

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N° 0205 DE 2017  
CVC – UNIVALLE  
MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



Evaluación de la Amenaza por Movimientos en Masa de la zona urbana del  
Municipio de Roldanillo

INFORME TÉCNICO



Santiago de Cali, octubre de 2018



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N°0205  
CVC – UNIVALLE  
MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



## PRESENTACIÓN

Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, es una gran satisfacción aportar a los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles, la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño en el componente urbano municipal, en cumplimiento de la función dada por la Ley 1523 de 2012 sobre el apoyo a los municipios en el conocimiento del riesgo.

Conocedores de la importancia y responsabilidad que reviste abordar el tema del conocimiento de las amenazas y los riesgos, la CVC llevó a cabo una alianza con el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, OSSO, adscrito a la Universidad del Valle, con el fin de obtener los mejores resultados en estas evaluaciones. De igual forma, es necesario reconocer el aporte, contribución y compromiso de las administraciones municipales y sus propios habitantes, a lo largo de la ejecución de este estudio. Otro objetivo es fortalecer el conocimiento que tenemos de nuestro entorno para tener certeza y articular una adecuada planificación y ocupación de nuestros territorios.

Los estudios entregados son parte fundamental de la información que se requiere para que cada municipio formule su Ordenamiento Territorial de segunda generación y son evaluaciones que dan soporte para la reducción y la elaboración de planes de emergencia y contingencia.

La presente evaluación de las amenazas y riesgos deben estructuralmente permitirle al municipio reglamentar el uso del suelo en el componente urbano, de tal manera que, como lo define la política de gestión del riesgo y en esencia la constitución colombiana, se logre avanzar hacia un desarrollo sostenible, que ofrezca seguridad para la vida de los habitantes, sus bienes y medios de subsistencia, así como a toda la infraestructura del municipio.

Finalmente, la CVC con estas evaluaciones, a través de la Universidad, espera contribuir en la formación y fortalecimiento de la capacidad profesional de la región en este tipo de estudios.

**Rubén Darío Materón Muñoz**  
Director General  
CVC

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Dirección Ambiental Regional BRUT, a la Secretaria de Planeación e Infraestructura de la Administración Municipal por la información suministrada. De igual manera se agradece a cada una de las entidades que de una u otra manera puso a disposición la información necesaria para adelantar la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona urbana del municipio de Roldanillo, en el marco del Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad de Valle, el cual tiene como objeto “Aunar Esfuerzos Técnicos y Recursos Económicos para la Elaboración de los Estudios de Zonificación de Amenaza y Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación para las Áreas Urbanas de los Municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”.

## **CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC**

### **DIRECTIVOS**

**RUBÉN DARÍO MATERÓN MUÑOZ**

Director General

**MARÍA CRISTINA VALENCIA RODRÍGUEZ**

Secretaria General (C)

**HÉCTOR FABIO ARISTIZABAL RODRIGUEZ**

Director Técnico Ambiental (C)

**PAULA ANDREA SOTO QUINTERO**

Directora Territorial – Dirección Ambiental Regional BRUT

### **SUPERVISIÓN**

**YUNCELY GIMENA BASTIDAS B**

Ingeniería Civil

Especialista en Diseño Estructural

Líder del proyecto 5001

**ARELIX ANDREA ORDOÑEZ FRANCO**

Ingeniería Ambiental

Supervisora del Convenio Interadministrativo N° 0205 de 2017 CVC-Univalle

### **EQUIPO TÉCNICO**

**OMAR ALBERTO CHAVES M**

Ingeniero Civil

**ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ**

Ingeniera Civil

Doctora (Ph. D.) en Geotecnia

**MARÍA VICTORIA CROSS GARCÉS**

Ingeniera Agrónoma

Especialización en Educación Ambiental

## UNIVERSIDAD DEL VALLE

### DIRECTIVOS

#### **EDAGAR VARELA BARRIOS**

Rector

#### **LILIANA ARIAS CASTILLO**

Vicerrectora Académica

#### **CLAUDIA SANTAMARÍA GAITÁN**

Vicerrector de Bienestar Universitario

#### **ANTONIO JOSÉ ECHEVERRY PÉREZ**

Secretario General

#### **INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS**

Vicerrectora Administrativa

#### **JAIME RICARDO CANTERA KINTZ**

Vicerrector de Investigación

#### **GLADYS STELLA LÓPEZ JIMÉNEZ**

Decana - Facultad de Humanidades

### EQUIPO TÉCNICO

#### **ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO**

Director - Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano - OSSO

Doctor (Ph. D.) en Física-Matemáticas

#### **GRUPO DE GEOTÉCNIA**

##### **Jhonalberth Palacios Sánchez**

M.Sc en Geotecnia

##### **Nisley Zúñiga Estacio**

Geógrafa

##### **María Rubio Simanca**

Geógrafa.

Est. M.Sc en Desarrollo Sustentable

##### **Iliana Hernández Meneses**

Estadística

#### **GRUPO DE CARTOGRAFÍA Y SIG**

##### **Jhon Jairo Barona**

Doctor en Ing Geográfica

Coordinador

##### **Danny Alexander Cocuñame Ricardo**

Geógrafo

##### **Vanessa García Cardona**

Ing. Topográfica

##### **María Camila Pomeo**

Est. Ingeniería Topográfica

##### **Carlos Mauricio Mosquera Pérez**

Est. Ingeniería Topográfica

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS.....	17
2. CARACTERÍSTICAS DEL MUNICIPIO .....	18
2.1 LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO.....	18
2.2 ÁREA URBANA .....	19
3. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (MM) .....	21
3.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD.....	21
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	22
4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....	23
4.1 PENDIENTE.....	28
4.2 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS .....	29
4.3 GEOMORFOLOGÍA .....	29
4.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM).....	29
4.5 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES .....	30
4.6 GEOLOGÍA .....	31
4.7 TEXTURA .....	31
4.8 TAXONOMÍA .....	31
4.9 EROSIÓN.....	34
4.10 COBERTURA DE LA TIERRA .....	34
5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	34
5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES .....	35
5.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM).....	35
5.1.2 PENDIENTE .....	37
5.1.3 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS.....	39
5.1.4 GEOMORFOLOGÍA.....	41
5.1.5 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES.....	44
5.1.6 GEOLOGÍA .....	46
5.1.7 TEXTURA DEL SUELO.....	48
5.1.8 TAXONOMÍA DEL SUELO .....	50
5.1.9 EROSIÓN.....	51
5.1.10 COBERTURA DE LA TIERRA .....	54
5.2 PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES (FACTORES).....	56
5.2.1 RECLASIFICACIÓN DE LAS CAPAS TEMÁTICAS.....	59
5.2.2 RESULTADOS DE LA RECLASIFICACIÓN DE LAS CAPAS TEMÁTICAS .....	59
5.2.2.1 PENDIENTE .....	61
5.2.2.2 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS .....	61
5.2.2.3 GEOMORFOLOGÍA.....	64
5.2.2.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM).....	64
5.2.2.5 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES.....	67
5.2.2.7 GEOLOGÍA .....	67
5.2.2.8 TEXTURA.....	70
5.2.2.9 TAXONOMÍA .....	70

5.2.2.10	EROSIÓN .....	73
5.2.2.11	COBERTURA DE LA TIERRA .....	73
5.3	SUPERPOSICIÓN DE CAPAS TEMÁTICAS.....	76
6.	ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA ....	77
7.	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TERRENO.....	81
7.1	ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES.....	81
7.2	INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA .....	83
7.2.1	METODOLOGÍA.....	84
7.2.2	EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO .....	84
7.2.2.1	PERFORACIONES MECÁNICAS .....	85
7.2.2.2	APIQUES 87	
7.2.2.3	LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.....	92
7.2.3	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	97
7.2.4	ENSAYOS DE CORTE DIRECTO .....	102
7.2.5	ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN .....	102
7.3	PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.....	103
7.4	MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS .....	105
7.5	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD .....	107
7.6	METODOLOGÍA .....	107
7.7	MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS .....	109
7.8	PARÁMETROS DE RESISTENCIA.....	109
7.9	AGENTES DETONANTES.....	110
7.10	ASPECTOS SISMOLÓGICOS.....	110
7.10.1	SISMOS .....	111
7.11	RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	112
7.12	AGUA SUBTERRÁNEA.....	113
7.13	HIDROLOGÍA .....	113
7.13.1.1	LLUVIA 114	
7.14	ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN SUELOS ARCILLOSOS 117	
7.15	ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN MATERIAL SUPERFICIAL ALTERADO .....	118
7.15.1	USO DEL MÉTODO MONTECARLO .....	122
7.15.2	CÓDIGO DESARROLLADO EN MATLAB .....	122
7.15.3	MODELACIÓN MECANISMOS DE FALLA TRASLACIONALES SUPERFICIALES.....	123
8.	EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	127
8.1	MAGNITUD .....	130
8.2	DISTANCIA DE VIAJE .....	131
8.3	INTENSIDAD.....	133
9.	CONCEPTO TÉCNICO PARA EL BARRIO LA CEIBA .....	135
	CONCLUSIONES.....	143
	REFERENCIAS .....	145

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 4.1.</b> PESOS MATRIZ CRITERIOS NORMALIZADOS .....	26
<b>TABLA 4.2.</b> MATRIZ NORMALIZADA SEGÚN GRADO DE IMPORTANCIA DE LA VARIABLE .....	26
<b>TABLA 4.3.</b> MATRIZ NORMALIZADA LLUVIA .....	27
<b>TABLA 4.4.</b> MATRIZ ACTIVIDAD ANTRÓPICA .....	27
<b>TABLA 5.1.</b> CATEGORIZACIÓN DE LA VARIABLE PENDIENTE.....	37
<b>TABLA 5.2.</b> CATEGORIZACIÓN DE LA VARIABLE ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS .....	39
<b>TABLA 5.3.</b> UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES .....	44
<b>TABLA 5.4.</b> CLASES TEXTURALES DEL SUELO.....	48
<b>TABLA 5.5.</b> TIPOS DE EROSIÓN Y EFECTOS.....	51
<b>TABLA 5.6.</b> PONDERACIÓN DE LA PENDIENTE.....	56
<b>TABLA 5.7.</b> PONDERACIÓN ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS .....	57
<b>TABLA 5.8.</b> PONDERACIÓN GEOMORFOLOGÍA .....	57
<b>TABLA 5.9.</b> PONDERACIÓN DEM .....	57
<b>TABLA 5.10.</b> PONDERACIÓN UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS) .....	57
<b>TABLA 5.11.</b> GEOLOGÍA .....	57
<b>TABLA 5.12.</b> PONDERACIÓN TEXTURA .....	58
<b>TABLA 5.13.</b> PONDERACIÓN TAXONOMÍA .....	58
<b>TABLA 5.14.</b> PONDERACIÓN EROSIÓN.....	58
<b>TABLA 5.15.</b> PONDERACIÓN COBERTURA DE LA TIERRA .....	58
<b>TABLA 5.16.</b> CRITERIOS DE LOS GRADOS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	59
<b>TABLA 6.1.</b> PESOS ASIGNADOS A LAS VARIABLES PARA OBTENER EL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD (LSI) .....	77
<b>TABLA 6.2.</b> PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	79
<b>TABLA 7.1.</b> RELACIÓN DE LAS PERFORACIONES REALIZADAS, COORDENADAS (PLANAS MAGNA- SIRGAS), ALCANCE EN PROFUNDIDAD Y CANTIDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	85
<b>TABLA 7.2.</b> RELACIÓN DE LOS APIQUES REALIZADOS, COORDENADAS (PLANAS MAGNA SIRGAS), ALCANCE EN PROFUNDIDAD EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....	88
<b>TABLA 7.3.</b> UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA REALIZADAS PARA EL PRESENTE ESTUDIO .....	94
<b>TABLA 7.4.</b> ESTRATOS, VELOCIDADES Y ESPESORES IDENTIFICADOS EN CADA UNA DE LAS LÍNEAS SÍSMICAS REALIZADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO. ....	97
<b>TABLA 7.5.</b> ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS PARA EL PRESENTE ESTUDIO. ....	97
<b>TABLA 7.6.</b> RELACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LAS MUESTRAS RECUPERADAS EN LAS LABORES DE EXPLORACIÓN .....	98
<b>TABLA 7.7.</b> RESUMEN DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS ESTABLECIDOS PARA LOS MATERIALES PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	104
<b>TABLA 7.8.</b> PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LOS DIFERENTES MATERIALES PRESENTES EN LA ZONA .....	109
<b>TABLA 7.9.</b> MEDICIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS DURANTE LAS LABORES DE EXPLORACIÓN EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	113
<b>TABLA 7.10.</b> PROBABILIDADES DE LOS AGENTES DETONANTES.....	116
<b>TABLA 7.11.</b> RELACIÓN NIVEL FREÁTICO Y LAS LLUVIAS .....	117

<b>TABLA 7.12.</b> RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA SECCIÓN BB', CONDICIÓN SIN OBRAS. ....	118
<b>TABLA 7.13.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS RD ....	123
<b>TABLA 7.14.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS .....	124
<b>TABLA 7.15.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS SAJ ...	124
<b>TABLA 7.16.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS SALE.	124
<b>TABLA 7.17.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS SAR ..	124
<b>TABLA 7.18.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STAA	125
<b>TABLA 7.19.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS .....	125
<b>TABLA 7.20.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STAT.	125
<b>TABLA 7.21.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STC...	125
<b>TABLA 7.22.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STCO	126
<b>TABLA 7.23.</b> PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STCT.	126
<b>TABLA 7.24.</b> VALORACIÓN INCERTIDUMBRE COEFICIENTES DE VARIACIÓN .....	126
<b>TABLA 8.1.</b> CATEGORIZACIÓN DE LA AMENAZA, DECRETO 227 DE 2006 (ADOPTADO DE GONZÁLEZ Y MILLÁN, 2005).....	127
<b>TABLA 8.2.</b> ÁREAS SEGÚN LOS NIVELES DE AMENAZA PARA LA CONDICIÓN FUTURA EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	130
<b>TABLA 8.3.</b> PORCENTAJE DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LOS SECTORES MÁS AFECTADOS .....	130
<b>TABLA 8.4.</b> ECUACIONES PARA DETERMINAR LA DISTANCIA DE VIAJE, OBTENIDAS EN HONG KONG .....	132
<b>TABLA 8.5.</b> ECUACIONES DE REGRESIÓN PARA $\log(H/L) = A + B * \log V$ .....	132
<b>TABLA 8.6.</b> CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA PARA EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	135
<b>TABLA 9.1.</b> MEDICIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS DURANTE LAS LABORES DE EXPLORACIÓN EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	139

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1.</b>	<b>LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 2.2.</b>	<b>MAPA POLÍTICO ADMINISTRATIVO MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 2.3.</b>	<b>DIVISIÓN DEL PERÍMETRO URBANO DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 4.1.</b>	<b>DIAGRAMA METODOLÓGICO UTILIZADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 4.2.</b>	<b>VARIABLES EMPLEADAS PARA LA GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA. ....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 5.1.</b>	<b>MAPA MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 5.2.</b>	<b>MAPA DE PENDIENTE DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 5.3.</b>	<b>MAPA ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 5.4.</b>	<b>MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 5.5.</b>	<b>MAPA UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 5.6.</b>	<b>MAPA GEOLOGÍA DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 5.7.</b>	<b>MAPA DE TEXTURA DEL SUELO EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 5.8.</b>	<b>MAPA TAXONOMÍA DEL SUELO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 5.9.</b>	<b>MAPA DE EROSIÓN DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 5.10.</b>	<b>MAPA DE COBERTURAS DE LA TIERRA DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO ROLDANILLO .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 5.11.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO DE LA PENDIENTE DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 5.12.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 5.13.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO GEOMORFOLÓGICA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 5.14.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO DEM EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO..</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 5.15.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 5.16.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO GEOLOGÍA DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 5.17.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO TEXTURAS EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 5.18.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO TAXONOMÍA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 5.19.</b>	<b>MAPA RECLASIFICADO EROSIÓN EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....</b>	<b>74</b>

<b>FIGURA 5.20.</b> MAPA RECLASIFICADO COBERTURA DE LA TIERRA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	75
<b>FIGURA 6.1.</b> PORCENTAJES DEL ÁREA DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	78
<b>FIGURA 6.2.</b> MAPA SUSCEPTIBILIDAD TOTAL A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	80
<b>FIGURA 7.1</b> ZONIFICACIÓN DETALLADA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA .....	83
<b>FIGURA 7.2.</b> UBICACIÓN EN PLANTA DE LAS PERFORACIONES MECÁNICAS SOBRE LA FOTO AÉREA TOMADA PARA EL PRESENTE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	86
<b>FIGURA 7.3.</b> MÁQUINA (JOY) USADA PARA LAS PERFORACIONES.....	87
<b>FIGURA 7.4.</b> APIQUE EXPLORATORIO EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	88
<b>FIGURA 7.5.</b> UBICACIÓN EN PLANTA DE LOS APIQUES SOBRE LA FOTO AÉREA TOMADA PARA EL PRESENTE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	89
<b>FIGURA 7.6.</b> PERFIL ESTRATIGRÁFICO ESTABLECIDO P-1. ....	91
<b>FIGURA 7.7.</b> LOCALIZACIÓN DE LAS LINEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, REALIZADAS EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	93
<b>FIGURA 7.8.</b> SISMÓGRAFO SEISTRONIX RAS-24. ....	94
<b>FIGURA 7.9.</b> REALIZACIÓN EN CAMPO DE UNA LÍNEA DE REFRACCIÓN SÍSMICA (LS) EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	94
<b>FIGURA 7.10.</b> ILUSTRACIÓN TÍPICA DE LA CAPTURA DE DATOS EN CAMPO MEDIANTE EL SOFTWARE RAS-24 CORRESPONDIENTE A LA EJECUCIÓN DE LA LÍNEA DE REFRACCIÓN LS-2 PARA ONDAS S. ....	95
<b>FIGURA 7.11.</b> ILUSTRACIÓN TÍPICA DEL PROCESAMIENTO DE DATOS MEDIANTE EL SOFTWARE SEISVIEW CORRESPONDIENTE A LA LÍNEA DE REFRACCIÓN, PARA ONDAS S.....	96
<b>FIGURA 7.12.</b> TOMOGRAFÍA DEL TERRENO, VELOCIDADES DE ONDA PLANA (Vs), LS-2 .....	96
<b>FIGURA 7.13.</b> GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PICO OBTENIDAS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO SOBRE LA MUESTRA M4 DE LA PERFORACIÓN P-06. ....	102
<b>FIGURA 7.14.</b> UBICACIÓN SECCIONES DE ANÁLISIS MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	105
<b>FIGURA 7.15.</b> PERFIL SECCIÓN DE ANÁLISIS.....	106
<b>FIGURA 7.16.</b> PERFIL SECCIÓN DE ANÁLISIS AA' .....	106
<b>FIGURA 7.17.</b> PERFIL SECCIÓN DE ANÁLISIS CC' .....	107
<b>FIGURA 7.18.</b> PERFIL SECCIÓN DE ANÁLISIS DD' .....	107
<b>FIGURA 7.19.</b> DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS.....	112
<b>FIGURA.7.20.</b> CURVAS DE INTENSIDAD FRECUENCIA Y DURACIÓN CON DATOS DE LA ESTACIÓN CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN.....	114
<b>FIGURA 7.21</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN PARA MEDIR EL NIVEL FREÁTICO. ....	116
<b>FIGURA 7.22.</b> ANÁLISIS DE ESTABILIDAD SECCIÓN BB', ESCENARIO FUTURO, CONDICIÓN SIN OBRAS. ....	118
<b>FIGURA 7.23.</b> MAPA DE PENDIENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	120
<b>FIGURA 7.24.</b> MAPA MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	121

<b>FIGURA 7.25.</b> GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL .....	123
<b>FIGURA 8.1.</b> MAPA DE AMENAZA CATEGORIZADO CORRESPONDIENTE A LA CONDICIÓN FUTURA PARA EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO.....	128
<b>FIGURA 8.2.</b> DISTRIBUCIÓN DE NIVELES DE AMENAZA PARA LA CONDICIÓN FUTURA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	130
<b>FIGURA 8.3.</b> DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UN DESLIZAMIENTO. ....	131
<b>FIGURA 8.4.</b> VARIABLES GEOMÉTRICAS PARA DEFINIR LA DISTANCIA DE VIAJE DE UN DESLIZAMIENTO. ....	132
<b>FIGURA 8.5.</b> BLOQUE DESLIZANTE, CONSIDERACIONES DINÁMICAS. A) PERFIL DE LA TRAYECTORIA. B) GEOMETRÍA LOCAL DEL CONTACTO. C) DIAGRAMA DE FUERZAS. D) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	133
<b>FIGURA 9.1.</b> FOTOS DE VIVIENDAS DEL BARRIO LA CEIBA .....	137
<b>FIGURA 9.2.</b> DISTRIBUCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS REALIZADOS EN EL MARCO DEL CONVENIO N°0205 DE 2017 ENTRE LA CVC- UNIVERSIDAD DEL VALLE PARA EL ESTUDIO DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL BARRIO LA CEIBA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO. ....	138
<b>FIGURA 9.3.</b> MAPA DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	140
<b>FIGURA 9.4.</b> MAPA DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS DEL BARRIO LA CEIBA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	141
<b>FIGURA 9.5.</b> PERFIL A-A' UBICADO EN EL BARRIO LA CEIBA EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO .....	142

## RESUMEN

La evaluación y zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa en la zona urbana del Municipio de Roldanillo, Valle del Cauca, es una herramienta útil a la hora de definir políticas regionales que contribuyan a la defensa del medio ambiente, conservación de los suelos, de los ecosistemas, planificación territorial y en general toma de decisiones concernientes a la población, la economía y desarrollo sostenible del municipio.

Para obtener la amenaza por movimientos en masa, se utiliza un sistema de información geográfica (SIG), con el cual se elabora el mapa de susceptibilidad partiendo de diferentes variables propias del suelo, se aplica una metodología heurística, la cual consiste de manera resumida en buscar las variables que producen o influyen en la generación de deslizamientos, después se le asigna peso a cada una de ellas (estos pesos son creados a partir del análisis de las condiciones locales y regionales del terreno y los diversos procesos presentes, de tal manera que la decisión interdisciplinaria del grupo de trabajo determina el peso y la inferencia de unas variables sobre las otras), luego estas variables son normalizadas en tres categorías (alta, media y baja), para finalmente realizar una suma ponderada de las variables y clasificarlas en amenaza alta, media o baja.

Los movimientos en masa van en aumento debido a factores como; los cambios en el uso del suelo, construcciones en sectores de altas pendientes, entre otros. La distribución espacial de la susceptibilidad busca aportar conocimientos que les permita una planificación del territorio acorde con sus verdaderos requerimientos y necesidades.

Para realizar la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, se toma como insumo base la susceptibilidad y a partir de ella en conjunto con los factores condicionante, (exploración y ensayos), y los detonantes, (lluvia, sismo, actividad antrópica), y los modelos matemáticos (Montecarlo, talud infinito, equilibrio límite. Etc). Para luego poder clasificar la zonificación en términos de probabilidad de falla en tres categorías, alta, media y baja.

La zonificación de movimientos en masa nos ayudará para determinar posibles zonas de expansión, zonas de conservación y protección, realizar obras de mitigación, para así poder brindar mayor soporte e información veraz al tomador de decisiones, y conocimientos, calidad de vida etc, a la población de acuerdo a sus necesidades.

## INTRODUCCIÓN

En el presente documento se muestran las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño (riesgo) realizadas en el área urbana de los municipios Bolívar, Roldanillo y Versalles. Dichos estudios se priorizan en el marco del Resultado 2 - Estudios de zonificación de amenazas y riesgos en áreas urbanas, cofinanciados; del proyecto 5001: Apoyo a la gestión del riesgo en el territorio del Plan de Acción 2016-2019 de la CVC.

Los estudios, que dan como resultado la zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos, se entregan con el fin de aportar a la disminución de la vulnerabilidad de cada una de las cabeceras frente a las amenazas naturales y socio naturales en concordancia con las limitaciones del territorio, es decir, se aborda el proceso de conocimiento del riesgo a partir del análisis de amenazas y riesgos a nivel de zonas urbanas, acorde con lo definido por el Decreto 1077 de 2015, lo cual permitirá abordar de manera adecuada los procesos de planificación ambiental y territorial, definiendo con mayor precisión las medidas prospectivas y correctivas que se deban implementar.

El informe de evaluación y zonificación de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa en la zona urbana del Municipio de Roldanillo, Valle del Cauca, se enmarca en el Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad de Valle, el cual tiene como objeto *“Aunar Esfuerzos Técnicos y Recursos Económicos para la Elaboración de los Estudios de Zonificación de Amenaza y Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación para las Áreas Urbanas de los Municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca.”*

El Municipio de Roldanillo (Alcaldía de Roldanillo, 2015) tiene una extensión superficial de 217 Km<sup>2</sup>, representando el 1% del Departamento del Valle del Cauca. Está constituido por 26 barrios en la zona urbana, 19 corregimientos y 16 veredas en la zona rural. Su territorio tiene una región plana al oriente y una zona montañosa al occidente, de 21.147 hectáreas que conforman su territorio. El 68% se localiza en zona de ladera, el 30.7% en zona plana y el 1.3% es el casco urbano, es decir, 14.269 hectáreas, 6.605 hectáreas y 273 hectáreas respectivamente. El municipio tiene su casco urbano localizado en la zona plana. Tiene un área de 273 hectáreas y un perímetro de 8.903 metros, con una buena cobertura de servicios públicos, sociales y buen equipamiento en los sectores de salud, educación y cultura, está organizado en veintiséis (26) barrios.

Sobresalen en su economía la agricultura, la ganadería, la agroindustria, la cultura y el turismo, además el Municipio cuenta con alguna actividad comercial, que concentra las actividades de la zona de influencia. Sus principales cultivos caña de azúcar, plátano, maíz, café, tabaco, soya, millo, hortalizas y frutas.

La humedad relativa promedio es de 72%, temperatura media mensual 24.3 °c temperatura máxima 34.5 °c temperatura mínima 16.4 °c precipitación promedio 1.118 mm/año precipitación máxima mensual 272 mm en marzo y abril precipitación mínima 1.1 mm/ año en julio evaporación promedio 1.841.7 mm /año 1 evaporación mínima 93.7 mm en abril evaporación máxima 221 en enero brillo solar medio 1900 has/año 22.3 mensual velocidad del viento mañana: 1.6 m/seg tarde y noche: 3.1 m/seg.

La zona plana, produce grandes volúmenes agrícolas como materias primas que se comercializan en los principales centros del país, tales como: Bogotá, Cali y Medellín. El turismo ha tomado auge, como consecuencia de las actividades desarrolladas por el Museo Rayo, Dibujo y Grabado Latinoamericano; por los encuentros de Poetas Colombianas; y los campeonatos nacionales e internacionales de Parapente y Ala delta. Cada año se celebra la Feria Agroindustrial y Equina grado “A” que concentra los ojos de Colombia en Roldanillo. El Municipio de Roldanillo en el sector urbano, dispone de todos los servicios públicos básicos.

Por su parte los movimientos en masa son eventos que han generado más daños en los países en vía de desarrollo, los cuales ocasionan más catástrofes que cualquier otro tipo de desastre natural (Guzzetti et al. 1999).

Las comunidades asentadas en zonas montañosas o zonas de laderas, pueden estar en riesgo a causa de los movimientos en masa, dado que dichos movimientos son responsables de pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura. Los movimientos en masa representan una amenaza para asentamientos humanos, zonas agrícolas y ganaderas y vías, entre otros tipos de infraestructura localizados sobre el abanico aluvial, es decir, en la parte plana donde los materiales transportados son depositados.

Este estudio busca evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo, Valle del Cauca, para realizar dicho estudio se seleccionan y analizan las variables que causen mayor afectación y se clasifican las áreas en tres grupos (amenaza alta, media y baja). Los métodos utilizados son cualitativos y cuantitativos, lo cual permite conocer la distribución de las áreas propensas a deslizarse.

Para determinar la amenaza por movimientos en masa, se realizó un amplio trabajo de campo, que permitió cartografiar y evaluar los principales parámetros que caracterizan el terreno, logrando con ello determinar primero la Susceptibilidad a movimientos en masa, que sirve como base para realizar a zonificación de amenaza por movimientos en masa. La metodología empleada para la susceptibilidad fue la heurística, y se generaron diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base, luego estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa de susceptibilidad y de amenaza.

Teniendo como base la susceptibilidad del terreno, se procede a elaborar la modelación de la amenaza por medio del Método de Montecarlo, este consiste en una técnica numérica para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios, los datos se obtienen a partir de los estudios geotécnicos, las pruebas en campo y ensayos de laboratorio. La distribución espacial de la amenaza busca aportar conocimientos que permitan una planificación del territorio acorde con sus verdaderos requerimientos y necesidades, puesto que, la amenaza por movimientos en masa es una herramienta útil a la hora de definir políticas regionales que contribuyan a la defensa del medio ambiente, conservación y protección de los suelos, de los ecosistemas, planificación territorial y en general toma de decisiones concernientes a la población, la economía y desarrollo sostenible del municipio. Cabe añadir que esta amenaza por mm es un insumo para la evaluación de la vulnerabilidad y escenarios de afectación, los cuales estarán contenidos en otro documento.

Este documento está compuesto por diez (10) capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presenta los objetivos y alcances del estudio

El Capítulo 2 se expone las generalidades.

El Capítulo 3 presenta la susceptibilidad por movimientos en masa.

El Capítulo 4 trata sobre la metodología utilizada para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa.

En el Capítulo 5 se plantea la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

El Capítulo 6 presenta la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

El capítulo 7 presenta la zonificación de la amenaza por movimientos en masa y el análisis de la estabilidad del terreno.

El capítulo 8 presenta la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Finalmente, en el Capítulo 9 se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes del estudio, mientras que en el Capítulo 10 se relacionan las referencias bibliográficas consultadas.

## **1. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo, Valle del Cauca.

### **ESPECÍFICOS**

- Evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo.
- Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo
- Analizar las precipitaciones y sismos ocurridos en la zona de estudio que puedan detonar movimientos en masa
- Calcular la magnitud y probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa
- Evaluar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo.
- Zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo
- Analizar la cartografía resultante de la zonificación y estimación de la susceptibilidad y de la amenaza por movimientos en masa.

### **ALCANCE**

El presente estudio pretende identificar, zonificar y evaluar los grados de amenaza que presenta el área urbana del municipio de Roldanillo, Valle del Cauca, a través de métodos cualitativos y cuantitativos, lo cual permite conocer la distribución de las áreas propensas a deslizarse. En cumplimiento del Decreto 1807 de 2015, el presente estudio se realiza a escala 1:2.000 con el fin de que sea tomado como insumos para los futuros procesos de ordenación y planificación territorial en los límites del municipio de Roldanillo.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL MUNICIPIO

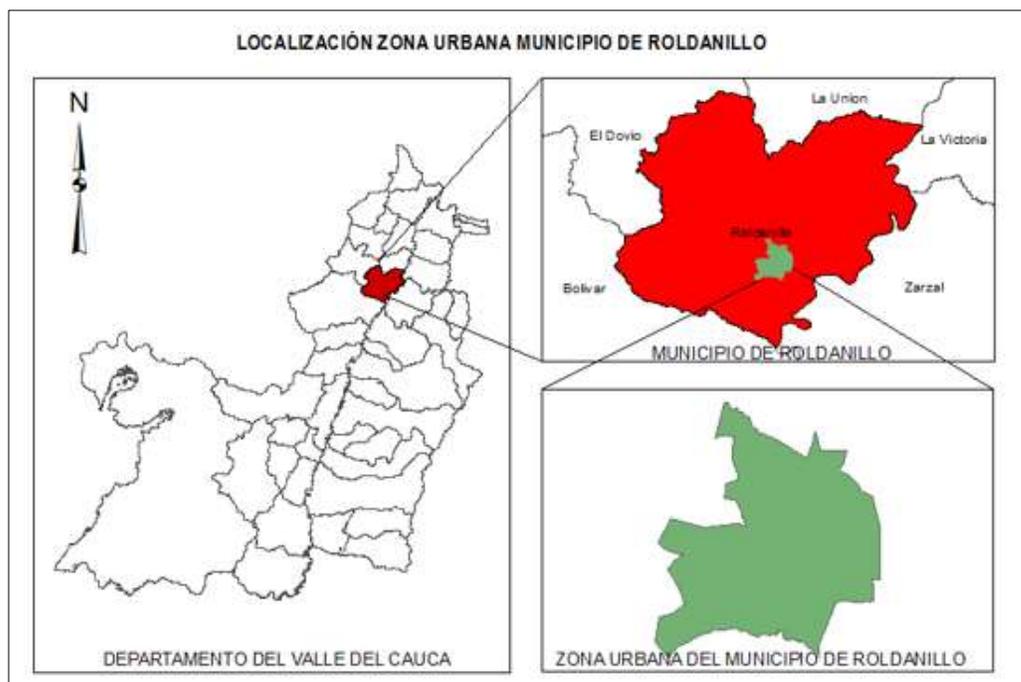
El municipio de Roldanillo está ubicado en el sector norte del departamento del Valle del Cauca, sobre el costado oriental de la cordillera Occidental y al margen occidental del río Cauca. El Municipio de Roldanillo (Alcaldía de Roldanillo, 2015), establece en el Plan municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, que el municipio se divide en 17 veredas, 19 corregimientos (área rural) y 27 barrios (área urbana). Presenta régimen de lluvias bimodal, con periodos de lluvias durante los meses de abril - mayo y octubre – noviembre, la temperatura promedio de 24 grados Celsius. Con respecto a los cuerpos de agua dentro o cercanos al casco urbano se localizan: los ríos Cauca, Roldanillo; Cáceres y el Zanjón de los Mudos.

### 2.1 LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

El Municipio de Roldanillo está localizado en la zona norte del Departamento del Valle del Cauca. En el sistema colinado de la cordillera occidental, forma parte de la vertiente del río Cauca y del sistema de drenaje al río Garrapatas (pacífico). Igualmente comprende, el área del valle geográfico del río Cauca. Roldanillo está ubicado a 4° 24' 08'' de latitud Norte y a 76° 09' 00'' de longitud oeste y a 965 m.s.n.m.

Roldanillo se ubica a una distancia de 135 km de la ciudad de Cali, está delimitado al norte con el municipio de la Unión; al sur con el municipio de Bolívar, al oriente con el municipio de Zarzal y la Victoria, al occidente con el municipio de El Dovio (Figura 2.1). La cabecera del municipio de Roldanillo, es centro de atracción comercial, cultural y educativa, para los municipios de: La Unión, Toro, Versalles, El Dovio, Roldanillo y Bolívar (Alcaldía de Roldanillo, 2016).

2.1.



Figura

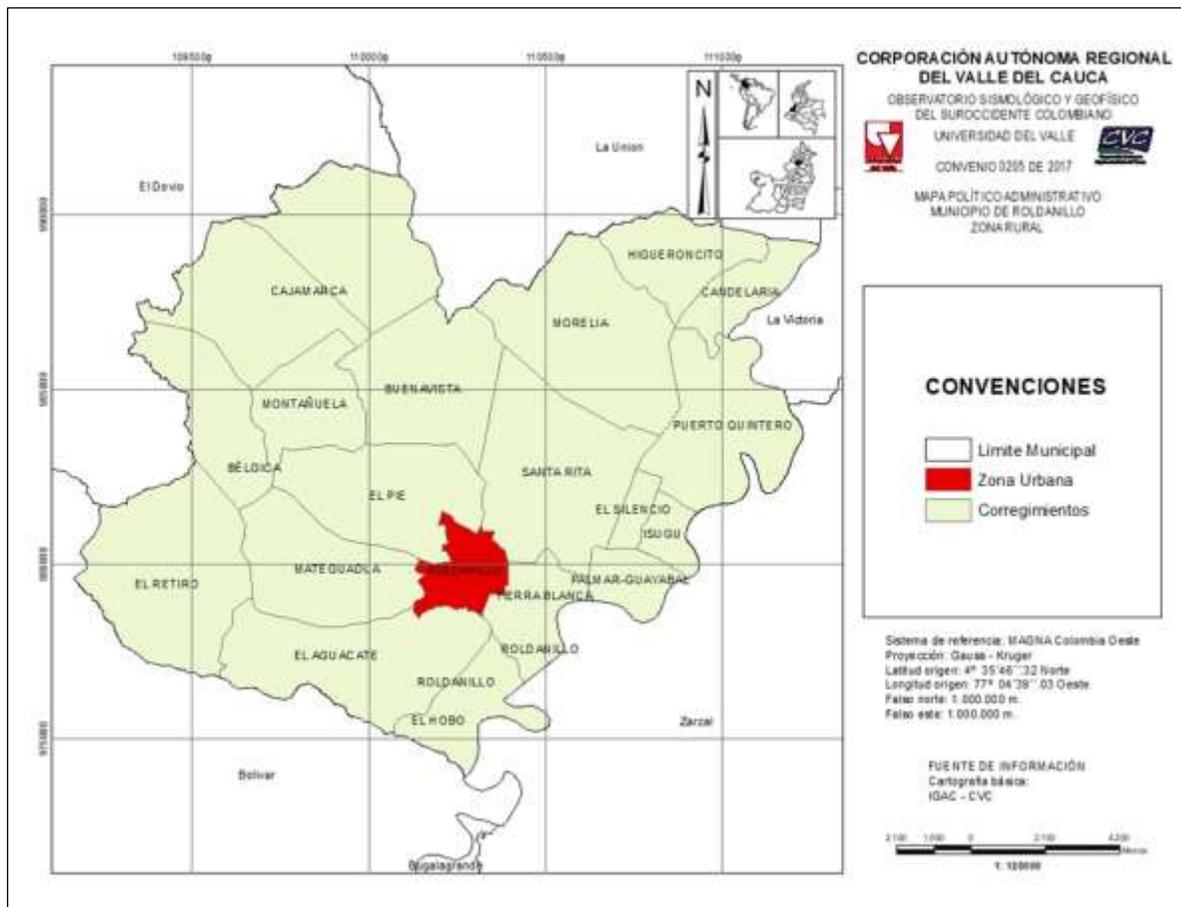
Localización de la zona de urbana del Municipio de Roldanillo

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 ÁREA URBANA

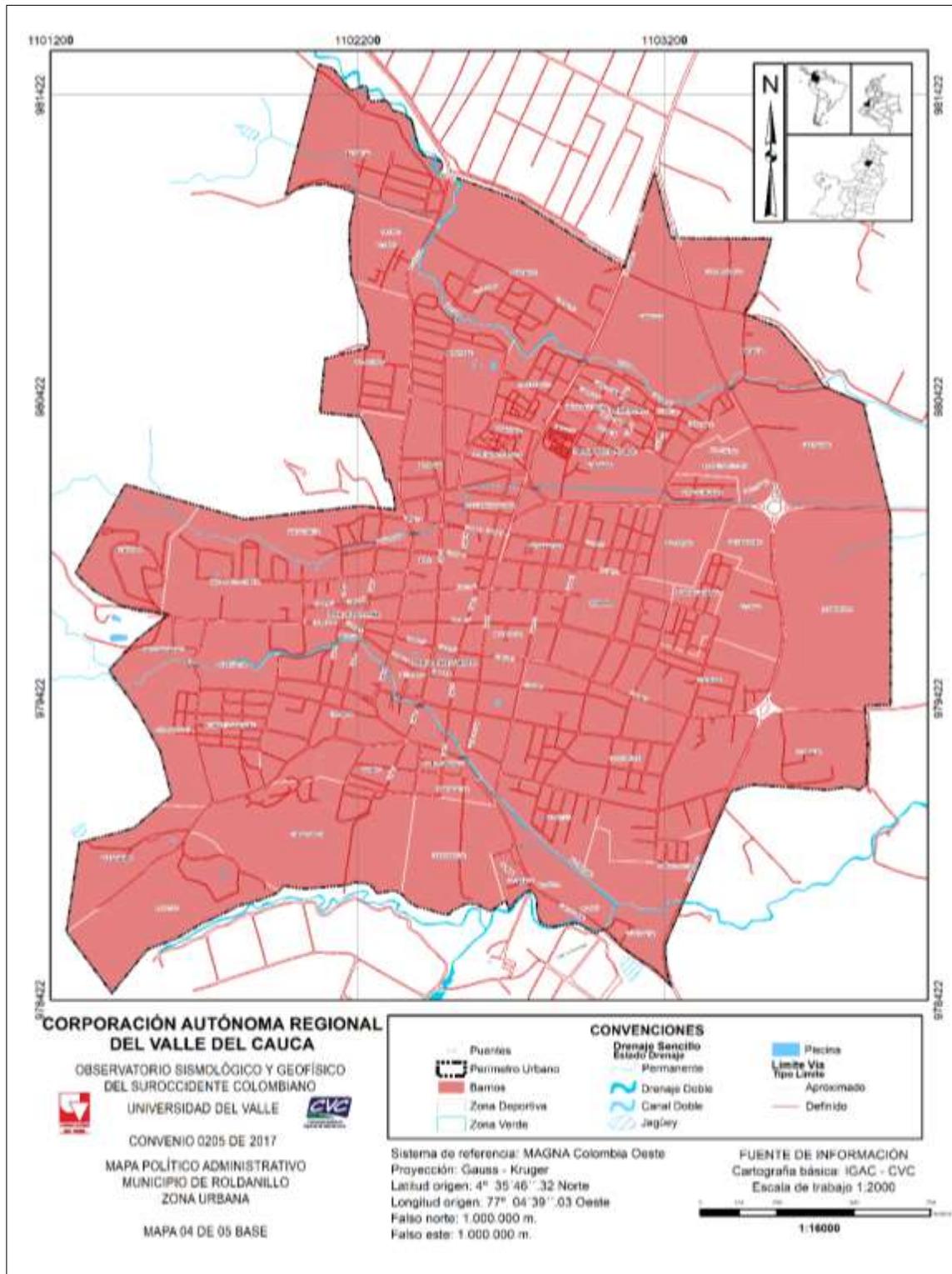
El sector urbano del municipio de Roldanillo fue determinado por el perímetro urbano establecido por el Acuerdo Municipal N° 102 del 20 de septiembre de 1999. En la actualidad se reconoce como perímetro urbano el establecido por el inventario predial del catastro nacional. El perímetro urbano establecido por acuerdo municipal comprende 368.5 Ha. (Alcaldía de Roldanillo, 2016). La Figura 2.2 muestra la división político- administrativa del municipio y la

Figura 2.3 enseña la división por barrios.



