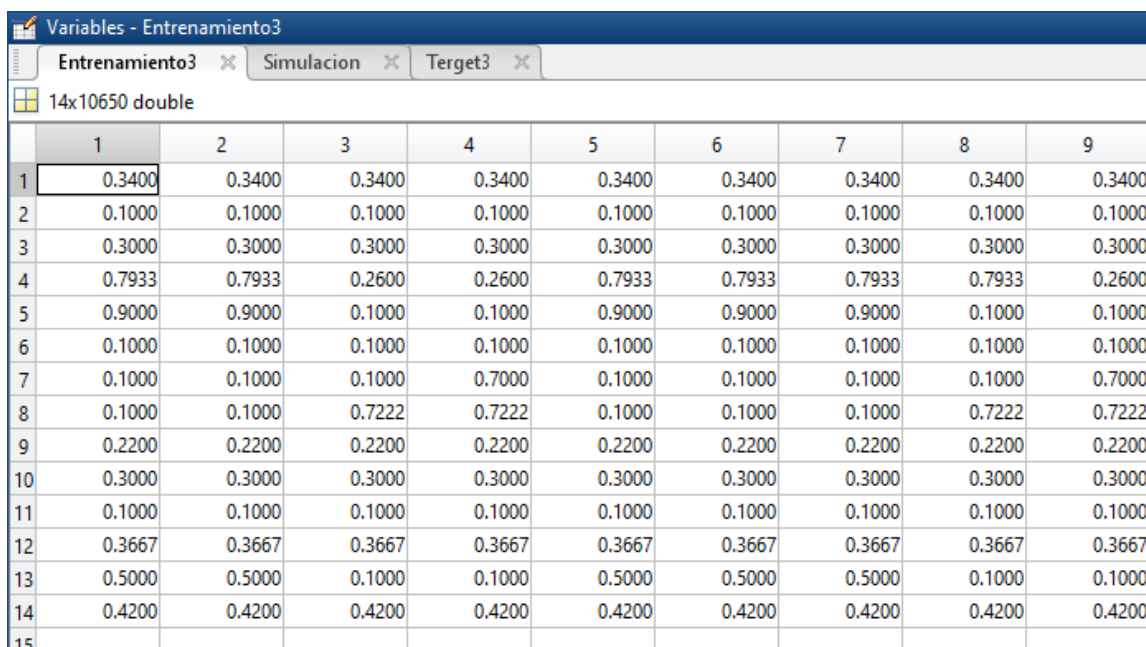
**4.3.3 Creación de las matrices.** Para que la RNA pueda simular de forma adecuada, es indispensable que esta cuente con los datos requeridos para su procesamiento, estos

son tres matrices en las que la información de las características de los 3.095.173 píxeles del municipio de Bucaramanga esta consignada.

A continuación se presenta la creación de cada una de las tres matrices.

**4.3.3.1 Matriz de entrenamiento.** Una vez conformado el conjunto de los puntos de entrenamiento se utilizó la herramienta Sample de ArcGIS 10.1 para extraer las características de los 14 criterios tenidos en cuenta para la RNA, la tabla resultante fue refinada en Excel y exportada en formato .txt para ser importada posteriormente a MATLAB, ver figura 20.

En esta matriz están consignadas las 14 características de los 10650 píxeles tenidos en cuenta para el entrenamiento de la red, de este modo quedo conformada por 14 filas y 10650 columnas.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400
2	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
3	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
4	0.7933	0.7933	0.2600	0.2600	0.7933	0.7933	0.7933	0.7933	0.2600
5	0.9000	0.9000	0.1000	0.1000	0.9000	0.9000	0.9000	0.1000	0.1000
6	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
7	0.1000	0.1000	0.1000	0.7000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.7000
8	0.1000	0.1000	0.7222	0.7222	0.1000	0.1000	0.1000	0.7222	0.7222
9	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200	0.2200
10	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
11	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
12	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667
13	0.5000	0.5000	0.1000	0.1000	0.5000	0.5000	0.5000	0.1000	0.1000
14	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200	0.4200
15									

Figura 20: Matriz de entrenamiento visualizada en MATLAB R2014A

**4.3.3.2 Matriz de objetivos.** Esta matriz representa la probabilidad de los puntos de entrenamiento a presentar movimientos en masa, uno (1) si son susceptibles y cero (0) si son zonas con características poco favorables a estos. En la figura 21 se muestra la dimensión de la matriz de

target, una fila de 5325 columnas que representan los valores de los pixeles donde han ocurridos deslizamientos seguida de otras 5325 columnas que representan zonas consideradas de baja susceptibilidad.

	1	2	3	4	5	6	7	8										
1	1	1	1	1	1	1	1	1										
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		

Figura 21, Matriz de objetivos.

**4.3.3.3 Matriz de simulación.** La finalidad de esta matriz fue brindarle a la RNA las características que se evaluaron en la fase de simulación. Para este fin el primer paso fue exportar con la herramienta Sample de ArcGis los atributos de cada uno de los 14 mapas revisados y clasificados en las fase de Verificación y Clasificación de datos, luego se importaron los datos a MATLAB R2014A, una vez visualizados los atributos en forma matricial se cambió la ID de las clasificaciones por el valor normalizado para luego establecer la matriz con las dimensiones requeridas. De esta forma la matriz quedo con 14 filas y 3.095.173 columnas, como se ve en la figura 22.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600	0.2600
2	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
3	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
4	0.1533	0.9000	0.1533	0.1533	0.1533	0.1533	0.1533	0.1533	0.1533
5	0.9000	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667
6	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667
7	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
8	0.9000	0.8111	0.8111	0.1889	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
9	0.3400	0.3800	0.3800	0.3800	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400	0.3400
10	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
11	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
12	0.3667	0.6333	0.6333	0.6333	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667
13	0.1000	0.9000	0.9000	0.1000	0.1000	0.1000	0.9000	0.1000	0.9000
14	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
15									

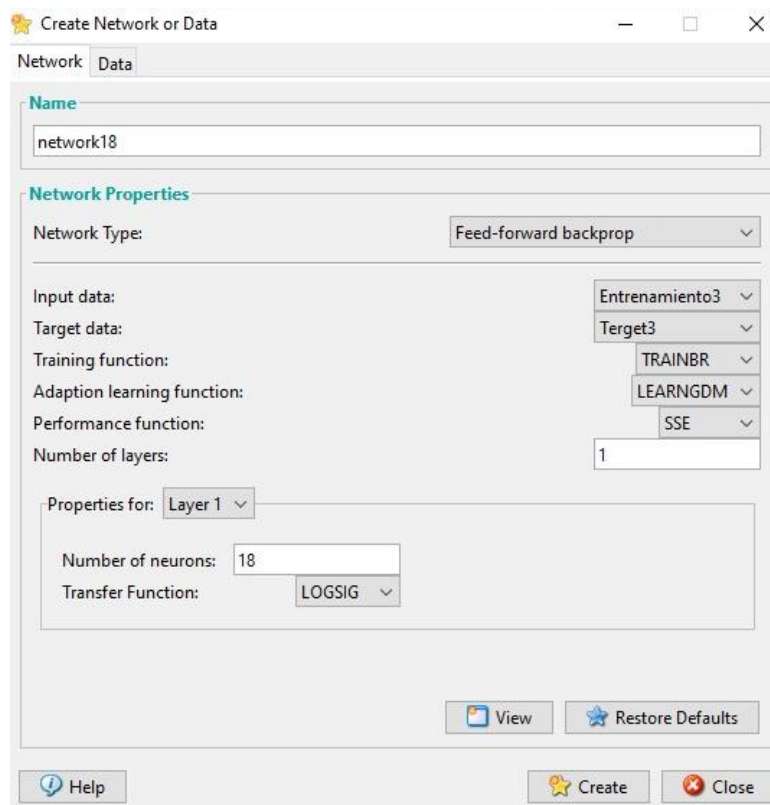
Figura 22: Matriz de simulación.

#### 4.4 Ejecución de la RNA, entrenamiento y procesamiento

En esta tercera fase se ejecutó el modelo definido para la red neuronal partiendo de los datos obtenidos en el capítulo 5.3. El modelo implementado, y más eficiente para el análisis de geoamenazas según literatura científica consultada, Negnevitsky, (2002), Chacón, J., (2005), Gomeza & Kavzoglu, (2005), Londoño, (2007), Tunusluoglu, et al, (2007), Valdés., et al, (2011), es el modelo de perceptrón multicapa. Para la etapa de entrenamiento se utilizara el algoritmo de aprendizaje Back Propagation (MLP-BP) o propagación hacia atrás. El modelo de la red neuronal y el algoritmo de aprendizaje se utilizan ampliamente debido a la alta tasa de reconocimiento de patrones. Esta fase se desarrollara en MATLAB, un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado, y cuenta con un lenguaje de programación propio.

**4.4.1 Entrenamiento.** Esta actividad se comenzó ejecutando la herramienta nntool de MATLAB A2014R, en esta se importaron las matrices conformadas en el numeral 4.3, luego se

creó la RNA, ver figura 23, en este proceso se especificó el modelo de la red basándose en la bibliografía consultada, Negnevitsky, (2002), Gomeza & Kavzoglub, (2005), Londoño, (2007), Tunusluoglu, et al, (2007), Valdés., et al, (2011), Tien Bui, et al. (2012), el tipo de red utilizada fue Feed-forward backprop, en las casillas de Training fuction, Adaption learning function, Perfomance Funtion, Number of layers y Transfer Funtion se dejó la misma configuración de Tien Bui, et al (2012), la cual es, TRAINBR, LEARNGDM, SSE, 1, LOGSIG, respetivamente. Las casillas de Number of neurona, Input data y target data, fueron llenadas según la necesidad de cada caso.