**Figura 2.2.** Mapa Político Administrativo Municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.3.** División del perímetro urbano del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia.

### **3. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (MM)**

La susceptibilidad según González de Vallejo; et al. (2002). Posibilidad de que una zona quede afectada por determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos, que como se verá, es insuficiente y puede mejorarse. La probabilidad puede aplicarse tanto al problema de la desestabilización de un punto, al hecho posible de que resulte movido por un movimiento subyacente, en cuyo caso hablamos de susceptibilidad a la desestabilización, como a su posible alcance por una masa desestabilizada en un proceso de movimiento.

La susceptibilidad por movimiento en masa se toma como el grado de propensión de un terreno a desarrollar un fenómeno natural potencialmente dañino, definido a partir de la interacción de las propiedades intrínsecas caracterizadas bajo unidades de parámetro y unidades de terreno (SGC, 2015). Es decir, la evaluación de la susceptibilidad expresa cuales son los sitios con mayor o menor o difícil es la ocurrencia de un evento en determinada área. La susceptibilidad posee gran importancia puesto que es el primer paso a tener en cuenta a la hora de realizar una evaluación de la amenaza, ya que ofrece la información necesaria para identificar las características que presenta la zona para luego ser analizadas.

Para determinar la susceptibilidad por movimientos en masa, se tuvieron en cuenta las siguientes características del terreno; geomorfología, geología, suelo y coberturas de la tierra. La metodología empleada se basa principalmente en la generación de diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base, además del uso de métodos cuantitativos, luego estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa de susceptibilidad. Para la elaboración de las salidas cartográficas se usó un Sistema de Información Geográfica (SIG). También se realizó trabajo de campo el cual es de gran utilidad para obtener resultados rápidos y confiables al igual que permite corroborar la información de fuentes secundarias.

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD**

Para la zonificación de la susceptibilidad se tiene en cuenta las condiciones que intervienen en la generación de los movimientos en masa, como los procesos morfodinámicos y características del suelo. La zonificación se obtiene a partir del procesamiento de las variables; pendientes, orientación de las laderas, geomorfología, modelo digital de elevaciones (MDE), unidades geológicas superficiales, geología, textura, taxonomía, erosión actual y cobertura de la tierra. A cada variable se le asignó un peso, esta calificación se basa principalmente en la metodología heurística. El estudio corresponde al área urbana del municipio de Roldanillo y es a escala de detalle.

La calificación depende del grado de influencia que aporta cada variable a la susceptibilidad. Para realizar la evaluación de la susceptibilidad se asignan tres rangos de intensidad (Alta, Media y Baja). Esta información es procesada mediante el SIG, arrojando varias capas temáticas correspondientes a cada variable, las cuales son sumadas dando como resultado un mapa que muestra cuales son los sectores del área de estudio susceptibles a sufrir movimientos en masa.

### 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS POR MOVIMIENTOS EN MASA

La clasificación de movimientos en masa presentes en este documento, sigue la distribución hecha por Cruden y Varnes (1996), donde enfatiza en el material involucrado y el tipo de deslizamiento, basados en la clasificación propuesta por Varnes (1978), adicionalmente los autores introducen una Terminología que considera factores como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, proponen la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos (caída de rocas-flujo de detritos).

**Caída:** Separación o desprendimiento de suelo o roca, desde una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que poco se produce desplazamiento de cizallamiento (desplazamiento). Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando. El movimiento es muy rápido excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada, la caída irá precedida de pequeños movimientos de deslizamiento o caída que separan el material desplazado de la masa no perturbada. (Cruden & Varnes 1996).

**Volcamiento:** Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza, se divide en tres tipos (Cruden & Varnes 1996).

- Volcamiento de bloques de roca
- Volcamientos de bloques aislados
- Volcamiento de detritos

**Deslizamiento:** Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte (ibíd.). Los autores plantean que la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que se desplazará, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. Este tipo de movimiento en masa se divide en tres tipos

- Rotacional,
- Traslacional
- Compuesto

**Flujo:** se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada es similar a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido. En realidad, se da una transición de deslizamiento a flujo, dependiendo del contenido de agua, la movilidad y la evolución del movimiento.

Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas con alta pendientes (ibíd.).

**Propagación lateral:** Extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida. La extensión se manifiesta como la extrusión de material propenso a licuación o flujo plástico. Se pueden presentar dos casos generales

- Propagación lateral en bloque
- Propagación lateral por licuación

**Creep:** “Deformación del terreno a esfuerzo constante” que involucra el material inconsolidado de la parte superior de las laderas.

Estos materiales se pueden relacionar con saprolitos y suelos residuales, suelos volcánicos, laderas de rocas lodosas hídricamente degradadas y, con más frecuencia, coluviones arcillosos asociados a rocas lodosas.

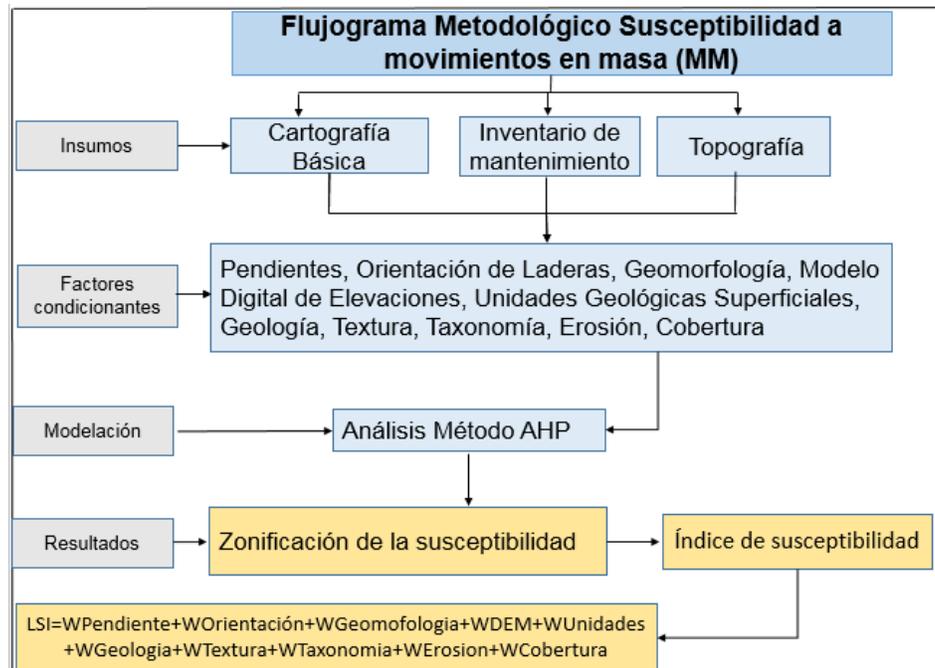
Para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimiento es masa, se hace necesario conocer el tipo de deslizamiento que se presenta en una zona, pues estos determinan la velocidad y la fuerza con que pueden impactar a la población cercana, también se tener en cuenta el tipo de movimiento en masa para la implementación de obras de mitigación adecuadas a la hora de intervenir la zona, la respuesta de la población ante estos y los entes territoriales, pues un deslizamiento traslacional, afecta diferente que un deslizamiento tipo flujo.

#### **4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO**

Para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa se propusieron los métodos análisis discriminante, bivariado, univariado, estadístico multicriterio, los cuales serían complementados con trabajo de campo y el estudio de historicidad, para obtener el inventario de procesos morfodinámicos. Para el municipio de Roldanillo no se reportaron registros de movimientos en masa (historicidad y geomorfología) en el área de estudio, lo cual no permitirá emplear métodos estadísticos. Sin embargo, “considerando las limitaciones de información se pueden emplear alternativas con base en métodos del conocimiento del área como en el caso de los métodos heurísticos” (Corominas et al., 2013).

El método Heurístico se basa en la asignación subjetiva de pesos o valores a los factores relevantes y a las subclases para obtener una suma de susceptibilidad. Se pueden realizar dos tipos de análisis heurísticos, mediante el análisis geomorfológico y mapa de combinación.

Por la disponibilidad de la información en la zona de estudio se optó por el método basado en combinación de mapas cualitativos. Las variables se suman de acuerdo con estos pesos para obtener valores de susceptibilidad que se puedan agrupar en clases. En ese sentido, el análisis heurístico requiere un grado de subjetividad, (Medina, 2017)., para reducir el grado de subjetividad que aporta el método se complementa con el método AHP (Ver Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Diagrama metodológico utilizado para la evaluación de la susceptibilidad por Movimientos en masa en el municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia

Para desarrollar los objetivos planteados; General: Evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo, Valle del Cauca.

Específicos:

- Evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo.
- Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo
- Analizar las precipitaciones y sismos ocurridos en la zona de estudio que puedan detonar movimientos en masa
- Calcular la magnitud y probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa
- Evaluar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo.
- Zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo
- Analizar la cartografía resultante de la zonificación y estimación de la susceptibilidad y de la amenaza por movimientos en masa.

Se ejecuta el estudio en cuatro fases que engloban el proceso que se debe recorrer para obtener un estudio confiable de la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa. Se estructura una metodología basada en las variables a intervenir, las cuales dependerán de la disponibilidad de la información, la zona de estudio, los eventos de deslizamientos presentados y las condiciones técnicas. Las fases mencionadas anteriormente son las siguientes:

1. Elección de las variables que influyen en la susceptibilidad por movimientos en masa.
2. Desarrollar el método para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa (AHP).
3. Asignación de pesos y ponderación de las variables (evaluación multicriterio “todos los mapas deben estar en formato raster”).
4. Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa (sumatoria de mapas).

Para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa se propusieron los métodos análisis discriminante, bivariado, univariado, estadístico multicriterio, los cuales serían complementados con trabajo de campo y el estudio de historicidad, para obtener el inventario de procesos morfodinámicos, considerado como uno de los insumos más importantes del proceso, pues permite establecer la relación que existe entre el factor condicionante y la posibilidad de que ocurra un movimiento en masa. Una vez hecha a revisión de las diferentes fuentes de información (bibliográficas, hemerográficas, archivos, base de datos entre otros), para el municipio de Roldanillo no se reportaron registros de movimientos en masa (historicidad y geomorfología) en el área de estudio, lo cual no permitirá emplear métodos estadísticos. Sin embargo, “considerando las limitaciones de información se pueden emplear alternativas con base en métodos del conocimiento del área como en el caso de los métodos AHP” (Corominas et al., 2013).

Según el SGC (2015). El análisis de la amenaza por movimientos en masa es un proceso que requiere de la interacción e intervención de diferentes disciplinas temáticas relacionadas con las ciencias de la tierra y un suficiente conocimiento de la zona de estudio en cada una de sus etapas. Y de acuerdo a los resultados arrojados de la revisión bibliográfica sobre la historicidad de los movimientos en masa registrados en el área de estudio, se propone la metodología AHP cuya formulación se basa principalmente en la calidad y cantidad de información disponible, además del conocimiento del área de estudio y de la construcción de las matrices con el método AHP.

Para realizar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el área urbana del municipio de Roldanillo se seleccionó el método Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), el cual fue escogido debido a que es un método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones gerenciales (Saaty, 1980). Esta metodología se utiliza para resolver problemas en los cuales existe la necesidad de priorizar distintas opciones y posteriormente decidir cuál es la opción más conveniente. Las decisiones a ser tomadas con el uso de esta técnica, pueden variar desde simple decisiones personales y cualitativas hasta escenarios de decisiones muy complejas y totalmente cuantitativas.

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico de la vida real. Cualquier actividad involucra de una u otra manera, la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión, donde muy frecuentemente estos criterios están en conflicto unos con otros, El método AHP es una metodología para estructurar, medir y sintetizar.

Medición en escalas. El AHP permite realizar mediciones de factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones numéricas, verbales o gráficas, lo cual le provee una gran flexibilidad, permitiendo esto, gran variedad de aplicaciones en campos tan distintos unos de otros. El hecho de tener definida una escala general, aplicable a cualquier situación, permite la universalidad del método y lo hace sencillo de aplicar para quien toma la decisión. Además, la escala es clara y provee una gran amplitud para las comparaciones. El enfoque del AHP es totalmente

sistémico, ya que, aunque analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica, en ningún momento pierde de vista el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas, por lo tanto, este método está enfocado en el sistema en general, y la solución que presenta es para la totalidad, no para la particularidad (Universidad Tecnológica de Pereira 2008)

A partir del modelo AHP se asignan el grado de susceptibilidad teniendo en los resultados arrojados por las diferentes matrices (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Tabla 4.1 a la Tabla 4.4) basados en o anterior se asignan los pesos a cada una de las variables utilizadas en este estudio (Figura 4.2).

**Tabla 4.1.** Pesos matriz criterios normalizados

PESOS MATRIZ DE CRITERIOS NORMALIZADA	
Grado de importancia	0,15
Lluvia	0,53
Actividad antrópica	0,32

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.2.** Matriz normalizada según grado de importancia de la variable

MATRIZ NORMALIZADA GRADO DE IMPORTANCIA											
Variables	Geología	Geomorfo- logía	UGS	Pendiente	DEM	Cobertura de la tierra	Taxonomía	Textura	Orientación de las laderas	Erosión	promedio
Geología	0,14	0,03	0,16	0,30	0,17	0,24	0,15	0,23	0,23	0,21	<b>0,19</b>
Geomorfología	0,42	0,10	0,08	0,30	0,17	0,02	0,14	0,17	0,13	0,15	<b>0,17</b>
UGS	0,28	0,42	0,33	0,24	0,21	0,29	0,15	0,17	0,16	0,18	<b>0,24</b>
Pendiente	0,03	0,02	0,08	0,06	0,08	0,24	0,15	0,13	0,13	0,12	<b>0,11</b>
DEM	0,03	0,03	0,07	0,03	0,04	0,02	0,12	0,13	0,01	0,09	<b>0,06</b>
Cobertura de la tierra	0,03	0,31	0,05	0,01	0,13	0,05	0,14	0,10	0,10	0,09	<b>0,10</b>
Taxonomía	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	<b>0,01</b>
Textura	0,02	0,02	0,07	0,02	0,01	0,02	0,05	0,03	0,13	0,09	<b>0,05</b>
Orientación de las laderas	0,02	0,03	0,07	0,02	0,17	0,10	0,03	0,01	0,03	0,02	<b>0,05</b>
Erosión	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02	0,05	0,01	0,07	0,03	<b>0,03</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.3.** Matriz normalizada lluvia

MATRIZ NORMALIZADA LLUVIA											
Variables	Geología	Geomorfo- logía	UGS	Pendiente	DEM	Cobertura de la tierra	Taxonomía	Textura	Orientación de las laderas	Erosión	promedio
Geología	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,14	0,14	0,15	0,02	<b>0,06</b>
Geomorfología	0,16	0,07	0,01	0,24	0,10	0,16	0,16	0,16	0,17	0,03	<b>0,13</b>
UGS	0,07	0,37	0,05	0,03	0,24	0,41	0,14	0,14	0,15	0,02	<b>0,16</b>
Pendiente	0,23	0,07	0,33	0,24	0,10	0,25	0,12	0,12	0,13	0,28	<b>0,19</b>
DEM	0,10	0,04	0,01	0,12	0,05	0,02	0,10	0,10	0,11	0,03	<b>0,07</b>
Cobertura de la tierra	0,16	0,04	0,23	0,08	0,24	0,08	0,14	0,14	0,15	0,42	<b>0,17</b>
Taxonomía	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	<b>0,02</b>
Textura	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	<b>0,02</b>
Orientación de las laderas	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,04	0,06	0,02	0,03	<b>0,02</b>
Erosión	0,23	0,37	0,33	0,12	0,24	0,03	0,10	0,14	0,11	0,14	<b>0,18</b>

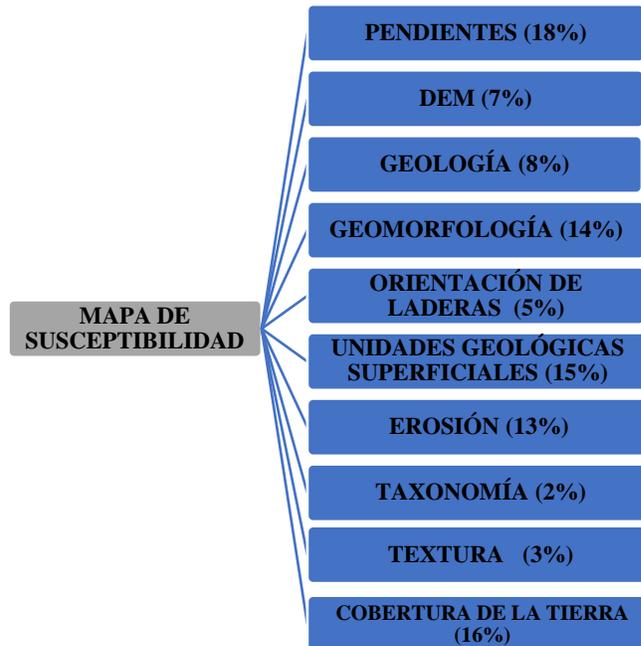
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.4.** Matriz actividad antrópica

MATRIZ NORMALIZADA ACTIVIDAD ANTRÓPICA											
Variables	Geología	Geomorfo- logía	UGS	Pendiente	DEM	Cobertura de la tierra	Taxonomía	Textura	Orientación de las laderas	Erosión	promedio
Geología	0,04	0,02	0,07	0,06	0,13	0,17	0,09	0,10	0,01	0,03	<b>0,07</b>
Geomorfología	0,21	0,09	0,02	0,38	0,18	0,04	0,11	0,13	0,10	0,17	<b>0,14</b>
UGS	0,04	0,35	0,07	0,06	0,13	0,06	0,09	0,10	0,02	0,04	<b>0,10</b>
Pendiente	0,13	0,04	0,21	0,19	0,22	0,33	0,14	0,16	0,25	0,25	<b>0,19</b>
DEM	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,14	0,16	0,25	0,03	<b>0,08</b>
Cobertura de la tierra	0,21	0,35	0,21	0,09	0,13	0,17	0,14	0,16	0,25	0,17	<b>0,19</b>
Taxonomía	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	<b>0,02</b>
Textura	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,03	0,09	0,03	0,02	0,04	<b>0,03</b>
Orientación de las laderas	0,21	0,04	0,21	0,04	0,01	0,03	0,09	0,10	0,05	0,17	<b>0,09</b>
Erosión	0,13	0,04	0,14	0,06	0,13	0,08	0,09	0,06	0,03	0,08	<b>0,08</b>

Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo se presentan clasificaciones de las variables usadas en este estudio, realizadas por diferentes autores.



**Figura 4.2.** Variables empleadas para la generación del mapa de susceptibilidad general del terreno por Movimientos en masa.

**Fuente:** Elaboración propia

La influencia de los parámetros físicos que intervienen en los movimientos en masa, se analiza mediante la correlación entre variables. En este estudio las variables que se utilizaron corresponden a las siguientes: geomorfología, unidades geológicas superficiales, suelo y cobertura de la tierra, que a su vez son obtenidas del cruce de varias capas temáticas.

Dentro de este grupo de variables, las correspondientes a características geométricas del relieve, son derivadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables temáticas como las unidades geológicas superficiales y coberturas, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otros componentes del proyecto (Componente de historicidad, geología, geomorfología e hidrología), a cada variable se le asigna un peso dependiendo de su participación en la generación de la susceptibilidad del terreno. A continuación, se presentan una breve descripción de las diez (10) variables utilizadas en la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

#### 4.1 PENDIENTE

Variable geométrica obtenida a partir del MDE, es definida como el ángulo formado por la superficie del terreno y la horizontal. Se expresa en grados, en rango entre 0° y 90° o en porcentaje en rango de 0% a 100%.

- **Interés**

La pendiente está relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de

corte tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001).

## 4.2 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS

Es importante determinar la orientación que presenta el relieve ya que su determinación se convierte en una información útil para diferentes investigaciones. Esta variable ayuda, por un lado, a determinar el tiempo de exposición a la radiación solar a la que se encuentre expuesta la ladera y, por otro, a establecer las corrientes fluviales. Para la elaboración de la cartografía es necesario utilizar el modelo digital de elevación (MDE), a través de la herramienta SIG, ya que este software permite realizar el cálculo de la altitud y el azimut. Esta variable cuantitativa, con rango de 1 a 360 grados, se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado.

- **Interés**

El cálculo de la orientación de las laderas brinda información acerca de la cantidad de lluvia que recibe, las áreas de donde hay mayor o menor insolación, indicando de esta manera zonas húmedas o secas y las áreas con mayor presencia de vegetación.

## 4.3 GEOMORFOLOGÍA

El IGAC (2012) define la geomorfología como la “ciencia que estudia el relieve terrestre: su estructura, origen, historia y dinámica actual”, igualmente, “el estudio geomorfológico incluye la descripción de las formas (morfología), su origen (génesis), dinámica actual y su relación con la actividad humana” (Hubp, 2011).

- **Interés**

La variable indica cómo se forma el paisaje y los agentes internos y externos que ayudan a su formación, lo cual permite inferir la posible reacción o respuesta frente a las tensiones de corte y la resistencia, estas fuerzas no dependen únicamente de la geoforma, aquí actúan otros factores tales como el tipo de suelo, la geología del sitio y la actividad que se desarrolle en él (actividad antrópica), ejemplo de ellos es un paisaje denotativo, el cual dependiendo el agente que intervenga (agua o aire) presentará una mayor o menor propensión a deslizarse.

## 4.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)

Un modelo digital de elevaciones (DEM) se define como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno; una representación digital de información cartográfica en un formato raster, que consiste en una matriz que muestra las elevaciones para un número de posiciones de la tierra a intervalos regularmente espaciados.

El DEM es una representación espacial, que muestra de forma simplificada la geometría de la superficie del terreno. Indica únicamente la información de altura sin ninguna definición adicional sobre la superficie.

Resaltando la importancia de la cartografía convencional como herramienta para comprender y analizar la distribución espacial de los diferentes factores, los mapas base topográficos resultan útiles para construir los modelos o superficies temáticos, reflejando las características morfométricas del municipio.

- **Interés**

La altitud tiene una estrecha relación con la pluviometría como han encontrado algunos autores (Carrara, 1983). En eventos previos se ha observado que, a mayor altitud, mayor es la precipitación. Dependiendo de la zona de estudio y de la interpretación que se pueda hacer de esta variable, se puede utilizar o rechazar para el análisis. De ella derivan los modelos del terreno (variables) utilizados para el análisis (Santacana, 2001).

#### 4.5 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

Esta variable refleja las características de los diferentes tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias) y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta su origen, así como sus características texturales y propiedades geomecánicas (IDEAM, 2012).

- **Interés**

Los depósitos en general son los que presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a los movimientos en masa. Para la ponderación de los depósitos se tiene en cuenta la resistencia y su comportamiento en taludes y laderas del país, a partir de la información existente en la “Clasificación regional de amenaza relativa de movimientos en masa en Colombia” (INGEOMINAS, 2002). Cada material presenta propiedades que actúan de diferente según los agentes externos.

Suelos transportados (por ceniza o agua): Los aluviones son depósitos conformados por materiales gruesos y matriz de finos en los tramos de ambiente montañosos y por materiales finos en los valles amplios. La gradación está ligada a la velocidad de la corriente, por lo general baja en los valles amplios (Escobar y Duque, 2002).

Suelos colapsables: Los limos venidos de cenizas volcánicas son colapsables, en especial cuando son remoldeados; Los suelos de origen eólico (y las cenizas tienen algo de eso) son susceptibles, el agua (pocas veces) y el sismo, en casos de licuación, hacen colapsar el suelo. (Ibid) Retiene agua presenta bajos niveles de resistencia.

Suelo antrópicos y relleno de escombros, como su nombre lo indica son producidos por el hombre, estos presentan una mayor inestabilidad, dado que son suelos sueltos, en los cuales no presentan un nivel de cohesión.

Roca dura.: materiales sólidos de la corteza terrestre que afloran en la superficie de la tierra. Según su origen se distinguen: las rocas ígneas (intrusivas o plutónicas y efusivas o volcánicas), las rocas sedimentarias y las metamórficas que resultan de las variaciones por temperatura o presión de los primeros tipos de rocas mencionados. (SGC, s.f).

Quizás es la base más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo del territorio colombiano. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa (IGAC, 2012).

#### 4.6 GEOLOGÍA

Variable cualitativa que se deriva de la cartografía de Unidades Geológicas Superficiales del municipio de Roldanillo, y representa el tipo de material geológico a nivel superficial.

- **Interés**

Es una de las bases más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo del territorio colombiano. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa (IGAC, 2012).

#### 4.7 TEXTURA

La textura hace referencia al tamaño relativo de las diferentes partículas del suelo menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas). Tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo” (FAO, s.f).

- **Interés**

Suárez (1998), menciona que el término textura, se refiere al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo, junto con la mineralogía, el grado de meteorización, y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y la fuerza entre partículas. La cementación de grupo de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad.

La textura, se encuentra relacionada con la velocidad de infiltración, retención y almacenamiento de humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos, fertilidad y nutrición mineral, entre otras.

#### 4.8 TAXONOMÍA

“Los suelos por su naturaleza contienen elementos químicos y simultáneamente se combinan entre fases sólidas, líquidas y gaseosas. Además, el número de características físicas, químicas y biológicas y sus combinaciones llegan a ser casi infinitas. Asimismo, no es de extrañar las varias propuestas y esquemas distintos para armonizar y correlacionar los tipos de suelo diferentes” (ONU, 2018).

La taxonomía es la clasificación y/o agrupación de los suelos, de manera jerárquica (Orden Suborden, Grupo, Subgrupo, familia, y serie) a partir de sus propiedades químicas, físicas y

morfológicas. A la fecha internacionalmente se utiliza la clasificación empleada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en la cual se manejan 12 Ordenes de suelos (Andisol, Alfisol, Inceptisol, Aridisol, Entisol, Gelisol; Histosol, Mollisol, Oxisol, Spodosol, Ultisol y Vertisol), estos se agrupan de acuerdo a las características y distribuciones de los horizontes del suelo (Epipedón y Endopedón).

- **Interés**

Se presentan 5 tipos de suelos pertenecientes a 2 órdenes taxonómicas, 1 agrupado en el Inceptisol y el resto en los Mollisoles, el primero es un suelo joven en el cual no se han definido los horizontes, mientras, el segundo es un suelo mineral, rico en materia orgánica, desarrollado principalmente en zonas templadas. Dependiendo del Suborden en el cual se clasifiquen, su nivel de humedad y temperatura, pueden indicar que tan susceptibles es (USDA y NRCS, 2014), es decir si pierde su grado de estabilidad.

Propiedades de Cada Suelo del Municipio a Partir de la (USDA, 2015)

- **VERTIC HUMUSTEPTS**

Suelos con un epiupedon Molico o umbrico, lo materiales parentales en su mayoría son de origen aluvial, coluvial, residuos o marinos, comúnmente estos suelos tienen un horizonte marrón del subsuelo, en algunos su límite es el lecho rocoso. (USDA, 2015.p 270)

- **VERTIC ARGJUSTOLLS**

Vertic Argiustolls: IGEJ. Otros Argiustolls que tienen, a través de uno o más horizontes con un espesor total de 18 cm o más dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral, una fracción de tierra-fina con una densidad aparente de 1.0 g/cm<sup>3</sup> o menos, medida a una retención de agua de 33 kPa, y porcentajes de Al más ½ Fe (por oxalato de amonio) de más de 1.0.

- **VERTIC HAPLUSTOLLS**

Vertic Haplustolls IGGK. Otros Haplustolls que tienen ambas de las siguientes características: 1. Cuando no están bajo riego ni en barbecho para almacenar humedad, una de las siguientes características: a. Un régimen de temperatura frígido y una sección de control de humedad que en años normales está seca en todas partes por cuatrodécimos o más de los días acumulativos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 5 o C; o b. Un régimen de temperatura del suelo méxico o térmico y una sección de control de humedad que en años normales está seca en alguna o en todas partes por seis-décimos o más de los días acumulativos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 5 o C; o c. Un régimen de temperatura del suelo hipertérmico, isoméxico, o un iso más caliente y una sección de control de humedad que en años normales permanece húmeda en alguna o en todas partes por menos de 90 días consecutivos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 8 o C; y 2. Una CIC aparente (por NH<sub>4</sub>OAc 1N a pH 7) de menos de 24 cmol (+) por kg de arcilla en 50 por ciento o más del volumen del suelo, entre una profundidad de 25 cm a partir de la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, si está menos profundo. (Si la relación de [porcentaje de agua retenida a una tención de 1500 kPa menos el porcentaje de carbono orgánico] al porcentaje de arcilla medida es de 0.6 o más, entonces el porcentaje de arcilla se considerará igual al porcentaje de arcilla medida o a tres veces el [Porcentaje

de agua retenida a una tensión de 1500 kPa menos porcentaje de carbono orgánico] pero no mayor de 100).

- TYPIC HAPLUSTOLLS

Haplustolls Clave para Subgrupos IGGA. Haplustolls que tienen un horizonte sálico dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral.

“Typic Haplustolls: la mayoría de estos suelos tienen horizonte cámbico (desarrollo mínimo del suelo) en el subsuelo debajo del epipedón mólico y un horizonte en el cual se han acumulado carbonatos o sales solubles. Algunos que se formaron en sedimentos no calizos no tienen un horizonte de acumulación de carbonatos. Los Haplustolls se formaron principalmente en depósitos del Pleistoceno tardío o del Holoceno o en superficies de edad comparable. Su vegetación ha sido predominantemente gramíneas y maleza (...). Donde hay pendientes adecuadas, la mayoría de los suelos se utilizan para cultivos de comida y granos (USDA, 2015). Estos suelos son aptos para la agricultura según sus propiedades, pero por su baja permeabilidad son propensos a la generación de movimientos en masa.

- TYPIC ARGIUSTOLLS

IGEA. Argiustolls que tienen ambas de las siguientes características:

1. Un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral; y  
2. Cuando no están bajo riego ni en barbecho para almacenar humedad, tienen una de las siguientes características:

a. Un régimen de temperatura frígido y una sección de control de humedad que en años normales está seca en todas partes por cuatrodécimos o más de los días acumulativos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 5 o C; o

b. Un régimen de temperatura del suelo méxico o térmico y una sección de control de humedad que en años normales está seca en alguna o en todas partes por seis-décimos o más de los días acumulativos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 5 o C; o

c. Un régimen de temperatura del suelo hipertérmico, isoméxico, o un iso más caliente y una sección de control de humedad que en años normales:

(1) Está húmeda en alguna o en todas partes por menos de 90 días consecutivos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 8 o C; y

(2) Está seca en alguna o en todas partes por seis-décimos o más de los días acumulativos por año cuando la temperatura del suelo, a una profundidad de 50 cm abajo de la superficie del suelo, es mayor de 5 o C.

El interés de la taxonomía del suelo radica en que se da una categoría a las clasificaciones, de la siguiente manera: orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie, estos son las categorías usadas como criterios de diferenciación, las propiedades incluyen distribución de tamaños de la

partículas y mineralogía abajo de la capa labrada, régimen de temperatura y espesor de la zona de raíces.

#### 4.9 EROSIÓN

La erosión del suelo es desprendimiento, transporte y depositación del material superficial por acción del agua, el viento, el hielo o el hombre.

- **Interés**

Es importante porque permite establecer la estabilidad del suelo, pues los agentes erosivos poco a poco transportan las partículas, provocando la pérdida del suelo, en terrenos que presenta niveles de erosión severos los suelos se degradan con mayor facilidad, como menciona Lal (2001).

“La erosión del suelo exagera la degradación del mismo, y viceversa. En algunos casos, la disminución de la calidad del suelo, especialmente el debilitamiento de las unidades estructurales, precede a la erosión. En otros, la erosión puede llevar a una disminución en la calidad del suelo y establecer la tendencia degradativa. De hecho, la erosión puede ser una manifestación de la degradación del suelo porque implica la eliminación física del suelo en una dirección vertical y / u horizontal y degrada la calidad del suelo. Es un proceso natural que ha dado forma al paisaje y llevado a la formación de suelos aluviales y loess fértiles. Sin embargo, la aceleración del proceso a través de perturbaciones antropogénicas puede tener graves impactos en el suelo y la calidad ambiental”.

#### 4.10 COBERTURA DE LA TIERRA

Representa la vegetación o cobertura vegetal del área de estudio, y el uso actual del suelo. Esta variable es de tipo cualitativo y se deriva del mapa de cobertura del suelo, se obtiene a través de los sistemas de información geográfica mediante una cubierta vectorial de polígonos. La cobertura de la tierra, influye en la estabilidad de depósitos, suelos y macizos rocosos, núcleos urbanos, explotaciones a cielo abierto.

- **Interés**

El tipo de cobertura y su densidad influyen en la capacidad de infiltración, en la evapotranspiración, entre otras características que presente el suelo y su relación con lo hidrológico. En relación a lo mecánico las raíces de los arboles ejercen una acción de amarre que brinda estabilidad a las laderas.

### 5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE ROLDANILLO

Hay diferentes factores que influyen en la ocurrencia de los movimientos en masa, pero las acciones antrópicas son las que más influyen, este tipo de fenómenos no son algo nuevo, pero se agudizan con la presencia de las precipitaciones y sismos, por lo general los sitios más afectados resultan ser los que poseen una topografía con altas pendientes y modificaciones del terreno, afectando el desarrollo normal de las comunidades.

La ocurrencia de los movimientos en masa en relación con su magnitud, generan cierto atraso para la población, ya que se necesitan abundantes recursos económicos y humanos para la recuperación de las condiciones idóneas, el funcionamiento de las redes, instituciones, etc., recursos con los que

en muchas ocasiones no se cuenta, superando la demanda local y nacional y por ende necesitando el apoyo externo.

Las características de las laderas como: los cortes abruptos e inclinados, los suelos desnudos, altas pendientes, las fuertes precipitaciones, entre otros, modifican la estabilidad de las laderas, produciendo susceptibilidad por movimientos en masa. A continuación, se realiza la ponderación y descripción de las variables tenidas en cuenta para la evaluación y análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa, en el municipio de Roldanillo.

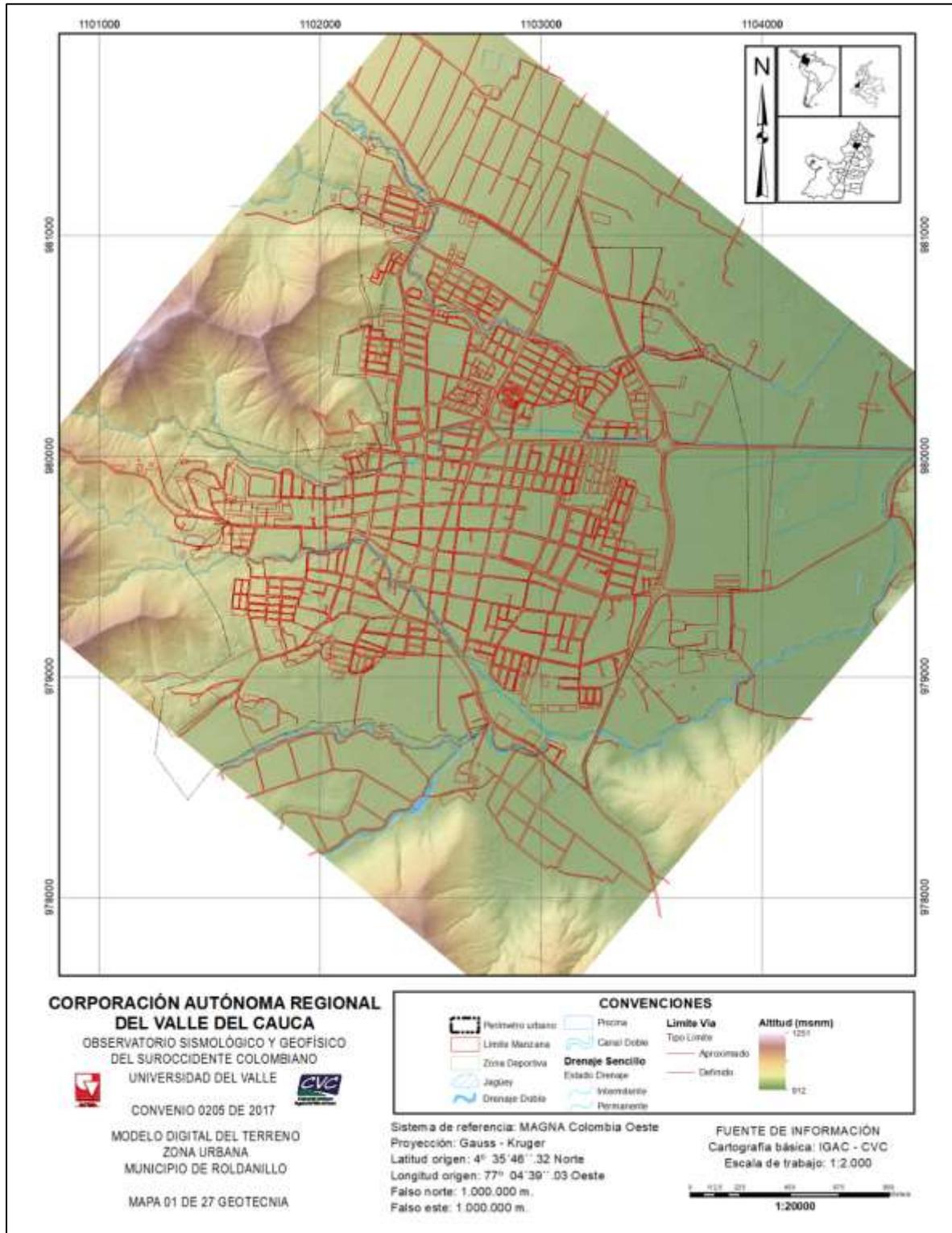
## **5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES**

Para la evaluación de la susceptibilidad y su análisis se toman en cuenta nueve (9) factores críticos que afectan de manera directa el municipio de Roldanillo: pendiente, orientación de las laderas, geomorfología, modelo digital de elevaciones, textura, taxonomía, cobertura de la tierra, unidades geológicas superficiales y erosión, el análisis también se basa en el reconocimientos de campo y la caracterización de los riesgos derivados de terrenos inestables mediante el análisis geomorfológicos, a través del uso de fotografías aéreas, mapas y corroboración en campo.

### **5.1.1 Modelo digital de elevación (DEM)**

El Modelo Digital de Elevación contiene información explícita acerca de la altitud y la distancia DEM de un área específica, al igual que permite calcular diferentes variables. El DEM, se elaboró de con puntos tomados con LIDAR a resolución de 30cm. Esta variable se tomará como base para elaborar diferentes mapas o capas temáticas que posteriormente serán utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa ( Figura 5.1).

En el DEM de la zona de estudio se reconocen desniveles con elevaciones máximas y mínimas de 1.250,86 a 917.257 m.s.n.m., respectivamente. Las mayores elevaciones se observan principalmente hacia el noroccidente del municipio. Las áreas que presentan menor nivel son las correspondientes a geformas de lomeríos con topes aplanados y drenajes espaciados y con poca profundidad.



**Figura 5.1.** Mapa Modelo Digital de Elevación del área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.2 Pendiente

La pendiente se refiere a la inclinación del terreno en un área determinada, expresada en grados. El área de estudio corresponde a zonas planas en la mayor parte de su extensión, un área más pequeña presenta pendientes que van desde ligeramente suaves a poco inclinadas, las cuales hacen parte de la cordillera occidental. En la (Tabla 5.1), se muestran los rangos de las pendientes formulados por Van Zulian 1986. El relieve de una determinada área juega un papel definitivo en la estabilidad de las laderas, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales de masas, en algunos casos aún con pendientes bajas se producen movimientos, de ahí que la cartografía y el análisis de este factor está dentro de las características fundamentales en un estudio que busque evaluar la susceptibilidad.

**Tabla 5.1.** Categorización de la Variable Pendiente

Inclinación (°)	Procesos característicos y condiciones del terreno
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (soliflucción) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente soliflucción periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos
16-35	Abrupto. Procesos denudaciones intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamiento). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Aforamiento rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente “denudación de escarpe”, susceptible a rodamientos de rocas.

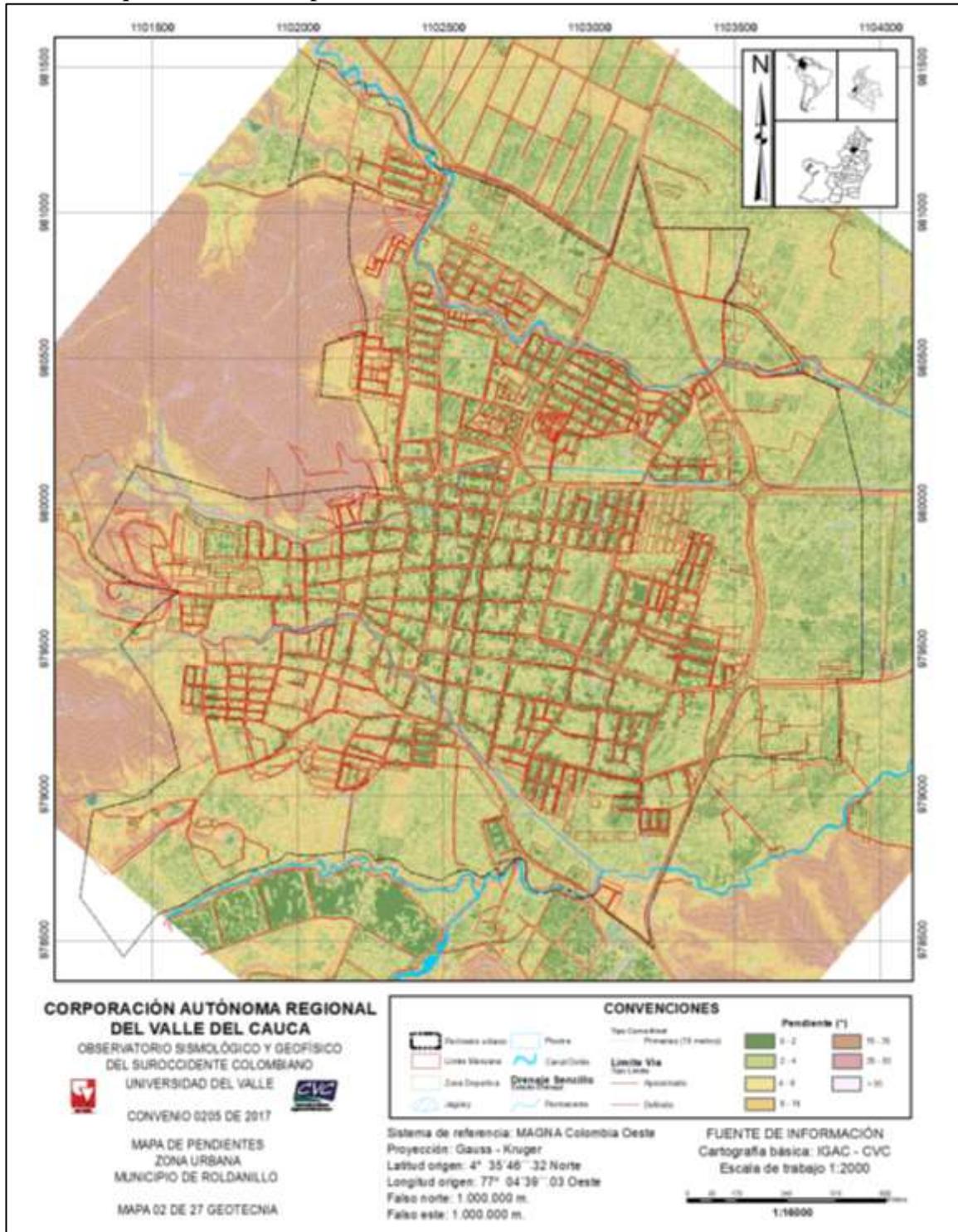
Fuente: Van Zulian 1986.

Las pendientes del terreno son determinantes en la estabilidad que tenga una determinada área, ya que en pendientes más suaves será menos probable que el terreno se deslice, mientras que en pendientes mayores la probabilidad de que se presenten procesos de movimientos en masa es más alta, sin embargo, cabe aclarar que el hecho de que la pendiente sea suave no lo exime de sufrir dichos procesos. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el mapa de pendientes es un elemento imprescindible para la evaluación.

El mapa de pendientes de la zona fue construido a partir de los valores de altura obtenidos en el DEM. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y de donde se obtienen las alturas y las distancias, resultando una capa raster, expresada en grados.

Las pendientes del área de estudio oscilan entre  $0^\circ \geq 60^\circ$ , encontrándose que el rango más representativo es el comprendido entre los  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , tal como puede observarse en el mapa de pendientes (Figura 5.2), la mayor parte del área de estudio no tendría alta propensión a sufrir

movimientos en masa, dado que entre mayor sea el gradiente que presente una ladera mayor será la posibilidad de que ocurran este tipo de eventos.



**Figura 5.2.** Mapa de pendiente del área urbana del municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.3 Orientación de las laderas

“Definida como la orientación de la ladera en un punto y que representa la dirección de máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de un punto dado” (Santacana, 2001). Esta variable posee valores que van de 1° a 360° y valores de -1 que indican zonas planas (Tabla 5.2).

Según el ángulo de orientación de las laderas, se da el ángulo de incidencia de los rayos del sol, es decir en horas del mediodía los rayos del sol pueden tener una inclinación de aproximadamente 55°, lo que indica que la ladera recibe una radiación vertical, mientras que en el periodo de la umbría el ángulo de la pendiente es equivalente a 20°, siendo de esta manera más débil y escasa la cantidad de energía por unidad de superficie recibida, ya que la reflexión tiende a aumentar cuando el ángulo de incidencia disminuye.

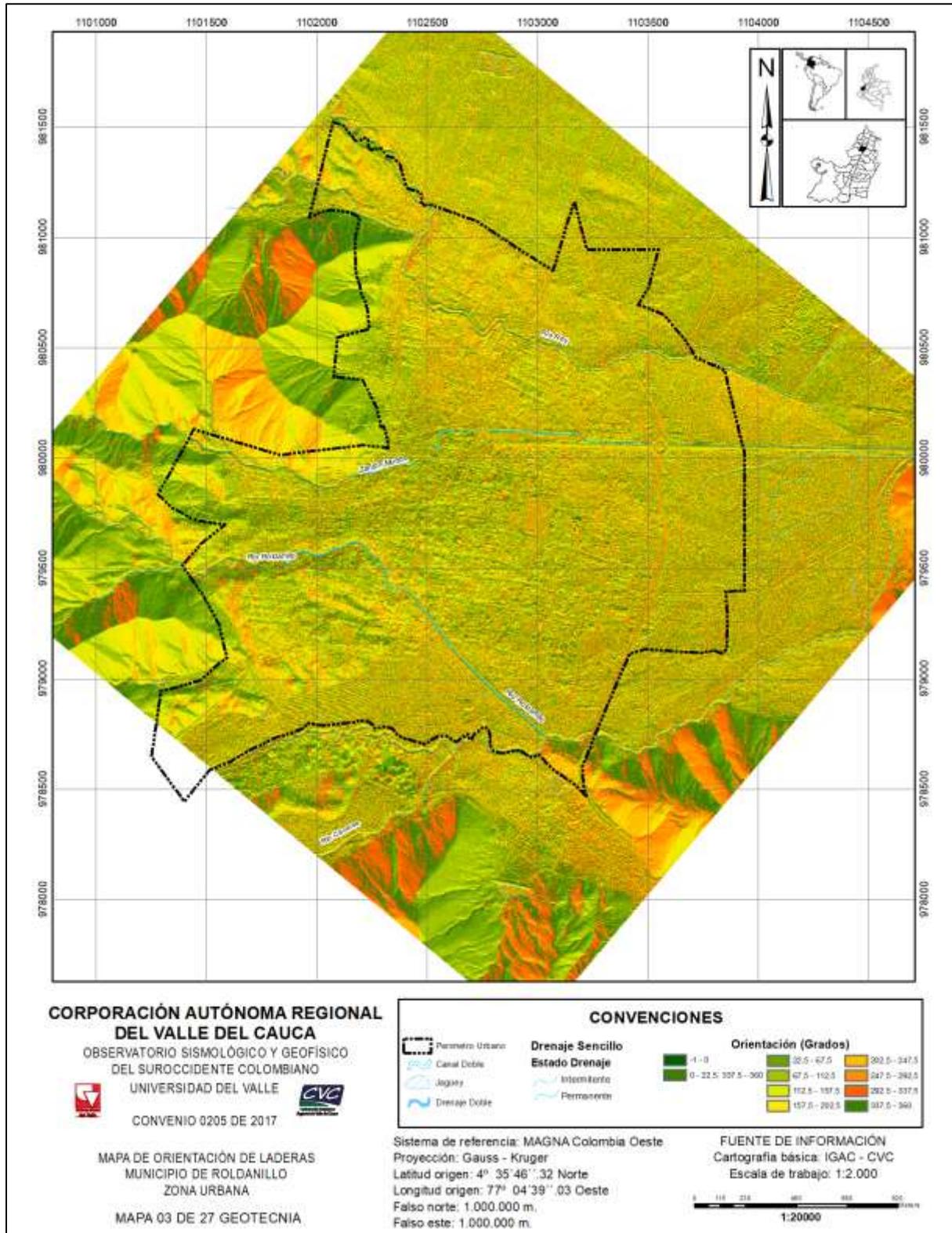
**Tabla 5.2.** Categorización de la Variable Orientación de las laderas

Clase	Grado	Dirección de ladera
0	-1	plano
1	0 – 22,5	Norte
2	22,5 – 67,5	Noreste
3	67,5 – 112,5	Este
4	112,5 – 157,5	Sureste
5	155,5 – 202,5	Sur
6	202,5 – 247,5	Suroccidente
7	247,5 – 292,5	Occidente
8	292,5 – 337,5	Noroccidente
1	337,5 - 360	Norte

**Fuente:** ArcGIS

El mapa que representa la orientación de las laderas (Figura 5.3), ha sido generado a partir de los datos contenidos en el Modelo Digital de Elevación (DEM), mediante la utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG), el programa realiza los cálculos, permitiendo conocer la ubicación de las superficies. Los procesos de movimientos en masa son producidos por la inestabilidad del terreno que ocasiona el agua y el fracturamiento de la roca. El mapa se calculó utilizando los datos de elevación, definiendo la dirección mediante una capa raster, expresado en grados, en base a los puntos cardinales, presentando tendencias de orientación SE y N – S NE - SW, SE – S, NW.

Las áreas propensas a deslizarse corresponden a las ubicadas en las laderas a las que llega menor cantidad de luz solar, por lo que la humedad es mayor. Igualmente, esto va relacionado con la radiación solar, la temporada de lluvias y la vegetación.



**Figura 5.3.** Mapa orientación de las laderas del área urbana del municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia

#### 5.1.4 Geomorfología

La actual dinámica global en referencia al cambio climático y la exposición cada vez mayor de la población, hacen necesario generar conocimiento sobre la dinámica del paisaje físico. Un estudio geomorfológico puede convertirse en una herramienta muy útil en la zonificación de la amenaza por fenómenos de movimientos en masa e inundaciones.

El estudio se hizo siguiendo 4 fases: fotointerpretación, control de campo, definición de elementos geomorfológicos y elaboración de mapas

Se definió que el área urbana de Roldanillo corresponde en un bajo porcentaje a un relieve de montañas con pendientes muy empinadas y de laderas largas, por otro lado, predomina un relieve de Piedemonte con pendientes que varían de suaves a muy suaves y finalmente una zona plana o de transición.

Regionalmente el municipio de Roldanillo se ubica sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental, conformado al occidente por un relieve irregular, montañoso, de origen estructural; dominado principalmente por altas pendientes. Por otro lado, se encuentran los depósitos del periodo Cuaternario donde el relieve irregular y montañosos fue cubierto por espesos depósitos de ceniza del complejo Ruiz-Tolima y Cerro Machín; que modificaron el paisaje, suavizando las crestas y generando nuevas geoformas de origen denudativo y agradacional, con depositación lenta o súbita, por la acción libre o conjunta de los agentes de transporte y la gravedad. En la parte baja del municipio donde dominan los abanicos aluviales depositados por los ríos y zanjones que conforman el área urbana, generando procesos de erosión y depositación fluvial, dieron origen a geoformas que ocupan las zonas aledañas a los mismos y sobre los que se construyó el municipio, estos datan del período Cuaternario.

Para la clasificación geomorfológica se tuvo en cuenta las características genéticas, el tipo de paisaje y relieve, la expresión morfológica, la posición topográfica, el grado de disección, el patrón de drenaje, el patrón textural y la densidad de fracturamiento. Para la descripción y clasificación de las unidades geomorfológicas en el municipio de Roldanillo, se utilizó la categorización geomorfogenética del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2012). También se tuvo en cuenta las unidades geológicas cartografiadas a la escala del proyecto, 1:2.000.

En el análisis geomorfológico se usaron los datos de teledetección y la cartografía regional o local disponibles. La caracterización geomorfológica comprendió el levantamiento de datos estratigráficos y datos que inciden en el comportamiento mecánico de los materiales, caracterización sobre litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos semejantes, así como la descripción de secuencias estratigráficas en afloramientos y definición de puntos de muestreo (Figura 5.4).

Por otra parte, la actividad antrópica, especialmente por la urbanización espontánea, modificó en algunos sectores la morfología del paisaje natural, generando nuevas formas y nuevos procesos que modifican el terreno (jarillones y rellenos), que tratan de evitar inundaciones en las áreas urbanizadas aledañas a los ríos y zanjones que se convierten en amenazas para sus habitantes. Esto se puede observar en las inmediaciones de algunos sectores de los ríos Rey, Roldanillo y en menor proporción el río Cáceres.

Tres tipos de morfología en el área urbana de Roldanillo:

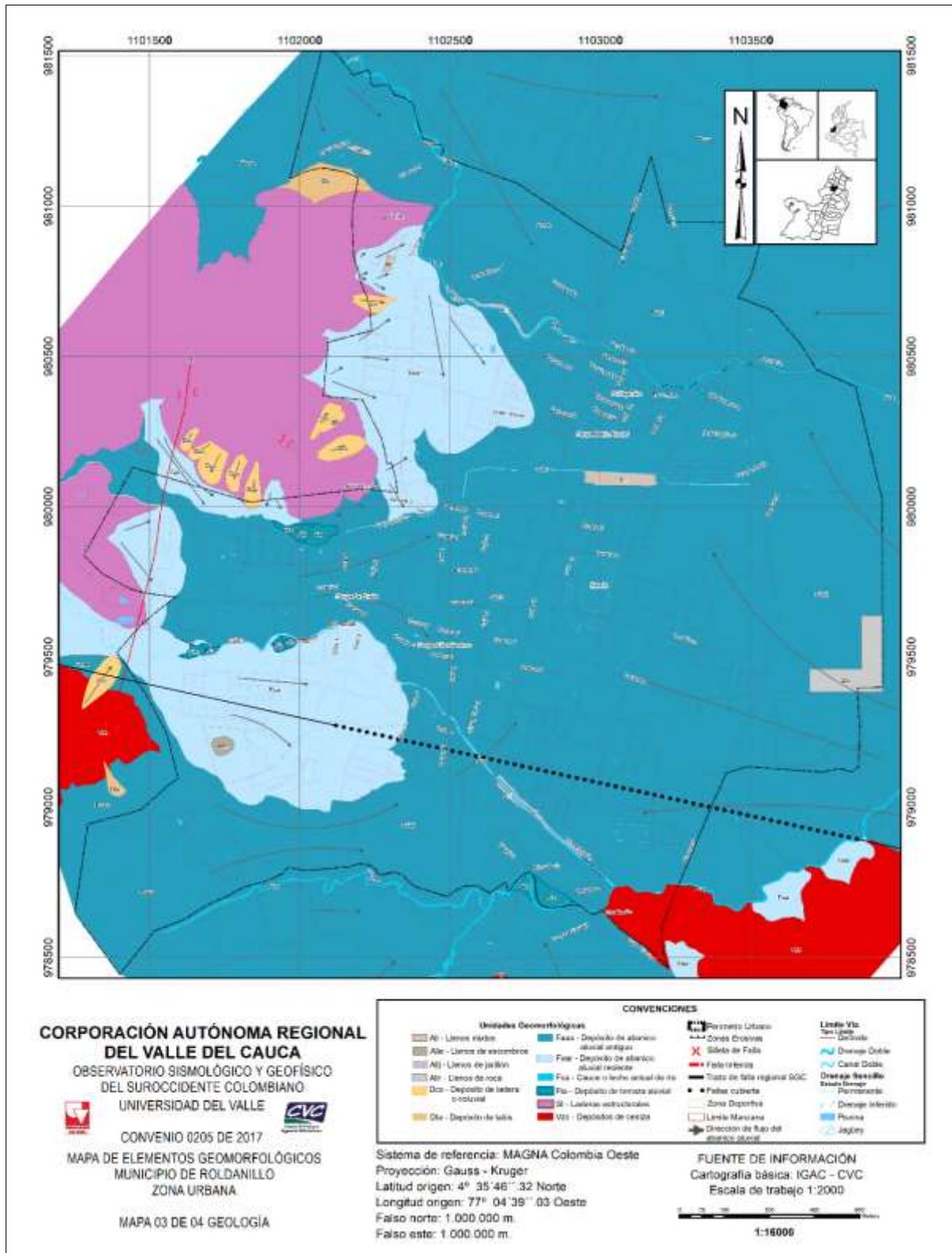
- Sectores montañosos conformados principalmente por rocas del Cretácico, Formación Volcánica (Kv); cubiertos por cenizas volcánicas que han suavizado las crestas, pero aún con predominio de pendientes altas, localizadas en el 5% del casco urbano del municipio.
- Zonas de abanicos aluviales, terrazas y depósitos aluviales, donde se tienen básicamente depósitos Cuaternarios de origen fluvial, asociados con la actividad de los ríos y zanjones del municipio; estas geoformas representan en 90% del casco urbano.
- Zonas asociadas a actividad antrópica, sobre los anteriores paisajes, que han generado geoformas recientes, especialmente relacionadas con rellenos realizados con fines de urbanización, protección para inundaciones y escombreras.

El fenómeno de movimientos de remoción en masa no se evidenció en la zona urbana del municipio de Roldanillo, se observan algunas zonas erosivas principalmente ocasionadas por la actividad fluvial en las laderas de los ríos y zanjones.

En los barrios con influencia de relieve de montaña como el barrio la Nueva Ermita y La Ceiba, se tiene una alta tasa de meteorización y fracturamiento, sin embargo, no ocasionan deslizamientos hasta el momento.

En el caso particular del barrio la Nueva Ermita se encontró que las viviendas están edificadas sobre rocas basálticas de la Formación Volcánica (Kv) que presentan alto grado de diaclasamiento. Este fracturamiento facilita la circulación de agua hacia las casas, transportando sedimentos finos producto de la meteorización.

La cartografía correspondiente a la geomorfología se elaboró con información basada en exploración en campo, para mayor detalle consultar el *“Informe Técnico de Geología y Geomorfología para la zonificación de amenazas por inundación y movimientos en masa de la zona urbana del Municipio de Roldanillo”*.



**Figura 5.4.** Mapa geomorfológico del área urbana del municipio de Roldanillo.  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.5 Unidades geológicas superficiales

Las Unidades Geológicas Superficiales se consideran como el conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros, e incluyen rocas con diferentes grados de meteorización y fracturamiento, así como suelos y depósitos inconsolidados (Ibañez et al., 2012).

En los límites urbanos de Roldanillo se definieron las unidades geológicas superficiales, identificándolas inicialmente de acuerdo a su origen: Rocas (R) o Suelos (S), y posteriormente por sus características litoestratigráficas (composición y estructura) y relieve. Las unidades geológicas superficiales corresponden a Roca dura (Rd) y suelos que se diferenciaron entre transportados (St) y antrópicos (Sa).

En los límites urbanos de Roldanillo se definieron las unidades geológicas superficiales, identificándolas inicialmente de acuerdo a su origen: Rocas (R) o Suelos (S), y posteriormente por sus características litoestratigráficas (composición y estructura) y relieve. Las unidades geológicas superficiales corresponden a Roca dura (Rd) y suelos que se diferenciaron entre transportados (St) y antrópicos (Sa), Unidad de Roca Dura (Rd) y Unidad de Suelo Transportado (St) (**Tabla 5.3**).

**Tabla 5.3.** Unidades geológicas superficiales

UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL	SIGNIFICADO
Sa	Suelo antrópicos
Star	Suelo transportado aluvial reciente
Stco	Suelo transportado coluvial
Star	Suelo transportado aluvial reciente
Stct	Suelo transportado de cono de talus
Rd	Roca dura

**Fuente:** Elaboración propia

La geología es uno de los factores más importantes en una evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa, este factor es uno de los condicionantes principales en la aparición del ya mencionado fenómeno. El mapa realizado en este estudio (

Figura 5.5), presenta diferentes unidades geológicas donde se identifican suelos transportados por diferentes agentes y áreas de roca dura. Predominan suelos aluviales, los cuales cubren aproximadamente el 90 por ciento del territorio. La parte restante se divide entre la roca dura y suelo coluvial, ubicados al occidente del municipio, es decir, las áreas de ladera, suelo de cono de talus, suelo transportado de ceniza, suelo antrópico (Relleno de escombros y Jarillón) y, por último, suelos aluviales de terraza, localizados al borde de los cauces del río Roldanillo y zanjón de rojas.



### 5.1.6 Geología

Para la definición de la geología del área urbana del municipio se hizo el reconocimiento o recorrido de campo donde se realizaron puntos de chequeo y observación de las características geológicas, geomorfológicas y estructurales del área; estas estaciones fueron graficadas en un mapa de estaciones de campo (ver Figura 5.6) y fue una de las herramientas para la elaboración de los mapas objeto de este estudio.

Está conformada de base a techo por rocas basálticas de la Formación Volcánica (*Kv*), suprayacidas por un sistema de depósitos de abanicos aluviales provenientes del piedemonte de la Cordillera Occidental, que se han ido remontando durante el período Cuaternario y que fueron conducidos por los diferentes drenajes ubicados en el área urbana y rural. Pueden alcanzar los 6m de espesor visible. También se encontraron secuencias de depósitos aluviales de 3 a 6m de espesor asociadas a los ríos Rey, Roldanillo, Cáceres y al zanjón de Ipira; mientras que al Sur-Este sobre la vía Panorama se observan afloramientos de gabro hornbléndico del Complejo Ultramáfico de Bolívar (*Ku*).

La Geología en los límites urbanos del municipio está conformada de base a techo por rocas basálticas de la Formación Volcánica (*Kv*), suprayacidas por un sistema de depósitos de abanicos aluviales provenientes del piedemonte de la Cordillera Occidental, que se han ido remontando durante el período Cuaternario y que fueron conducidos por los diferentes drenajes ubicados en el área urbana y rural. Pueden alcanzar los 6m de espesor visible; también se encontraron secuencias de depósitos aluviales de 3 a 6m de espesor en los ríos Rey, Roldanillo, Cáceres y zanjón de Ipira; mientras que al Sur-Este sobre la vía Panorama se observan afloramientos de gabro hornbléndico del Complejo Ultramáfico de Bolívar (*Ku*).

Formación volcánica (*Kv*): esta formación está conformada en el área urbana rocas basálticas de color gris verdoso, con alto grado de meteorización (en algunos sectores presenta meteorización esferoidal) y diaclasamiento. Aflora en la zona montañosa del área urbana (alrededores del Sector del Guachal, Barrio La Ceiba, Las Colinas y La Nueva Ermita. En el camino que conduce del Guachal a la Planta de potabilización de agua del acueducto comunitario el Rey aflora un basalto que presenta vacuolas de cuarzo.

En el sector de la antigua ladrillera, entre el barrio La Ceiba y Las Colinas; se encuentra contacto entre basamento basáltico diaclasado y con alto grado de meteorización esferoidal, suprayacido por dos depósitos coluviales de material tobáceo de color blanco.

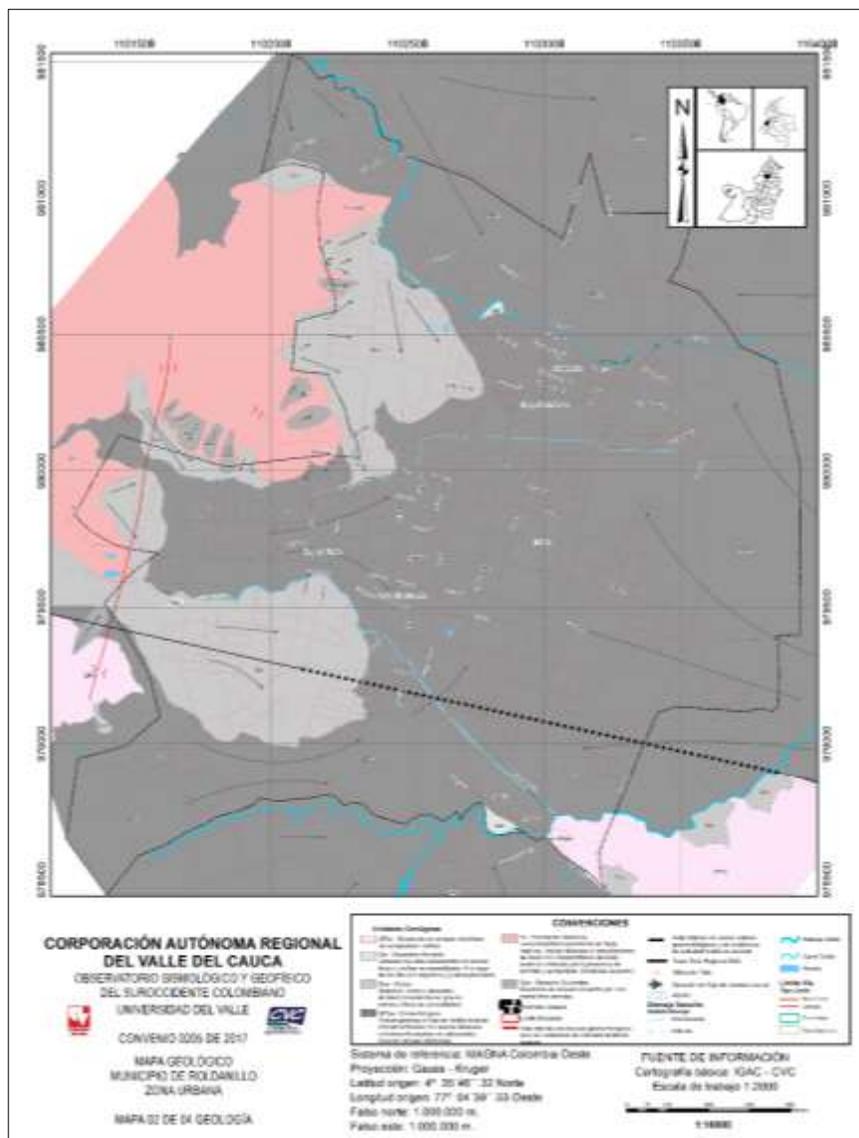
El único afloramiento de la Formación Volcánica (*Kv*) expuesto por erosión del río fue encontrado en el lecho del río Rey, cuyo espesor visible fue de 1.5m de basalto que presenta meteorización esferoidal y diaclasamiento; se encuentra suprayacido por un depósito aluvial de aproximadamente 3.0m de espesor

En el sector del barrio La Nueva Ermita se encuentra afloramiento de aproximadamente 15m de altura, donde afloran rocas basálticas altamente diaclasadas y meteorizadas, suprayacido por un coluvión de 1m de espesor.

- **Geología estructural**

En cuanto a la geológica estructural se tiene que, dentro del área de estudio, se pueden diferenciar pocos rasgos en superficie que permiten identificar fallas geológicas. Se observaron algunas silletas de falla que no son contundentes para definir con certeza los trazos de las mismas. Se representaron los siguientes rasgos estructurales:

Falla inferida con indicios geomorfológicos, pero sin evidencias de actividad tectónica reciente que corresponden a trazos marcados por la presencia de silletas de falla, colinas y cauces deflectados identificados en campo y fotografías aéreas. Sin embargo, no se encontraron evidencias geomorfológicas tales como escarpes o plano de falla para verificar su desplazamiento. Al Oeste del perímetro urbano se encuentra una de estas fallas. Tiene una dirección NE-SW.



**Figura 5.6.** Mapa Geología del área urbana del municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.7 Textura del suelo

Conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo (ya sea desde un punto de vista de su composición). Para clasificar a los constituyentes del suelo según el tamaño de partículas se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. De todas estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional son las más utilizadas en este tipo de estudios.

Las fracciones usuales son:

- Gravas > 2 mm
- Arenas 2-0,02 mm; con 2-0,2 mm para las arenas gruesas y 0,2-0,02 mm para las arenas finas (a veces de 0,2-0,05)
- Limos 0,02 - 0,002 mm, es decir de 20-2 micras (y a veces 0,05 - 0,002)
- Arcillas <2 micras; con las arcillas gruesas de 2-0,2 micras y las arcillas finas menores de 0,2 micras

Adicional a la clasificación anterior la Tabla 5.4, enseña las clases de texturas clasificadas por la USDA y el porcentaje de cada componente. La Figura 5.7, muestra que hacia el costado occidental del área urbana se presentan texturas moderadamente finas, las cuales bordean el límite del municipio, las texturas finas se localizan al noroccidente, occidente, suroccidente y suroriente

**Tabla 5.4.** Clases texturales del suelo

Textura general	Porcentaje			Clase de textura
	Arena	Limo	Arcilla	
Textura gruesa (Suelos Arenosos)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Textura moderadamente gruesa (Suelos Francos)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
	23-52	28-50	7-27	Franco arenoso
Textura media (Suelos Francos)	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Textura moderadamente fina (Suelos Francos)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco areno arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Textura fina (Suelos Arcillosos)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

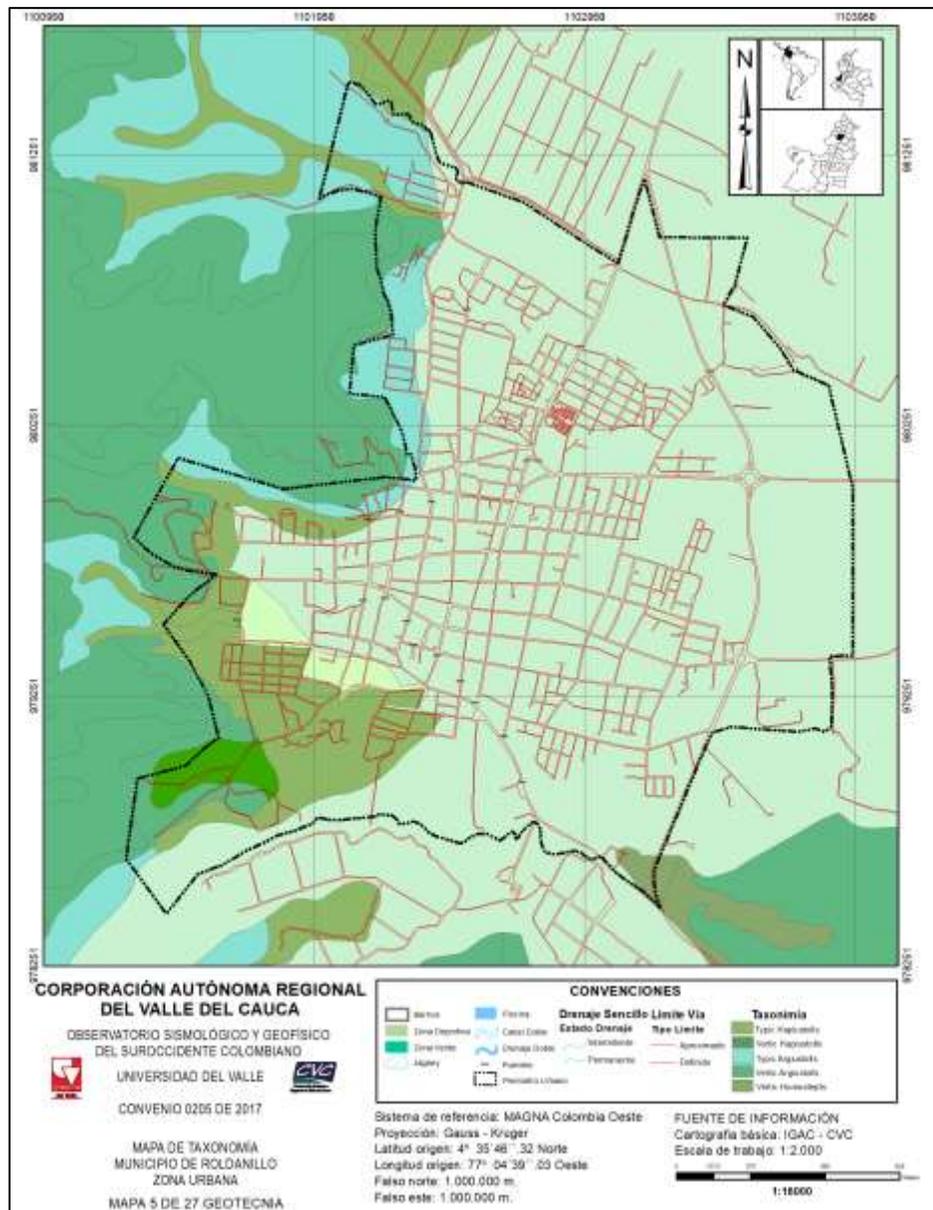
Fuente: adaptado de la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos- USDA s.f (por sus siglas en inglés, United States Department of Agriculture)

[http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#54a](http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#54a)



### 5.1.8 Taxonomía del suelo

El mapa de taxonomía del suelo (**Figura 5.8**), muestra que aproximadamente un 90% del área total de la zona urbana del municipio de Roldanillo se encuentra abarcada por el componente Typic Haplustolls, el cual cubre las zonas norte, oriente, sur y centro. Seguido por el Vertic Haplustolls, el cual bordea el límite urbano con el lado noroccidente, occidente y suroccidente. Por último, el Typic Argiustolls se localiza al costado noroccidente en pequeñas franjas alargadas.



**Figura 5.8.** Mapa taxonomía del suelo del área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.9 Erosión

Desde la perspectiva geológica y de formación del paisaje, la erosión es entendida como parte del proceso de morfogénesis a través del cual se alteran y moldean las formas terrestres. Desde este punto de vista, la configuración que hoy se tiene de la superficie de la tierra, se debe a los procesos continuos de agradación y degradación que en tiempo geológico han moldeado la superficie. Estos procesos geomorfológicos están relacionados con factores internos (litología, estructura, tectónica, volcanismo y topografía) y externos (clima: temperatura y precipitación; organismos; y acción antrópica).

En general, existen dos tipos de erosión: la hídrica y la eólica. La erosión hídrica es causada por la acción del agua (lluvia, ríos y mares), en las zonas de ladera, cuando el suelo está sin cobertura vegetal, las gotas de lluvia o el riego, ayudadas por la fuerza gravitacional, arrastran las partículas formando zanjas o cárcavas, e incluso causando movimientos en masa en los cuales se desplaza un gran volumen de suelo. Por otra parte, la erosión eólica es causada por el viento que levanta y transporta las partículas del suelo, produciendo acumulaciones (dunas o médanos) y torbellinos de polvo. En este sentido, no solamente se erosionan los suelos, con ellos se pierden los nutrientes, la materia orgánica, la retención de humedad, la profundidad de los suelos, se disminuye la productividad, lo cual conllevan a la pobreza y el desarraigo de la tierra (SIAC (Sistema de Información Ambiental en Colombia), s.f)

En la Tabla 5.5 se presenta algunos tipos de erosión hídrica, su acción y los efectos que puede llegar a causar. Por otro lado, en relación con la pérdida de suelo la erosión se clasifica en ligera, moderada y severa, según el IGAC cada se definen así:

Erosión ligera: Las pérdidas de suelo apenas son apreciables y de tipo laminar.

Erosión moderada: Las pérdidas de suelo están entre el 25% y el 75% de la capa superficial, es claramente apreciable y se observa erosión en surquillos.

Erosión severa: El suelo superficial ha sido removido prácticamente todo. Presenta cárcavas superficiales y algunas poco profundas

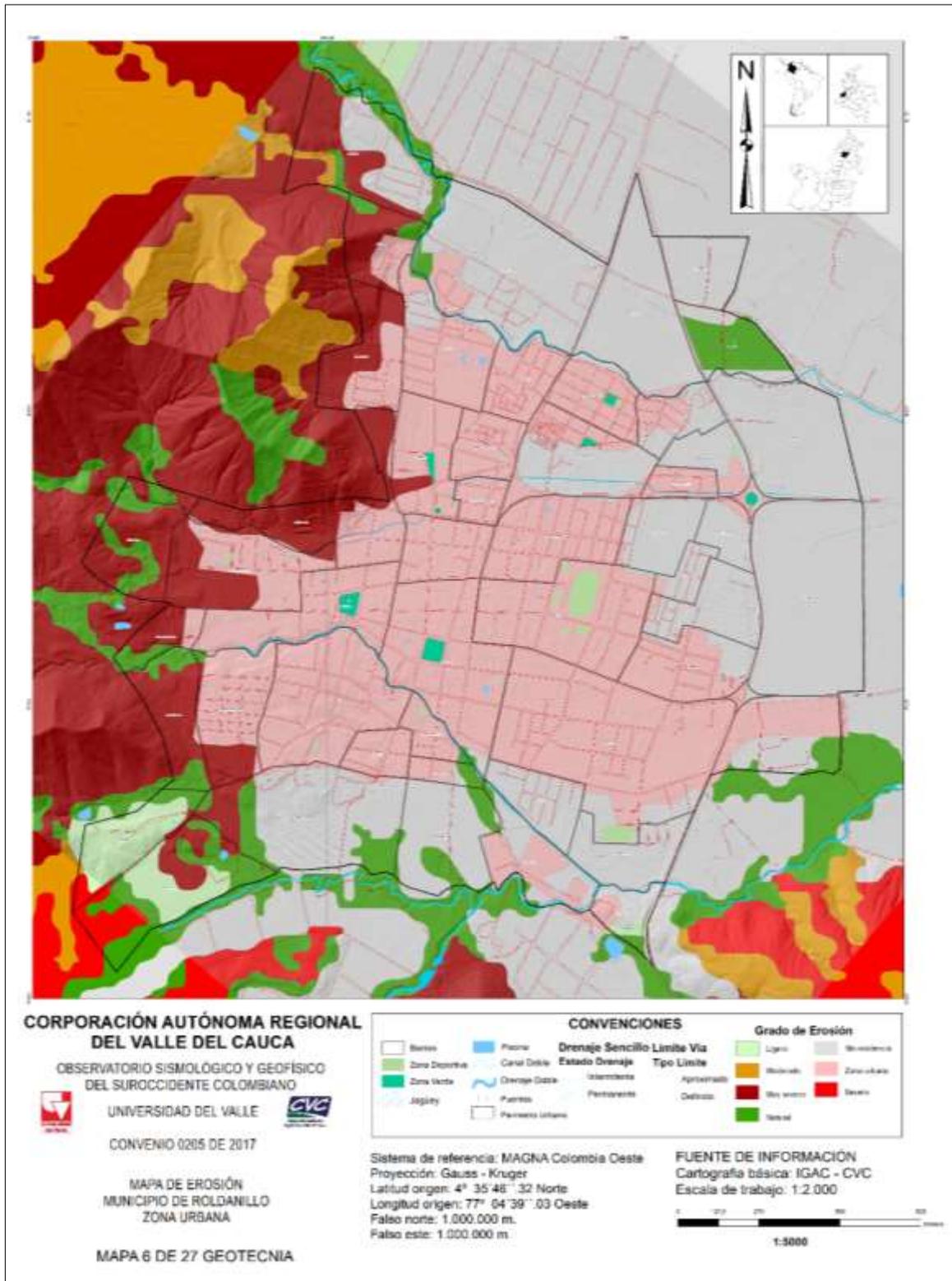
**Tabla 5.5.** Tipos de erosión y efectos

TIPO	ACCIÓN	EFECTOS	
<p><b>Erosión por lluvias:</b> la acción de las aguas lluvias, con la contribución de otros agentes climáticos, sobre la superficie interfluvio.</p> <p>Nota: las crestas del interfluvio son laderas(naturales) y Taludes (construidos)</p>	<p><b>Saltación Pluvial:</b> Desalojo y dispersión por gotas de lluvia</p>	Impacto de la gota de agua	
		Reducción de la capa de infiltración	
		Destrucción de los poros y de las fisuras del suelo	
	<b>Escorrimento superficial difuso</b>		
	<p><b>Erosión laminar:</b> Arrastre uniforme de capas de suelo a muy corta distancia</p>		Escorrimento de suelos limosos y arenosos
			Es fuente importante de sedimentos
	<b>Escorrimento superficial concentrado</b>		
	<p><b>Surcos de erosión:</b> El escorrimento concentrado forma pequeños canales paralelos.</p>		Destrucción de taludes y laderas
			Alto aporte de sedimentos
Los canales se borran con perfilado y labranza			

TIPO	ACCIÓN	EFECTOS
	<b>Cárcavas:</b> Son zanjones profundos y de gran tamaño, por lo tanto son difíciles de controlar.	Acentuar el relieve promoviendo otras formas de inestabilidad Fuente importante de sedimentos Corrección de alto costo
	<b>Escurrimiento subsuperficial</b>	
<b>Erosión interna:</b> Por flujo subterráneo	<b>Tubificación y cavernas:</b> Debilitamiento interno	Puede originar manantiales, cárcavas y hundimiento
<b>Erosión Fluvial</b>	<b>Socavación de fondo</b>	Profundiza el fondo de los cauces naturales
	<b>Socavación lateral</b>	Elimina el soporte de las laderas
	<b>Descarga torrencial</b>	Efectos devastadores en las márgenes del cauce

**Fuente:** Adaptado de Duque, G., & Escobar, C. E. (2002). 1. Mecánica de los suelos I

La Figura 5.9 muestra que en el municipio de Roldanillo la erosión ligera se localiza al suroccidente del área urbana, la moderada se presenta en pequeñas franjas en el noroccidente donde se aproximan al casco urbano, provenientes de grandes zonas erosionadas localizadas fuera del límite del municipio, al igual que aparecen en zonas del suroccidente y suroriente. La erosión severa se presenta principalmente en los bordes del límite urbano en los barrios El Hatillo y Los Samanes y en el suroriente. Por otro lado, la erosión muy severa se encuentra al noroccidente, occidente y suroccidente del municipio, más exactamente en los barrios o sectores; Ciudad Verde, Las Colinas, La Ceiba, El Portal, El Prado, Nueva Ermita y Prados de la Ermita. La erosión natural se presenta en relictos medianos que se encuentran dispersos bordeando la zona urbana, en pequeñas proporciones afecta dentro del límite por el costado noroccidental, suroccidental, sur y suroriental, se presenta un área considerable ubicada en el sur que no registra información.