*Figura 23, Creación de la RNA en la herramienta nntool de MATLAB R2014A*

Luego de crear la RNA se ingresó a esta y se ejecutó el entrenamiento de la misma en la ventana Train, ver figura 24, en Training Info se ingresó las matrices de entrenamiento y target, en Training Parameters se dejaron los valores por defecto, con excepción del parámetro goal que se le asignó

un valor de 0.001 al igual que Tien Bui, et al (2012). Una vez definidos los parámetros e ingresado las matrices se dio inicio al entrenamiento de la red.

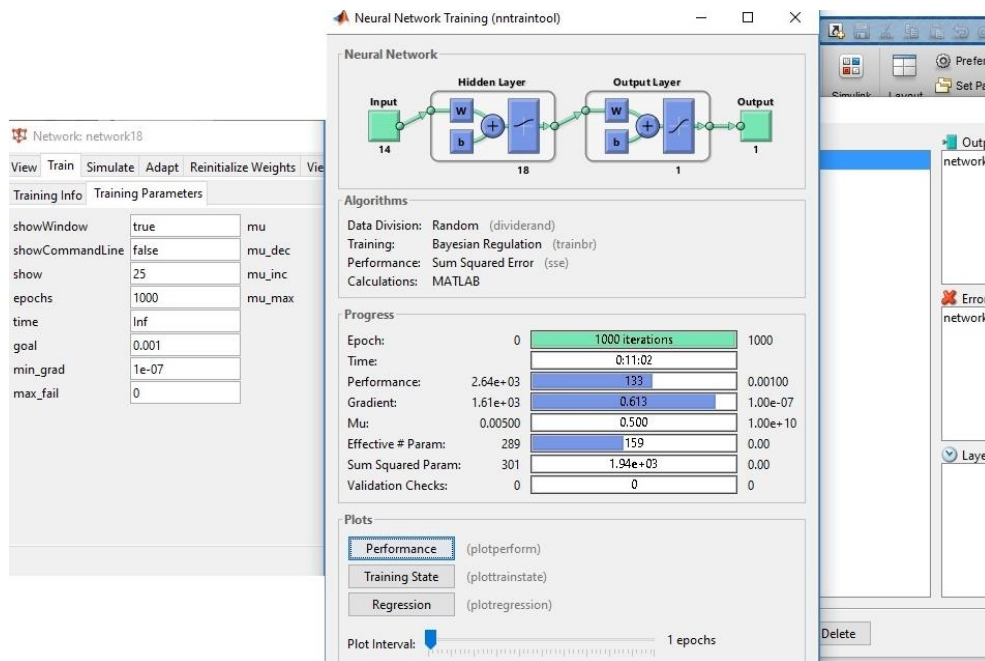


Figura 24, Entrenamiento de la RNA en la herramienta nntool de MATLAB R2014A

Para el presente informe se realizó una primer etapa en la que se entrenaron 21 redes, ver tabla 17, en las que su única variante era el número de neuronas ocultas, de este primer ciclo de entrenamiento se pudo observar que a mayor número de neuronas ocultas menos era el error (SSE) pero su entrenamiento requería más tiempo, además que no era necesario pues los errores llegaban a los mínimos niveles con 18 neuronas ocultas.

Tabla 17. Resultados de diferentes entrenamientos.

Numero de neuronas ocultas	Iteraciones	SSE	Training	Test	All
1	1000	802	0.8035	0.77826	0.79968
2	1000	581	0.86593	0.84855	0.86333

3	1000	701	0.83181	0.82816	0.83128
4	1000	292	0.93447	0.93749	0.93493
5	1000	202	0.95438	0.94413	0.95283
6	836	244	0.94496	0.94197	0.94453
7	740	148	0.96675	0.95662	0.96523
8	902	155	0.96507	0.97665	0.96681
9	767	141	0.9683	0.95966	0.96701
10	1000	147	0.9669	0.96529	0.96666
11	1000	143	0.9678	0.96876	0.96794
12	1000	145	0.96743	0.96557	0.96716
13	1000	139	0.96892	0.96242	0.96795
14	1000	140	0.96866	0.96519	0.96814
15	1000	140	0.96847	0.96899	0.96855
16	1000	141	0.96827	0.97103	0.96868
17	1000	176	0.9603	0.96694	0.9613
18	1000	135	0.96961	0.96157	0.96841
19	1000	140	0.96869	0.97082	0.96901
20	1000	138	0.96909	0.96897	0.96907
50	1000	134	0.96988	0.96087	0.96853

*Nota: Los valores varían según sus neuronas ocultas.*

Debido a que el parámetro Sum Squared Error (SSE), arrojo valores tan altos, ver tabla 16, se elaboraron múltiples entrenamientos en los que se suprimieron diferentes variables con el fin de mirar la respuesta de los SSE, el procedimiento se realizó con 18 neuronas ocultas, siendo éste el número promedio de las neuronas ocultas utilizadas en la bibliografía, los valores y las variables extraídas se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. *Resultados de RNA con diferentes matrices de entrenamiento.*

<b>VARIABLES EXTRAÍDAS</b>	<b>SSE</b>
<b>Precipitación, Evaporación</b>	267
<b>Drenaje</b>	214
<b>Fallas</b>	145
<b>Rugosidad</b>	139
<b>Vías</b>	149
<b>Fallas, Drenajes, Vías</b>	331
<b>Pendiente, Curvatura, Orientación, Rugosidad</b>	225
<b>Zona dinámica, Zona geotécnica, Geología</b>	229

**Cobertura y uso actual del suelo,  
Conflicto de uso del suelo**

152

Según los datos obtenidos en la tabla 17, se puede observar que entre más variables se tenga en cuenta menor es el error, además de esto se observa que las variables, fallas, vías y drenajes, son las características más influyentes ya que el error aumenta a casi el doble cuando se les excluye del entrenamiento, bajo este mismo análisis, se puede decir que el factor de la Rugosidad no aporta en el análisis.

Después de que el SSE fuese superior en los entrenamientos que se realizaron sin ciertas variables se comprobó que las 14 entradas que se habían definido tienen una influencia directa en el SSE y por ende sobre el entrenamiento de la RNA.

En la fase de entrenamiento se decidió utilizar las catorce entradas definidas en un principio y 18 neuronas ocultas. Teniendo en cuenta que el parámetro SSE fue alto en la fase de entrenamientos y que posteriormente la visualización de los datos producidos por la red presentaron incongruencias, ver numeral 5.2.1.1, se resolvió cambiar el MDT del cual se obtuvieron las variables de pendiente, rugosidad, orientación y curvatura, al momento de cambiar los datos correspondientes a las variables antes mencionadas se procedió a cambiar igualmente las matrices de entrenamiento y simulación.

El entrenamiento de la nueva red arrojó un valor de 39 en el parámetro SSE, casi un tercio del valor pasado obtenido, con estos datos de respuesta se decidió realizar la generación del mapa de susceptibilidad y la validación a este.

**4.4.2 Procesamiento.** En la etapa de procesamiento se simuló la RNA, para esto se utilizó la matriz de simulación que recoge todas las características de los criterios tenidos en cuenta

para la estimación de la susceptibilidad a movimientos en masa, esta etapa genero una salida, ver figura 25, de una matriz de una fila con 3.095.173 columnas que representan los pixeles del municipio de Bucaramanga y que están dispuestos en el mismo orden de entrada de la matriz de simulación, estos varían de cero a uno, correspondiendo a los límites de la función de activación, la función Sigmoidal logarítmica.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

*Figura 25, Matriz de salida de la RNA visualizada en MATLAB R2014A*

#### 4.5 Generación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

Con el fin de generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa se generó una nueva variable en MATLAB R2014a, la cual está constituida por tres columnas y 3.095.173 filas, ver figura 26, las primer columna representa los valores que arrojo la simulación de la RNA, las otras dos columnas son las coordenadas de estos valores, estas se dispusieron partiendo del hecho que los resultados de la red, se dieron en el mismo orden de cómo se introdujeron los datos en la simulación.

	1	2	3	4	5
1	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
2	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
3	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
4	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
5	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
6	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
7	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
8	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		
9	1.0000	1.1093e+06	1.2945e+06		
10	1.0000	1.1093e+06	1.2945e+06		
11	1.0000	1.1093e+06	1.2945e+06		
12	1.0000	1.1093e+06	1.2945e+06		
13	1.0000	1.1092e+06	1.2945e+06		

*Figura 26, matriz de resultados con coordenadas, visto en MATLAB R2014a*

La variable antes mencionada se exporto en formato .txt y se importó en ArcGIS. Con esta se produjo un mapa en formato matricial, ver figura 26, que representa los resultados obtenidos en la simulación de la RNA, estos valores tienden a uno cuando las características del lugar que representan son más susceptibles a movimientos en masa y a cero cuando presentan menor propensión a presentar MM, de la misma forma como se había dispuesto en la matriz Targets. El mapa de salida conserva el tamaño de pixeles de 7x7.

### Visualización de datos producidos por la RNA

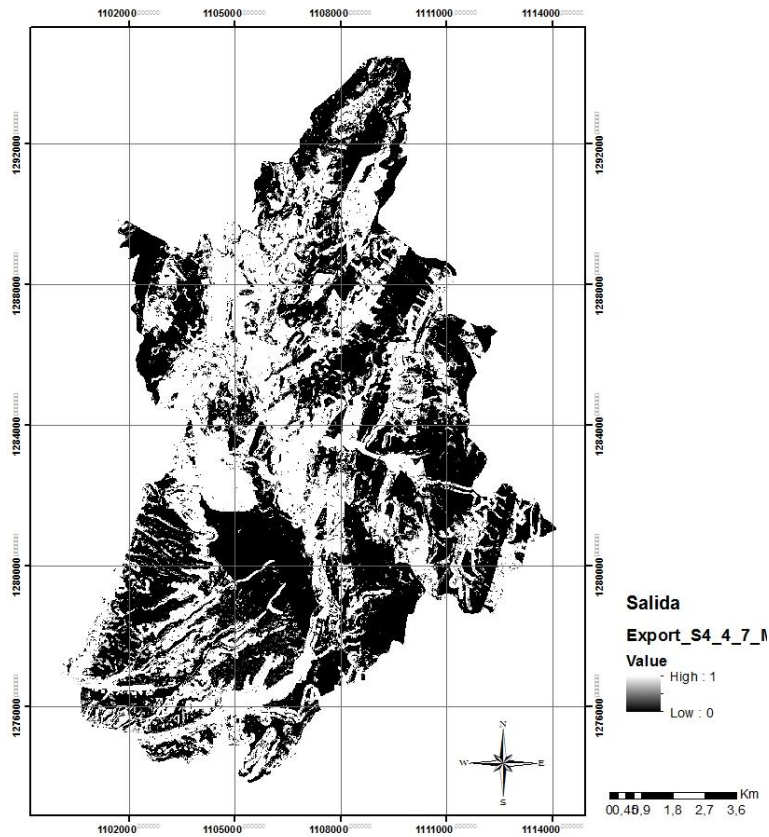


Figura 26, visualización de datos de la RNA.

**4.5.1 Obtención del mapa de susceptibilidad.** Para la obtención del mapa de susceptibilidad a movimiento en masa del municipio de Bucaramanga, primero se definió el número de categorías en las que se dividiría la salida de la RNA, en este caso son 5, ver tabla 19. El número de clases se eligió teniendo en cuenta los grados de susceptibilidad utilizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), en su publicación, Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa, publicada en el 2012.

Tabla 19. Grados de susceptibilidad.

<b>Categoría de la susceptibilidad</b>	<b>Grado de susceptibilidad</b>
<b>1</b>	Muy baja
<b>2</b>	Baja
<b>3</b>	Moderada
<b>4</b>	Alta
<b>5</b>	Muy alta

*Nota: Tomada de Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa (2012)*

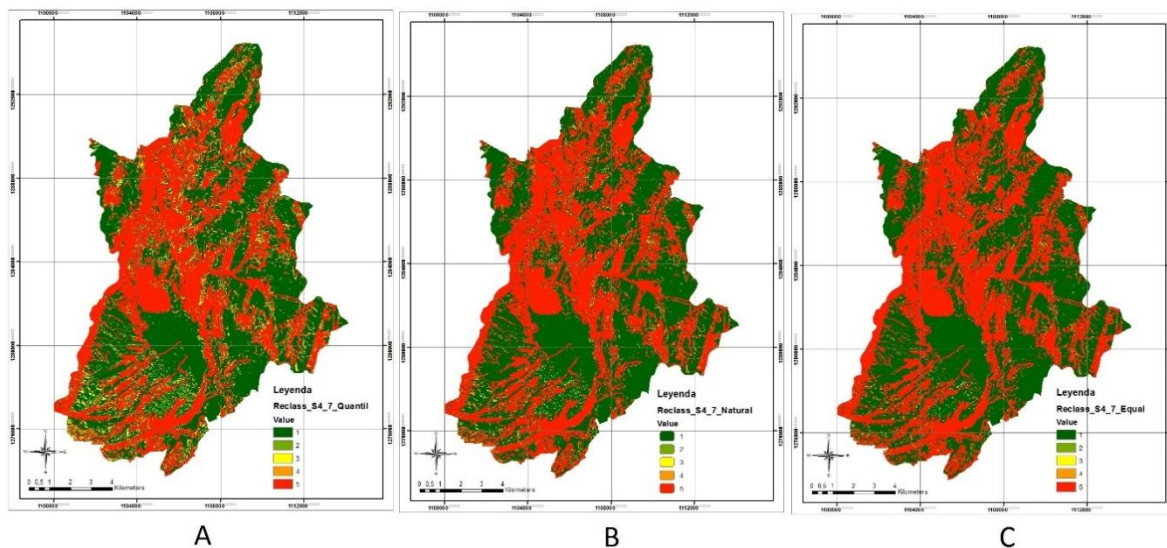
También se realizó una revisión de la bibliografía para encontrar el método de clasificación adecuado. En Pradha y Lee 2009, se construye un mapa de zonas con riesgo a presentar deslizamientos, para ello los investigadores utilizan Redes neuronales artificiales junto a otros dos métodos. En las tres metodologías los resultados fueron analizados cualitativamente usando modelos de clasificación en intervalos iguales. Pradha y Lee en su tercera publicación del 2010 también exponen una metodología en la que utilizan RNA para la evaluación del riesgo en un área de la isla de Penang, en Malasia, en la cual utilizan el mismo modelo de clasificación utilizado en su publicación del 2009.

En la investigación realizada por Londoño en el 2016, el autor utiliza las RNA para evaluar de forma holística el riesgo en la ciudad andina de Manizales-Colombia, este opta por dividir los resultados obtenidos en intervalos de clases iguales según el histograma de frecuencias de los datos, de manera que cada uno de los rangos contenga igual cantidad de datos. En Tien et al 2012 se reconocen diferentes métodos de clasificación pero se escoge el método de ruptura natural de clases propuesto en otros trabajos y se divide en 4 clases la totalidad de datos.

Con base en la bibliografía consulta y páginas Web analizadas entre las que se encuentra foros, videos y paginas oficiales como la de la compañía Esri, empresa desarrolladora del software ArcGIS, se utilizó la herramienta Reclassify del arctoolbox de ArcGIS 10.1 para clasificar los valores de salida de la red neuronal artificial. Para este caso se utilizaron tres opciones de clasificación, Equal Interval, quantile y Natural Breaks o Jenks.

La opción de Equal Interval divide el rango de valores o atributos en categorías de igual tamaño, también determina automáticamente las rupturas de clases en intervalos iguales según el rango de valores. En la opción de Quantile se asigna el mismo número de datos a cada clase. El método de Natural Breaks (Jenks) se basa en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Esta técnica se caracteriza porque agrupa mejor los valores similares y maximiza las diferencias entre todas las clases, los datos se clasifican en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos.

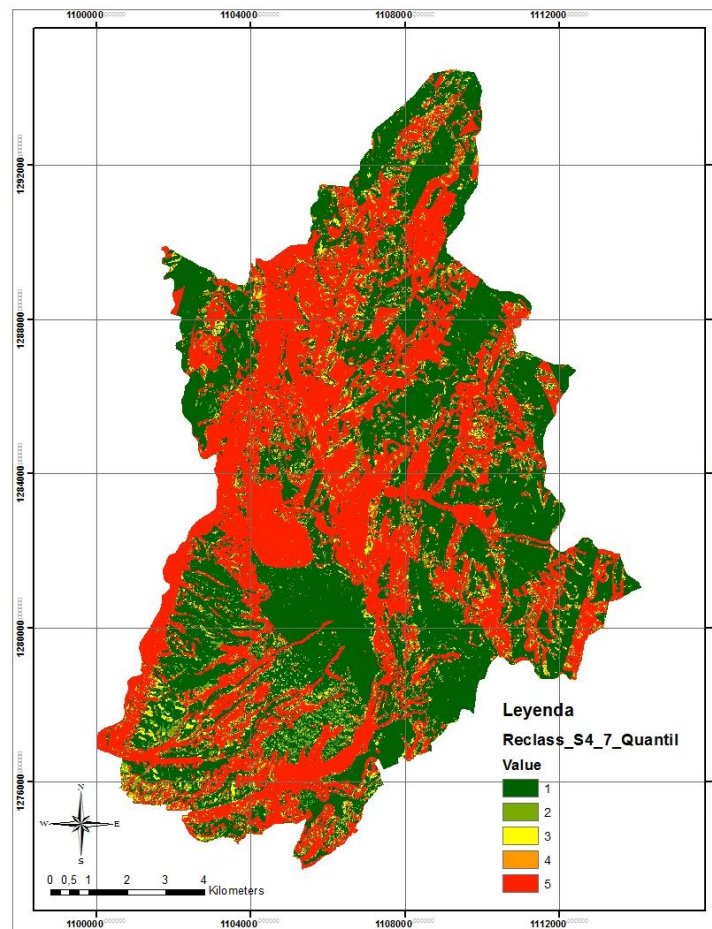
Teniendo en cuenta que los valores que representan la probabilidad de ocurrencia de movimientos de masa están representados por valores decimales de cero a uno siendo uno la probabilidad máxima de presentar movimientos de masa; se utilizó los métodos de Equal Interval figura 28C, Quantile figura 28A, y Natural Breaks figura 28B, para ordenas y visualizar la salida de la red neuronal artificial.



*Figura 28, Mapas de susceptibilidad clasificados con diferentes métodos.*

La diferencia principal de los métodos utilizados está en la cantidad de datos clasificados en las categorías. Al utilizar el método Quantile algunos datos que antes se clasificaban como zonas

seguras se clasifican como lugares con una moderada susceptibilidad. Partiendo del hecho de que es mejor clasificar una zona como insegura aunque no lo sea a clasificar un lugar seguro aunque presente cierta susceptibilidad, se prefirió la clasificación obtenida con el método Quantile, ver figura 29.



*Figura 29, Mapa de susceptibilidad clasificado por el método Quantile.*

#### 4.6 Validación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

Para la validación de los resultados se tuvo en cuenta autores como Tunusluolu, 2007; Prabhan y Lee, 2009; Chauhan et al, 2010; Pradhan et al, 2010; Prabhan y Lee, 2010c; Tien et al, 2012; los cuales plantean la utilización de métodos estadísticos con la finalidad de determinar la exactitud de

los resultados obtenidos de redes naturales artificiales implementadas en sus trabajos y utilizadas para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en diferentes regiones. Como lo aducen Cerda y Cifuentes en el 2012, estos métodos evalúan la capacidad discriminativa de los resultados. Es decir, valoran la capacidad de diferenciar zonas susceptibles y no susceptibles a presentar movimientos en masa.