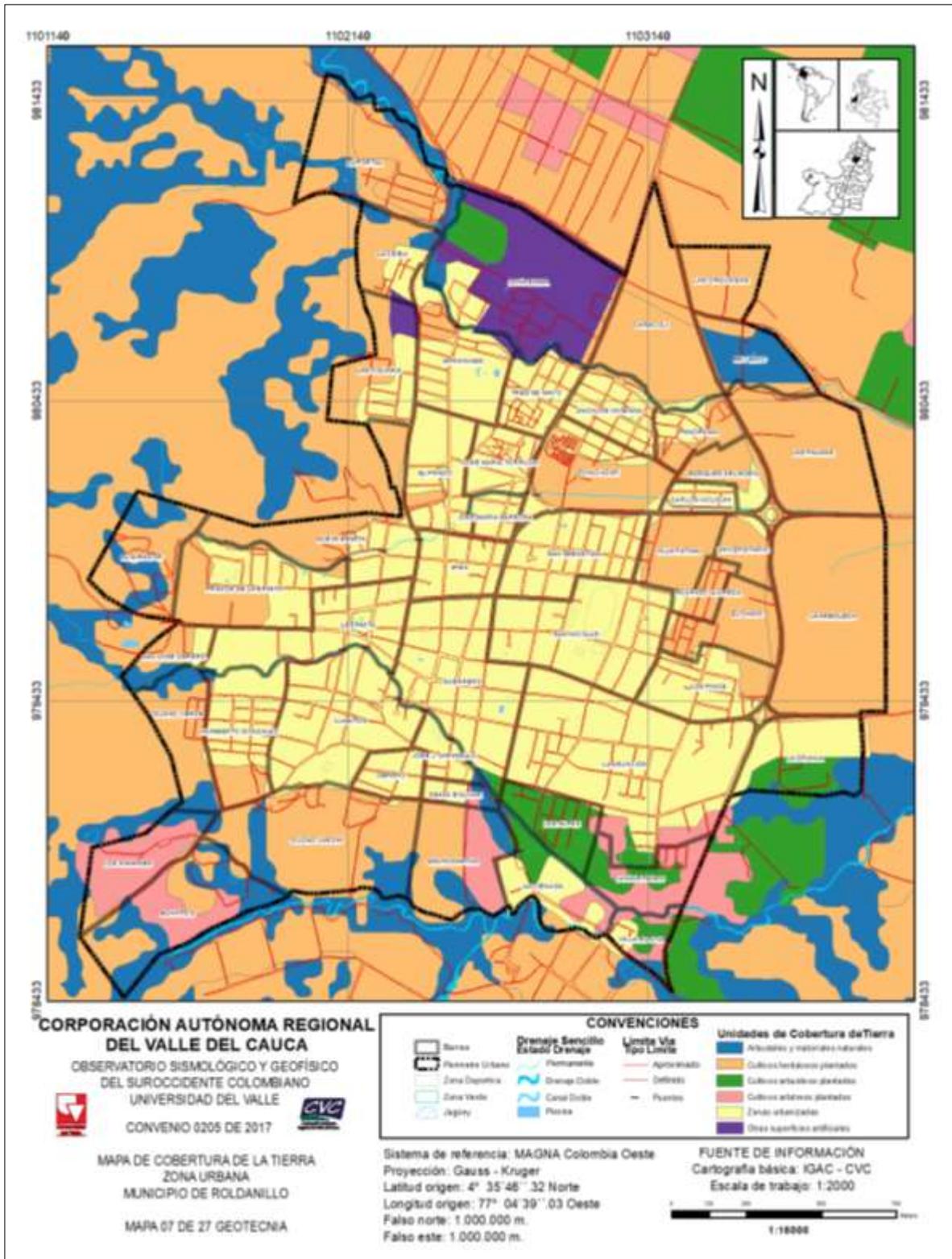
**Figura 5.9.** Mapa de erosión del área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### **5.1.10 Cobertura de la tierra**

Conceptualmente se ha logrado la separación entre cobertura y uso de la tierra, que anteriormente se empleaban indistintamente; el término "Uso" implica la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano. El IDEAM (2018) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

A continuación, se describen los tipos de cobertura del suelo más característicos del municipio de Roldanillo. El mapa de cobertura (Figura 5.10), es el resultado de observaciones en campo y análisis de imágenes aéreas, en este mapa se puede encontrar las siguientes unidades:

Arbustos y matorrales naturales, se localizan de forma dispersa bordeando el límite del área urbana de Roldanillo, los cultivos herbáceos, estos se encuentran en toda el área del municipio, configurándose en pequeños relictos en los bordes internos y externos del límite municipal, los cultivos arbustivos plantados se encuentran al sur, los cultivos arbóreos plantados aparecen en el sur y suroccidente, otras superficies arteriales se localizan al norte y la zona urbana, la cual es la más representativa cubre la mayor parte del área municipal.



**Figura 5.10.** Mapa de coberturas de la tierra del área urbana del municipio Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

## 5.2 PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES (FACTORES)

La susceptibilidad es evaluada bajo condiciones cualitativas y cuantitativas mediante la asignación de porcentajes o pesos a las variables utilizadas para generar las capas temáticas. El valor asignado depende del grado de importancia que cada uno de los factores cobra en la generación de la susceptibilidad. En las siguientes tablas se muestran la ponderación y estandarización de cada indicador (Tabla 5.6 a Tabla 5.15).

La evaluación multicriterio, se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, mediante la descripción, ordenación, jerarquización y selección de alternativas de acuerdo a ciertos postulados, los cuales a su vez dependen de los objetivos planteados (Gómez y Barredo, 2005).

La evaluación multicriterio, es una metodología recomendable para los estudios de susceptibilidad a deslizamientos de tierra debido a que permite al usuario la manipulación de distintas coberturas cartográficas relativas al problema planteado y finalmente la obtención de un resultado satisfactorio en corto tiempo. Así mismo, se encuentra integrada a la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica, permitiendo automatizar muchos de sus métodos. Así, la integración de estos dos elementos (SIG y EMC) facilita llevar a cabo procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los dos componentes del dato geográfico: espacial y temático (Gómez y Barredo, 2005), (Hervas, 2001).

Todas las variables se deben parametrizar en términos de susceptibilidad, como se muestra en la Tabla 5.6. Estas son ponderadas basadas en autores que trabajan los temas relacionados a continuación:

**Pendientes:** las pendientes se clasifican según lo expuesto por Van Zuidam (1986) el cual las clasifica en cuatro rangos, para efectos de este estudio se clasifican en tres rangos debido a que se está evaluando la susceptibilidad baja, media y alta.

**Orientación de las laderas y DEM:** estas variables se clasifican según lo expuesto por Santacana (2001) posteriormente modificado para este estudio.

**Geomorfología, unidades geológicas superficiales, geología, textura, estructura y erosión:** estas variables se clasifican según lo presentado por el Servicio Geológico Colombiano SGC, (2016)

**Coberturas de la tierra:** para la clasificación de los rangos de la cobertura se tiene en cuenta la metodología Corine Land Cover 1990 (2010), se modifica para ajustarlo a los requerimientos de este estudio.

**Tabla 5.6.** Ponderación de la pendiente

VALORACIÓN		PENDIENTE	
		Rangos	
1	Baja	0,00	16,85
2	Media	16,86	37,91
3	Alta	37,92	100

**Fuente:** Van Zuidam (1986) modificado

**Tabla 5.7.** Ponderación orientación de las laderas

VALORACIÓN		ORIENTACIÓN DE LADERAS	
		Rangos	
1	Baja	0,00	112,50
2	Media	112,51	247,50
3	Alta	247,51	360,00

**Fuente:** Santacana (2001) modificado

**Tabla 5.8.** Ponderación Geomorfología

VALORACIÓN		GEOMORFOLOGÍA	
		Rangos	
1	Baja	Laderas estructurales SI, llenos de jarillón (Allj), depósito aluvial y de terraza (Faa) (Fta), lecho actual del río (Fca), Roca Dura (Rd), llenos de roca (Allr), depósitos de abanico aluvial recuente (Faar)	
2	Media	Lleno mixtos (All), Depósito de ceniza (Vzc), , depósito coluvial (Dco)	
3	Alta	Lleno de escombros (Alle), depósitos de talus (Dta)	

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.9.** Ponderación DEM

VALORACIÓN		DEM	
		Rangos (m.s.n.m)	
1	Baja	912	1024
2	Media	1025	1207
3	Alta	1207	1251

**Fuente:** Santacana (2001) modificado

**Tabla 5.10.** Ponderación Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

VALORACIÓN		UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	
		Rangos	
1	Baja	Suelos transportados (agua) Staa y Stat Roca dura (Rd), Suelo transportado aluvial antiguo (star),	
2	Media	Suelos transportados (ceniza) Stc, coluviones (Stco), Suelo transportado coluvial (stct)	
3	Alta	Suelo antrópicos relleno de escombros (Sale) suelo transportado, suelo antrópico (sa), suelo antrópico jarillon (saj), suelo antrópico de roca (sar).	

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.11.** Geología

VALORACIÓN		GEOLOGÍA	
		Rangos	
1	Baja	Formación volcánica (Kv), Depósitos Aluviales (Qal), Depósitos de Conos Antiguos (QPca)	
2	Media	Depósitos de Cenizas Volcánicas (QPcv), Depósito Coluvial (Qco),	
3	Alta	Depósitos de Conos (Qca)	

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.12. Ponderación Textura**

VALORACIÓN		TEXTURA
1	Baja	Textura gruesa
2	Media	Textura moderadamente fina
3	Alta	Textura fina

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.13. Ponderación Taxonomía**

VALORACIÓN		TAXONOMÍA
		Rangos
1	Baja	Vertic humustopts, vertic argiustolls
2	Media	Vertic haplustolls, typic haplustolls, typic argiustolls

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.14. Ponderación erosión**

VALORACIÓN		EROSIÓN
		Rangos
1	Baja	Ligero, sin evidencia, natural
2	Media	Moderado
3	Alta	Severo, muy severo

**Fuente:** SGC, (2016) modificado

**Tabla 5.15. Ponderación Cobertura de la tierra**

VALORACIÓN		COBERTURA DE LA TIERRA
1	Baja	Área Urbana e Industrial
2	Media	Cultivos limpios y semilimpios

**Fuente:** Corine Land Cover (2010) modificado

Para la evaluación de la susceptibilidad en el municipio de Roldanillo, se toma como base principalmente el concepto del análisis de las condiciones locales y regionales del terreno y los diversos procesos presentes, de tal manera que la decisión interdisciplinaria del grupo de trabajo determina el peso y la inferencia de unas variables sobre las otras, mediante la aplicación de una escala de 0 a 100 puntos (Tabla 5.16).

En este cuadro se da un rango de valor a cada grado de susceptibilidad, es decir cero (0), para la susceptibilidad baja o nula, a medida que el rango va aumentando la susceptibilidad será mayor, siendo los rangos comprendido entre 33,1 - 54; 54,1 - 100 los de mayor cuidado. Teniendo en cuenta las características físicas del área de estudio, el grado de incidencia en la generación de la susceptibilidad y los requerimientos técnicos se definieron tres (3) rangos de susceptibilidad.

**Tabla 5.16.** Criterios de los grados de susceptibilidad

GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD		RANGO DE VALOR	CRITERIO
1	Baja	0 – 33	Rango (0 - 33). Hacen parte de este rango las siguientes características: el terreno presenta alturas entre los 912 y 1024 m.s.n.m. con pendientes entre los 0° y 16,85°, se presenta una orientación de las laderas entre los 0 y 112,50, las unidades geológicas están asociadas a suelos transportados por el agua (aluvial) y roca dura, su textura es gruesa, la taxonomía es Vertic humustopts, vertic agiustolls, presenta erosión ligera, sin evidencias o natural, y la cobertura se restringe principalmente a las áreas urbanas e industriales, geomorfología de terrazas aluviales, laderas estructurales, llenos de jarillón y lecho actual del río.
2	Media	33,1 – 54	Rango (33,1 - 54). En este rango se presentan pendientes entre los 16,86 y los 37,91 grados, una altura entre 1025 – 1207 m.s.n.m, la orientación de las laderas es de 112,51 y 247,50, las unidades geológicas de la zona son suelos transportados (por cenizas o agua), la textura es moderadamente fina y su taxonomía se clasifica como, Vertic haplustolls, typic haplustolls, typic agiustolls, se presenta erosión moderada y su cobertura es de cultivos limpios y semilimpios, geomorfología de rellenos mixtos, es decir, mezcla entre materiales resistentes y otros no tanto.
3	Alta	54,1 – 100	Rango (54,1 a 100). Abarca las zonas donde hay presencia de pendientes entre los 37,92 – 84,24 grados, la altura se encuentra entre los 120,7 y los 1251, la orientación de las laderas 247,51 – 360, las unidades geológicas se cataloga como suelos antrópicos y rellenos de escombros, texturas finas, erosión severa a muy severa, áreas cuya geoformas son depósitos coluviales, relleno de escombros y depósitos de talus.

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.2.1 Reclasificación de las capas temáticas

En este apartado se realiza la reclasificación de cada una de las capas temáticas con el fin de asignar los pesos correspondientes a cada una de ellas y obtener los niveles de susceptibilidad por movimientos en masa, dentro de tres rangos: baja, media y alta.

### 5.2.2 Resultados de la reclasificación de las capas temáticas

El desarrollo de los diferentes factores que intervienen en la estimación de la susceptibilidad permite que se analicen e interpreten las diferentes capas temáticas y posteriormente se procesen para obtener el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa.

Para zonificar los procesos de movimientos en masa se realiza una división del área en zonas que sean homogéneas y se ponderan dependiendo del peso que cada una de las variables aporte al grado de susceptibilidad, para este tipo de estudios se utilizan metodologías directas o indirectas. En la metodología directa el mapa se elabora basado en el criterio y análisis de las condiciones locales y regionales del terreno y los diversos procesos presentes, de tal manera que la decisión interdisciplinaria del grupo de trabajo determina el peso y la inferencia de unas variables sobre las otras, donde se muestre la distribución espacial de los parámetros que puedan tener algún tipo de incidencia en la ocurrencia de los fenómenos amenazantes. La forma indirecta se lleva a cabo mediante la estimación de las áreas que no han sufrido movimientos en masa; sin embargo, presentan

condiciones físicas que lo hacen propenso a sufrirlas, tomando como ejemplo lo ocurrido en sectores que tengan las mismas características y que si hayan sufrido movimientos.

Los métodos más utilizados en el cálculo de la susceptibilidad son los estadísticos y los heurísticos. Los métodos estadísticos se basan principalmente en la relación existente entre la distribución de los movimientos y los factores naturales, se superponen las capas temáticas calculando la densidad de deslizamiento de acuerdo a la técnica de análisis que puede ser multivariada o bivariada. En la técnica bivariada el nivel de importancia que tenga cada factor o cruce de estos, se le puede asignar una ponderación y puede ser analizada en forma conjunta o individual. Mientras que el método heurístico se basa en el manejo de conocimientos a priori de las causas posibles que puedan causar la inestabilidad del terreno, los factores son catalogados y clasificados según su participación en la producción del desequilibrio del terreno favoreciendo la aparición del movimiento en masa.

En esta sección se presenta la evaluación de la susceptibilidad mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo la manipulación de la información y dando la oportunidad de realizar procesamientos de datos que permiten el análisis general y espacialización de la información, teniendo en cuenta que para realizar la zonificación de procesos de movimientos en masa, se requiere la unión de varios factores que se interrelacionan entre sí, esta herramienta es de uso primordial.

Como un factor de corroboración y de ampliación de información y veracidad de los resultados se propuso realizar la estimación de la susceptibilidad a través del método estadístico multivariado, Análisis Discriminante. El cual tiene como objetivo identificar las características que diferencian (discriminan) a dos o más grupos y a crear una función capaz de distinguir con la mayor precisión posible a los miembros de uno u otro grupo. Para llegar a conocer en qué se diferencian los grupos se necesita disponer de la información (cuantificada de una serie de variables) en las que supone que se diferencian (IBM SPSS).

Teniendo en cuenta que dentro de los objetivos de los métodos multivariados está describir o caracterizar un grupo de individuos a través de determinadas variables, y para desarrollar esta metodología es necesario que los individuos a analizar sean un número considerado válido con los cuales se pueda hacer deducciones sobre el total de la zona de estudio, es decir, estadísticamente un estudio presenta validez interna cuando la muestra poblacional es igual o mayor a 30 unidades experimentales y en este caso no se encuentran registros suficientes que para su aplicación.

Para desarrollar dicho método multivariado, se sugiere seguir el procedimiento propuesto (Baeza, 1994); (Santacana, 2001) (Cardona, 2013), donde se describe que se debe contar con un inventario de puntos de deslizamientos previos, a los cuales se les extrae una muestra aleatoria y las unidades de análisis serán el doble de unidades de la muestra.

Para el municipio de Roldanillo no es posible plantear el análisis multivariado como método de estimación de la susceptibilidad debido a la carencia de puntos de inestabilidad previos, ocurridos en la zona, dado que en los análisis de historicidad se encontró que para el municipio de Roldanillo no se presentaron eventos de movimientos en masa como puntos de inestabilidad. Por lo tanto, no es posible aplicar un análisis con estas características dado que carece estadísticamente de validez interna.

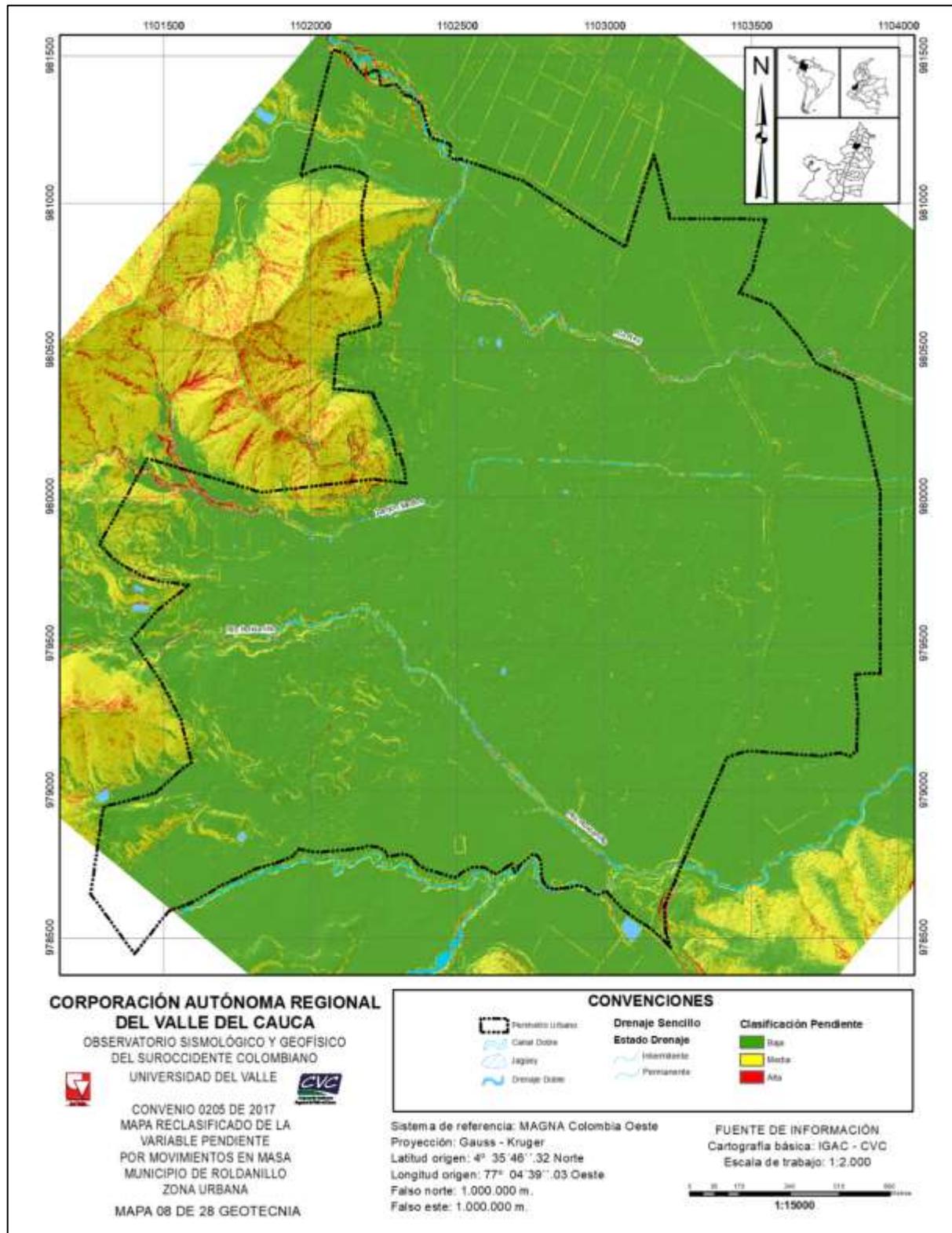
### **5.2.2.1 Pendiente**

El mapa resultante de la reclasificación de la capa pendiente muestra que el área urbana del municipio de Roldanillo en su mayoría es plano, aproximadamente en un 97%. Las pendientes más fuertes se presentan en el lado occidental del límite municipal, las áreas que presentan mayores pendientes son las correspondientes a los barrios La Ceiba, Nueva Ermita, Urbanización el portal, Ciudad Verde, El Mirador, Los Samanes y las Colinas (Figura 5.11).

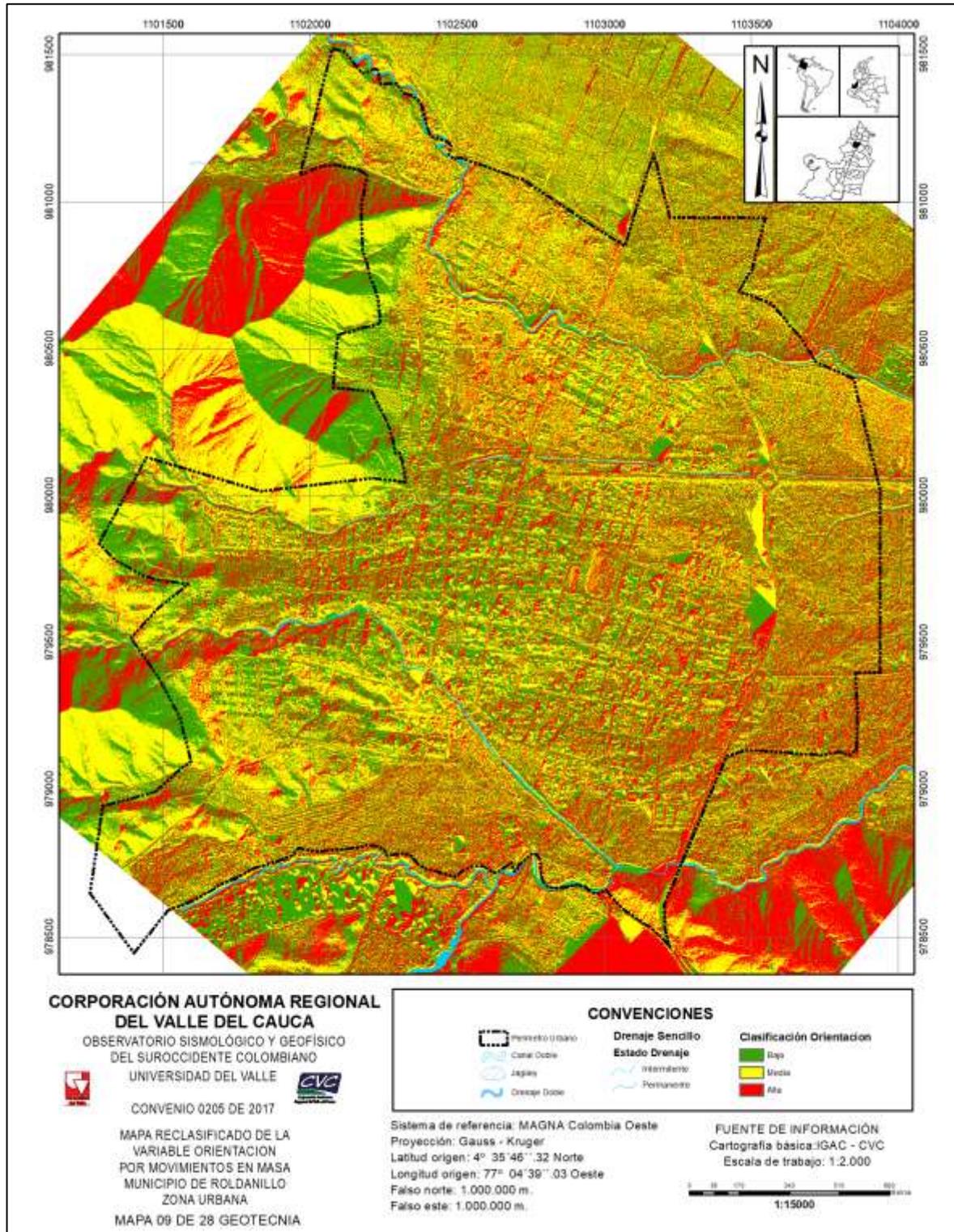
### **5.2.2.2 Orientación de las Laderas**

La morfología de las laderas afecta de forma directa su estabilidad al igual que la escasa vegetación, ya que la dirección y el comportamiento de los escurrimientos se ven influenciados por la forma que tenga cada ladera, lo que quiere decir que el agua va a escurrir, dispersar o concentrar dependiendo de cada geoforma. En las laderas convexas el agua se dispersa en diferentes direcciones evitando con esto el represamiento de agua, situación diferente ocurre con las laderas cóncavas en las cuales se da el represamiento de agua, esta concentración de líquidos es fundamental en propiciar el desequilibrio del área.

En el área de estudio las laderas son pocas y están localizadas principalmente al occidente, donde el agua escurre con rapidez, pero no por ello es menos importante dado que la rapidez con que el agua se desliza por las laderas, el nivel erosivo, tipo de cobertura de la tierra, la pendiente entre otras variables se mezclan causando arrastre de material, el resto del municipio por poseer una topografía plana puede sufrir encharcamientos o inundaciones (Figura 5.12).



**Figura 5.11.** Mapa reclasificado de la pendiente del área urbana del municipio de Roldanillo.  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 5.12.** Mapa reclasificado Orientación de las Laderas en el área urbana del municipio de Roldanillo

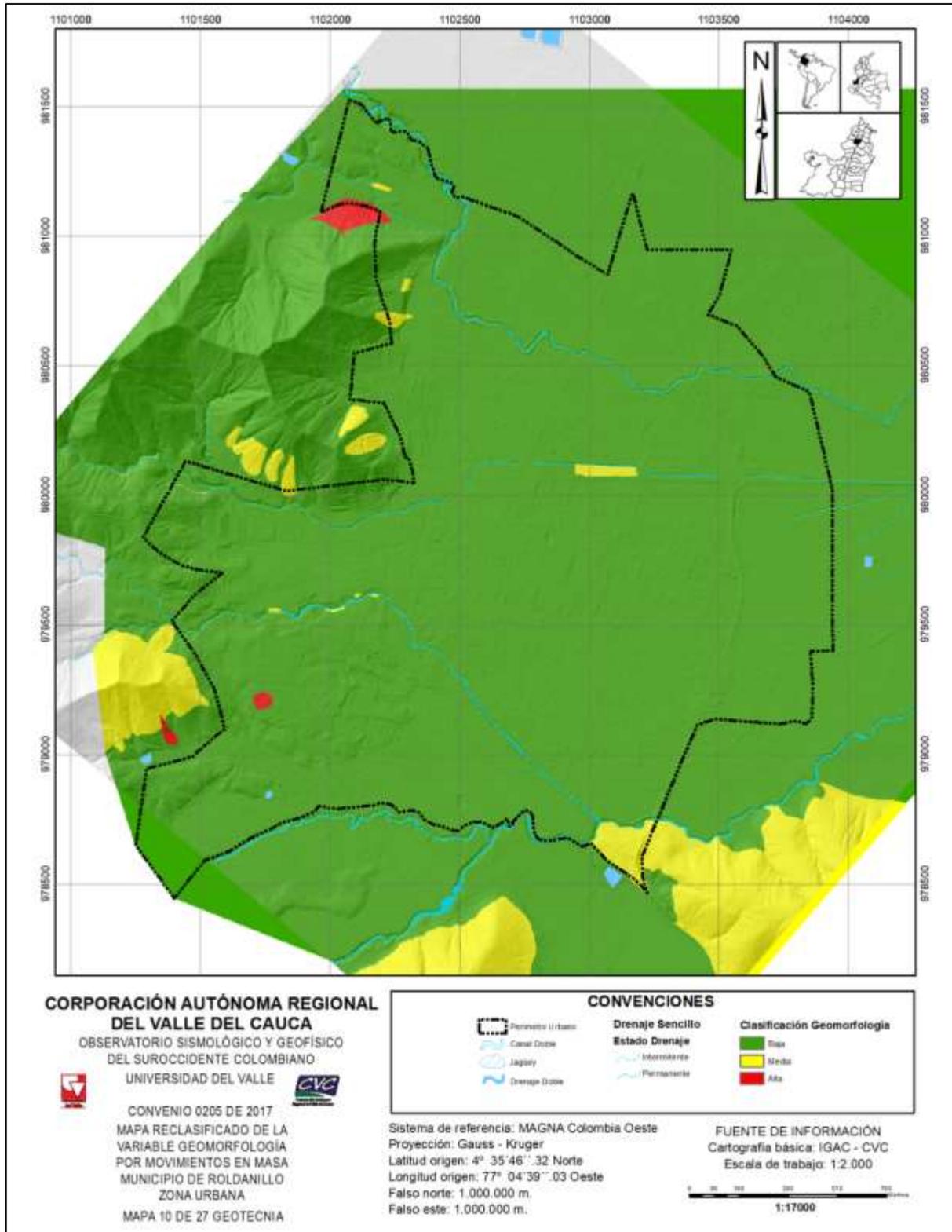
**Fuente:** Elaboración propia

### **5.2.2.3 Geomorfología**

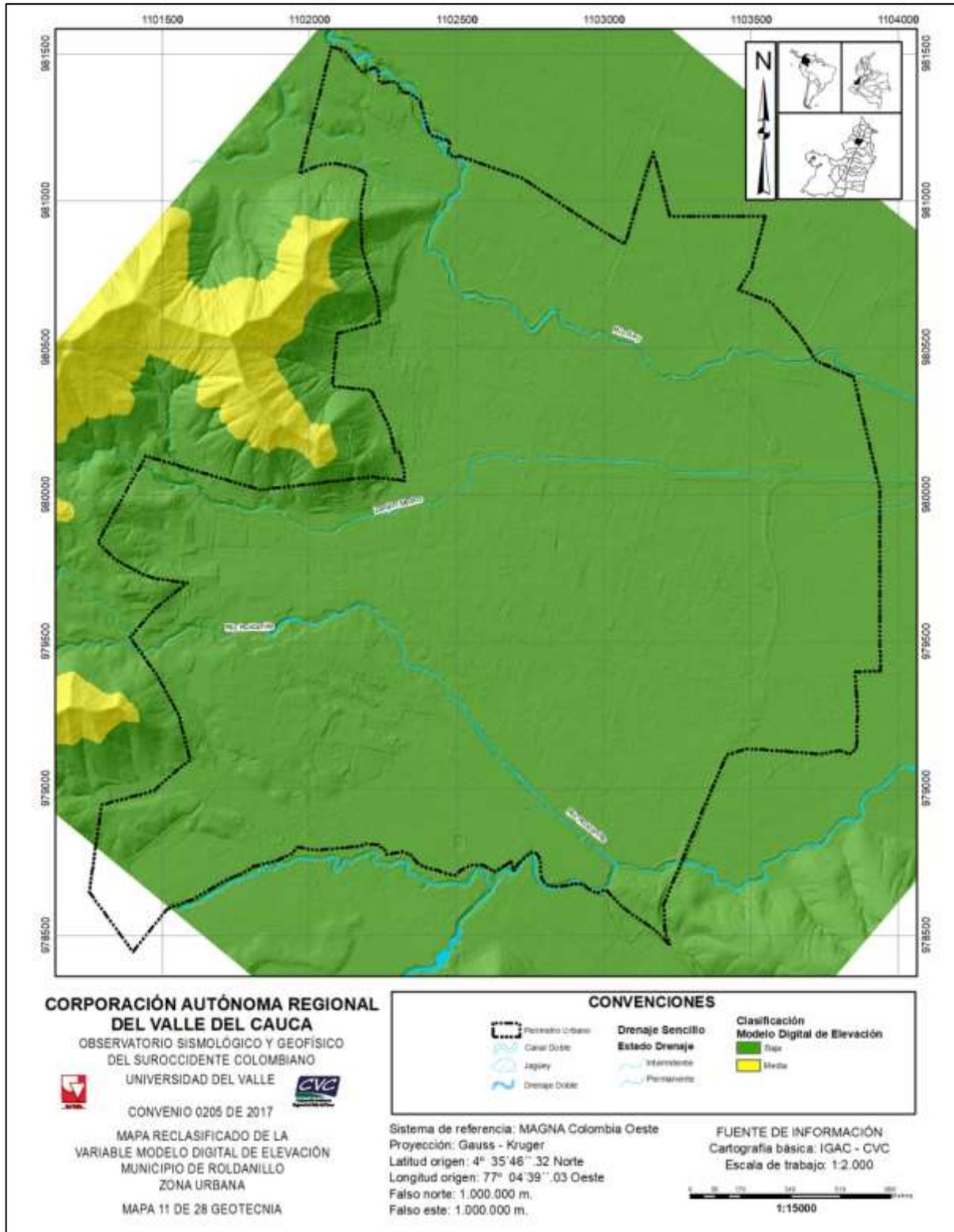
En general las áreas con susceptibilidad alta se encuentran al noroccidente del municipio sobre la zona de ladera. Los sitios con un grado susceptibilidad medio se presentan principalmente al noroccidente, relacionado con los coluviones, al sur occidente y suroriente, mientras que las áreas con un grado bajo de susceptibilidad predominan en la zona plana del municipio, asociado con Depósitos Aluviales (Figura 5.13).

### **5.2.2.4 Modelo Digital de Elevaciones (DEM)**

El DEM, es reclasificado con el fin de obtener la capa denominada Morfodinámica (Figura 5.14), donde se obtuvo como resultado que el total del área urbana del municipio presenta susceptibilidad baja. La susceptibilidad media se encuentra ubicada por fuera del perímetro de la zona urbana, localizada en los puntos cardinales noroccidente y suroccidente, dándose la correlación con las pendientes más fuertes.



**Figura 5.13.** Mapa reclasificado Geomorfológica en el área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia



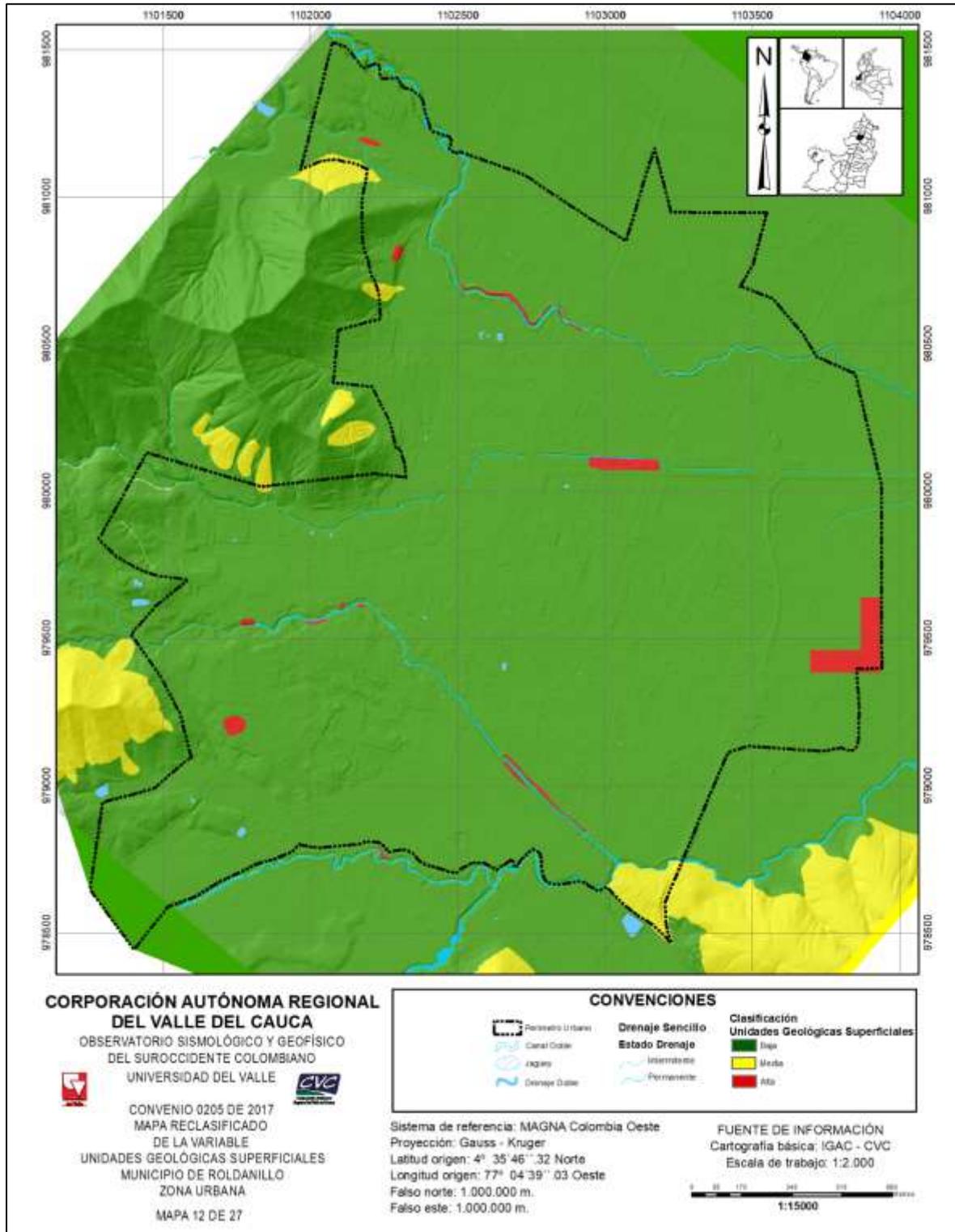
**Figura 5.14.** Mapa reclasificado DEM en el área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### **5.2.2.5 Unidades Geológicas Superficiales**

De acuerdo con la reclasificación de la variable Unidades Geológicas Superficiales, se establece que gran parte del área urbana del municipio presenta susceptibilidad baja, siendo los sectores localizados al noroccidente y suroccidente los que presentan susceptibilidad media (Figura 5.15). Las áreas con susceptibilidad alta se encuentran cercanas al barrio La Ceiba y a la orilla de los ríos Rey y Roldanillo.