Los datos con los que se realizaron los métodos propuestos para la validación de la red neuronal artificial son los resultados de la RNA implementada, y la totalidad de pixeles de entrenamiento, incluidos el 25 % que se extrajo en un principio. Estos últimos se utilizaron para evaluar la capacidad de predicción de la RNA.

Al igual que Pradhan et al, 2010, se realizó una gráfica de relación de frecuencia en la que se grafica el cociente de los porcentajes de pixeles con movimientos en masa, entre el total de pixeles para cada intervalo, esto se realiza para cada categoría tenida en cuenta en la clasificación. Con esta grafica se muestra el porcentaje de movimientos en masa en cada clase de susceptibilidad.

Para realizar la relación de frecuencia se construyeron; la tabla 20 que muestran el porcentaje por categorías y porcentaje acumulado de los pixeles que conforman el mapa de susceptibilidad; y la tabla 21 en la cual se observa la distribución por categorías de susceptibilidad de los movimientos en masa de la fase de entrenamiento de la red.

Tabla 20. *Porcentaje y porcentaje acumulado de los pixeles que conforman el mapa de susceptibilidad.*

<b>Categorías de susceptibilidad</b>	<b>Pixeles del Mapa de Susceptibilidad</b>	<b>% en el mapa</b>	<b>% acumulado en el mapa</b>
<b>1</b>	1.421.590	45,94%	45,94%
<b>2</b>	137.884	4,45%	50,39%
<b>3</b>	140.126	4,53%	54,92%
<b>4</b>	62.110	2%	56,92%
<b>5</b>	1.333.463	43,08%	100%

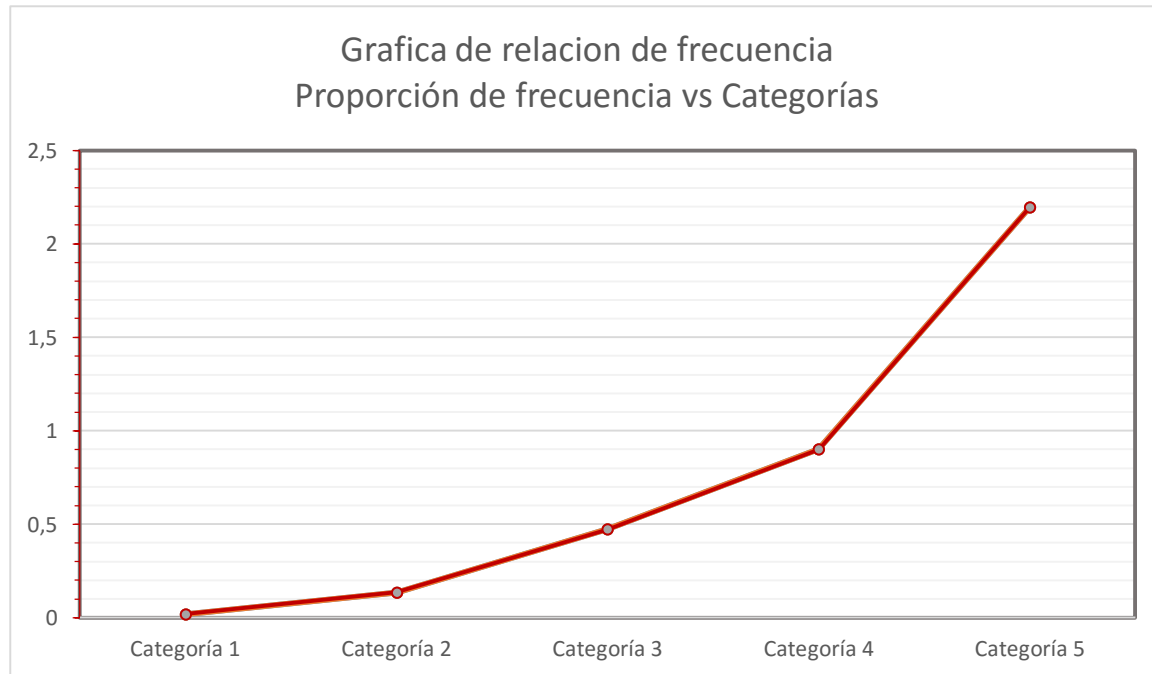
Tabla 21. *Distribución por categorías de susceptibilidad de los movimientos en masa de la fase de entrenamiento de la red.*

<b>Categorías de susceptibilidad</b>	<b>Píxeles con MM del entrenamiento</b>	<b>% en el mapa</b>	<b>% acumulado en el mapa</b>
<b>1</b>	45	0.85	0.85
<b>2</b>	32	0.6	1.45
<b>3</b>	114	2.14	3.59
<b>4</b>	96	1.8	5.39
<b>5</b>	5039	94.61	100

En la figura 30 se muestra la gráfica de relación de frecuencia construida con base en los datos consignados en el tabla 22, la cual contiene los valores de proporción de frecuencia por cada categoría de susceptibilidad, la proporción de frecuencia se grafica en el eje de las ordenadas versus las categorías, representada en el eje de las abscisas.

Tabla 22. *Proporción de frecuencia acumulada según índice de susceptibilidad.*

<b>Categorías de Susceptibilidad</b>	<b>Proporción de frecuencia</b>
<b>1</b>	0,0185
<b>2</b>	0,1348
<b>3</b>	0,4724
<b>4</b>	0,9
<b>5</b>	2,1961



*Figura 30, Diagrama de Relación de frecuencia.*

Autores como Burgueño, García, Gonzalez, (1995); Medina, 2011; Cerda y Cifuentes, en el 2012; han utilizado análisis ROC (acrónimo de Receiver Operating Characteristic, o Característica Operativa del Receptor) para evaluar resultados en diferentes disciplinas académicas, este análisis es utilizado por su eficiencia en la validación de resultados booleanos.

Las curvas ROC han sido utilizadas por autores como Tunusluolu, 2007; Prabhan y Lee, 2009; Chauhan et al, 2010; Pradhan et al, 2010; Prabhan y Lee, 2010c; Tien et al, 2012; para medir la exactitud de investigaciones que tienen como finalidad la determinación del índice de susceptibilidad a movimientos en masa, estas constituyen una de las estadísticas más utilizadas para los modelos de predicción en evaluaciones de peligros naturales.

Las curvas ROC se construyen con dos variables, sensibilidad en el eje de las ordenadas y 1-especificidad en las abscisas; la primera se define con la ecuación de sensibilidad, mostrada al finalizar este párrafo, y se entiende como la capacidad de identificar correctamente un pixel

inestable, es decir, la capacidad de la RNA para detectar movimientos en masa; la segunda, especificidad, se describe con la igualdad que se muestra más adelante, esta variable muestra la capacidad de la red neuronal artificial para marcar como estables las zonas que no presentan susceptibilidad a remoción en masa.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FN}}$$

Los valores que se utilizan en las ecuaciones de las figuras 10 y 11, y a su vez para la construcción de las curvas ROC se dividen en 4 grupos:

- Verdadero positivo (VP): representa el número de píxeles de movimientos en masa clasificados en las categorías.
- Falso positivo (FP): muestra el número de píxeles de las áreas consideradas relativamente estables en las categorías.
- Falso negativo (FN): es la diferencia entre el total de los píxeles de movimientos en masa y el valor del verdadero positivo.
- Verdadero negativo (VN): es la diferencia entre el total de los píxeles de las áreas consideradas relativamente estables y el valor del falso positivo.

$$\text{Especificidad} = \frac{\text{VN}}{\text{VN} + \text{FP}}$$

Estos valores se consignan en una tabla de contingencia Burgueño et al, 1995. Ver tabla 23, la cual se construye para cada categoría de susceptibilidad definida.

Tabla 23. *Tabla de contingencia.*

Test	Categoría de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
Positivos	VP	FP
Negativos	FN	VN

*Nota: Tomado y modificado de Burgueño et al, 1995; Cerda y Cifuentes, 2012.*

Para el presente trabajo se construyó curvas de éxito y curvas de predicción, para estas se construyeron la tabla 24 y la tabla 25, respectivamente, en las que constan las categorías de susceptibilidad; desde la quinta que teóricamente tiene más susceptibilidad a presentar movimientos en masa, hasta la primera; así como el número de píxeles con y sin movimientos en masa. En las curvas de éxito se utilizan los datos de entrenamientos de la RNA. La curva de predicción se grafica con base al conjunto de datos denominados validación, definidos de los datos totales de puntos estables e inestables.

Tabla 24. *Número de píxeles de entrenamiento clasificados en las categorías de susceptibilidad.*

Categoría de susceptibilidad	Píxeles de Movimientos en masa	Píxeles de zonas consideradas como estables
5	5039	23
4	96	4
3	114	80
2	32	430
1	45	4789

Tabla 25. *Número de píxeles de validación clasificados en las categorías de susceptibilidad.*

Categoría de susceptibilidad	Píxeles de Movimientos en masa	Píxeles de zonas consideradas como estables
5	1388	343
4	39	20
3	37	57
2	47	73
1	306	1324

Las tablas 26 a 30 muestran las tablas de contingencias realizadas para la curva de éxito, en la figura 31 se muestra la gráfica de esta curva, la cual es construida con base en tabla 36, el AUC (acrónimo de Area Under the Curve, o Area Bajo la Curva) de la curva de éxito es 0.986. Para la curva de predicción se construyeron las tablas 31 a 35, la gráfica se muestra en la figura 32 y es realizada partiendo de los datos de la tabla 33, el área bajo la curva de predicción es aproximadamente 0,734.

Tabla 26. *Tabla de contingencia para la curva de éxito.*

Test	Categoría 5 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	5039	23
<b>Negativos</b>	287	5303

Tabla 27. *Tabla de contingencia para la curva de éxito.*

Test	Categoría 4 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	5135	27
<b>Negativos</b>	191	5299

Tabla 28. *Tabla de contingencia para la curva de éxito.*

Test	Categoría 3 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	5249	107
<b>Negativos</b>	77	5219

Tabla 29. *Tabla de contingencia para la curva de éxito.*

Test	Categoría 2 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	5281	537
<b>Negativos</b>	45	4789

Tabla 30. *Tabla de contingencia para la curva de éxito.*

Test	Categoría 1 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	5326	5326
<b>Negativos</b>	0	0

Tabla 31. *Tabla de contingencia para la curva de predicción.*

Test	Categoría 5 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	1388	343
<b>Negativos</b>	429	1474

Tabla 32. *Tabla de contingencia para la curva de predicción.*

Test	Categoría 4 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	1427	363
<b>Negativos</b>	390	1454

Tabla 33. *Tabla de contingencia para la curva de predicción.*

Test	Categoría 3 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	1464	424
<b>Negativos</b>	353	1393

Tabla 34. *Tabla de contingencia para la curva de predicción.*

Test	Categoría 2 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	1511	497
<b>Negativos</b>	306	1320

Tabla 35. *Tabla de contingencia para la curva de predicción.*

Test	Categoría 1 de susceptibilidad	
	Con movimientos en masa	Sin movimientos en masa
<b>Positivos</b>	1817	1817
<b>Negativos</b>	0	0

Tabla 36. *Valores de especificidad, sensibilidad y 1-especificidad para la curva de éxito.*

Categoría	Sensibilidad	Especificidad	1-Especificidad
<b>1</b>	1	0	1
<b>2</b>	0,991550882	0,899173864	0,100826136
<b>3</b>	0,985542621	0,979909876	0,020090124
<b>4</b>	0,96413819	0,994930529	0,005069471
<b>5</b>	0,946113406	0,995681562	0,004318438

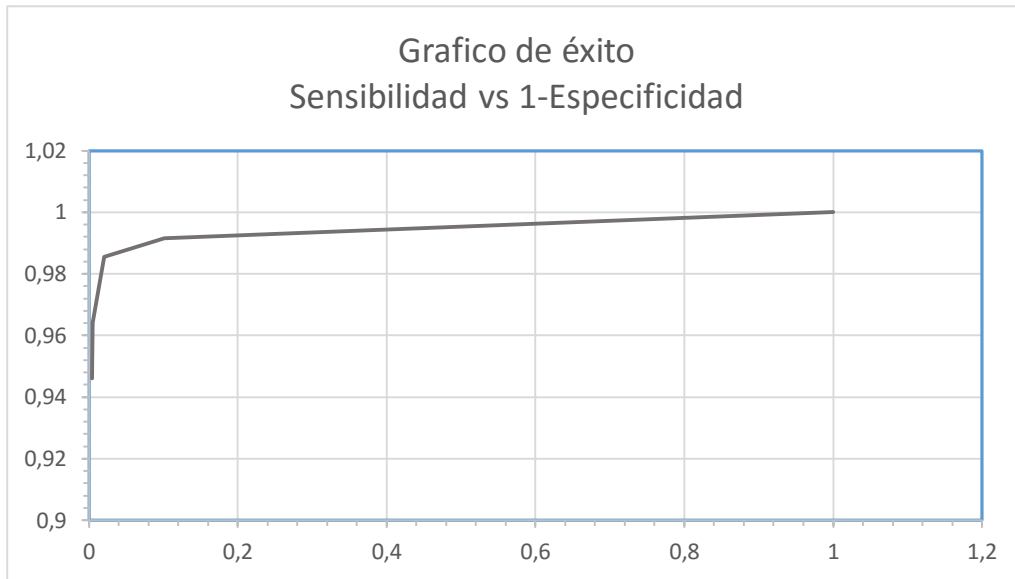


Figura 31, Curva de éxito.

Tabla 37. Valores de especificidad, sensibilidad y 1-especificidad para la curva de predicción.

Categoría	Sensibilidad	Especificidad	1-Especificidad
1	1	0	1
2	0,831590534	0,726472207	0,273527793
3	0,80572372	0,766648321	0,233351679
4	0,785360484	0,800220143	0,199779857
5	0,763896533	0,811227298	0,188772702

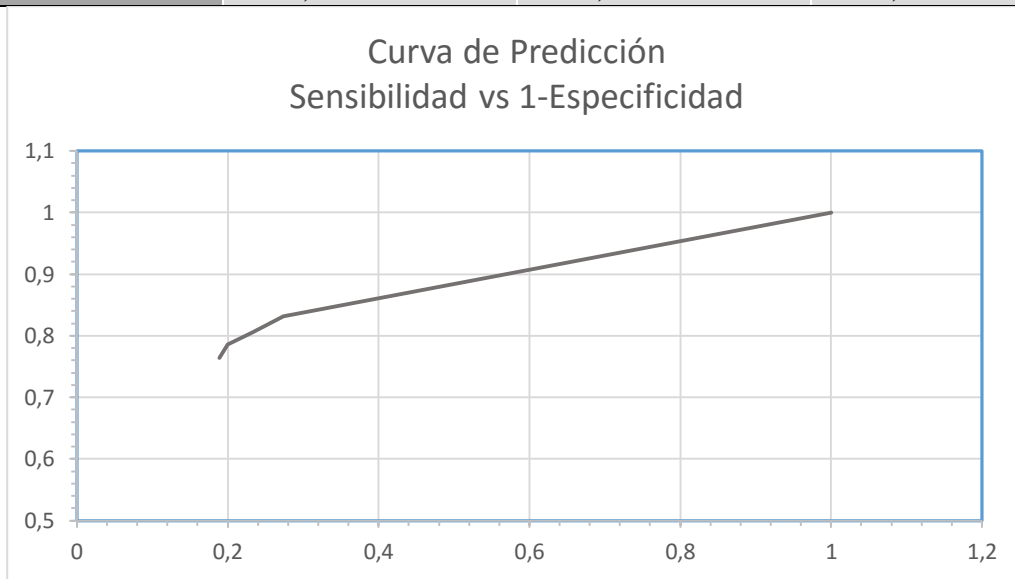


Figura 32, curva de predicción.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Este capítulo aborda el análisis de algunos procesos y etapas que se realizaron en el desarrollo de la práctica empresarial. Esto se realiza con el propósito de evaluar de una forma concienzuda el desarrollo de la metodología implementada. Para ello se aborda de una forma cronológica las fases más relevantes agrupándolas en tres subtítulos. Al final de este apartado se analiza el mapa resultante, para lo cual se tiene en cuenta, de forma individual, las variables utilizadas y las categorías resultantes del mapa de susceptibilidad.

En un primer subtítulo se analiza el grupo inicial de datos con el que se trabajó, se destacan aspectos principales de este y se muestran algunos procedimientos que se les realizaron. En el segundo subtítulo se abordan las formas de presentación de los datos utilizados para la etapa de entrenamiento y los datos obtenidos en la etapa de simulación. Por último se abordan los métodos realizados para la validación de la RNA y el mapa de susceptibilidad obtenido.

### 5.1 Primer conjunto de datos

Al momento de abordar este subtítulo cabe resaltar que la proveniencia de los datos con los que se trabajó fue diversa, esto sucedió porque ninguno de los proyectos con los que se contó suplió la necesidad y diversidad de información con la que se quería contar para la RNA. Los mapas que se importaron de otros proyectos estaban elaborados con diferentes proyecciones cartográficas, al unificarlos a todos en la proyección MAGNA Colombia Bogotá se crearon ciertas discrepancias

pues no se acoplaban por completo entre sí, ocasionando un margen de error minúsculo para la escala.

Para los puntos de entrenamiento es importante señalar que se contó con coordenadas exactas de lugares en los que ocurrieron movimientos en masa, y que a estas se les realizó un búfer de 25 metros con el fin de utilizarlo en la extracción de la información de los mapas utilizados para la etapa de entrenamiento de la RNA. Cuando se realizó este proceso no se tuvo en cuenta la geometría del deslizamiento ni zonas contiguas a este, dando cabida a posibles extracciones erróneas de información.

El modelo de elevación digital que se utilizó en una primer medida fue un modelo que se construyó con base en las curvas de nivel 1:25.000 del IGAC, este MDT presentó fuertes falencia pues su distribución de datos fue anómala influyendo en la ejecución de la red neuronal artificial. Sin embargo con estos primeros datos se pudo establecer el número óptimo de neuronas ocultas, la red que se eligió fue la que presentó menor SSE, esta fue la que trabajó con 18 neuronas ocultas. En las siguientes estructuras de RNA se trabajó con el mismo número de neuronas ocultas pues aunque los datos variaron, la clasificación bajo la cual se sometieron fue la misma.

Con este primer conjunto de datos también se realizaron diferentes entrenamientos, ver tabla 38, con el fin de evaluar el error de entrenamiento en diversas redes cuando se variaban los datos de entrada.

De la tabla 38 se puede extraer; que entre más variables se tenga en cuenta menor es el error, las redes A, F, H con mayor error fueron de las que más se extrajeron mapas, 2, 3 y 3 respectivamente; que las variables fallas, vías y drenaje, son las características más influyentes, esto debido a que el error aumenta en la red F casi el doble, en la red B, donde se extrae únicamente la variable de drenaje el error aumenta en un tercio; al observar la red D, se extrae que el factor de

Rugosidad no aporta en el análisis pues el SSE permanece casi que constante con o sin utilizar la variable.