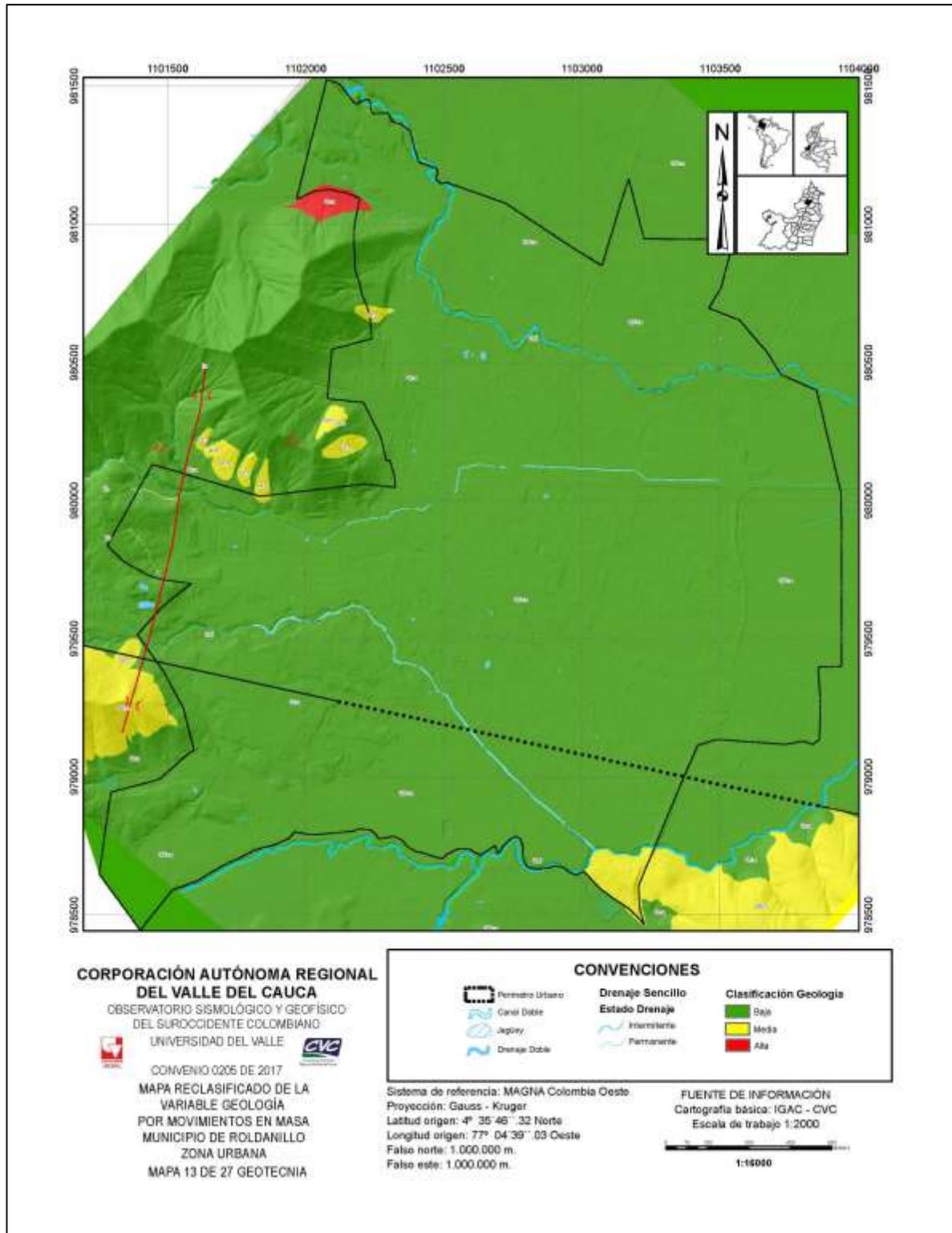
### **5.2.2.7 Geología**

En la Figura 5.16 muestra la geología reclasificada del municipio de Roldanillo, donde se observa que la mayor parte del área presenta susceptibilidad baja, en los costados noroccidental, occidental y suroriental se presentan susceptibilidad alta y media.



**Figura 5.15.** Mapa reclasificado Unidades Geológicas Superficiales en el área urbana del municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia



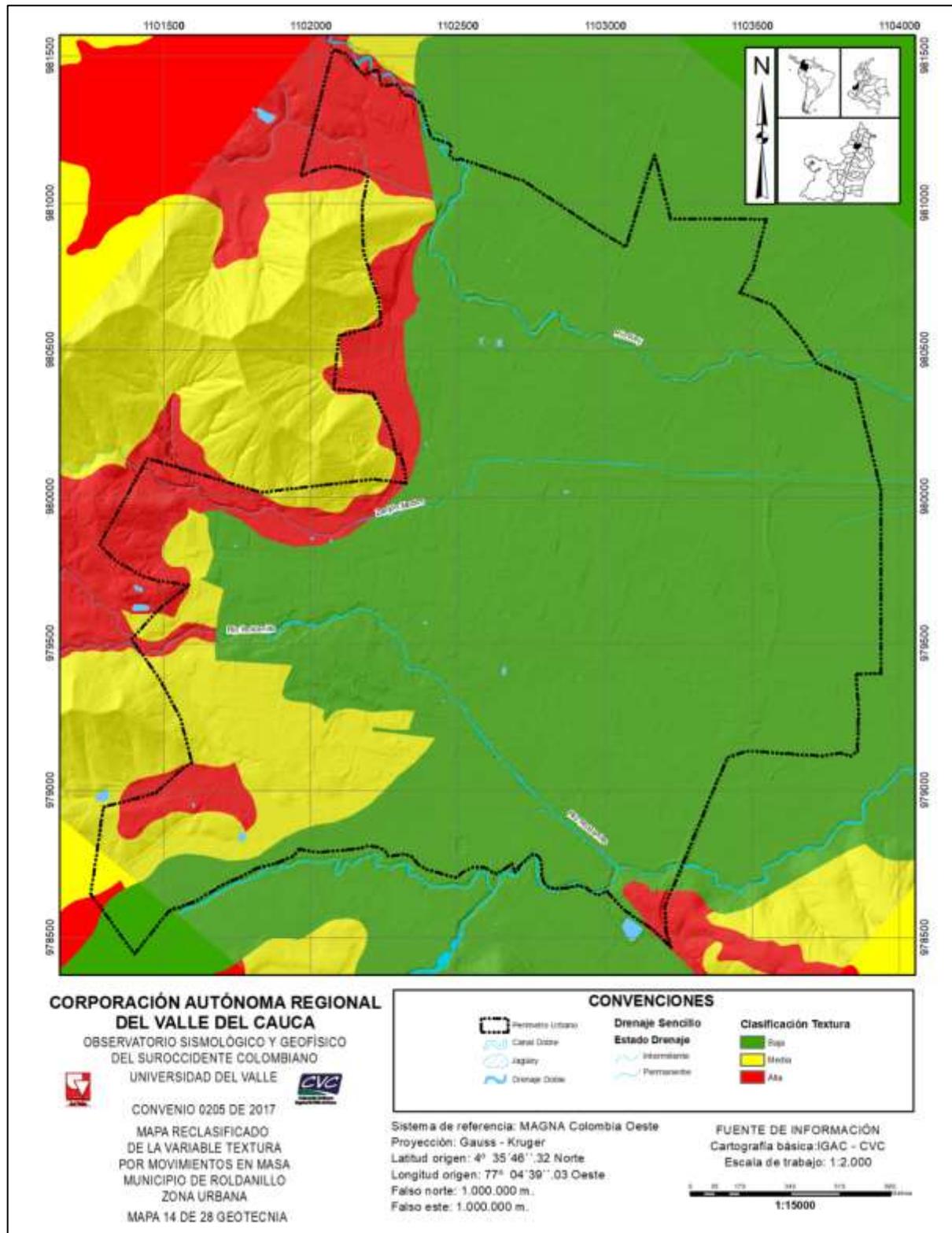
**Figura 5.16.** Mapa reclasificado Geología del área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### **5.2.2.8 *Textura***

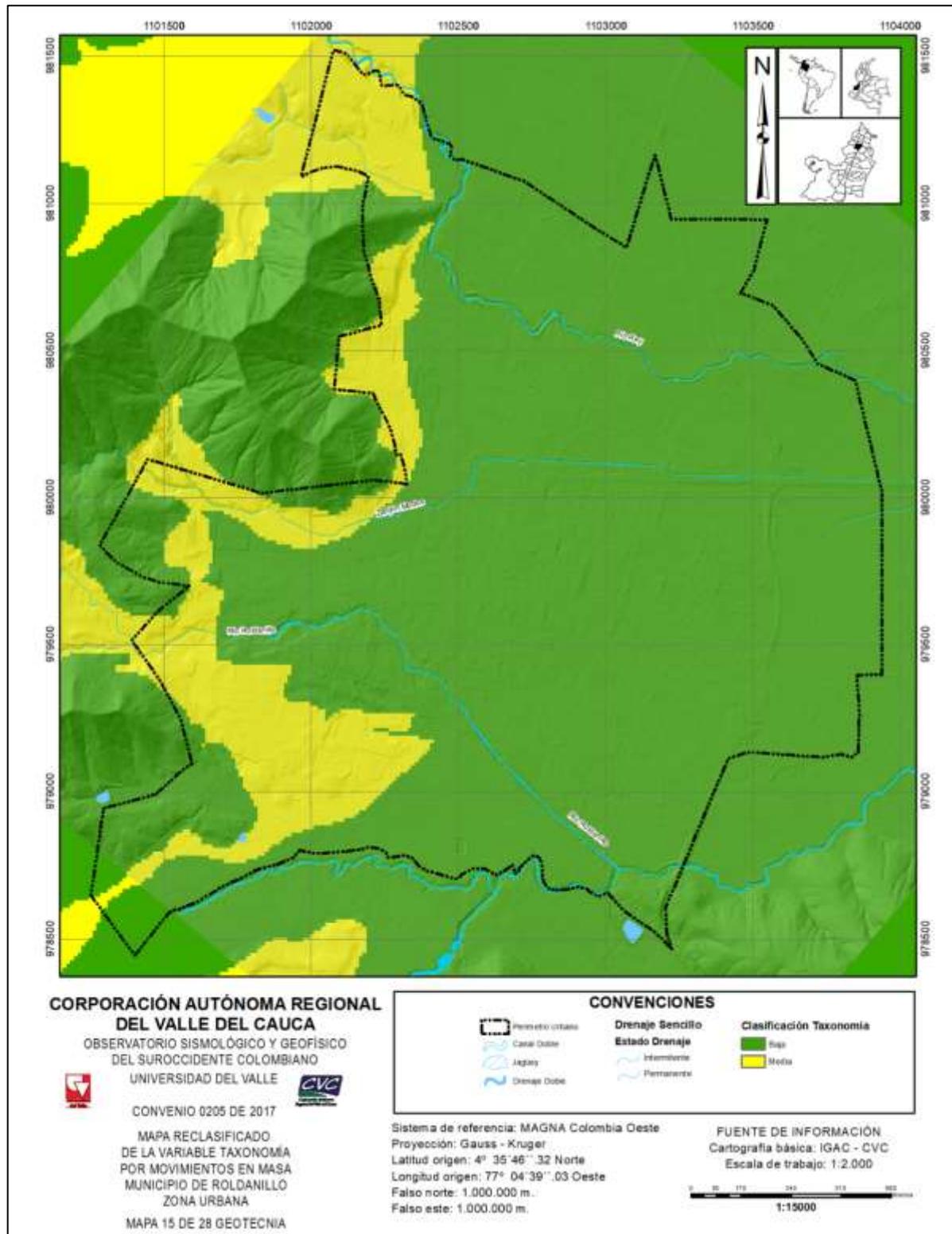
La susceptibilidad alta por textura se presenta en el norte, noroccidente, occidente y en menor proporción al lado suroccidental y suroriental, esta se presenta como pequeñas franjas que bordean el límite municipal, siendo los sectores más críticos El Hatillo, Ciudad Jardín, Llanitos. La susceptibilidad media se presenta en el suroccidente y suroriente municipal. La susceptibilidad baja abarca el resto del área de estudio (Figura 5.17).

### **5.2.2.9 *Taxonomía***

La susceptibilidad media por la taxonomía se localiza en el norte, noroccidente, occidente y suroccidente. Al occidente y suroccidente la susceptibilidad media ocupa un espacio importante en cercanías al del límite municipal y el río Roldanillo. La susceptibilidad baja ocupa el resto del área de estudio (Figura 5.18).



**Figura 5.17.** Mapa reclasificado Texturas en el área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 5.18.** Mapa reclasificado Taxonomía en el área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

### **5.2.2.10 Erosión**

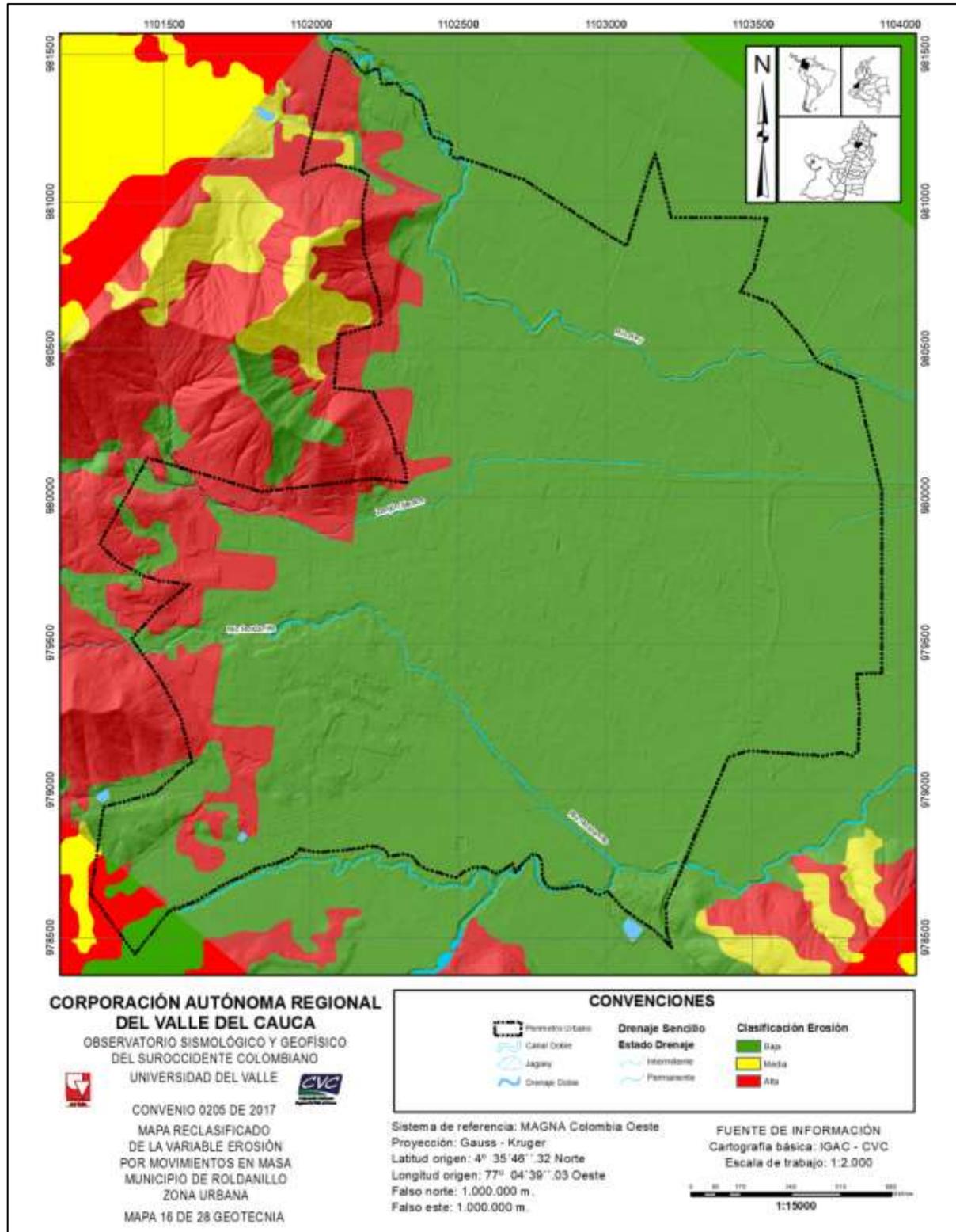
La erosión alta se presenta al noroccidente, occidente y suroccidente del municipio de Roldanillo, la erosión media se concentra en el noroccidente y un área muy pequeña en el suroccidente, se debe tener en cuenta que esta se localiza por fuera del límite municipal, y corresponden a áreas de mediano tamaño. La erosión baja ocupa el mayor porcentaje del área municipal (Figura 5.19)

### **5.2.2.11 Cobertura de la tierra**

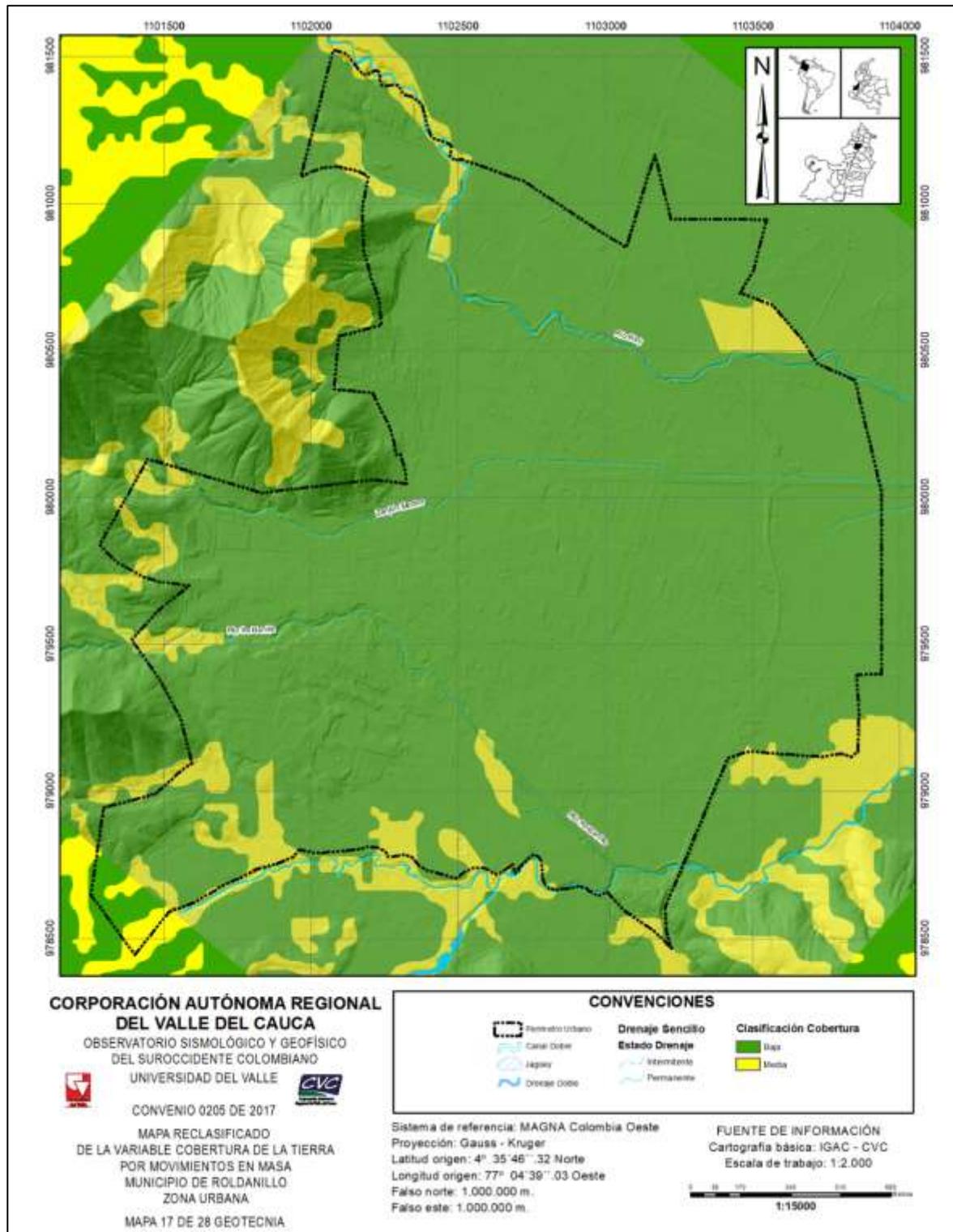
La cobertura de la tierra que abarca el mayor porcentaje del área municipal corresponde a susceptibilidad baja. La susceptibilidad media se presenta en los costados, norte, noroccidente, occidente, suroccidente, sur y suroriente, en este caso la zona más susceptible son las del noroccidente, la sur y suroriente. Cabe anotar que la mayor parte de estas zonas se localizan en el límite municipal (Figura 5.20).

Son las acciones que el hombre ejerce sobre el suelo las que llevan a que se potencie la ocurrencia de movimientos en masa, el hecho de modificar los usos del suelo sin tener unas bases sólidas que sustenten que se puede hacer es poner en riesgo su salud y rendimiento. La deforestación, practicar agricultura, ganadería etc., en altas pendientes hace que el terreno se sobre cargue, erosione, que se modifiquen sus características como textura, estructura, PH, entre otros, produciéndose con el tiempo suelos ácidos o salinos, erosión en diferentes niveles (laminar, surcos y cárcavas) y en el peor de los casos movimientos en masa.

En el municipio se encuentran suelos heterogéneos, algunos son más propensos a presentar movimientos en masa que otros, debido a la actividad erosiva a la que se encuentren sometidos, en la zona predomina la cobertura correspondiente a zona urbana, la cual se localiza en su gran mayoría en la zona plana, lo que disminuye la susceptibilidad. Por otro lado, las zonas que presentan coberturas con alta susceptibilidad se localizan en los bordes del área urbana, al costado noroccidente, occidente y suroccidente, donde se presenta la cobertura de cultivos limpios y semilimpios, estos resultados son acordes con las observaciones realizadas en campo.



**Figura 5.19.** Mapa reclasificado Erosión en el área urbana del municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 5.20.** Mapa reclasificado Cobertura de la tierra en el área urbana del municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.3 SUPERPOSICIÓN DE CAPAS TEMÁTICAS

Para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa se propuso el uso de método multicriterio, los cual serían complementados con trabajo de campo y el estudio de historicidad, para obtener el inventario de procesos morfodinámicos, considerado como uno de los insumos más importantes del proceso, pues permite establecer la relación que existe entre el factor condicionante y la posibilidad de que ocurra un movimiento en masa. Una vez hecha a revisión de las diferentes fuentes de información (bibliográficas, hemerográficas, archivos, base de datos entre otros), para el municipio de Roldanillo no se reportaron registros de movimientos en masa en el área de estudio, lo cual permitiera emplear cualquier método estadístico. Sin embargo, “considerando las limitaciones de información se pueden emplear alternativas con base en métodos estadísticos o el conocimiento del área como en el caso de los métodos heurísticos o geomorfológicos” (Corominas et al., 2013).

Según el SGC (2015). El análisis de la amenaza por movimientos en masa es un proceso que requiere de la interacción e intervención de diferentes disciplinas temáticas relacionadas con las ciencias de la tierra y un suficiente conocimiento de la zona de estudio en cada una de sus etapas. Y de acuerdo a los resultados arrojados de la revisión bibliográfica sobre la historicidad de los movimientos en masa registrados en el área de estudio, se propone la metodología heurística cuya formulación se basa principalmente en la calidad y cantidad de información disponible, además del conocimiento del área de estudio y del fenómeno por parte del grupo interdisciplinario.

La determinación de los pesos ponderados de las variables se realiza a través del método AHP, análisis de las condiciones locales y regionales del terreno y los diversos procesos presentes en el área de estudio.

## 6. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Finalmente, la evaluación de la susceptibilidad se realizará por medio del método heurístico, lo que implica tomar cada una de las variables categorizadas y obtener los pesos W de cada variable. Una vez obtenidos todos los factores W, se suman las variables para obtener el grado o índice de susceptibilidad (LSI), el cual indica la sumatoria o ecuación que se aplicará según la siguiente expresión.

$$LSI = W_{\text{Pendiente}} + W_{\text{Orientación}} + W_{\text{Geomorfología}} + W_{\text{DEM}} + W_{\text{Unidades}} + W_{\text{Geología}} + W_{\text{Textura}} + W_{\text{Taxonomía}} + W_{\text{Erosión}} + W_{\text{Cobertura}}$$

**Tabla 6.1.** Pesos asignados a las variables para obtener el grado de susceptibilidad (LSI)

VARIABLES	PESO ASIGNADO A CADA VARIABLE (%)
Pendiente	18
Orientación de laderas	5
Geomorfología	14
MDE	7
Geología	8
UGS	15
Textura	3
Taxonomía	2
Erosión	13
Cobertura de la tierra	16

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.2, se presentan el mapa de susceptibilidad, las zonas con susceptibilidad por movimientos en masa en las categorías alta, media y baja en el municipio de Roldanillo. A continuación, se describen estas zonas:

- **Susceptibilidad alta:**

El área catalogada con susceptibilidad alta se encuentra en el rango comprendido entre 54,1 a 100%, que corresponde a zonas con condiciones altamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad asociados principalmente con movimientos y a zonas afectadas por erosión concentrada, además de las características litológicas del material aflorante en la zona y de fuertes pendientes que caracterizan la zona alta del municipio. En general la zona enmarcada dentro de susceptibilidad alta, corresponde a parte del frente montañoso.

La susceptibilidad alta se presenta al norte del barrio La Ceiba, al sur del barrio El Portal más exactamente hacia el límite municipal la mayor parte de la susceptibilidad alta se localiza por fuera del municipio. Estas zonas se presentan al norte y noroccidente de Roldanillo. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción pequeña dentro de la zona de estudio (0.26%)

Figura 6.1). El porcentaje de susceptibilidad presente en cada barrio del municipio de Roldanillo, se presenta en la Tabla 6.2.

- **Susceptibilidad media:**

La susceptibilidad media se encuentra en el rango de 33,1 a 54%. Las zonas enmarcadas en este rango están relacionadas con autores topográficas moderadas del abanico de Roldanillo, el cual se encuentra urbanizado y está ubicada hacia las zonas de piedemonte, correspondiendo básicamente a la transición entre la zona montañosa y la zona plana.

La susceptibilidad media se presenta en los barrios El Portal, Las Colinas, Nueva Ermita, El Mirador, San José Obrero, al norte de Ciudad Verde, occidente de Ciudad Jardín, todos localizados, al norte, occidente y noroccidente y en Villa Rosita al sur.

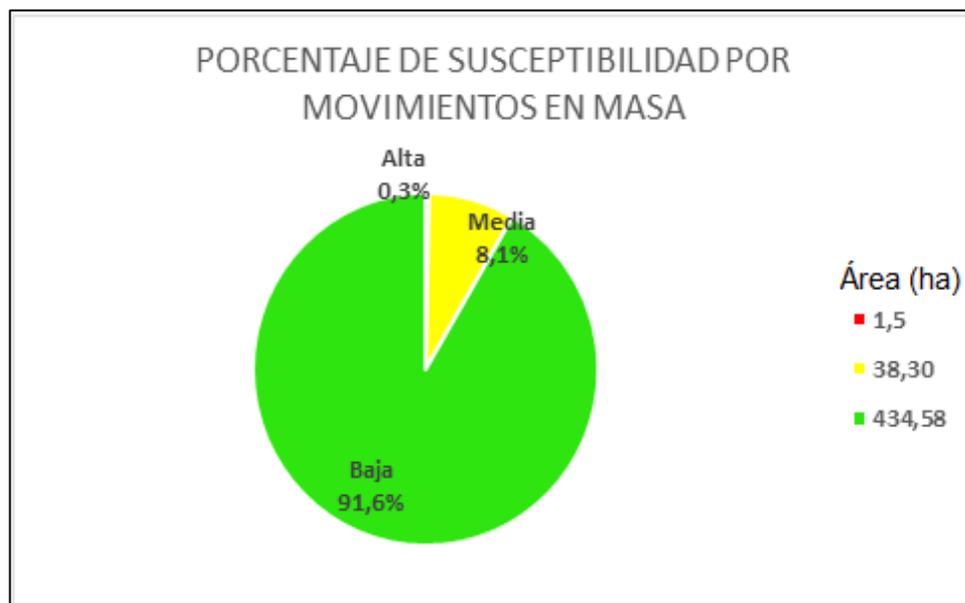
La zona con susceptibilidad media para el municipio de Roldanillo es equivalente al 7.96% del área urbana.

- **Susceptibilidad baja:**

La susceptibilidad baja está en el rango de 0 a 33%, son zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Estas zonas pueden ser susceptibles a procesos de inundación y avenidas torrenciales, lo cual se corroborará con el estudio complementario sobre amenaza por inundaciones.

Como se muestra en la

Figura 6.1, la susceptibilidad baja se presenta en gran parte del municipio (91.78%), siendo las áreas localizadas en el nororiente, oriente, centro, suroriente las que no presentan indicios de susceptibilidad alta o media, seguida por la susceptibilidad media y alta que se encuentran en el noroccidente municipal.



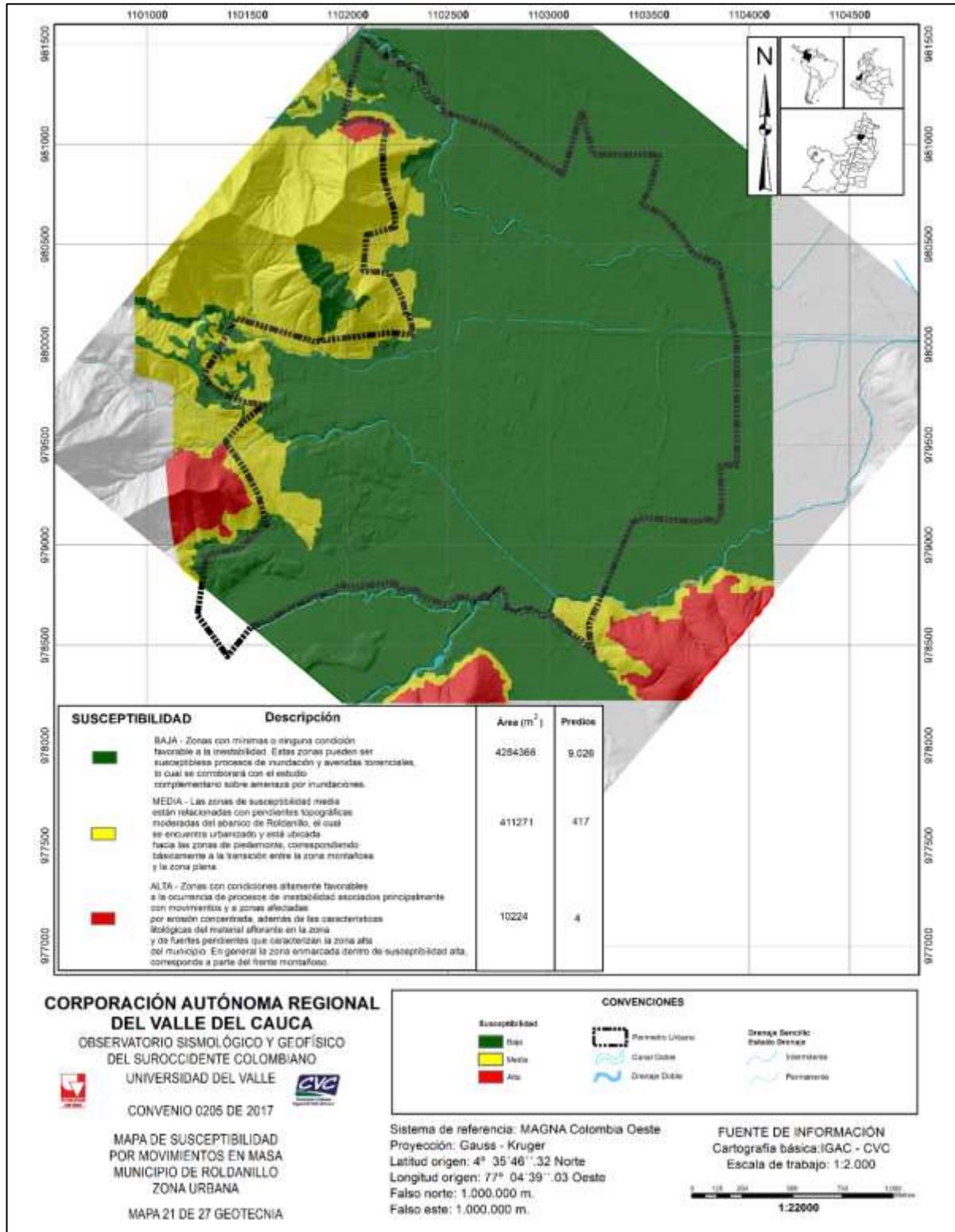
**Figura 6.1.** Porcentajes del área de la susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 6.2.** Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de Roldanillo

BARRIO	PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD (MM) POR BARRIO		
	ALTA	MEDIA	BAJA
Villa Rosita	0	93	7
El Mirador	0	72	28
Ciudad Verde	0	84	16
Las Colinas	0	61	39
La Ceiba	3	61	36
San Jose Obrero	0	57	43
Nueva Ermita	0	52	48
Humberto Gonzalez	0	28	72
El Portal	2	11	87
Los Samanes	0	9	91
Prados de la Ermita	0	8	92
El Prado	0	4	96
Ciudad Jardin	0	4	96
La Ermita	0	1	99
Arrayanes	0	1	99

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 6.2.** Mapa Susceptibilidad total a movimientos en masa en el municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia

## **7. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TERRENO**

La zonificación de amenazas de un territorio es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo para el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación, infraestructura, conservación entre otros. Además, permitirá restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que en el futuro se eviten eventuales demandas y problemas asociados a reubicación de viviendas.

La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (INGEOMINAS, 2006), involucra en su evaluación, el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa amenazante activo o potencial, así como estimativos de su magnitud, recurrencia y localización geográfica. Esta es una actividad compleja que requiere una gran cantidad de información de aspectos tales como: topografía, cobertura y usos del suelo, geología (geología para ingeniería, estratigrafía, geología estructural) geomorfología, clima, hidrología, hidráulica, hidrogeología (niveles piezométricos y su variación en el tiempo, régimen de flujo de aguas subterráneas), parámetros geomecánicos de materiales e intensidad y probabilidad de ocurrencia de factores detonantes tales como lluvias y sismos (CVC y Univalle, 2010).

### **7.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES**

En este capítulo se describen los aspectos metodológicos propuestos para elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa, según lo dispuesto en el Decreto 1807 de 2014. La zonificación de amenaza en los estudios básicos se realiza a escala 1:5000 con base en análisis determinísticos, mientras que para los estudios de detalle se realiza a escala 1:2000, aplicando análisis probabilísticos. Para efectuar los estudios de amenaza se requiere la cartografía básica del área de análisis a escala 1:2000 y a partir de ella se genera la cartografía temática, correspondiente a cartografía geológica en unidades de geología para ingeniería, la cartografía geomorfológica en cuanto a elementos geomorfológicos y la cartografía de cobertura. Además, se debe hacer un inventario de movimientos en masa y un registro histórico de estos (catálogo de eventos).

Tanto el catálogo como el inventario de los movimientos en masa permiten identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los factores detonantes.

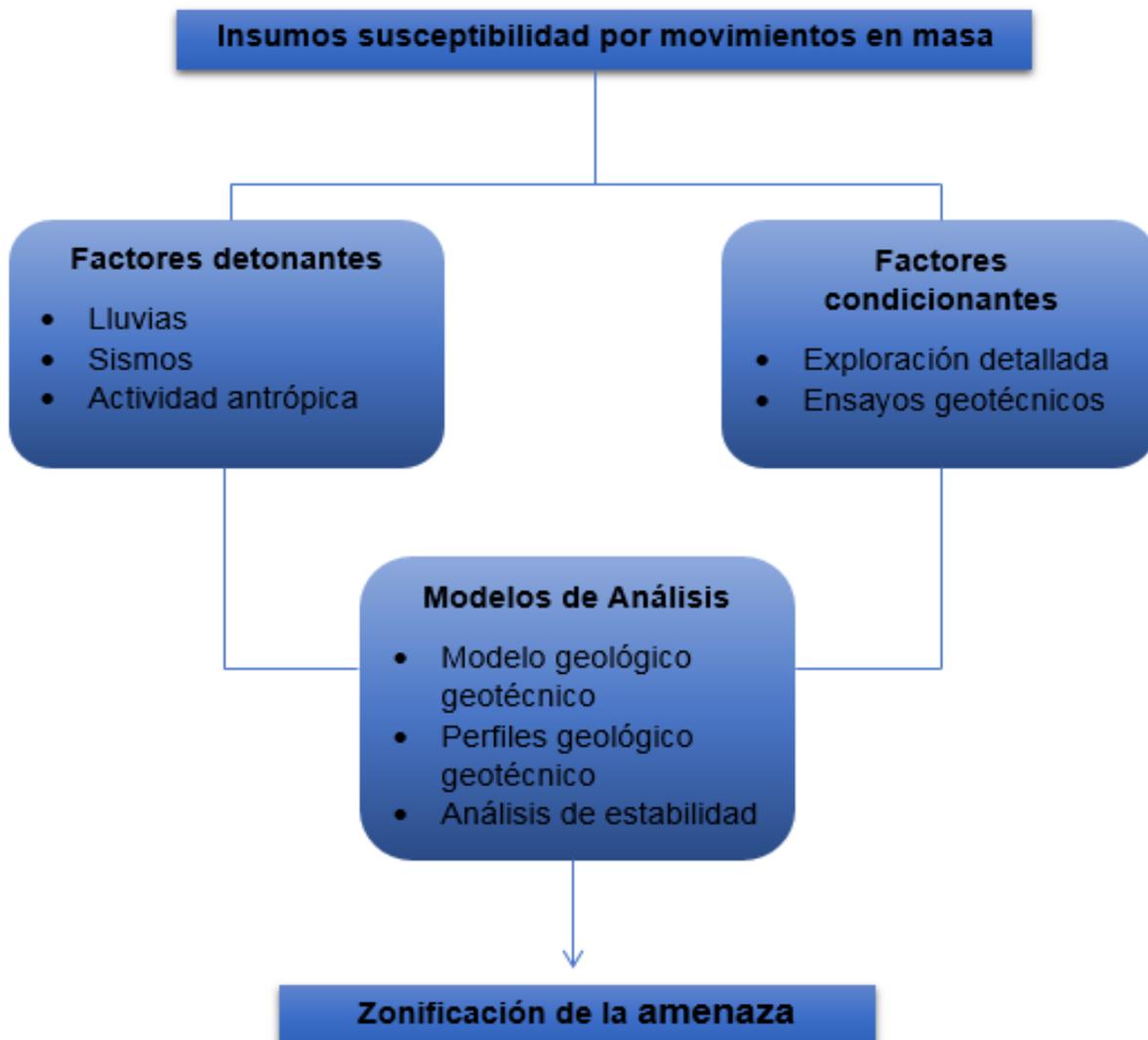
A partir de los temas descritos se establece un modelo geológico - geotécnico en el que se requiere, como actividad adicional, efectuar una exploración geotécnica básica que permita caracterizar geomecánicamente los materiales del subsuelo y efectuar un análisis determinístico de estabilidad, que para el caso de taludes en suelos se hace por medio de un modelo de talud infinito y para el caso de taludes en roca, mediante modelos convencionales de estabilidad de macizos rocosos, según lo establezca el experto.

Para el primer caso se cuenta, entonces, con una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y de una aceleración sísmica, con lo cual se procede a calcular, por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o “columnas” de suelo, para hallar así su distribución espacial. Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de amenaza. Para taludes en roca, la zonificación de amenaza se basa en el método SMR (Romana, 1995), que tiene en cuenta las características geométricas del talud, las características estructurales del macizo y las propiedades mecánicas de las rocas.

Las áreas de amenaza alta definidas en los estudios básicos en los que se identifiquen elementos expuestos, áreas urbanizadas ocupadas o edificadas, así como aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales, se consideran áreas en condición de riesgo y se deben priorizar para llevar a cabo estudios detallados. Por su parte, las zonas ocupadas categorizadas como de amenazas media y alta, y clasificadas como suelo urbano, de expansión urbana o centro poblado rural, se consideran zonas con condición de amenaza y también se deben evaluar en estudios detallados.