*Tabla 38, Resultados de RNA con diferentes matrices de entrenamiento.*

<b>RNA</b>	<b>Variables extraídas</b>	<b>SSE</b>
<b>A</b>	Precipitación, Evaporación	267
<b>B</b>	Drenaje	214
<b>C</b>	Fallas	145
<b>D</b>	Rugosidad	139
<b>E</b>	Vías	149
<b>F</b>	Fallas, Drenajes, Vías	331
<b>G</b>	Pendiente, Curvatura, Orientación, Rugosidad	225
<b>H</b>	Zona dinámica, Zona geotécnica, Geología	229
<b>I</b>	Cobertura y uso actual del suelo, Conflicto de uso del suelo	152

*Nota: tomada y modificado del informe 2 de la presente práctica.*

## **5.2 Visualización de datos**

Al momento de rehacer las matrices de entrenamiento, simulación y targets, se analizó la relación entre el SSE y el orden de la matriz targets, que repercute a su vez en el orden de la matriz de entrenamiento. Con el fin de identificar la mejor distribución de los datos del entrenamiento, se serializó tres pruebas en la que se varió el orden de la matriz de targets, orden que repercute también en la matriz de entrenamiento. Las diferencias más significativas que se obtuvieron giran en torno al valor de la variable performance que representa la suma de errores cuadráticos, SSE. Como se extrajo del manual de MATLAB R2014a, este parámetro es una función de rendimiento de la red y funciona de acuerdo a la suma de los errores al cuadrado.

En una primera medida se procesó la red con los datos en el mismo orden de cómo se extrajeron los resultados, de una forma aleatoria. En la figura 33A se muestran el resultado obtenido, se puede observar que el parámetro performance es el segundo más alto de las pruebas realizadas.



Figura 33, entrenamientos de RNA.

En la figura 33B, se observa el entrenamiento de una RNA en la que se ordenó las matrices de targets y entrenamientos de forma que los primeros 5625 datos correspondieran a zonas estables con un target de cero (0) y los otros 5625 representara zonas inestables con target uno (1), el SSE de esta red es el más elevado de las tres pruebas. En la figura 33C se muestra el entrenamiento de la RNA que tuvo menos valor la variable performance exponiendo un mejor ajuste del modelo a los datos y un mejor rendimiento de la red.

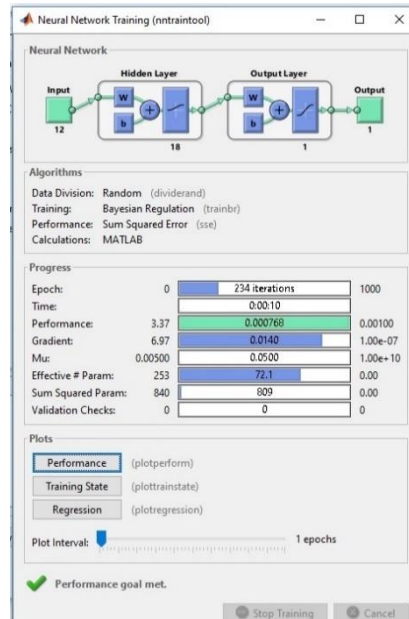
Con la operación anterior se observó que, el orden en la matriz targets con menor SSE en la etapa de entrenamiento es el que establece en las primeras columnas los valores de los pixeles considerados como inestables, demarcado con el valor uno (1), y después de estos los valores de las casillas clasificadas como estables, con el valor (0).

Un segundo análisis que se obtuvo con la visualización de los datos se obtuvo cuando con el fin de observar el rendimiento de la red se decidió cambiar la resolución de todas las variables. Para esto se reelaboraron los mapas de geología, zona dinámica, zona geotécnica, vías, drenajes, fallas,

conflicto de suelo y uso del suelo, así como un ráster que muestra los lugares en los que ya ha ocurrido fenómenos de remoción en masa y de zonas consideradas estable, en todos los casos se respetó el tamaño de pixel de 56x56 metros. Las variables de Precipitación y Evaporación no se tuvieron en cuenta, las variables Pendiente, Rugosidad, Temperatura y Orientación conservaron los tamaños de celda de 12.5x12.5 pero la información para las matrices de entrenamiento y simulación se extrajo con celdas de 56x56 metros.

Con esta nueva información se construyeron matrices de simulación, entrenamiento y targets cuyas dimensiones fueron 12x48380, 12x176 y 1x176, respectivamente. La disminución de datos es una respuesta a la menor cantidad de pixeles que resultaron después de aumentar el tamaño a estos. En la creación de la RNA y el entrenamiento de la misma, se utilizaron las mismas propiedades que en las otras redes.

Cabe resaltar que el SSE de la red realizada con el proceso anterior fue de 0.000768, ver figura 34, y que la única variación que se produjo con respecto a las otras RNA fue el tamaño del pixel de los mapas utilizados. Debido a la poca cantidad de datos en la RNA y la geometría pixelada que mostro el mapa no se utilizó en la validación.



*Figura 34, Proceso de entrenamiento con tamaño de celda de 56x56*

Por último se concluye un tercer y último análisis con respecto a los datos obtenidos de la RNA y la clasificación de estos. La diferencia principal de los métodos utilizados para la clasificación de los datos está en la cantidad de datos clasificados en las categorías. Al utilizar el método Quantile algunos datos que antes se clasificaban como zonas seguras se clasifican como lugares con una moderada susceptibilidad. Para elegir el método más adecuado, al momento de clasificar el conjunto de datos se partió del hecho de que es mejor clasificar una zona como propensa a movimientos en masa aunque no lo sea a clasificar un lugar seguro aunque presente cierta susceptibilidad. Por ello se utilizó la clasificación obtenida con el método Quantile.

### 5.3 Análisis de los métodos de evaluación

En este título se exponen los métodos estadísticos utilizados para evaluar la efectividad de la red neuronal artificial para identificar zonas susceptibles a movimientos en masa. Los análisis que se realizaron se desarrollaron teniendo en cuenta diferentes autores como Tunusluolu, 2007; Prabhan y Lee, 2009; Chauhan et al, 2010; Pradhan et al, 2010; Prabhan y Lee, 2010c; Tien et al, 2012; que

han utilizado las RNA para predecir fenómenos naturales y han evaluado la efectividad de estas con gráficas de relación de frecuencia, curvas de éxito y curvas de predicción.

Como lo aducen Burgueño et al, 1995; Medina, 2011; Cerda y Cifuentes, en el 2012, las curvas ROC son análisis estadísticos para determinar la exactitud de un resultado booleano. El valor mínimo del área bajo la curva es 0,5 y expresa que el modelo no predice con exactitud la ocurrencia del evento, mientras que el valor máximo equivalente a 1 e indica una predicción perfecta (Burgueño et al, 1995; Tunusluolu, 2007; Chauhan et al., 2010; Pradhan et al, 2010).

**5.3.1 Grafica de relación de frecuencia.** En la validación de la RNA la primer grafica que se construyo fue un diagrama de relación de frecuencias en el cual se muestra la proporción de frecuencia de los movimientos en masa para cada categoría. En este esquema se observa una gráfica de pendiente positiva que crece a medida que se desplaza de la categoría de susceptibilidad uno (1) a la cinco (5). Este es el comportamiento que se esperaba obtener pues la categoría uno denota una baja susceptibilidad a movimientos en masa y por ello la cantidad de movimiento en masa en esta clase debe ser teóricamente nula o en la práctica, valores cercanos al cero (0).

**5.3.2 Curva de éxito.** La curva de éxito es una curva ROC construida con base en los datos de entrenamiento y los resultados obtenidos en la red neuronal artificial. Lo que pretende este método es la comprobación de la eficacia del proceso de la red al evaluar la efectividad y precisión con la que se clasificaron los datos de entrenamiento. El área bajo la curva es 0.98567 lo que denota coherencia entre los datos de entrenamiento y la clasificación resultante de la simulación de la RNA.

**5.3.3 Curva de predicción.** También se realizó un análisis ROC con los datos de validación, estos datos están conformados por puntos considerados como propensos y no propensos

a presentar movimientos en masa, y que no se utilizaron en la etapa de entrenamiento. El objetivo de esta curva es medir el grado de predicción que tiene la RNA. El área bajo la curva dio como resultado 0.73342 lo que indica una capacidad mediana de predicción del mapa. El resultado que se obtuvo en el AUC de esta curva responde a las condiciones que se exponen en el subtítulo 6.1 del presente informe.

Aunque la RNA tiene una capacidad predictiva aceptable, el hecho de que esta capacidad no sea mayor gira en torno a los márgenes de errores que se presentaron al momento de proyectar los mapas en la proyección magma Colombia Bogotá y al momento de crear el búfer en las coordenadas de los deslizamiento sin tener en cuenta la geometría de los movimientos ni características de la zona.

#### **5.4 Mapa de susceptibilidad a Movimientos en masa del municipio de Bucaramanga**

En este capítulo se analiza el mapa de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa obtenido según los parámetros elegidos en la metodología. Haciendo un análisis mediante los datos usados en el entrenamiento y en la validación de la RNA, se observa en el mapa cinco categorías que muestran una relación directa con la localización de movimientos en masa. Al observar la distribución de las categorías se evidencia que cerca del 89% del mapa se clasifica en las categorías uno y cinco las cuales denotan las categorías de muy baja y muy alta susceptibilidad, respectivamente. Esta última categoría cuenta con el 43.08% del total de pixeles que representan el municipio de Bucaramanga.

Realizando un análisis mediante la superposición al mapa resultante de los mapas tenidos en cuenta para el análisis, se concluye que la distribución de las categorías de susceptibilidad no responde a una sola variable, al contrario, es la respuesta de la interacción de las catorce tenidas en

cuenta. Aunque algunas aportan más preponderancia en el resultado que otras, por ejemplo las variables Evaporación y Precipitación no muestran una incidencia grande en el resultado.

Por otro lado las variables Zona geotectónica, Uso actual, Fallas, Geología y en una menor medida las derivadas del MDT, Pendiente y orientación, son las variables con mayor preeminencia en las categorías de susceptibilidad establecidas. A continuación se abordan cada una de las categorías y se analiza las características por zonas donde se encuentran, para lo cual se tiene en cuenta el trabajo de Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, realizado en 2001 por INGEOMINAS.

**5.4.1 Categoría de susceptibilidad 1, Muy baja.** Esta zona cuenta con el 45.94% del mapa resultante, se encuentra en la ciudad de Bucaramanga con excepción de las comunas de las periferias, también se presenta en la parte media del escarpe occidental de la ciudad, y en algunos sectores del macizo de Santander.

Una de las zonas que se demarcan como susceptibilidad muy baja corresponden a la zona más urbanizada de Bucaramanga, el drenaje que presenta en esta zona es subparalelo, la franja está asociada a una geoforma de origen aluvial que corresponde a un gran abanico de baja pendiente sobre el cual se encuentra cimentada la ciudad de Bucaramanga. Este sector se encuentra conformado por el miembro Limos Rojos (Qblr) de la formación Bucaramanga. Los suelos subsuperficiales corresponden a arenas gravo-arcillosas, cementadas por óxidos de hierro sobre mantos gravosos y un tanto conglomeráticos; estos suelos presentan generalmente cohesiones y capacidades de soporte altos, INGEOMINAS (2001).

Otras zonas que tienden a presentar muy baja susceptibilidad a movimientos en masa se localizan dentro de la formación Bucaramanga en el miembro Organos e incluye principalmente los sectores

de las mesetas de: Barrio Los Colorados, y el barrio Kennedy. La morfología corresponde a colinas onduladas de baja pendiente, INGEOMINAS (2001).

En el extremo noroccidental del área metropolitana de Bucaramanga, se encuentran otras zonas de muy baja susceptibilidad. Como aduce, INGEOMINAS (2001) el terreno presenta drenaje subdendrítico, y geoformas de colinas bajas subredondeadas, lomos y pendientes subhorizontales denudacionales, estas zonas constan de rocas sedimentarias constituidas por intercalaciones de niveles duros (areniscas y conglomerados) y blandos (lodolitas, arcillolitas y limolitas) de la formación Bocas (TRb).

Otro conjunto de zonas que se delimitan como muy baja susceptibilidad está localizado en el sector oriental del área metropolitana, por encima de la zona de mayor influencia de la falla Bucaramanga, conformando el denominado macizo de Santander, en esta categoría de muy baja susceptibilidad, no se incluyen las cuencas medias de los ríos y quebradas. Esta zona está conformada por rocas de origen metamórfico e ígneo del Gneis de Bucaramanga (Peb), INGEOMINAS (2001). Las zonas que se presentan en esta categoría son zonas comprendidas entre los 500 y 1000 metros de distancia a fallas.

**5.4.2 Categoría de susceptibilidad 2, Baja.** Esta categoría representa el 4,45% del mapa final de susceptibilidad, aunque su frecuencia es poca, su distribución se encuentra dispersa por todo el municipio de Bucaramanga, no obstante aumenta su ocurrencia en la parte suroccidental de la ciudad en zonas donde la pendiente es alta y en zonas con depósitos cuaternarios. Zonas que tienden a presentar baja susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa se localizan dentro de la formación Bucaramanga y corresponde principalmente a colinas onduladas de pendientes moderadas, litológicamente se encuentra conformada por depósitos del miembro Organos (Qbo), INGEOMINAS (2001). Otro conjunto de zonas que se delimitan como baja susceptibilidad está

localizado al oriente de la ciudad, en el macizo de Santander donde se incluyen como zonas de baja susceptibilidad, algunos sectores de las cuencas medias de los ríos y quebradas, esta zona está conformada por rocas de origen metamórfico e ígneo del Gneis de Bucaramanga, INGEOMINAS (2001).

**5.4.3 Categoría de susceptibilidad 3, Moderada.** La tercera categoría del mapa abarca el 4,53% de los pixeles totales del municipio de Bucaramanga, se encuentra distribuida en todo el municipio, aunque su frecuencia es poca. Zonas que presentan susceptibilidades moderadas están ubicadas en la escarpa occidental del Abanico de Bucaramanga, así como parte superior de los valles aluviales, como se vio en INGEOMINAS (2001), el drenaje que presentan estas zonas es dendrítico y subparalelo, con cañadas en V, los lugares poseen una densidad de drenaje muy alta y altas pendientes en sus cauces, litológicamente están constituidos por los denominados miembros Organos (Qbo), Limos Rojos (Qblr) y Finos (Qbf) de la formación Bucaramanga. Otras zonas con moderada susceptibilidad están localizada en macizo de Santander, este posee cauces de ríos y quebradas profundas que se encuentran en V, geomorfológicamente se identifican unidades de tipo estructural denudacional representados por pendientes abruptas con procesos denudacionales y depósitos de ladera. Esta zona está conformada por rocas de origen metamórfico e ígneo del Gneis de Bucaramanga (Peb), INGEOMINAS (2001).

**5.4.4 Categoría de susceptibilidad 4, Alta.** Esta categoría es la que menos porcentaje total cuenta, a ella pertenece el 2% de los datos totales que representa el municipio de Bucaramanga y al igual que las categorías 2 y 3, se encuentra dispersa por todo el municipio. Aunque se puede determinar zonas de influencia como la parte alta del escarpa occidental del Abanico de Bucaramanga, así como partes superiores de los valles aluviales del río de Oro y río Frío, el drenaje de estas zonas es dendrítico y subparalelo, con cañadas en V, y una densidad de drenaje muy alta, los cauces también posee altas pendientes, los suelos subsuperficiales corresponden a gravas areno

arcillosas, con gran cantidad de cantos redondeados, correspondientes al miembro Organos, INGEOMINAS (2001). Otra zona con alta propensión a presentar valores altos de susceptibilidad se presenta como una franja alargada de dirección nornoroeste, correspondiente a la zona de alto fracturamiento asociado a la falla Bucaramanga, incluyendo las laderas nororientales de Bucaramanga ocupadas por asentamientos humanos, el cerro de Morrórico y las colinas del piedemonte del macizo de Santander, las geoformas son principalmente de origen estructural, asociadas a la actividad de la falla Bucaramanga, con topografía abrupta, su litología corresponde a rocas metamórficas e ígneas, fuertemente cizalladas, pertenecientes al Gneis de Bucaramanga (PEb), INGEOMINAS (2001).

**5.4.5 Categoría de susceptibilidad 5, Muy alta.** Esta quinta categoría representa las zonas más propensas a presentar movimientos en masa, cuenta con un total de 43,08% del total de datos de salida de la RNA, para el análisis se dividió en zonas más o menos homogéneas que agrupan según sus características.

Un primer grupo se encuentra ubicada al norte del área Metropolitana de Bucaramanga, el drenaje que se presenta es subdendrítico a subparalelo y se desarrolla en una zona de alta pendiente con valles en V; la morfología que presenta esta zona es de laderas empinadas con escarpes semiverticales en los sectores más altos, los materiales pertenecientes a esta unidad son rocas sedimentarias duras (calizas, areniscas y conglomerados) y blandas (lodolitas, arcillolitas y limolitas) pertenecientes a las formaciones, Tiburón (TRPt), Bocas (TRb), Girón (Jg), suelos residuales y Depósitos Coluviales (Ql), los suelos corresponden a sectores de bloques de roca muy fracturados, grandes bloques sueltos sobre superficies de talud, talus y coluviones colgados sobre las laderas y suelos residuales con perfiles de meteorización poco profundos, además aparecen amplias cárcavas de erosión y cicatrices de antiguos deslizamientos, INGEOMINAS (2001).

Localizada en el sector oriental de la ciudad de Bucaramanga, se podría definir una segunda zona conforma en el macizo de Santander la cual también se incluye las cuencas medias de los ríos y quebradas que nacen en este. Según INGEOMINAS (2001) El drenaje es dendrítico a subdendrítico, con cauces de ríos y quebradas profundas en V, geomorfológicamente se identifican unidades de tipo estructural denudacional representados por pendientes abruptas con nichos asociados a lomos, pendientes con procesos denudacionales y depósitos de ladera. Esta zona está conformada por rocas de origen metamórfico e ígneo del Gneis de Bucaramanga (Peb), los suelos corresponden a suelos residuales con perfil de meteorización profundo a muy profundo y gran cantidad de estructuras heredadas, la mayoría de los suelos corresponden a arenas arcillosas y limosas de color claro, INGEOMINAS (2001).

Una tercera zona sería la franja alargada de dirección nornoroeste, correspondiente a la zona de alto fracturamiento asociado a la falla Bucaramanga, incluyendo las laderas nororientales de Bucaramanga ocupadas por asentamientos humanos, el cerro de Morrórico y las colinas del piedemonte del macizo de Santander, el drenaje es subdendrítico y subparalelo, las geoformas son principalmente de origen estructural, asociadas a la actividad de la falla Bucaramanga, con topografía abrupta, su litología corresponde a rocas metamórficas e ígneas, fuertemente cizalladas, pertenecientes al Gneis de Bucaramanga (PEb), los suelos son residuales con perfil de meteorización profundo a muy profundo, estos corresponden a arenas arcillosas y limosas de color claro en los sectores metamórficos, y arcillas arenosas y arenas arcillosas en los sectores ígneos, INGEOMINAS (2001).