La cartografía relacionada con los temas de geología para ingeniería y elementos geomorfológicos en los estudios de zonificación de amenaza por movimientos en masa detallados es la misma que la generada en los estudios básicos, pero con un énfasis especial en la elaboración de columnas estratigráficas que permitan a partir de un modelo geológico - geotécnico y perfiles de análisis para unidades de ladera (definidos por el experto en aquellos sectores clasificados con condición de amenaza o riesgo), calcular la probabilidad de falla para deslizamientos superficiales, profundos o caídas de roca según corresponda. Este tipo de análisis permite considerar la incertidumbre en los parámetros de resistencia del terreno y la probabilidad de ocurrencia de los factores detonantes, es decir, la ejecución de análisis de estabilidad probabilísticos. La zonificación de la amenaza obtenida en los estudios de detalle debe contener, además de la probabilidad de falla de los taludes, la caracterización del proceso amenazante en materia de ubicación, clasificación del tipo de movimiento, material, magnitud, distancia de viaje, velocidad e intensidad, datos básicos para llevar a cabo los análisis cuantitativos de vulnerabilidad y riesgo (SGC, 2015).

En la Figura 7.1, se ilustra el esquema metodológico general utilizado para evaluación de la amenaza por movimientos en masa. Esta evaluación depende directamente de la evaluación de la susceptibilidad, a la cual se le han adicionado los factores detonantes (precipitación y sismos). En este orden de ideas se procede a continuación a detallar la obtención de dicha evaluación.



**Figura 7.1** Zonificación detallada de amenaza por movimientos en masa

**Fuente:** (SGC, 2015).

## 7.2 INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

En este apartado se presenta el desarrollo de las diferentes actividades llevadas a cabo durante el estudio geotécnico realizado para la caracterización de la zona del estudio, la cual servirá para la generación de los mapas de amenaza.

El objeto del estudio geotécnico está orientado a obtener los modelos geológico-geotécnicos del subsuelo representativos en las unidades geológicas superficiales identificadas, donde se pueda definir la disposición y distribución estratigráfica de los materiales, superficies de falla, profundidad del nivel freático y determinación de parámetros geotécnicos representativos de los materiales, insumos que son fundamentales para la etapa de análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza.

Según Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A., (2007) y Jimeno, C. L., (2013) el Ensayo de Penetración Estándar o (SPT por sus siglas en inglés), es una prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que es necesario realizar un estudio geotécnico. Este tipo de ensayo consiste en medir el número de golpes necesarios para que se introduzca a una determinada profundidad una cuchara (cilíndrica y hueca) muy robusta (diámetro exterior de 51 milímetros e interior de 35 milímetros, lo que supone una relación de áreas superior a 100), que le permite tomar una muestra en su interior, naturalmente alterada. El peso de la maza y la altura de la caída libre, están normalizados, siendo de 63'5 kilopondios (kilogramos-fuerza) y 76 centímetros respectivamente.

Contractualmente se planteó hacer los sondeos (perforaciones) con el método SPT, pero como se encontró rechazo a 1 metro de profundidad, debido a esto, se decide realizar las exploraciones por el método de perforaciones mecánicas por rotación en diámetro HQ

### **7.2.1 Metodología**

Para realizar la caracterización geotécnica y lograr los objetivos anteriormente planteados, se definió un programa de exploración del subsuelo con base en el análisis de la cartografía de unidades geológicas superficiales, estableciendo los sitios de exploración, tipo y profundidad aproximada.

La fase de exploración geotécnica se enfocó hacia la definición de los espesores e identificación de los diferentes materiales del subsuelo en la zona del estudio, además de reportar los niveles freáticos en cada una de las perforaciones realizadas. Para ello se realizaron perforaciones profundas con muestreo continuo inalterado, apiques superficiales con toma de muestras en bloque, líneas de refracción sísmica.

En paralelo a la exploración del suelo y posterior a la finalización de la primera perforación, las muestras obtenidas, tanto de suelo como de roca, fueron llevadas y ensayadas en el laboratorio con el fin de estimar sus propiedades desde el punto de vista físico y mecánico. Los ensayos incluyeron clasificación, propiedades básicas y geomecánicas (resistencia).

Finalmente, la información geológica, geotécnica y geofísica obtenida fue integrada para definir los modelos geológicos-geotécnicos del subsuelo, sobre secciones previamente establecidas de comportamiento geotécnico similar con base en la unidad geológica superficial y el inventario de movimientos en masa.

### **7.2.2 Exploración del subsuelo**

Con el fin de realizar la caracterización y estimar las propiedades geotécnicas de los materiales presentes en el subsuelo bajo el área de estudio, se llevó a cabo un plan de exploración de tipo directo e indirecto. La exploración directa consistió en la ejecución de una serie de perforaciones mecánicas y de apiques superficiales, con su respectiva descripción del perfil estratigráfico y toma de muestras inalteradas. Por otro lado, la exploración indirecta consistió en la ejecución de ensayos de campo a través de líneas geofísicas de refracción sísmica.

Para lo anterior, se tuvo en cuenta el levantamiento topográfico y la cartografía de unidades geológicas superficiales realizada para el presente estudio, con lo cual se estimaron, de forma a priori, los espesores y el tipo de material a explorar.

### 7.2.2.1 Perforaciones mecánicas

Se llevaron a cabo seis (6) perforaciones mecánicas por rotación en diámetro HQ, con profundidad de exploración variable, 4 a 10 m y 2 a 5 m, durante las cuales se recuperaron muestras inalteradas de los materiales presentes en el sector, permitiendo su descripción, estimación de espesores y caracterización geomecánica. La distribución y resultados de dichas perforaciones permitieron identificar la secuencia estratigráfica de materiales y corroborar la información de geología regional y local.

Para realizar las perforaciones mecánicas se utilizó una máquina JOY, la cual está equipada con martillos perforadores, rotación de 360° en la parte superior de la torreta para una máxima cobertura del brazo, controles piloto hidráulicos, esta perforadora indicada para la realización de orificios verticales o inclinados. Permite colocar varios tipos de cabezales y, en consecuencia, aplicar diferentes técnicas de perforación; rotación, rotoperCUSión, perforación con aire, con martillo de fondo, entre otros.

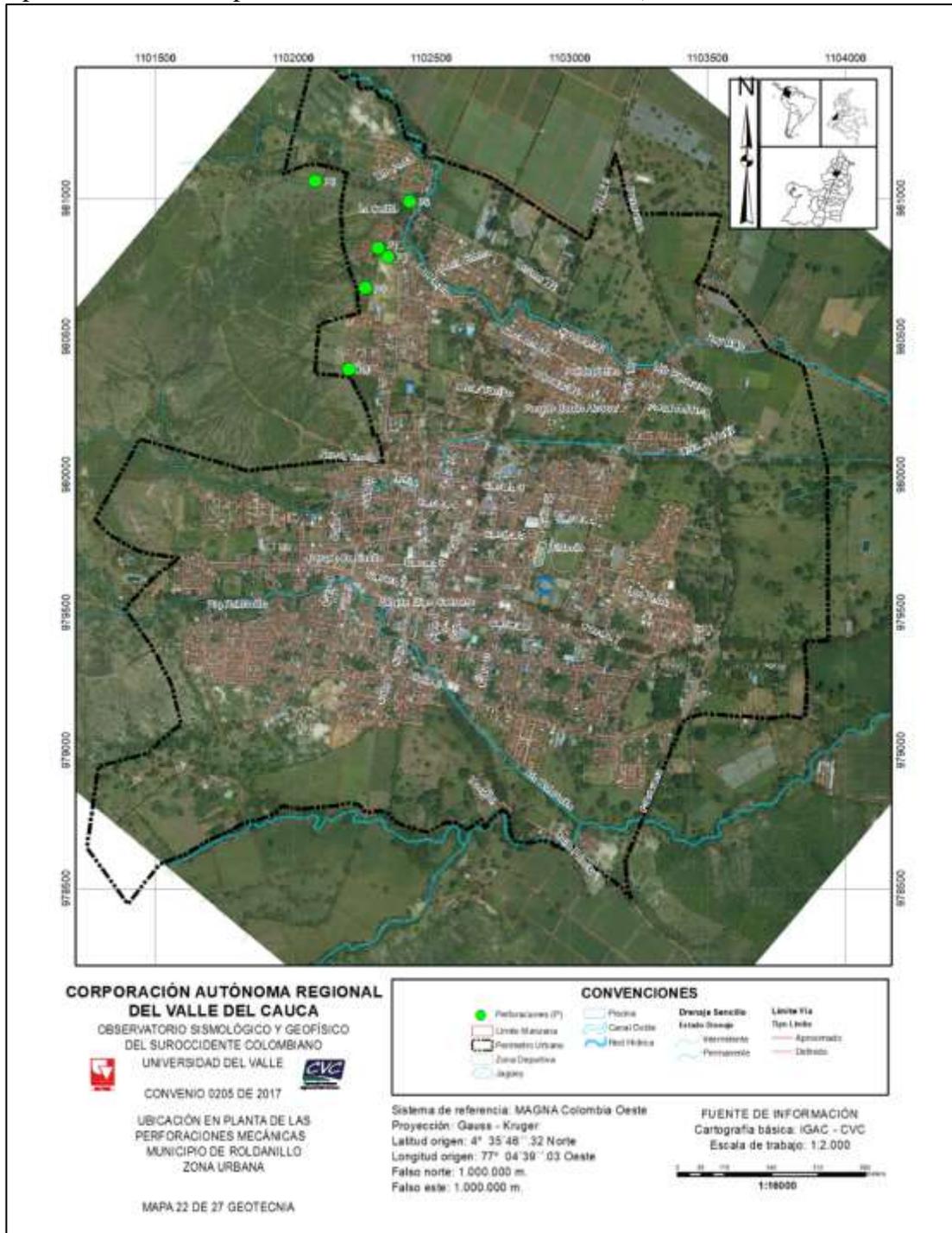
En la **Tabla 7.1** se relacionan las coordenadas de los sitios de perforación, profundidad de exploración, la cantidad de muestras tomadas y la posición del nivel freático, medido después de las labores. En particular, se muestra la relación de profundidades alcanzadas en cada perforación, ejecutando un total de 50 m de perforación.

**Tabla 7.1.** Relación de las perforaciones realizadas, coordenadas (planas Magna-Sirgas), alcance en profundidad y cantidad de muestras tomadas en el municipio de Roldanillo.

PERFORACIÓN (CÓDIGO)	LONGITUD	LATITUD	PROFUNDIDAD ALCANZADA (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	UGS	SIGNIFICADO
P1	1102296	980830	10	5,0	sa	Suelo antrópicos
P2	1102344	980793	10	6,0	star	Suelo transportado aluvial reciente
P3	1102287	980684	10	No se encontró	stco	Suelo transportado coluvial
P4	1102194	980396	5	2,5	star	Suelo transportado aluvial reciente
P5	1102007	981111	10	1,8	stct	Suelo transportado de cono de talus
P6	1102080	981067	5	1,4	stct	Suelo transportado de cono de talus

**Fuente:** Elaboración propia.

La distribución espacial de las perforaciones mecánicas ejecutadas para el presente estudio se puede apreciar en la Figura 7.2, adicional a ello, se presenta la máquina de perforación utilizada en las labores en la Figura 7.3 (máquina JOY, equipada con martillos perforadores, rotación de 360° en la parte superior de la torreta para una máxima cobertura del brazo).



**Figura 7.2.** Ubicación en planta de las perforaciones mecánicas sobre la foto aérea tomada para el presente estudio en el municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 7.3.** Máquina (JOY) usada para las perforaciones  
**Fuente:** fotografía propia.

#### 7.2.2.2 *Apiques*

Además de las perforaciones realizadas, se llevó a cabo la apertura de diecinueve (19) apiques exploratorios en diferentes zonas del área de estudio, con el fin de conocer los estratos superficiales del suelo, los cuales tuvieron dimensiones de 2 m x 2 m x 2 m. La muestra se tomó en bloques de 25cm x 25cm x 25cm. Mediante este tipo de exploración se permitió describir y obtener muestras de los depósitos de suelo superficiales, hasta profundidades máximas de 2 m. Se recuperaron muestras inalteradas consideradas representativas de los materiales detectados, relleno y suelo arcilloso residual, fueron ensayados y caracterizados en el laboratorio.

En la Tabla 7.2 se relacionan las coordenadas de los sitios de apiques, profundidad de exploración, la cantidad de muestras tomadas y la posición del nivel freático. En particular se muestra la relación de profundidades alcanzadas en cada apique, ejecutando un total de 38 m de excavación.

**Tabla 7.2.** Relación de los apiques realizados, coordenadas (planas Magna Sirgas), alcance en profundidad en el municipio de Roldanillo

Código	Longitud	Latitud	Profundidad
AP1	1102265,610	980803,339	2
AP2	1102177,106	981076,323	2
AP4	1102227,775	980910,569	2
AP5	1102069,337	979910,937	2
AP6	1102122,180	980433,707	2
AP7	1101743,928	979209,701	2
AP8	1102691,981	980649,096	2
AP9	1102917,177	979843,359	2
AP10	1102111,148	980185,473	2
AP11	1102820,791	978712,958	2
AP13	1103051,340	980090,719	2
AP14	1103700,417	980446,238	2
AP15	1102039,853	979993,462	2
AP16	1102683,740	979000,414	2
AP17	1103179,088	978544,206	2
AP20	1103731,791	979423,370	2
AP21	1103145,601	978677,789	2
AP23	1102201,043	981190,039	2
AP24	1101664,252	979523,317	2

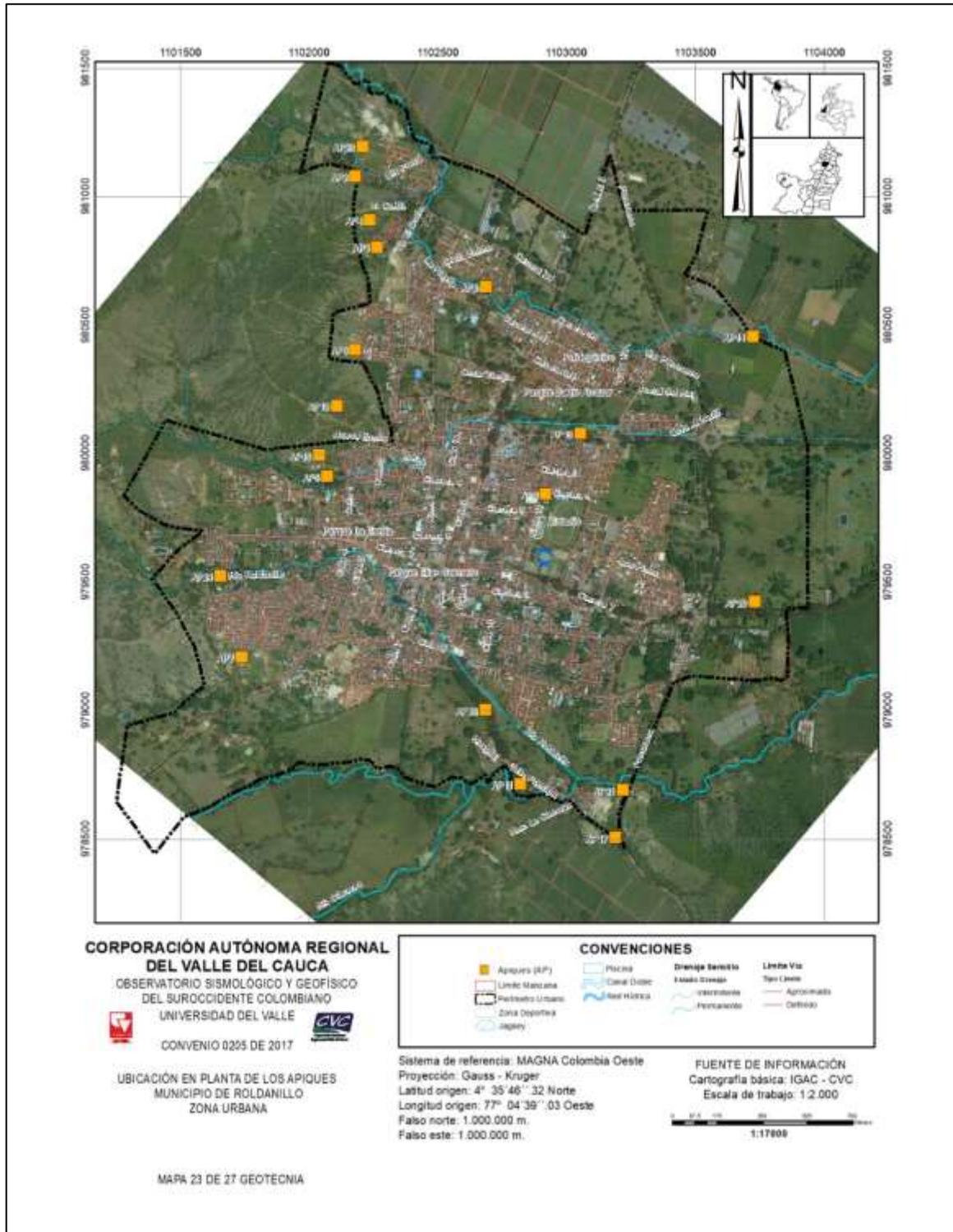
**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 7.4., se muestra la excavación correspondiente a uno de los apiques realizados durante las labores geotécnicas de campo, mientras la ubicación de los apiques exploratorios ejecutados para el presente estudio se puede apreciar en la Figura 7.5



**Figura 7.4.** Apique exploratorio en el municipio de Roldanillo

**Fuente:** fotografía propia.



**Figura 7.5.** Ubicación en planta de los apiques sobre la foto aérea tomada para el presente estudio en el municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Perfiles estratigráficos en los sitios de perforación**

Aprovechando la información obtenida de las descripciones de los materiales extraídos durante las perforaciones, la evaluación posterior de las muestras conservadas para ensayos, los ensayos de exploración in situ y las características de los contactos geológicos presentes en la zona, fue posible generar perfiles estratigráficos en cada uno de los sitios de perforación.

Las descripciones de los estratos incluyen el tipo de material, litología, características físicas, espesor de cada estrato identificado, las condiciones de humedad. Para cada tipo de suelo se define también una representación gráfica consecuente con el tipo de material encontrado y la descripción del suelo, la cual se mantiene para materiales similares en los diferentes perfiles estratigráficos mostrados. A manera ilustrativa, en la Figura 7.6, se aprecia el perfil estratigráfico establecido en el sitio de perforación P-1, el cual se montó utilizando el software STRATER versión 5.

En la Figura 7.6, se puede apreciar la estratificación en el sitio P-1, hasta una profundidad de 10.0 m, identificando cuatro (4) estratos diferentes, así:

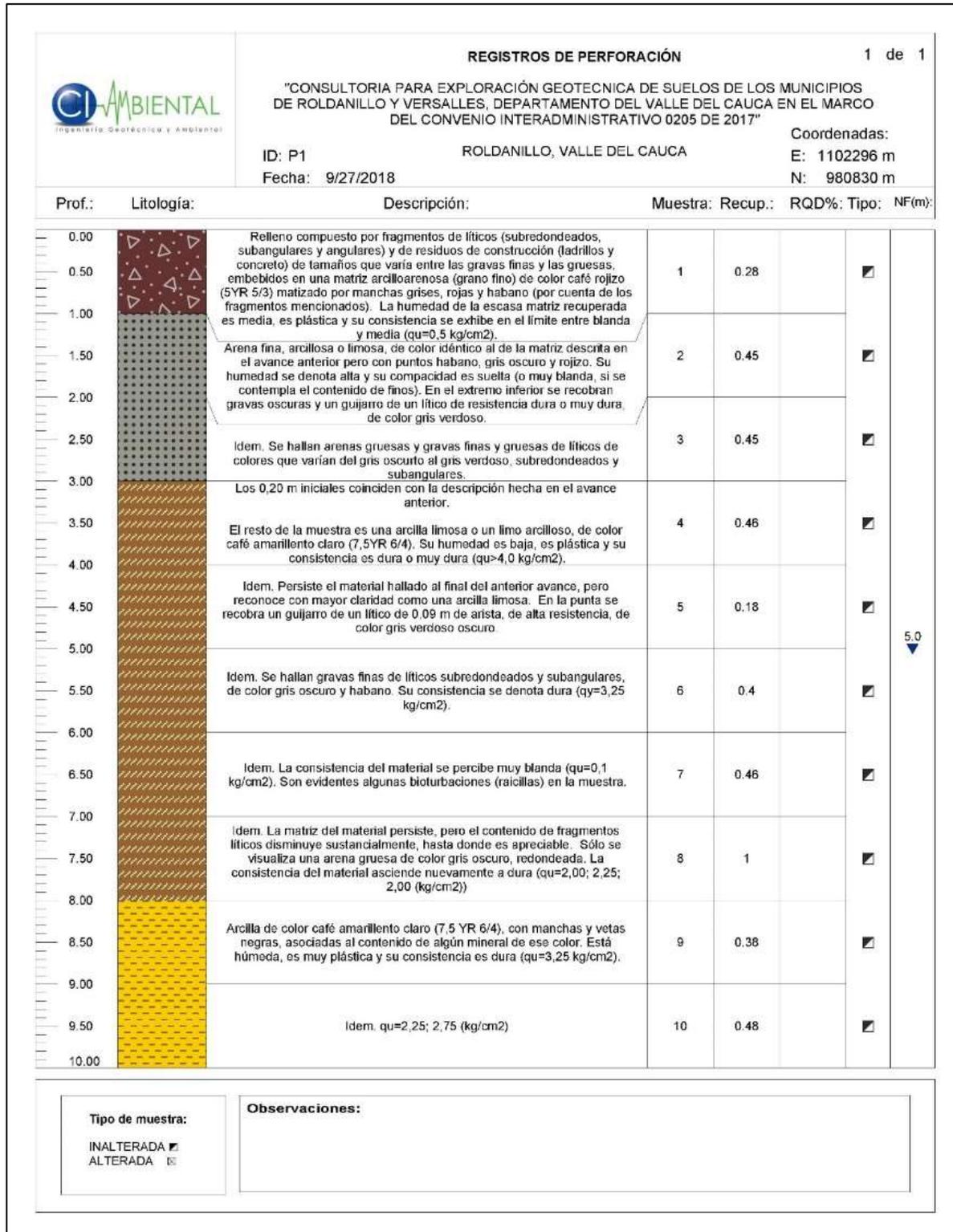
El primer estrato corresponde a un relleno compuesto por fragmentos de líticos y de residuos de construcción de tamaños que varían entre gravas finas y las gruesas, embebidos en una matriz arcilloarenosa de color café rojizo matizado por manchas grises, rojas y habano. Que se extiende desde la superficie hasta una profundidad de 1 m.

El segundo estrato se extiende desde los 1 m hasta los 3.0 m, corresponde a arena fina, arcillosa o limosa, de color café rojizo matizado por manchas grises, rojas y habano, pero con puntos gris oscuro y rojizo.

El tercer estrato se extiende desde los 3.0 m de profundidad hasta los 8 m aproximadamente, los primeros 0,20 m iniciales corresponde a la descripción anterior.

El resto de la muestra corresponde a una arcilla limosa o un limo arcilloso, de color café amarillento claro, su humedad es baja, de los 4 m a los 5 m persiste la arcilla limosa o un limo arcilloso, pero se distingue con mayor claridad como una arcilla limosa, ente los 5 m y los 6 m, se hallan gravas finas de líticos subredondeados y subangulares, de color gris oscuro y habano. Con consistencia dura. De los 6 m a los 7 m, la consistencia de la materia se percibe blanda con evidencia de algunas raíces, entre los 7 m y los 8 m, la matriz del material persiste, pero el contenido lítico disminuye, se visualiza una arena gruesa de color gris oscuro, la consistencia es dura.

El cuarto y último estrato descrito en este perfil corresponde a una arcilla de color café amarillento claro con manchas y vetas negras, asociadas al contenido de algún material de ese color. Su consistencia es dura.



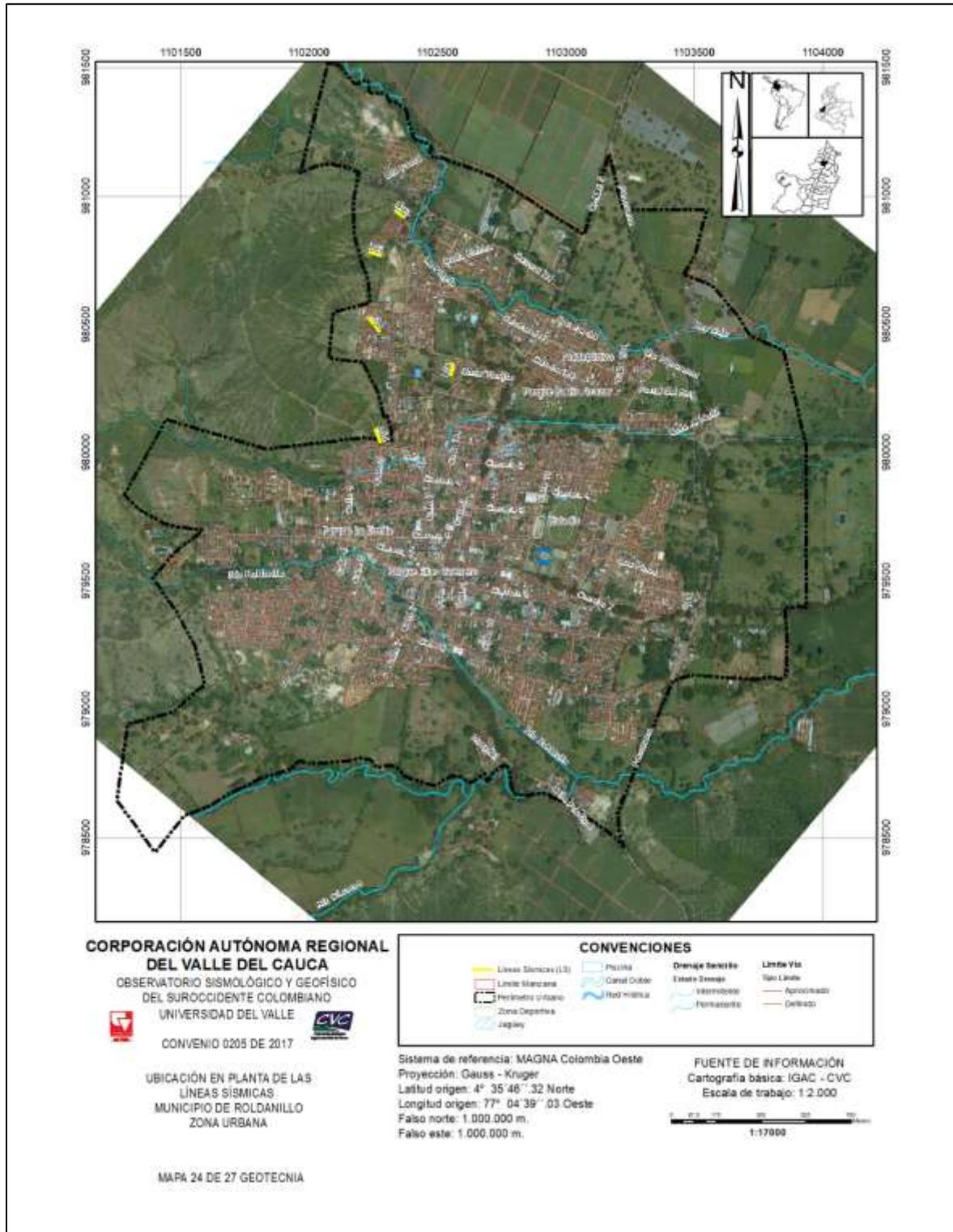
**Figura 7.6.** Perfil estratigráfico establecido P-1.  
Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2.3 *Líneas de refracción sísmica*

Este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas, tanto de compresión (ondas P) como de corte (ondas S), desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos) situados a lo largo de una línea de adquisición. Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio. A partir de los valores de velocidad se puede obtener un modelo del subsuelo compuesto por capas de velocidad constante y espesor variable. Este método es muy útil para determinar, de manera indirecta, la estratigrafía del subsuelo.

La conformación del subsuelo por este método se validó con las perforaciones realizadas en el sector, con el fin de obtener un modelo geológico-geotécnico ajustado a las condiciones de campo. Las líneas sísmicas permiten cubrir mayor área que por medio de perforaciones, por lo tanto, su empleo resulta óptimo para poder interpolar lo identificado en sitios específicos.

En total se realizaron cinco (5) líneas sísmicas de 60 m de longitud cada una, ubicadas de forma tal que cubrieran la mayor parte del área de interés y obteniendo alcances entre 5 a 30 m de profundidad, permitiendo así identificar características de los suelos aflorantes en el sector de estudio y aportar datos para la determinación de las propiedades geomecánicas de los materiales relevantes para los análisis y modelos de estabilidad. Estas se realizaron en zonas donde existía espacio suficiente para su realización. En la Figura 7.7, se presenta la ubicación de las líneas realizadas dentro del área de estudio y en la Tabla 7.3. Se presentan las coordenadas de localización de las mismas.



**Figura 7.7.** Localización de las líneas de refracción sísmica, realizadas en el municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.3.** Ubicación de las líneas de refracción sísmica realizadas para el presente estudio

COORDENADAS REFRACCIONES SÍSMICAS				
CÓDIGO	VÉRTICE	LONGITUD	LATITUD	PROFUNDIDAD
LS1	LS1_Inicial	1102550	980284	> (6.20)(11.60)
LS1	LS1_Final	1102563	980338	
LS2	LS2_Inicial	1102274	980772	> (2.10)(6.30)
LS2	LS2_Final	1102218	980785	
LS3	LS3_Inicial	1102388	980918	> (3.50)(7.20)
LS3	LS3_Final	1102335	980948	
LS4	LS4_Inicial	1102225	980529	> (3.60)(5.50)
LS4	LS4_Final	1102262	980483	
LS5	LS5_Inicial	1102273	980033	> (6.90)(7.70)
LS5	LS5_Final	1102259	980088	

**Fuente:** Elaboración propia.

El proceso de toma de datos en campo se realizó con el sismógrafo de 12 canales RAS-24 ( Figura 7.8 y Figura 7.9), con arreglos de 12 canales, los cuales se separaron cada 5.0 m, cubriendo en total una longitud de exploración de 60 m por línea.



**Figura 7.8.** Sismógrafo Seistronix RAS-24.

**Fuente:** fotografía propia.

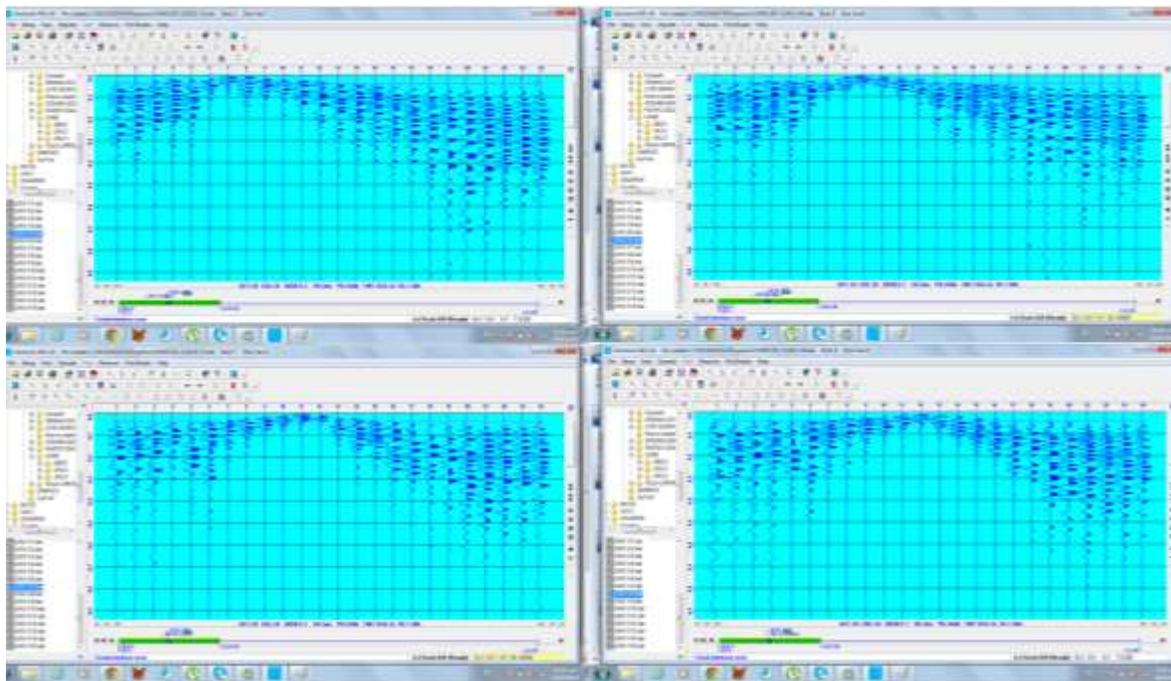


**Figura 7.9.** Realización en campo de una línea de refracción sísmica (LS) en el municipio de Roldanillo.

**Fuente:** fotografía propia.

El método de adquisición de datos depende de un impacto en superficie, realizado con un martillo de 20 lb, el cual es golpeado contra una placa de acero; seguidamente, mediante un sensor (Hammerswitch), manda un impulso electromagnético al equipo, el cual activa el registro de señales vibratorias de cada uno de los geófonos a profundidad durante un tiempo de lectura definido al inicio de las mediciones. El sistema cuenta con una unidad de control, geófonos verticales y horizontales (ondas P y ondas S respectivamente), un martillo, el Hammerswitch y algunos otros accesorios necesarios para el buen funcionamiento del sistema.

Para el almacenamiento de los datos, el equipo utiliza el software RAS-24 (propio del sismógrafo Seistronix RAS-24), donde los datos de entrada de configuración son el Sample Rate, el número de golpes, la ganancia, el tiempo de lectura y la sensibilidad del Trigger, además de las posiciones del primer geófono del arreglo y el punto de golpeo. En la Figura 7.10, se presenta un mosaico de los datos registrados por medio del software RAS-24, durante la medición de las ondas S para la línea LS-2.



**Figura 7.10.** Ilustración típica de la captura de datos en campo mediante el software RAS-24 correspondiente a la ejecución de la línea de refracción LS-2 para ondas S.

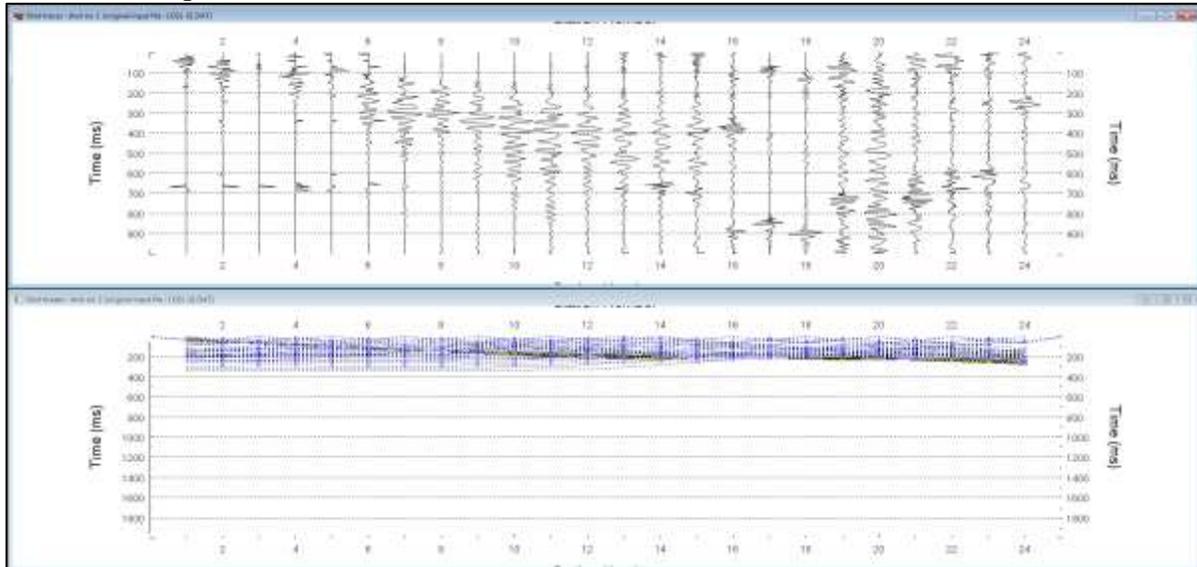
**Fuente:** Elaboración propia.

Posterior a la adquisición de datos se hace uso del software Seisview, el cual toma los datos recolectados por el equipo RAS-24, identifica los timebreaks, es decir, el tiempo que toma la onda de impacto en llegar a cada uno de los geófonos del arreglo, y a partir de interpolaciones genera tomografías del suelo, con las que, posterior a un análisis de velocidades, facilitan la determinación de espesores de los diversos estratos del suelo.

Mediante el software Seisview, se identifican los primeros puntos de llegada de la onda a cada uno de los geófonos para cada golpe, dichos puntos de llegada son utilizados para un análisis matemático de cada una de las líneas, mediante el uso de la metodología propuesta por el Explosive Excavation

Research Laboratory Livermore de California, en el documento “Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations”.

En la Figura 7.11, se presenta una imagen del análisis realizado mediante el software Seisview para la línea sísmica, para las Ondas S.

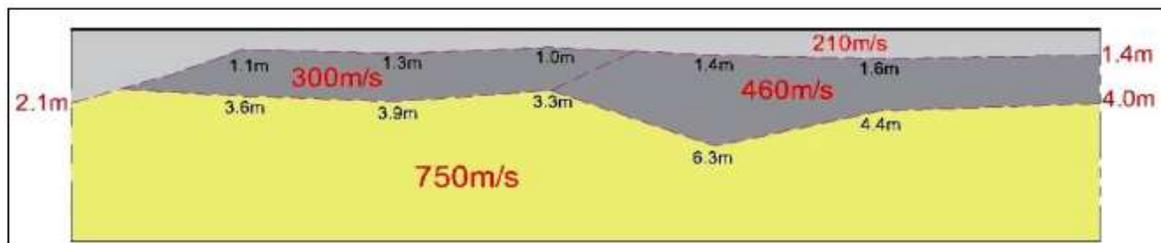


**Figura 7.11.** Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Seisview correspondiente a la línea de refracción, para ondas S.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa en las figuras anteriores como la onda de impacto en superficie, generada en diferentes puntos del arreglo, se dispersa a diferentes velocidades de onda a lo largo de los estratos del suelo, y cada uno de los geófonos recibe su señal entrando en resonancia con la amplitud y frecuencia de dichas ondas.

A partir del análisis de las dromócronas se determinan las diferentes pendientes que indican finalmente las velocidades características de cada uno de los estratos. Se observa en dichas dromócronas que a medida que se aumenta la distancia desde el punto de golpeo, se presentan cambios de pendientes menores, lo que se traduce en mayores velocidades a profundidad, ya que se debe recordar que a medida que la onda se aleja del punto de golpeo, los geófonos reciben la señal a mayor profundidad. En la Figura 7.12, se presenta la imagen de la Tomografía del Terreno, Velocidades de Onda Plana ( $V_s$ ), LS-2.



**Figura 7.12.** Tomografía del Terreno, Velocidades de Onda Plana ( $V_s$ ), LS-2

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Tabla 7.4 se presentan las velocidades calculadas para cada uno de los puntos de golpeo. A partir de dichas velocidades y en comparación con las tomografías del terreno, se determinan los espesores de cada estrato, relacionados con sus velocidades de transmisión de Ondas S.

**Tabla 7.4.** Estratos, velocidades y espesores identificados en cada una de las líneas sísmicas realizadas en el área de estudio.

LINEAS	ESTRATOS	VELOCIDADES [m/s]	PROFUNDIDAD [m]
		V <sub>s</sub>	
LS1	1	250	2.9
	2	510	11.6
	3	1110	>11.6
LS2	1	210	2.1
	2	300 - 460	6.3
	3	750	>6.3
LS3	1	300	2
	2	700 - 1100	7.2
	3	1410	>7.2
LS-4	1	230	2
	2	500	5.5
	3	960	>5.5
LS5	1	350 - 610	3.5
	2	1100	7.7
	3	1690	>7.7

**Fuente:** Elaboración propia.

### 7.2.3 Ensayos de laboratorio

El plan de ensayos de laboratorio tuvo por objeto la caracterización geomecánica de los materiales que componen el subsuelo bajo el área de estudio, para lo cual se llevaron a cabo ensayos de clasificación y de resistencia. Dentro de los ensayos de clasificación de suelos se realizaron humedad natural, límites de consistencia, granulometría y peso unitario.

En la (Tabla 7.5), se presentan el tipo y número de ensayos realizados para la caracterización de los materiales recuperados en el proceso de exploración geotécnica. En la (Tabla 7.6) se reportan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados.