En una cuarta zona se incluyen las áreas de depósitos aluviales de los ríos de Oro, río Frío entre otros, afectadas directamente por procesos de erosión relacionados con la dinámica de las corrientes de agua. Las áreas correspondientes a esta zona se encuentran localizadas en las riberas de los ríos

y quebradas. Como se observa en, INGEOMINAS (2001), las áreas que comprende esta zona presentan una morfología de valles aluviales, semiplanos, con escarpes verticales junto a las riberas de los ríos y litológicamente se encuentran en los Depósitos Aluviales principales (Qal). los suelos subsuperficiales corresponden a arenas limpias, gravas y arenas limosas en mantos subhorizontales a diferentes profundidades, según el sitio, aparecen suelos duros o rocas..

Una quinta zona incluye las áreas de depósitos coluviales sobre las pendientes de las laderas y coluviones principales localizados en: Piedemonte del macizo de Santander, laderas del cerro de Palonegro, escarpe occidental de la meseta de Bucaramanga, y laderas laterales de los valles aluviales de las quebradas, las áreas que comprende esta zona presentan una morfología de laderas de mediana pendiente con cauces de quebradas relativamente profundas y en V, litológicamente corresponden a los Depósitos de Coluvión (Ql), cada coluvión tiene una composición específica de la matriz y clastos de los depósitos coluviales, dependiendo del tipo de roca de la cual se originan, INGEOMINAS (2001).

La sexta zona que se extrae con una alta susceptibilidad a movimientos en masa está conformada por el área del bloque hundido y erosionado del abanico de Bucaramanga al norte de la Meseta, la cual presenta susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos de tierra de gran magnitud. El área susceptible a deslizamientos en la zona norte de la meseta de Bucaramanga se encuentra localizada al norte, nororiente y noroccidente del escarpe norte de la Meseta de Bucaramanga, la morfología en general corresponde a laderas de alta pendiente con cauces de quebradas relativamente profundas, el sector de Ciudad Norte corresponde a un gran deslizamiento cuya corona principal presenta fuertes pendiente la cual se va suavizando en dirección del río Surata, litológicamente la zona corresponde en su mayor parte al miembro Organos (Qbo) de la formación Bucaramanga, los

suelos subsuperficiales corresponden a gravas areno arcillosas, con gran cantidad de cantos redondeados, correspondientes al miembro Organos, INGEOMINAS (2001).

Una última zona incluyen las áreas de rellenos de suelos sueltos y basuras, esta zona se encuentran localizadas en una gran cantidad de lugares del Area Metropolitana de Bucaramanga, algunos de los rellenos más grandes corresponde a zonas como Quebrada Seca, Quebrada la Rosita y Quebrada la Flora – la Iglesia, entre otros. Según INGEOMINAS (2001), el material de relleno está conformado por basuras, ladrillos y material proveniente de excavaciones, este material es muy heterogéneo y no presenta ningún tipo de compactación.

## 6. CONCLUSIONES

- Dentro de la metodología, las fases de revisión, análisis y síntesis bibliográficas, que se desarrollaron en gran medida al inicio, pero que se siguieron realizando durante todas las etapas metodológicas, aportaron las bases teóricas indispensables para el entrenamiento, simulación y validación de la RNA, y ayudaron a definir criterios en las diferentes fases de la ejecución de la práctica, como en el entrenamiento, o en la definición del tipo de red neuronal utilizada, que para esta práctica fue Multilayer Perceptrón, con el algoritmo de aprendizaje Backpropagation tipo Bayesian Regulation, y una estructura de 18 neuronas ocultas.
- De la metodología implementada también se puede concluir que para los datos y modelo de RNA que se utilizó las 14 variables utilizadas tienen incidencia en el resultado de la red, aunque las variables, Zona geotectónica, Distancia a fallas, uso actual, y en una menor

medida, Pendiente Orientación y Geología, son las variables que más preponderancia tienen en el análisis. Las curvas de éxito y predicción que se construyeron muestran que la RNA tuvo una salida acorde con los datos utilizados, y que posee una aceptable predicción, lo que muestra que el resultado obtenido es fiable y se puede utilizar como insumo en la zonificación de la susceptibilidad para el municipio de Bucaramanga.

- Las características geológicas, geotécnicas y edafológicas de áreas clasificadas con unas susceptibilidades muy altas y altas, no proporcionan estabilidad de proyectos de desarrollo urbano. Por lo tanto, cualquier edificación u obra de infraestructura que se localice en esta área, estará en peligro de ser afectada severamente por procesos de movimientos en masa. Debido al peligro en que se encuentran algunos sectores urbanizados actualmente, es urgente y prioritario establecer e implementar planes de contingencia, así como desarrollar un sistema de alerta temprana. Se recomienda realizar un estudio detallado de deslizamientos incluyendo estudios geológicos y geotécnicos de todo el sector norte, la comuna 14 y la parte alta del escarpe occidental de la ciudad de Bucaramanga, con el objeto de determinar de forma precisa la susceptibilidad, amenaza y riesgo a movimientos en masa, para diseñar e implementar un programa de prevención y mitigación del riesgo.
- Esta práctica empresarial fomenta una formación académica que complementa las competencias del estudiante y fomenta conocimientos en torno a la planificación territorial y la prevención y mitigación de riesgos geológicos así como de desastres naturales, también proporciona conocimientos entorno a métodos para la zonificación de la susceptibilidad a MM, capacidad de recolectar, procesar e interpretar datos de diversas fuentes con el fin de utilizarlo en otros análisis, de igual forma ayuda a percibir y comprender las dimensiones espaciales y temporales de los procesos geológicos y sus efectos sobre el territorio.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aristizábal, E., Shuichiro Y. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de aburra. *Dyna*, 149, 5 -16. ISSN 0012-7353.
- Blanco, D.C., Jiménez. S. M. (2012). *Evaluación de amenazas por fenómenos de remoción en masa de algunos sectores de la comuna 14 del municipio de Bucaramanga utilizando el método estadístico con variables locales* (tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos* (tesis doctoral). Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Burgueñoa, M.J., García, J.L., Gonzalez, j.M. (1995). Las curvas ROC en la evaluación de las pruebas diagnósticas. *Medicina clínica*, 104(17), 661-670.
- Cerda, J., Cifuentes, L. (2012). Uso de curvas ROC en investigación clínica. Aspectos teórico-prácticos. *Rev chil. Infectol*, 29(2) 138-141.
- Chauhan, S., Sharma, M., Arora, M.K.,Gupta, N.K. (2010). Landslide Susceptibility Zonation through ratings derived. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12. 340–350
- Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga – CDMB (2011). Consorcio zonas inundables 2011 - Informe componente técnico GE-277. Suministrado por la Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga - CDMB.

Delgado, R.J., Rivera, S., (2007). Aplicación del modelamiento con SIG y GEOSLOPE en el diagnóstico de la amenaza en el SO de la meseta de Bucaramanga. *Revista ambiental agua, aire y suelo* 2 (1). 63-72.

Environmental Systems Research Institute, Inc. (2016). *Cómo funciona Orientación*. California, EU. Esri. Recuperado en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-aspect-works.htm>.

Environmental Systems Research Institute, Inc. (2016). *Curvatura*. California, EU. Esri. Recuperado en <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/curvature.htm>

GIS 4 Geomorphology. (2016). Terrain Roughness – 13 Ways. (Sin lugar). Skye Cooley. Recuperado en <http://gis4geomorphology.com/roughness-topographic-position/>.

Gómez, H. & Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78. 11–27. Recuperado de [www.elsevier.com/locate/enggeo](http://www.elsevier.com/locate/enggeo).

INGEOMINAS (1973). Cuadrángulo h-12 Bucaramanga planchas 109 rionegro - 120 Bucaramanga cuadrángulo h-13 pamplona planchas 110 pamplona - 121cerrito. Suministrado por el Servicio geológico Colombia – SGC.

INGEOMINAS (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga. Suministrado por la Corporación para de la defensa de la meseta de Bucaramanga - CDMB.

- INGEOMINAS (2005). Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, girón y Piedecuesta. Suministrado por la Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga – CDMB.
- Londoño, J. P. (2007). Evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas andinas. Una propuesta metodológica. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 20. 53-72.
- Medina, M.C. (2011). *Generalidades de las pruebas diagnósticas, y su utilidad en la toma de decisiones médicas*. Rev. Colomb. Psiquiat., 40 (4). 787-797.
- Negnevitsky, M. (2002). *Artificial Intelligence A Guide to intelligent Systems*. Londres, Inglaterra, Pearson Education Limited. Capítulo 6. 165-218.
- Pradhan, B., Lee, S. (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60, 1037:1054. doi: 10.1007/s12665-009-0245-8
- Pradhan, B., Lee, S. (2010). Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia. *Landslides*, 17(7), 13–30.
- Remondo, J. T. (2001). *Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial* (tesis doctoral). Universidad de Oviedo. Oviedo, España.
- Rodríguez, L. E., Rueda, P. J. (2014). *Aplicación de SIG para la zonificación de amenazas por deslizamientos en la comuna 14 del municipio de Bucaramanga*. (tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Servicio Geológico Colombiano – SGC. (2012). Memoria explicativa del mapa de amenazas por movimientos en masa, plancha 120 – Bucaramanga departamento de Santander. Suministrado por el Servicio Geológico Colombiano – SGC.

Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O. B. (2012). Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh Province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology* 171–172. 12–29.

Tunusluoglu, M. C., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H. A. (2007). An artificial neural network application to produce debris source areas of Barla, Besparmak, and Kapi Mountains (NW Taurids, Turkey). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7. 557 – 570.

Valdés, N. J., González, L. O., Will, L. E. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales. *Acta Agronómica* 60 (3). 252-262.