**Tabla 7.5.** Ensayos de laboratorio realizados para el presente estudio.

Ensayo de Laboratorio	Cantidad
Contenido de humedad	27
Límites de consistencia (LL y LP)	27
Peso unitario	13
Granulometría por tamizado	17
Consolidación	8
Corte directo	13

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.6.** Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración

ID. EXPLORACION	Id. MUESTRA	PROFUNDIDAD [m]		PESO UNITARIO HÚMEDO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	HUMEDAD (%)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	GRANULOMETRÍA			CLASIFICACIÓN USCS	CORTE DIRECTO		CONSOLIDACIÓN							EXPANSIÓN LIBRE (%)	PRESIÓN DE EXPANSIÓN LIBRE (Kg/cm <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN		
		DESDE	HASTA							% DE GRAVAS	% DE ARENAS	% DE FINOS		ÁNGULO DE FRICCIÓN PICO f (°)	COHESIÓN PICO (kPa)	G <sub>s</sub>	e <sub>0</sub>	Esf. Efec. Inicial (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esf. Preconsolid. (Kg/cm <sup>2</sup> )	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>	R S C					
P-1	M <sub>6</sub>	5,00	6,00			25,3	40,6	24,4	16,2	14,80	25,00	60,20	CL														Arcilla habano claro
P-1	M <sub>8A</sub>	7,00	8,00			42,1	57,7	26,8	30,9				CH														Arcilla color habano oscuro
P-1	M <sub>9</sub>	8,00	9,00	1,85	1,38	32,5	65,9	31,0	34,9	0,90	6,70	92,40	CH	22,1	22,0	2,69	0,951	0,30	2,00	0,262	0,000	6,67	1,10	0,40		Arcilla habano claro	
P-2	M <sub>4</sub>	2,50	4,00			29,9	53,3	22,7	30,6				CH														Arcilla de color café claro
P-2	M <sub>5A</sub>	4,00	5,50	1,79	1,34	33,1	68,7	24,6	44,1	0,90	10,30	88,80	CH			2,70	1,022	0,85	1,20	0,283	0,04	1,411	0,89	0,5		Arcilla habano claro	
P-2	M <sub>6B</sub>	6,50	8,00	1,82	1,32	29,4	61,5	24,9	36,6	5,30	9,40	85,30	CH	24,5	24,0	2,69	1,042							1,68			Arcilla habano claro
P-4	M <sub>3</sub>	1,00	2,50			29,0	39,6	15,6	24,0				CL														Arcilla limosa de color café verdoso
P-4	M <sub>4</sub>	2,50	4,00			25,7	40,2	20,3	19,9	0,80	10,10	89,10	CL														Arcilla café verdoso
P-5	M <sub>2</sub>	1,00	2,00			23,6	25,0	22,0	3,0				ML u OL														Limo arenoso de





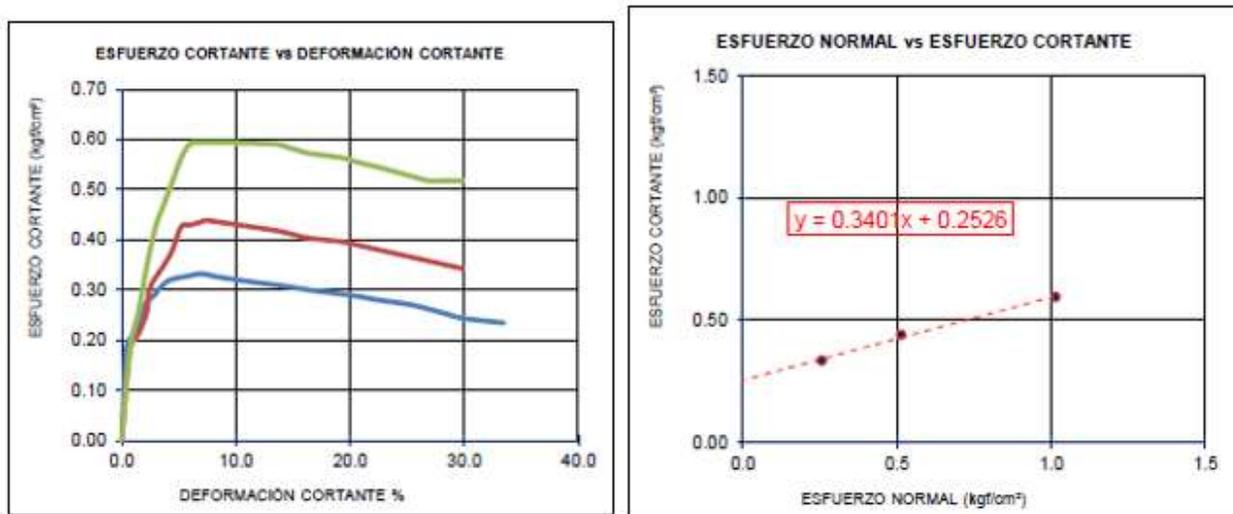
Id. EXPLORACION	Id. MUESTRA	PROFUNDIDAD [m]		PESO UNITARIO HÚMEDO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	HUMEDAD (%)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	GRANULOMETRÍA			CLASIFICACIÓN USCS	CORTE DIRECTO		CONSOLIDACIÓN						EXPANSIÓN LIBRE (%)	PRESIÓN DE EXPANSIÓN LIBRE (Kg/cm <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN		
		DESDE	HASTA							% DE GRAVAS	% DE ARENAS	% DE FINOS		ÁNGULO DE FRICCIÓN PICO f (°)	COHESIÓN PICO (kPa)	G <sub>s</sub>	e <sub>0</sub>	Esf. Efec. Inicial (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esf. Preconsolid. (Kg/cm <sup>2</sup> )	C <sub>c</sub>	Cr				R S C	
																										gris verdoso
AP-20		0,00	2,00	1,71	1,23	38,7	80,5	33,4	47,1	1,3	14,5	84,2	CH	18,2	48,0	2,69	1,171	0,19	2,00	0,481	0,043	10,6 33	1,21	0,50	Arcilla limosa café oscuro	
AP-21		0,00	2,00	1,65	1,50	10,2	20,3	12,6	7,7	3,2	45,6	51,2	CL	30,7	6,9											Arcilla arenosa café claro
AP-23		0,00	2,00	1,68	1,29	18,4	49,5	25,5	24,0	4,6	19,9	75,5	CL	19,7	32,0	2,69	1,084									Arcilla limosa algo arenosa café claro
AP-24		0,00	2,00			17,9	38,8	28,3	10,5				ML													Limo café algo rojizo

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.2.4 Ensayos de corte directo

Con el ánimo de estimar los parámetros de resistencia al corte de los materiales, se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras de suelo, recuperadas en las perforaciones y apiques realizados. Este ensayo se realizó para condiciones pico, lo que permitió obtener una envolvente residual para así estimar los parámetros de resistencia en estado crítico. Se realizaron sobre muestras de suelo a nivel superficial y profundo (2 a 10 metros de profundidad), incluyendo la estimación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción interna). Este ensayo se realizó para tres niveles de esfuerzos, cada uno a través de tres etapas: saturación, consolidación y falla.

Los resultados de los ensayos se relacionan en la Figura 7.13, se presentan los resultados de uno de los cortes realizados.



**Figura 7.13.** Gráficas esfuerzo-deformación pico obtenidas del ensayo de corte directo sobre la Muestra M4 de la Perforación P-06.

**Fuente:** Elaboración propia.

Los esfuerzos axiales aplicados en este ensayo se encuentran en el anexo 4, (ensayos de laboratorio).

#### 7.2.5 Ensayos de consolidación

Para el ensayo de consolidación de suelos es necesario determinar no solo el tiempo en el cual se produce la consolidación si no también la magnitud del asentamiento que tendrá lugar debido a la deformación del suelo, para esto se realiza la prueba de consolidación, la cual consiste en someter a un esfuerzo de comprensión axial a una muestra inalterada del suelo en estudio. La muestra deberá ser inalterada, ya que la consolidación depende de la estructura del suelo (Becerra et al, 2015).

### **7.3 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS**

La (Tabla 7.7), resume las propiedades geotécnicas establecidas para cada uno de los materiales identificados en la zona de estudio, apoyados en la cartografía de las Unidades Geológicas Superficiales-UGS y los resultados de la exploración del subsuelo y de los ensayos de laboratorio practicados, expuestos en los numerales previos. En ella se discretizan las propiedades en función de su profundidad y UGS, dando valores promedios en cuanto a su clasificación, características básicas y resistencia.

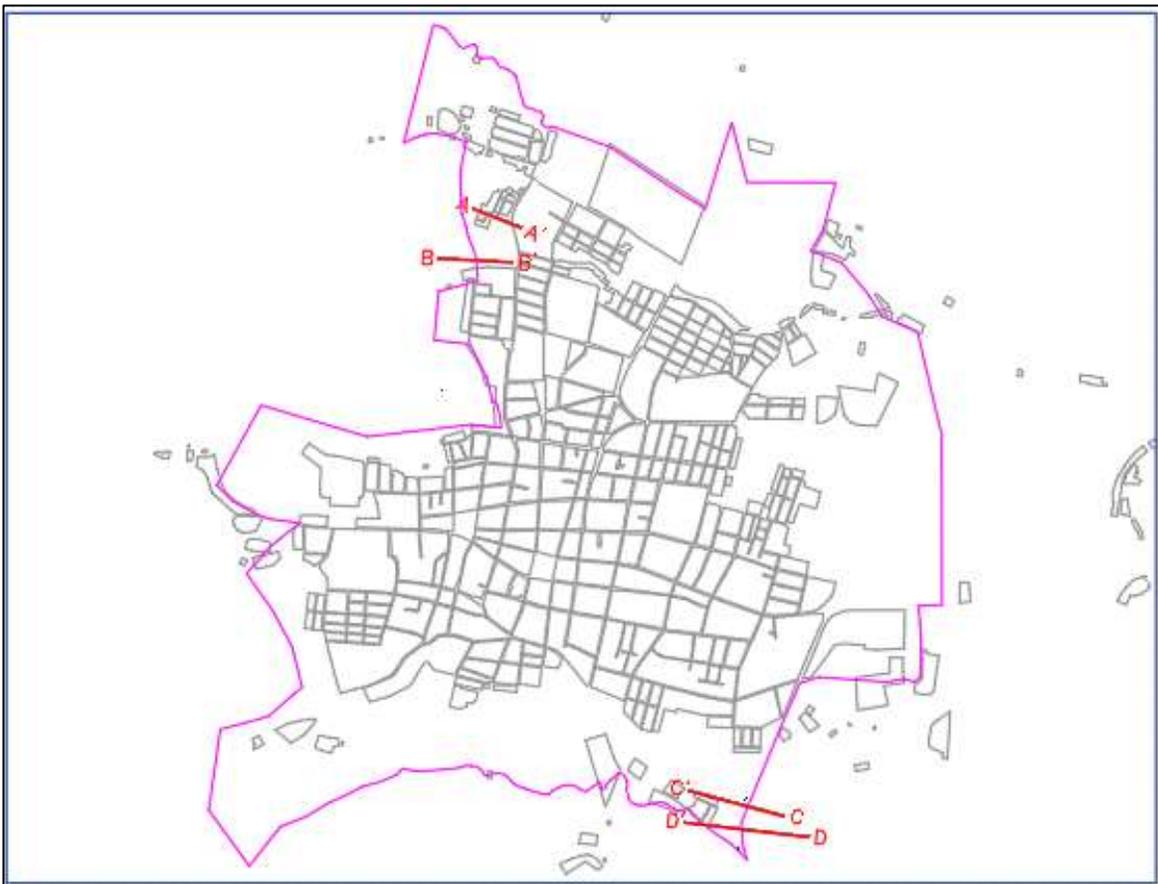
**Tabla 7.7.** Resumen de los parámetros geotécnicos establecidos para los materiales presentes en la zona de estudio

MATERIAL	APIQUE	DESCRIPCIÓN	UGS	W	LL	LP	IP	US CS	%GR AVA	%AR ENA	%FI NOS	PESO UNITA RIO (g/cm <sup>3</sup> )	CONSOLIDACIÓN					CORTE PICO	
	PERF.												e	GS	OCR	CC	CS	C (KPa)	FI (°)
9	P1	Arcilla habano claro	Sa	32,5	65,9	31,0	34,9	CH	0,90	6,70	92,40	2,23	0,951	2,69	6,67	0,262	0	22	22,1
6	P2	Arcilla habano claro	Star	33,1	68,7	24,6	44,1	CH	0,90	10,30	88,80	1,79	1,042	2,69	1,411	0,283	0,047	24,0	24,5
4	P6	Arcilla limosa color carmelito claro verdoso	Stct	18,4	28,4	15,4	13,0	CL	6,60	15,70	77,80	1,77	0,831	2,68	2,098	0,259	0,031	25,0	18,8
	AP-5	Arcilla limosa color amarillo quemado	Stat	26,3	48,6	27,7	20,9	CL	15,80	30,30	53,80	1,74	0,898	2,69	11,214	0,423	0,025	20,1	32,0
	AP-7	Limo arcilloso carmelito verdoso	Sale	15,6	38,7	26,2	12,5	ML	3,40	23,9	72,6	1,77	0,751	2,68				58	24,1
	AP-8	Arcilla limo arenosa café claro	Saj	8,9	31,7	20,2	11,5	CL	0,20	30,80	69,10	1,58	0,811	2,60	-	-	-	11,0	23,9
	AP-10	Limo arcilloso color carmelito oscuro con raíces	Stco	41,1	54,6	36,0	18,6	MH	1,30	25,10	73,60	1,73	1,146	2,62	6,606	0,294	0,018	22,0	23,4
	AP20	Arcilla limosa café oscuro	Sar	38,7	80,5	33,4	47,1	CH	1,3	14,5	84,2	1,71	1,171	2,69	10,633	0,481	0,043	48,0	18,2
	AP21	Arcilla arenosa café claro	Stc	10,2	20,3	12,6	7,7	CL	3,2	45,6	51,2	1,65	-	-	-	-	-	6,9	30,7
	AP23	Limo arcilloso color café oscuro	Staa	18,4	49,5	25,5	24	CL	4,6	19,9	75,5	1,53	1,114	2,69	2,345	0,355	0,030	31,4	19,7

**Fuente:** Elaboración propia a partir de los ensayos de laboratorio

## 7.4 MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Bajo los lineamientos anteriores y con el fin de realizar la evaluación de estabilidad, se establecieron cuatro (4) secciones o modelos geológico-geotécnicos de análisis, representativos de la condición actual del terreno y cuya localización se muestra sobre el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (Figura 7.14). Tales secciones fueron definidas de tal manera que atravesaran las zonas UGS definidas previamente, y que adicionalmente atravesaran los cuerpos inestables, con el fin de modelar los mecanismos de falla presentes, así como calibrar los resultados de los análisis. Para la generación de estas secciones se tuvo en cuenta la información topográfica, la cartografía geológica y geomorfológica y los registros estratigráficos de las perforaciones y apiques, líneas de refracción sísmica y parámetros geotécnicos, entre otros.



**Figura 7.14.** Ubicación Secciones de Análisis Municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia.

A manera de ilustración, se presenta en la (Figura 7.15) la sección BB', localizada en la parte sur del área de estudio y que cubre la zona desde la parte alta a la parte baja donde se localiza el área afectada.

De esta manera, los modelos representan, en promedio, las zonas homogéneas presentes en el área de estudio, de condiciones y comportamientos geológicos y geomecánicos similares, con dinámicas de movimientos característicos en cada uno de ellos. Por consiguiente, se asume que el grado de estabilidad de esta sección (o sus partes) es atribuible a la región geomorfológica a la que pertenece. Lo anterior, se constituye en la hipótesis de trabajo para los análisis de estabilidad que se presentan a continuación.

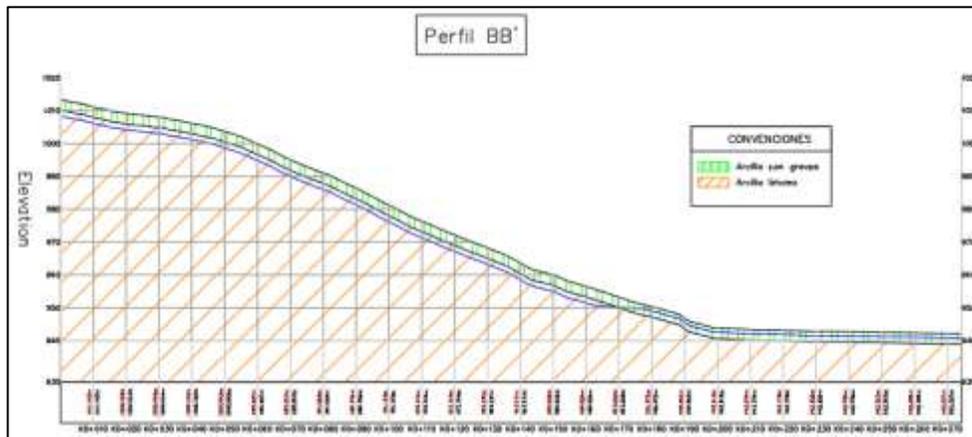


Figura 7.15. Perfil Sección de análisis.

Fuente: Elaboración propia.

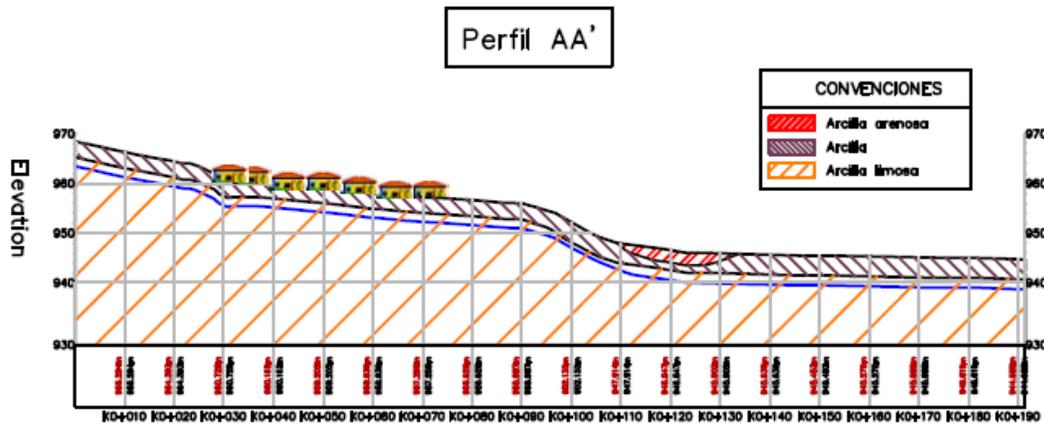
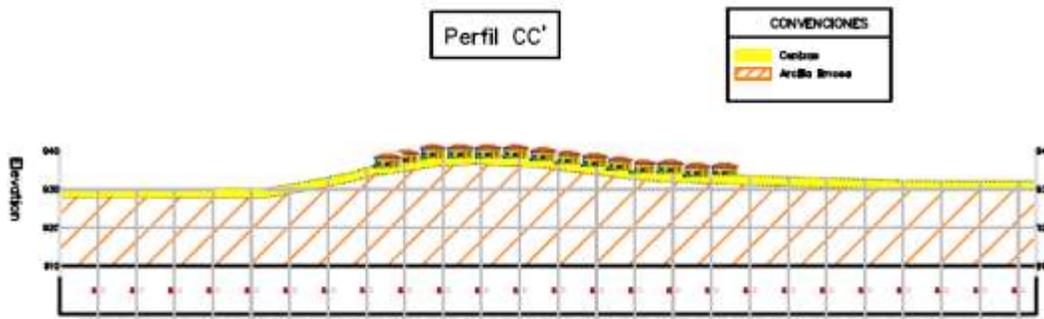


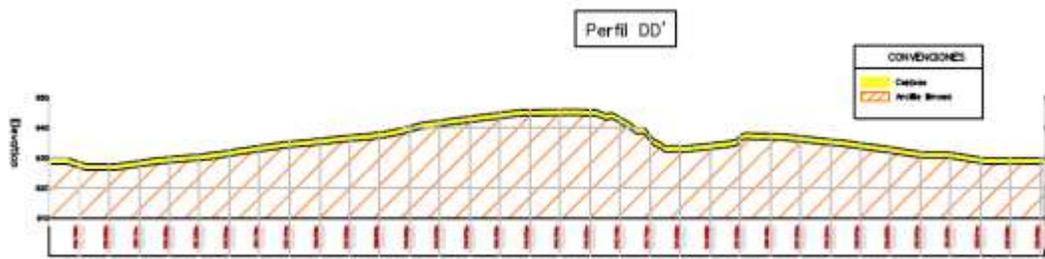
Figura 7.16. Perfil Sección de análisis AA'.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.17.** Perfil Sección de análisis CC'.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 7.18.** Perfil Sección de análisis DD'.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 7.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se enfocan al estudio de los modos y posibilidades de movimientos a lo largo de los planos de debilidad estructural, en los sectores donde hay suelos transportados, lo que abarca la mayor parte de la zona de estudio, así como en los mecanismos de movilización de los depósitos cuaternarios recientes y suelos residuales arcillosos.

Posteriormente, se aborda el modelamiento de los mecanismos de falla, con ayuda de los métodos de equilibrio límite, de la respuesta estática y pseudoestática de los estados probables de movilización (según su geometría, el tipo de material, su disposición estratigráfica y condiciones de drenaje), tanto de los principales cuerpos del cuaternario como de los materiales rocosos, a través de deslizamientos rotacionales, traslacionales y planares infinitos, y a la deducción, a partir de los factores de seguridad y de la probabilidad condicional de falla, de los diferentes niveles de amenaza para los estados actual y futuro.

## 7.6 METODOLOGÍA

Una vez identificados los mecanismos de falla (traslacional, caída y rotacional), y realizada la respectiva caracterización geotécnica, se definieron y construyeron los perfiles geológico-geotécnicos, con el fin de realizar los respectivos análisis de estabilidad (modelación

numérica). Para efectos de evaluar la estabilidad de los diferentes sectores se procedió a realizar los análisis de la siguiente manera, en función del factor de seguridad y la probabilidad de falla:

- Análisis de estabilidad en depósitos coluviales arcillosos sobre suelos residuales y transportados
- Análisis de estabilidad del material superficial alterado, suelto y fracturado (suelo residual y transportados).

Por lo anterior, se procedió a analizar el espectro de posibilidades que se pueden obtener variando los parámetros de resistencia de los materiales y el nivel de intensidad de los agentes detonantes considerados (lluvia y sismo). De esta manera, los análisis de estabilidad en términos de probabilidad de falla se tornan más representativos que el reporte de un factor de seguridad, el cual es el simbolismo numérico de uno de los múltiples eventos factibles. Sin embargo, la deducción de la probabilidad de falla implica conocer la distribución estadística del factor de seguridad (González, 1999), específicamente la de sus dos primeros momentos:  $\mu_{FS}$  y  $\sigma_{FS}$ , es decir, la media y la desviación estándar. La solución a la relación predictiva entre estas dos variables ( $P_f$  y  $FS$ ) y la obtención de ellas, se plantea aquí con el empleo de métodos aproximados, específicamente mediante el método de Montecarlo.

En este orden de ideas, la probabilidad de ocurrencia de un evento particular ( $MM$ ) se evalúa en términos de sus eventos condicionantes, a través de la ley de probabilidades totales, de tal manera que la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento está definida por la siguiente ecuación:

$$p(D) = P(D/LS)p(LS) + P(D/L\bar{S})p(L\bar{S}) + P(D/\bar{L}S)p(\bar{L}S) + P(D/\bar{L}\bar{S})p(\bar{L}\bar{S})$$

Dicha probabilidad, como lo expresan sus términos, es función de las probabilidades condicionales de presentarse el deslizamiento para todas las posibles combinaciones de precipitación y sismo, así:

- $p(D)$ : Es la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento  
 $p(D/LS)$ : Es la probabilidad condicional de que se produzca el deslizamiento, dado que haya lluvia y sismo.  
 $p(LS)$ : Es la probabilidad de que se presenten la lluvia y el sismo simultáneamente  
 $p(D/\bar{L}S)$ : Es la probabilidad condicional de que ocurra el deslizamiento dado que se presente el sismo y que no tenga lugar la lluvia  
 $p(\bar{L}S)$ : Es la probabilidad de que haya lluvia y no se produzca el sismo.  
 $p(D/\bar{L}\bar{S})$ : Es la probabilidad condicional de que ocurra el deslizamiento dado que no haya lluvia ni sismo  
 $p(L\bar{S})$ : Es la probabilidad de no tenga lugar ni el sismo ni la lluvia

Con el fin de evaluar la probabilidad de falla del talud, es necesario entrar a evaluar los agentes que pueden afectar la estabilidad de la ladera. Para el desarrollo de este tema se requiere el tratamiento previo de cuatro hipótesis:

- Parámetros de resistencia efectivos para cada material.

- Mecanismo de falla.
- Método de análisis.
- Agentes detonantes.

Es importante destacar que la segunda y tercera hipótesis se consideran unidades determinísticas, debido a que son invariables, mientras que la primera y la cuarta están regidas por los principios de la incertidumbre, bien sea por la variabilidad espacial de los parámetros de resistencia o bien por la variabilidad temporal de los agentes detonantes, por lo que se les asignan distribuciones de probabilidad, las cuales se explican a continuación.

## 7.7 MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis utilizados están basados en la teoría de equilibrio límite. Adicionalmente se utilizó como modelo constitutivo el criterio de resistencia de Mohr – Coulomb para suelos. Para efectos de cálculo, se utilizó el programa SLIDE para modelar los movimientos con mecanismo de falla rotacional – traslacional. Adicionalmente se utilizó una rutina sobre MATLAB para el análisis de talud infinito.

Bajo los lineamientos anteriores y con el fin de adelantar la tarea de evaluación de estabilidad para la condición actual y futura, se utilizaron las secciones o modelos geológicos-geotécnicos.

## 7.8 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Para la obtención de los parámetros geomecánicos que fueron asignados a los diferentes materiales, se utilizaron los resultados de los trabajos cartográficos de campo y del plan de ensayos de laboratorio (ver Tabla 7.5) realizados sobre muestras inalteradas, ejecutados en el área de estudio

En particular, en lo que respecta a los parámetros de resistencia, los ensayos consistieron en pruebas cortes directos y estáticos consolidados no drenado midiendo presión de poros, las cuales son pruebas representativas para la obtención de los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos.

El resumen de los parámetros de resistencia asignados a los diferentes materiales presentes en el subsuelo de la zona de estudio se ilustra en la (Tabla 7.8).

**Tabla 7.8.** Parámetros de resistencia para los diferentes materiales presentes en la zona

UNIDAD	C (Kpa)	$\Phi$ (°)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )
Rd	19613	48	26,5
Sa	22	22	18,5
Saj	24	11	15,8
Sale	58	24	17,7
Sar	48	18	17,1
Staa	31	20	15,3
Star	24	25	18,2
Stat	32	20	17,4

UNIDAD	C (Kpa)	$\Phi$ (°)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )
Stc	7	31	16,5
Stco	22	23	17,3
Stct	25	19	17,7

**Fuente:** Elaboración propia.

## 7.9 AGENTES DETONANTES

Dentro de los agentes detonantes que pueden afectar la estabilidad de las laderas en el área de estudio, se consideraron los eventos sísmicos y la presencia de agua en el subsuelo.

## 7.10 ASPECTOS SISMOLÓGICOS

“Los sismos pueden producir, además de movimiento vibratorio característico, una serie de efectos inducidos que dan lugar a grandes deformaciones y roturas en el terreno, entre estos encontramos los deslizamientos y desprendimientos de rocas. Éstos se relacionan con el comportamiento geológico y geotécnico del terreno” (Villalta y González, 2011 p 7). Los movimientos de laderas no sólo dependen del sismo para su generación, sino que requiere que la intensidad sea alta para que estos deslizamientos y desprendimientos tengan lugar.

“La región occidental de Suramérica se encuentra dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico; una compleja franja de fosas tectónicas, en donde las mayores placas de la corteza terrestre interactúan mediante procesos de expansión y colisión, originando terremotos y erupciones volcánicas” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009). “Por su ubicación en la esquina noroccidental de Suramérica, e territorio colombiano ha estado sometido desde el pasado geológico a grandes esfuerzos dirigidos en diferentes direcciones por el efecto de la convergencia de tres placas tectónicas: la placa oceánica del Caribe al norte, la placa oceánica de Nazca al oeste y la placa continental Suramericana localizada al este de la anterior” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009).

“La placa Nazca subduce bajo la placa Suramericana a lo largo de la Costa Pacífica colombiana. Teniendo asociado a este movimiento sismos de considerable magnitud que han generado efectos devastadores a lo largo de la historia. Se ha estimado que la velocidad del desplazamiento de esta placa es de aproximadamente 69 mm/año en dirección este” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009).

Según la Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia realizado por el Servicio Geológico Colombiano-SGC y la Universidad Nacional de Colombia (2010), se estima para el municipio de Roldanillo, una aceleración máxima horizontal a nivel de roca de 130 cm/seg<sup>2</sup>, valor que es producto de un modelo probabilístico correspondiente a un período de retorno de 475, es decir, para una probabilidad de excedencia de 10% en un tiempo de exposición de 50 años.

Considerando los anteriores resultados, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Ministerio de Ambiente, Cuidad y Territorio) (2010), localiza a Roldanillo en zona de amenaza sísmica alta, asignándole un coeficiente de aceleración pico

efectiva (Aa) de 0.25g a nivel de roca. Por otro lado, el Título H de la NSR-10, establece los coeficientes sísmicos pseudoestáticos (Kst), el cual específicamente para la zona de estudio es de 1.0.

### 7.10.1 Sismos

La región andina colombiana se encuentra determinada por fallas geológicas y de sismos, por el proceso de convergencia de dos grandes placas tectónicas, la de Nazca (oceánica) y la de Suramérica. Entre estas dos, el llamado "Bloque Norandino" (entre la Zona de Subducción frente al Litoral Pacífico y el Piedemonte de la Cordillera Oriental), se ha desarrollado como una microplaca, con movimiento en dirección hacia el NNE. Dentro del esquema de esfuerzos regionales producidos por la fricción entre estas placas, se destacan tres tipos de fuentes sísmicas de importancia para la región del Valle del Cauca.

a) La "Zona de Subducción", cuya traza superficial corre a unos 150 - 200 km paralela a la Costa Pacífica. Es la más importante de las fuentes sísmicas en Colombia, en términos de las magnitudes máximas y recurrencias de sismos grandes, con magnitudes mayores de 8.0. Su sismicidad es superficial, hasta profundidades de 40 km aproximadamente.

b) Sismicidad de la "Zona de Wadati-Benioff", la parte profunda del plano de fricción entre las placas que convergen (o sea la continuación de la Zona de Subducción). La sismicidad de esta fuente es la más profunda de la región, hasta más de 100 km. Se concentra en la parte norte del Valle del Cauca.

c) Sismicidad tipo "intraplaca". A esta categoría pertenecen fallas como las del sistema Romeral, Cauca y aunque la Falla Frontal del Borde Llanero (que separa la placa Suramérica del Bloque Norandino).

- **Falla Roldanillo**

Desplazamiento y deformación Horizontal: para la falla Roldanillo, se establece que al momento de la liberación de energía durante un sismo de magnitud  $M_w = 6,5$ , valor considerado como su magnitud máxima posible (Aspden et al., 1985, en INGEOMINAS, 2001), los desplazamientos horizontales que en ella se experimentarían serían de comportamiento compresivo, con vectores de desplazamiento lateral también cercanos a un metro en inmediaciones de la zona de falla y los esfuerzos convergen. En este caso, el trazo de la falla generaría una deformación en sentido lateral hacia el primer y tercer cuadrante. (Pérez, Salcedo y Mora. 2014).

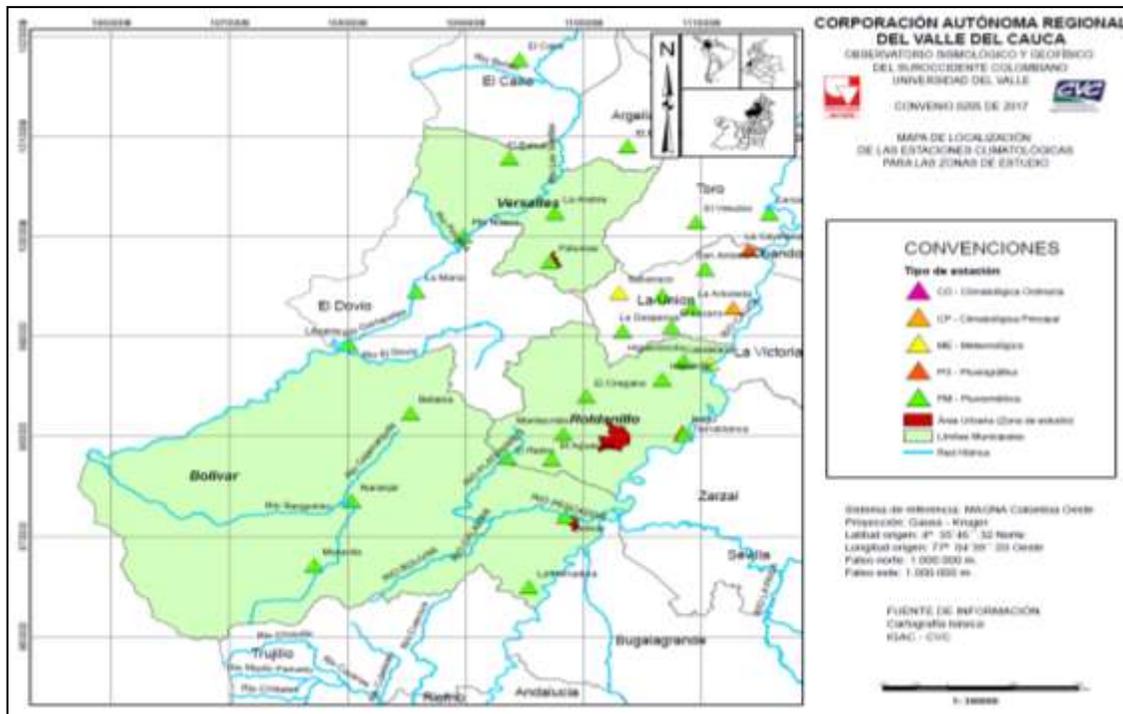
Considerando los anteriores resultados, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, localiza a Roldanillo en zona de amenaza sísmica alta, asignándole un coeficiente de aceleración pico efectiva (Aa) de 0,25g a nivel de roca. Por otro lado, en el Título H (NSR-10), establece los coeficientes sísmicos pseudoestáticos (Kst), el cual específicamente para la zona de estudio es de 1,0.

Por lo tanto, la aceleración horizontal a involucrar en los análisis pseudo-estáticos de estabilidad se estima en 0.25, para el escenario futuro (periodo de retorno de 475 años que corresponde a condiciones extremas).

## 7.11 RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

El análisis del clima como factor de gran incidencia en los procesos que se presentan en el medio natural, se realizó a partir de la información disponible en las estaciones que conforman la red climatológica de la Corporación Regional del Valle del Cauca - CVC y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM; que se localizan en el área de influencia del proyecto. Se identificaron un total de 21 estaciones de las cuales: una estación es climatológica, una estación es pluviográfica, una estación es meteorológica, una estación es evaporimétrica y 17 son pluviométricas, localizadas en zona de influencia del proyecto.

Para este estudio se utilizaron los registros mensuales multianuales disponibles, principalmente de las dos estaciones climatológicas Centro administrativo La Unión y Tierrablanca, localizadas dentro o en inmediaciones del municipio de Roldanillo.



**Figura 7.19.** Distribución espacial de estaciones hidroclimatológicas  
**Fuente:** Elaboración propia con datos de IGAC y CVC (2004)

## 7.12 AGUA SUBTERRÁNEA

Debido a la dificultad en predecir el real efecto del agua sobre la inestabilidad del talud, se observaron los niveles freáticos, una vez realizadas las perforaciones. El tipo de material geológico y las características hidrogeológicas observadas en el área de estudio, indudablemente controlan la profundidad de la tabla de agua existente en el subsuelo; en la (Tabla 7.9), se resumen los niveles freáticos medidos, notándose que por lo general los niveles de agua son relativamente profundos, exceptuando los registrados en el sector más suroriental del área, debido seguramente al tipo de material predominantemente fino en dicho sector.

Para determinar la posición del nivel freático, después de ocurrida una lluvia se utilizó la fórmula presentada en el numeral 7.9.2.1, que nos explica lo siguiente: se toma el valor de precipitación a partir de las curvas IDF con una duración de 24 horas. Adicional a ello se conoce la posición del nivel freático a partir de las exploraciones realizadas (perforaciones). Para luego determinar por medio de la varianza qué tanto fluctúa el nivel freático.

**Tabla 7.9.** Medición de los niveles freáticos durante las labores de exploración en el municipio de Roldanillo.

PERFORACIÓN / APIQUE	UGS	FECHA DE MEDICIÓN	NIVEL FREÁTICO (m)	CÁLCULO NIVEL FREÁTICO CON LLUVIA
P1	sa	Octubre 2018)	5	En superficie
P2	star	Octubre 2018)	4.3	En superficie
P6	Stct	Octubre 2018)	1,4	En superficie
AP-5	Stat	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-7	Sale	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-8	Saj	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-23	Staa	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-10	Stco	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-20	Sar	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-21	Stc	Octubre 2018)	-	En superficie

**Fuente:** Elaboración propia

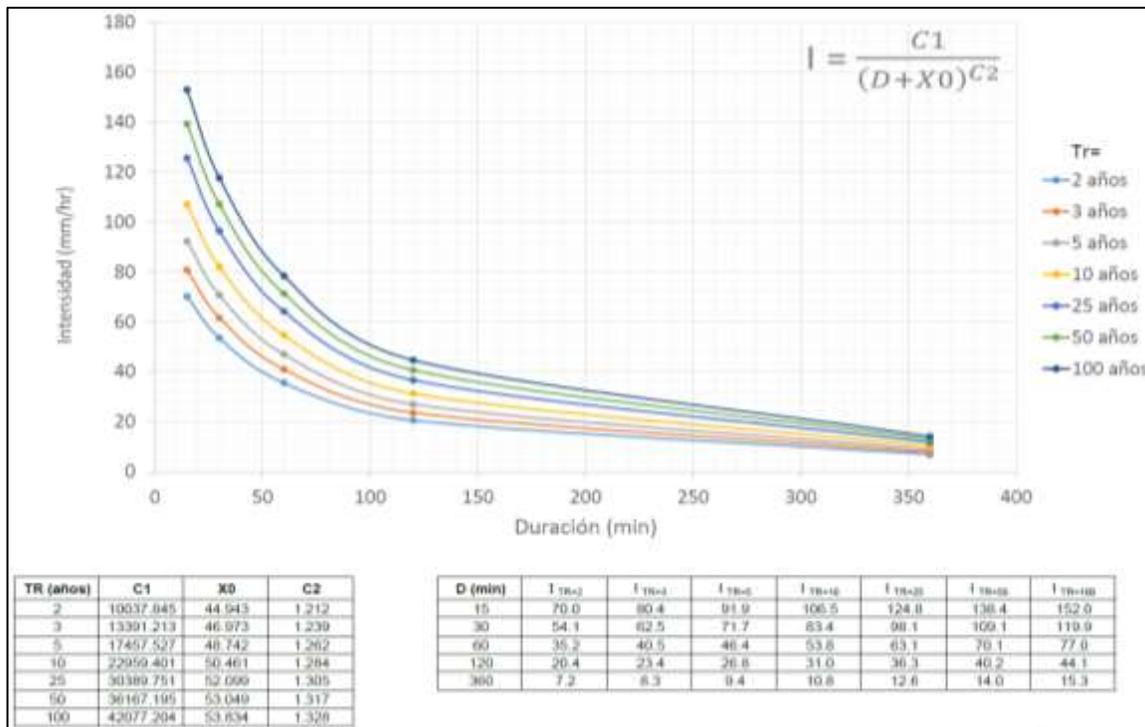
## 7.13 HIDROLOGÍA

Para determinar los caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años de las Unidades hidrológicas o fuentes hídricas que atraviesan el casco urbano y de expansión del Municipio de Roldanillo, se realizó una caracterización climática e hidrológica.

La caracterización climática se realizó con base en la información de las estaciones meteorológicas existentes en la zona del proyecto donde se analizó el comportamiento de las precipitaciones considerando la temporalidad de los eventos de lluvia máximas y su distribución espacial, de igual manera se realizó el cálculo de los histogramas de lluvia de diseño para diferentes periodos de retorno utilizando la información de las Curvas de

intensidad , frecuencia y duración de la estación Centro Administrativo La Unión del año 2016.

La caracterización hídrica, se realiza mediante modelaciones hidrológicas utilizando el programa Hec – Hms, para la estimación de caudales máximos de los ríos analizados y elaborar la modelación hidráulica de los ríos que atraviesan el área de estudio, dentro de los periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, dentro de las corrientes hídricas analizadas se destacan: el río Roldanillo, las quebradas El Rey y Cáceres y El Zanjón Los Mudos. Las curvas IDF (intensidad, frecuencia y duración) para la estación Centro Administrativo La Unión se generan a partir de la información de datos de precipitación para diferentes periodos de retorno suministrados por el IDEAM (2016) y la CVC. La Figura.7.20 muestra la relación entre la cantidad de lluvia por minutos a partir de periodos de retorno, se denota en todos los periodos, que después de los 120 min el nivel de lluvias disminuye a menos de 40 mm/hr, lo cual indica que las lluvias cortas poseen mayor intensidad.



**Figura.7.20.** Curvas de intensidad frecuencia y duración con datos de la Estación Centro Administrativo La Unión.

**Fuente.** IDEAM, (2016).

### 7.13.1.1 Lluvia

Una vez definidas las unidades geotécnicas para los análisis detallados, será necesario contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con la fluctuación del nivel freático. A partir del muestreo de campo, realizado

de acuerdo con lo estipulado en la exploración básica del subsuelo, se deberá obtener una profundidad de la tabla de agua, además de las propiedades del suelo que se indicaran en los siguientes párrafos.

En razón de que en los deslizamientos la posición del nivel freático es generalmente un condicionante de la inestabilidad, resulta clave calcular la profundidad de la tabla de agua, asociada a un cierto periodo de retorno, para el cual se considera que ocurrirá la falla. La experiencia sugiere utilizar un periodo de retorno de 100 años. En virtud de que los deslizamientos profundos ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático, y que estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia, se requiere relacionar de alguna manera la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Dicha estimación se ha de realizar en atención a que existe una relación directa entre el volumen acumulado de agua caída en un periodo de lluvia y el ascenso del nivel freático, ya que por lo general en nuestro medio no se cuenta con registros de nivel freático levantados sistemáticamente (SGC, 2015). En razón de que para el análisis detallado de la amenaza a escala 1:2000 según el SGC, 2015.

Se requiere asumir la profundidad del nivel freático correspondiente a una lluvia con periodo de retorno de 30 años y teniendo en cuenta que aquí no se exige realizar modelación hidrogeológica alguna, deberá tomarse dicho valor de precipitación a partir de las curvas, para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 24 horas; calcular la precipitación infiltrable correspondiente, asumiendo una condición antecedente de humedad (II), deducir esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático supuesta como media y restar 1,65 veces la desviación estándar ( $\sigma$ ) del análisis de acumulados anuales de precipitación infiltrable.

Este análisis se hace suponiendo una variación a largo plazo del nivel freático que sigue una distribución normal con un periodo de retorno de 100 años, así que la profundidad del nivel freático para dicho periodo se puede estimar con una ecuación, la cual se ilustra en la (Figura 7.21).

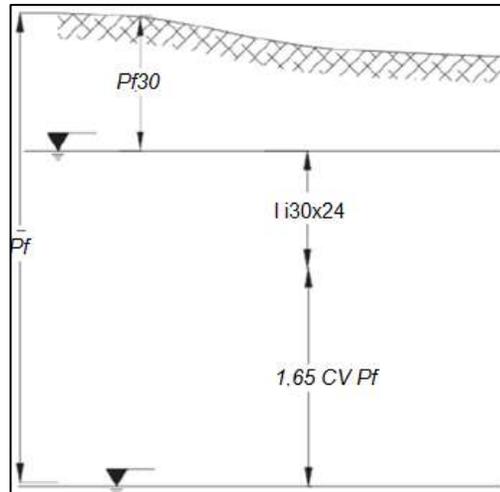
$$Pf100 = (Pf - 1,65 CV Pf) - (Ii100 * 24)$$

Donde:

*Pf100*: corresponde a la profundidad del nivel freático asociado a una lluvia de 100 años de periodo de retorno, en milímetros (SGC, 2015).

*Pf*: corresponde a la profundidad media del nivel freático, en milímetros.

*CV Pf*: corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada, en milímetros (SGC, 2015).



**Figura 7.21** Representación gráfica de la ecuación para medir el nivel freático.

**Fuente:** SGC, (2015)

Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 100 años (SGC, 2015).

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia de todas las combinaciones de sismo y lluvia críticas se calculó con base en su periodo de retorno ( $T_r=100$  años, para la lluvia, considerando el escenarios: futuro (50 años), según las expresiones que se presentan a continuación y cuyos resultados se relacionan en la (Tabla 7.10).

$$P^+ = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^\beta$$

$$P^- = 1 - P^+$$

Dónde:

$P^+$  = Probabilidad de ocurrencia del evento crítico

$T$  = Tiempo de exposición

$\beta$  = Periodo de retorno

$P^-$  = Probabilidad de no ocurrencia del evento crítico

**Tabla 7.10.** Probabilidades de los agentes detonantes

PERIODO DE ANÁLISIS	LARGO PLAZO (50 AÑOS)	
	OCURRENCIA	NO OCURRENCIA
Agua, $T=100$ años	0,395	0,605
Sismo, $T=475$ años	0,100	0,900

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez se aplicó la ecuación en el área de estudio se elabora la Tabla 7.11, la cual muestra el nivel freático de cada unidad geológica en un periodo de retorno dado, estimado para 5, 10,25,50 y 100 años. Los niveles freáticos son medidos desde la superficie hasta el nivel en donde se encuentre la columna de agua, a medida que aumenta el periodo de retorno, el nivel

freático se acerca a la superficie. Los valores negativos expresan que el agua está por arriba de la superficie.

A continuación, se presenta la relación que existe entre el nivel freático y las lluvias en el municipio de Roldanillo.

**Tabla 7.11.** Relación nivel freático y las lluvias

UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL	PROFUNDIDAD N.F. (m)	PROFUNDIDAD N.F. (mm)	INTENSIDAD TR 5 AÑOS (mm/hr)	INTENSIDAD TR 10 AÑOS (mm/hr)	INTENSIDAD TR 25 AÑOS (mm/hr)	INTENSIDAD TR 50 AÑOS (mm/hr)	INTENSIDAD TR 100 AÑOS (mm/hr)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	CV Pf (mm)	P.N.F <sub>5</sub> (m)	P.N.F <sub>10</sub> (m)	P.N.F <sub>25</sub> (m)	P.N.F <sub>50</sub> (m)	P.N.F <sub>100</sub> (m)
Rd	5,00	5000	91,9	106,5	124,8	152,0	205,0	1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Sa	5,00	5000						2073,64	45,08	2,72	2,37	1,93	1,28	0,08
Saj	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Sale	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Sar	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Staa	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Star	4,30	4300						2436,60	62,16	1,99	1,64	1,20	0,55	-0,62
Stat	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Stc	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Stco	5,00	5000						1581,14	31,62	2,74	2,39	1,95	1,30	0,08
Stct	1,40	1400						1068,64	58,72	-0,90	-1,25	-1,69	-2,34	-3,52

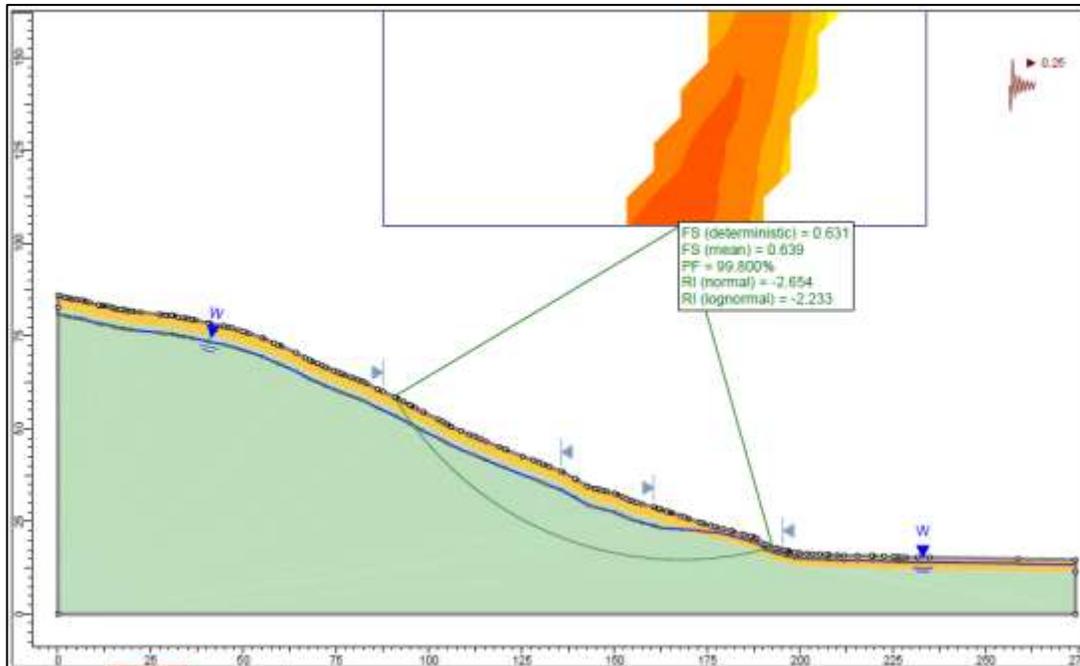
Fuente: Elaboración propia.

## 7.14 ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN SUELOS ARCILLOSOS

Se utilizó el método de equilibrio límite para la estimación de los factores de seguridad, empleando como herramienta de cálculo de la probabilidad de falla el software SLIDE v6.0 de Rocscience, haciendo uso del Método Montecarlo. Lo anterior para simular el mecanismo de falla rotacional, modelado a través de la sección BB', que involucra el depósito de suelos transportados de ceniza.

Así, se determinó el FS para múltiples casos (del orden de mil simulaciones) utilizando combinaciones aleatorias de parámetros que seguían distribuciones de probabilidad normal (parámetros de resistencia de los materiales) y exponencial (para el sismo y la lluvia). Todas estas modelaciones se efectúan para el escenario de exposición futura.

A manera ilustrativa, la Figura 7.22, se presenta los resultados obtenidos en la Sección BB' para el escenario futuro. Dentro de la sección de análisis se han definido claramente los niveles de amenaza, los cuales aportan información parcial para la construcción de los mapas de amenaza correspondientes. El resumen de los factores de seguridad y las probabilidades de falla Fs-Pf estimadas se relacionan en la Tabla 7.12.



**Figura 7.22.** Análisis de estabilidad Sección BB', escenario futuro, condición sin obras.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.12.** Resumen de los Factores de Seguridad y de la Probabilidad de Falla Sección BB', condición sin obras.

CONDICIÓN	TIPO DE OBRA	ESCENARIO	NIVEL DE AGUA	SISMO – A (G)	F.S	PF
Sin obra	No Aplica	futuro	Parcialmente saturado	0.25	0.639	99.80%

**Fuente:** Elaboración propia

### 7.15 ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN MATERIAL SUPERFICIAL ALTERADO

Esta unidad está constituida por suelos arcilloso-limosos producto de la meteorización de los niveles de rocas. Estos suelos alcanzan espesores del orden de 1.0 a 2.0 m en la parte más baja de la ladera y se hacen más delgados hacia la parte media y alta de la ladera, donde su espesor disminuye a menos de un metro. Debido a la alta pendiente de la ladera se ha generado el lavado de parte de estos suelos que han sido acumulados en la parte baja de la misma, conformando suelos transportados recientes.

En este orden de ideas, el mecanismo de falla corresponde a una falla planar en talud infinito. Si bien es cierto que el espesor de este material es delgado, la alta vulnerabilidad de las estructuras, principalmente por exposición, hace que cualquier pequeño deslizamiento tenga un alto impacto sobre la población. Por lo anterior, se optó por utilizar el método del talud infinito, con celdas de tamaño 2 x 2 m, las cuales pueden representar de manera adecuada fenómenos locales de inestabilidad.

Adicionalmente, dada la alta variabilidad de los parámetros de resistencia, se realizó un análisis estadístico y probabilístico mediante simulaciones por el método de Monte Carlo. Para este análisis se evalúa el factor de seguridad en la ladera mediante la siguiente expresión:

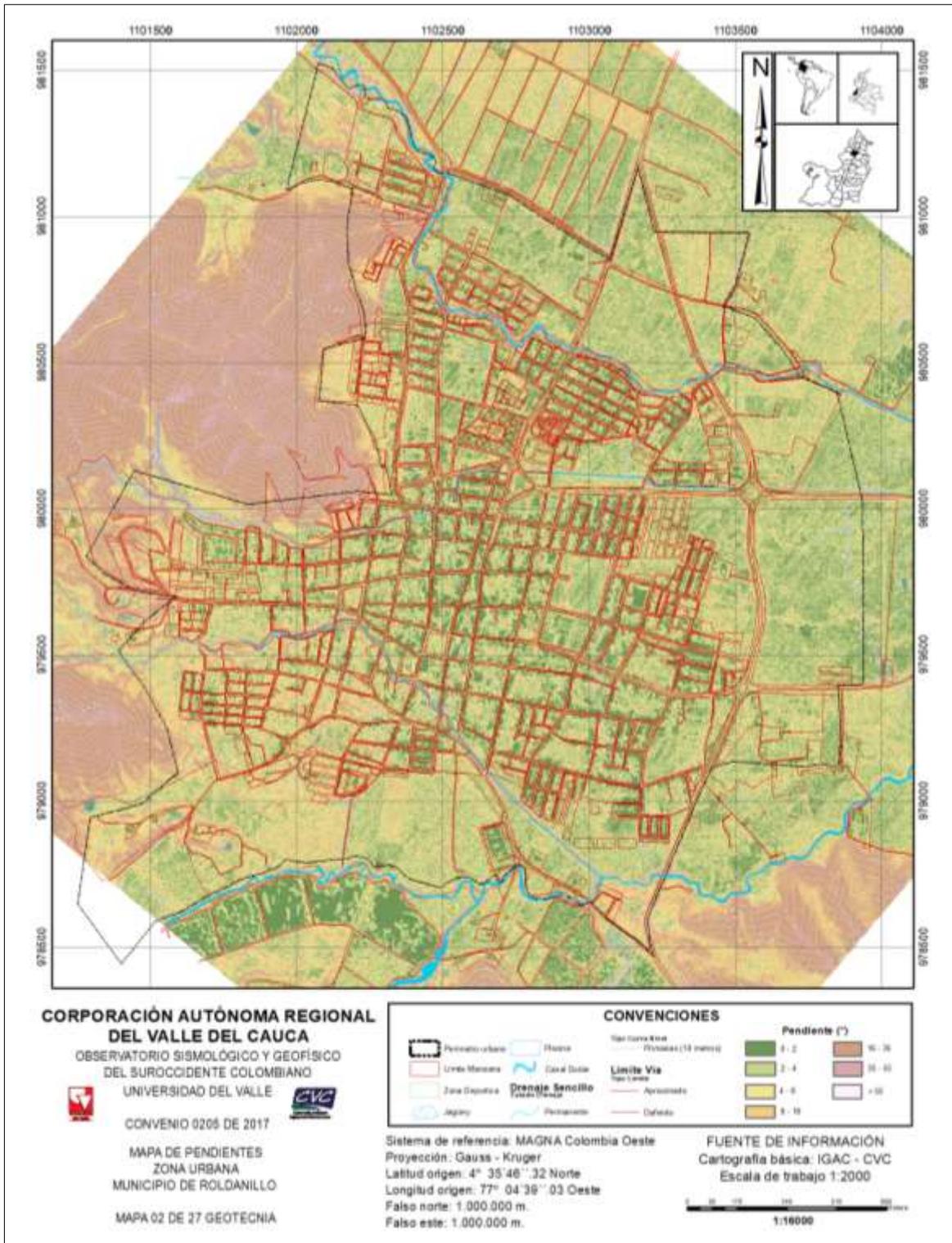
$$FS = \frac{(c' \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

Donde:

$C'$ = Cohesión efectiva	$k$ = Coeficiente de aceleración horizontal
$\Phi$ = Angulo efectivo de fricción	$b$ = Espesor de estrato deslizante
$h_w$ = altura de la lámina de agua para el periodo de retorno dado	$h$ = Proporción del estrato deslizante que se encuentra saturado
$\gamma$ = Peso unitario del suelo	$\alpha$ = Angulo de inclinación de la superficie de falla
$\gamma_w$ = Peso unitario del agua	

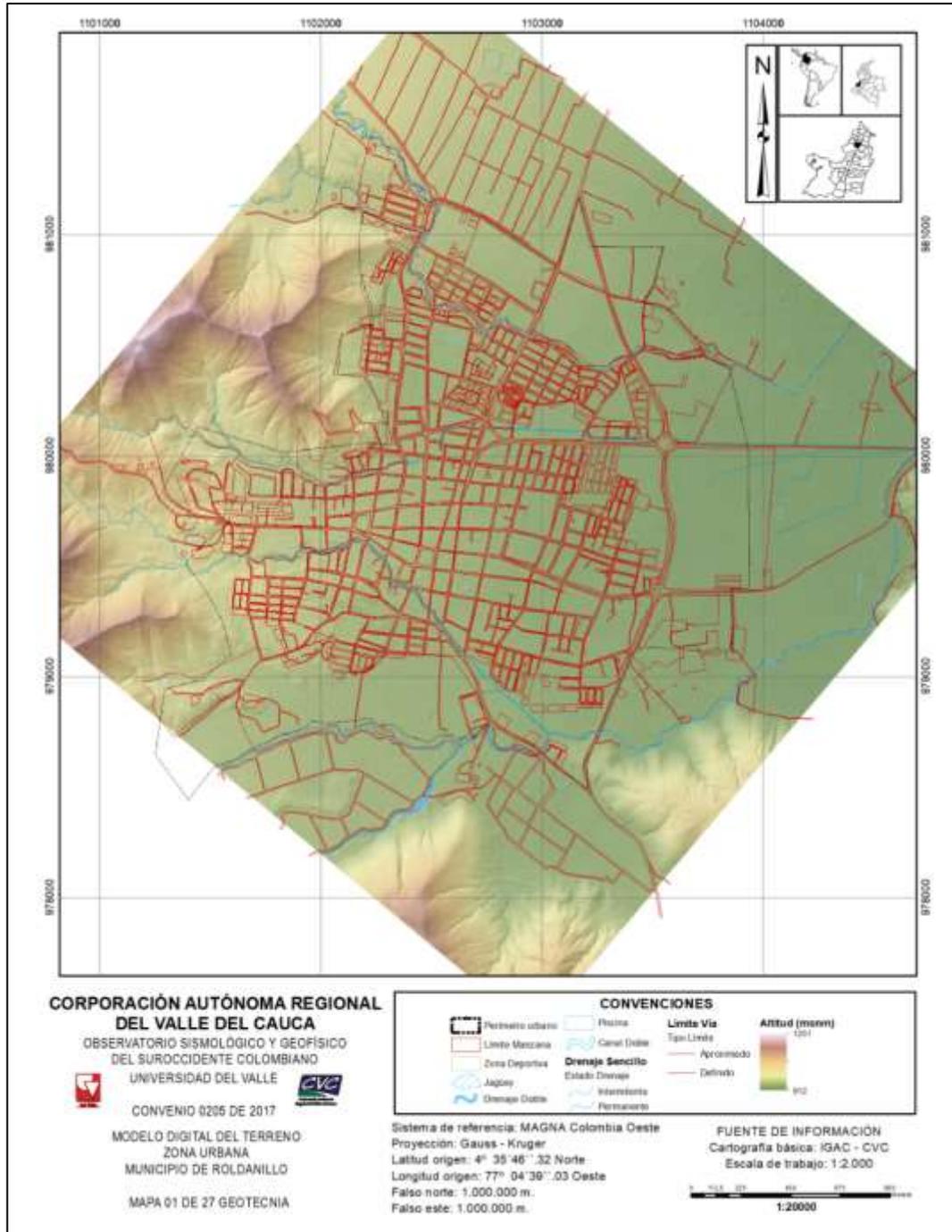
Para ello se necesita desarrollar las siguientes matrices, todas de igual tamaño (m x n): matriz de elevación (se obtiene de la topografía desarrollando un modelo digital de elevación), matriz de pendientes (se desarrolla haciendo uso de las herramientas de ArcGIS) y matrices de valores de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario del suelo, datos provenientes de la cartografía geológica y caracterización geotécnica realizada para el presente estudio. Para el tratamiento de los datos se creó un código desarrollado en Matlab donde se genera una matriz de tamaño (m x n) con los valores de factor de seguridad para cada pixel del mapa.

Un aspecto de suma importancia dentro del modelo corresponde a la inclinación del terreno. Para tener en cuenta esta variable se ha generado el respectivo mapa de pendientes el cual se ilustra en la (Figura 7.23). Nótese que las mayores pendientes varían entre ligeramente suaves a fuertes con inclinaciones del orden de los 5° a  $\geq 60$  a lo largo del área de estudio. Las mayores pendientes se localizan al noroccidente, al occidente, y en el sur del municipio, se caracterizan por tener en general buena conservación y pocas evidencias de inestabilidad.



**Figura 7.23.** Mapa de pendientes del área de estudio  
**Fuente:** Elaboración propia.

En el mapa del Modelo Digital de Elevaciones del municipio de Roldanillo (Figura 7.24) se observan altitudes que van desde los 912 a los 1250 msnm, las mayores elevaciones se localizan en el noroccidente, occidente, suroccidente, sur y suroriente del casco urbano.



**Figura 7.24.** Mapa Modelo Digital de Elevaciones municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia.

### 7.15.1 Uso del método Montecarlo

Como el objetivo es desarrollar un mapa probabilístico, la creación de las matrices de los parámetros del suelo, cohesión, ángulo de fricción y peso unitario, se han desarrollado haciendo uso del Método Montecarlo considerando una distribución normal para estos parámetros (los parámetros geotécnicos se comportan normalmente según varios autores). Para la variable del espesor del estrato deslizante, se ha tomado una distribución uniforme. Estas distribuciones se muestran a continuación:

Generación de una matriz (m x n) con m x n valores a partir de una distribución normal:

$$r = (\text{randn}(m, n) * sd) + mu$$

Donde:

Sd = Desviación estándar del parámetro geotécnico (phi, c o gamma).

Mu = Media del parámetro geotécnico (phi, c o gamma).

Randn = función que genera valores aleatorios de 0 a 1.

Generación de una matriz (m x n) con m x n valores a partir de una distribución uniforme:

$$r = a + \text{randn}(m, n) * (b - a)$$

Donde:

a = valor mínimo del parámetro geotécnico (phi, c o gamma)

b = valor máximo del parámetro geotécnico (phi, c o gamma)

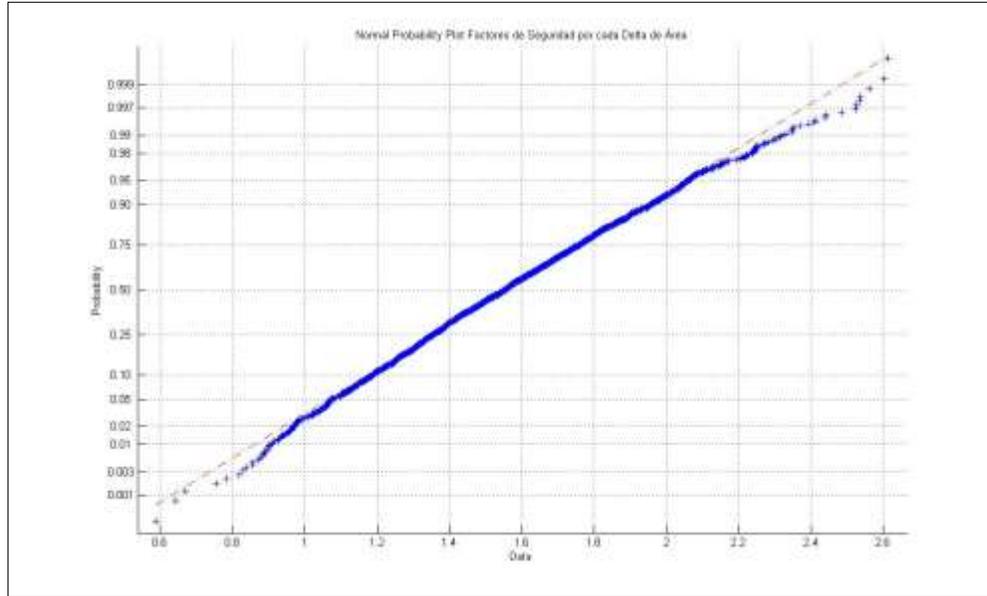
Randn = función que genera valores aleatorios de 0 a 1

Haciendo uso de las anteriores expresiones en el código desarrollado en Matlab, se obtienen las matrices de los parámetros geotécnicos basados en el método de Monte Carlo.

### 7.15.2 Código desarrollado en Matlab

A partir del modelo de elevación digital se desarrolla una matriz o un raster de pendientes haciendo uso de las herramientas de ArcGIS. Tanto la matriz de elevaciones como la matriz de pendientes se exportan a formato ASCII que puede ser leído por Matlab.

Con el fin de aplicar el método de Monte Carlo se debe crear un vector (m x n, 1) con el fin de evaluar la expresión de F.S en cada pixel del DEM, haciéndose necesario que el número de iteraciones esté dentro del rango de 2000 a 10000 (Heuvelink, 1996). Al concluir este último paso, obtenemos una matriz de tamaño (m x n, número de iteraciones). Seguidamente, se debe analizar los datos de cada fila buscando encontrar que tipo de comportamiento presentan los datos. Se encuentra que los datos se comportan normalmente (Figura 7.25).



**Figura 7.25.** Gráfica de probabilidad normal  
**Fuente:** Elaboración propia

Una vez determinado el comportamiento de los valores, se calculan los parámetros estadísticos para cada pixel (desviación estándar, media e intervalo de confianza) en una nueva matriz donde cada columna corresponde a cada parámetro estadístico y cada fila corresponde a un pixel. Con los parámetros estadísticos se calcula ahora la probabilidad de falla (Pf) por movimientos en masa para cada pixel.

Por último, con el fin de visualizar los valores de Pf en ArcGIS, se escribe un archivo ASCII que luego se importa al Sistema de Información Geográfica.

### 7.15.3 Modelación mecanismos de falla traslacionales superficiales

Para la determinación de los parámetros geomecánicos empleados en la modelación de mecanismos de falla traslacional superficial (talud infinito), se utilizaron los ensayos de laboratorio y datos recopilados en la exploración de campo del presente estudio, diferenciándose por unidad geológica superficial-UGS (Ver Tabla 7.13 a la Tabla 7.23)

**Tabla 7.13.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Rd

PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	Rd		
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	48	6,34	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	19613	6864,55	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	26,48	2,648	-
Superficie de falla (m)	0,1	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.14.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS

Sa			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	22,1	2,33	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	22	7,70	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	18,5	1,85	-
Superficie de falla (m)	2,45	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.15.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Saj

Saj			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	11	1,11	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	23,9	8,37	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	15,8	1,58	-
Superficie de falla (m)	2	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.16.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Sale

Sale			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	24.1	2.56	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	58	20.30	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	17.7	1.77	-
Superficie de falla (m)	2	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.17.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Sar

Sar			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	18,2	1,88	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	48	16,80	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	17,1	1,71	-
Superficie de falla (m)	2	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.18.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Staa

Staa			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	19.7	2.05	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	31.4	10.99	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	15.3	1.53	-
Superficie de falla (m)	1.82	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.19.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS

Star			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	24,5	2,61	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	24	8,40	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	18,2	1,82	-
Superficie de falla (m)	2,25	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.20.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Stat

Stat			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	20.1	2.10	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	32	11.20	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	17.4	1.74	-
Superficie de falla (m)	1.81	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.21.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Stc

Stc			
PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	30,7	3,40	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	6,9	2,42	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	16,5	1,65	-
Superficie de falla (m)	1,45	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.22.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Stco

Stco			
PARÁMETROS GEOMECÁNICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	23.4	2.48	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	22	7.70	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	17.3	1.73	-
Superficie de falla (m)	1.73	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.23.** Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Stct

Stct			
PARÁMETROS GEOMECÁNICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR
Angulo de Fricción (°)	18.8	1.95	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	25	8.75	-
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	17.7	1.77	-
Superficie de falla (m)	2	-	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

Debido a la variabilidad intrínseca de los parámetros de resistencia de los materiales detectados in situ, se tomaron valoraciones estadísticas tomando como base el Eurocode, el cual recomienda valores de coeficientes de variación que permiten modelar la incertidumbre asociada cuando no se cuenta con una nube de datos estadísticamente significativa de los parámetros de resistencia. En el caso de estudio se tomaron los coeficientes de variación (COV) relacionados en la (Tabla 7.24).

**Tabla 7.24.** Valoración incertidumbre coeficientes de variación

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS Y DE MODELACIÓN	MEDIA	COV (%)	VALOR
Angulo de fricción (°)	22.1	10	-
Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	22	35	-
Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	10	-
Superficie de falla (m)	2.45	0	-
Tamaño de celda (m)	-	-	2 x 2

**Fuente:** Elaboración propia.

Similar a los análisis de estabilidad anteriores, se consideró el escenario futuro y cuyos resultados se expresan en función del F.S y de la Pf, así:

- **Escenario Futuro - Talud Saturado con Sismo correspondiente a tiempo de exposición de 50 años:** Este escenario representa un periodo fuerte de lluvias y adicionalmente se presenta un sismo de baja probabilidad de ocurrencia anual, pero de intensidad alta con  $A_a=0,25$ .

## 8. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Este capítulo tiene por objeto determinar el nivel de amenaza por movimientos en masa, a que se encuentra expuesta la zona de estudio en las condiciones actual.

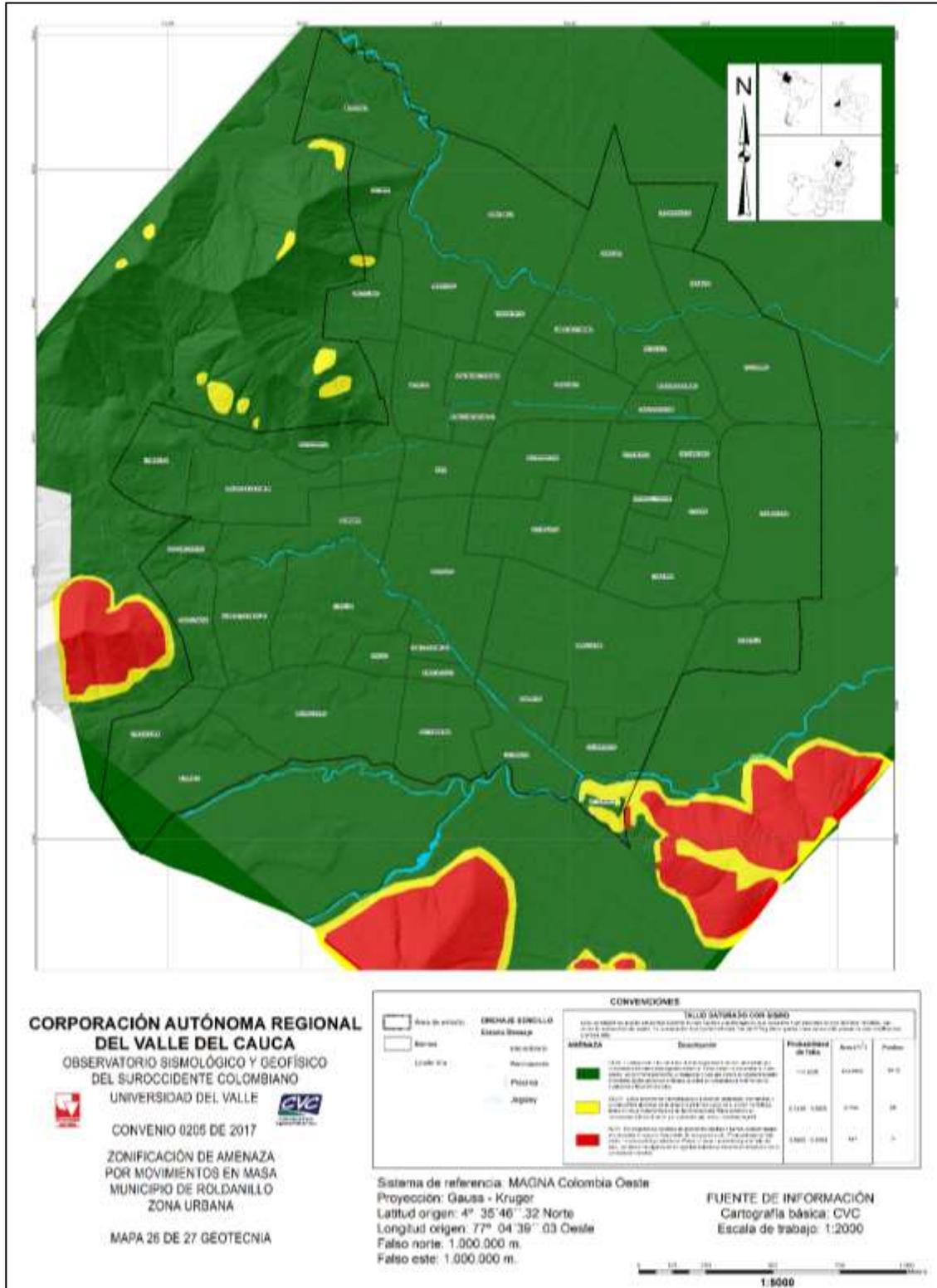
Integrando en un solo mapa los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad realizados para cada uno de los mecanismos de fallas identificadas, se obtienen los mapas de amenaza para el escenario considerado. De esta manera se superponen los resultados de F.S y Pf, obteniendo la zonificación de amenaza para la condición futura (Figura 8.1).

Para una vez obtenidos los resultados de la probabilidad de falla, fueron categorizados según la propuesta de González y Millán (2005), (Tabla 8.1).

**Tabla 8.1.** Categorización de la Amenaza, Decreto 227 de 2006 (Adoptado de González y Millán, 2005)

TIEMPO DE EXPOSICIÓN Te (años)	FACTOR DE SEGURIDAD		k	PROBABILIDAD DE FALLA		NIVEL DE AMENAZA	
	De	a		De	a		
<b>CONDICIONES EXTREMAS</b>							
50	0,1954	1,0000	4,2040	0,9993	0,5000	ALTA	A
	1,0000	1,3000		0,5000	0,1239	MEDIA	M
	1,3000	3,4000		0,1239	0,0000	BAJA	B

**Fuente:** Resolución 227 de 2006



**Figura 8.1.** Mapa de amenaza categorizado correspondiente a la condición futura para el municipio de Roldanillo  
**Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados de la amenaza procederemos a destacar los principales aspectos de la amenaza, así como su significado:

**AMENAZA BAJA:** Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por movimientos en masa ante agentes externos. Estas áreas corresponden a zonas planas, de menor pendiente, urbanizadas y con una cobertura vegetal bastante importante. sin embargo, estas zonas, pueden ser propensas a fenómenos de inundación y flujos torrenciales.

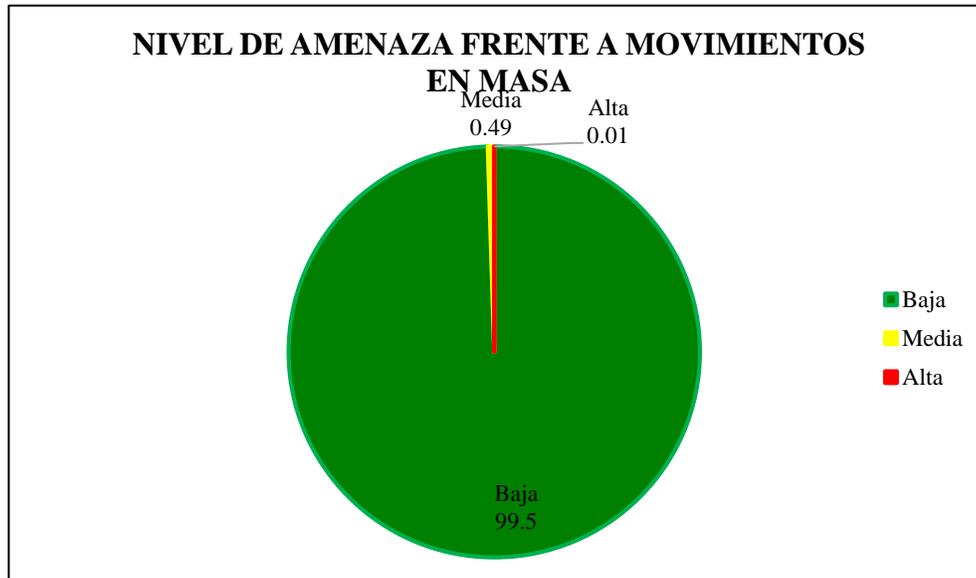
**AMENAZA MEDIA:** Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y se encuentran ubicadas en la generalidad de los casos en el sector montañoso, donde el mecanismo de falla es de tipo traslacional. Estos sectores se caracterizan adicionalmente, por presentar una buena cobertura vegetal.

**AMENAZA ALTA:** Corresponden a sectores de pendientes medias a fuertes, caracterizadas por presentar un espesor importante de la capa de suelo. El mecanismo de falla predominante es de tipo rotacional. Estas zonas se caracterizan por la falla del talud, por efecto de algunos de los agentes externos previamente descritos o por la combinación de ellos.

Para la condición futura, la amenaza es media, con algunas zonas de amenaza alta, las cuales se deben a las altas pendientes y depósitos de suelos transportados de ceniza.

Los resultados del análisis de amenaza para la condición futura, mediante el método determinístico, se ilustra en la Figura 8.2 y Tabla 8.2, destacándose los siguientes aspectos:

- La amenaza media se presenta en pequeñas áreas (0,49% del total del municipio) localizadas en los puntos sur, suroccidente, suroriente y noroccidente del municipio, cabe destacar que sólo se presenta amenaza media dentro del municipio en dos sectores: el primero está ubicado entre los barrios La Ceiba y Las Colinas en el noroccidente y en segundo en el extremo sur en el barrio Villa Rosita.
- La amenaza alta dentro del municipio es (0,01%), en la Figura 8.2 se muestra la localización de áreas con amenaza por movimientos en masa alta, por fuera del área de estudio en los sectores sur, suroccidente y suroriente del municipio.



**Figura 8.2.** Distribución de niveles de amenaza para la condición futura en el municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 8.2.** Áreas según los niveles de amenaza para la condición futura el municipio de Roldanillo

NIVEL DE AMENAZA	ÁREA NIVEL DE AMENAZA (m <sup>2</sup> )	ÁREA NIVEL DE AMENAZA (Ha)	ÁREA (%)
Baja	4721950,4	472,2	99,50
Media	21150,3	2,12	0,49
Alta	196,8	0,02	0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

El área más afectada del municipio de Roldanillo con amenaza por movimientos en masa es el correspondiente al barrio Villa Rosita, tal como se muestra a continuación (Tabla 8.3), se puede denotar que mas de la mitad del área del barrio se encuentra en amenaza media por movimientos en masa.

**Tabla 8.3.** Porcentaje de amenaza por movimientos en masa en los sectores más afectados

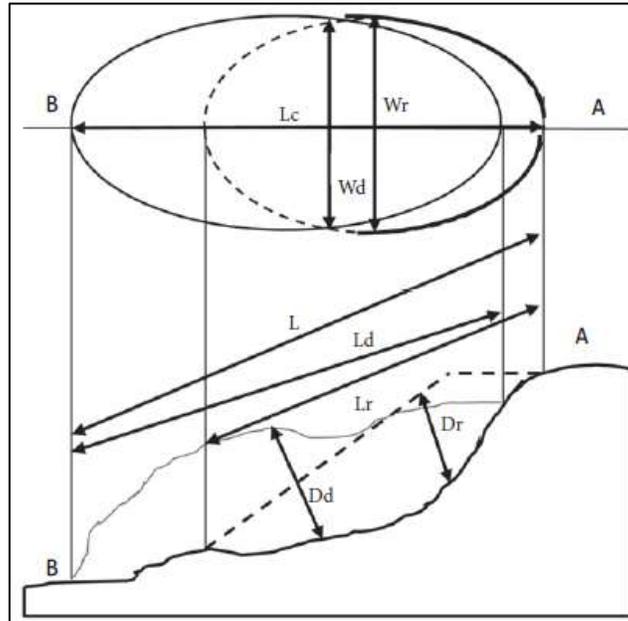
BARRIO	PORCENTAJE DE AMENAZA (MM) POR BARRIO (Ha) y (%)					
	ALTA	Porcentaje (%)	MEDIA	Porcentaje (%)	BAJA	Porcentaje (%)
Villa Rosita	0,02	0,56	1,97	56,22	1,47	41,82

**Fuente:** Elaboración propia.

## 8.1 MAGNITUD

Se define como parámetro de magnitud el volumen de la masa potencialmente inestable. Para determinar el valor del volumen se deberá contar con un mapa en planta, en el que se detalle el contorno del movimiento potencial, y un perfil donde se pueda estimar el espesor de la masa comprometida en el movimiento. Así, el volumen se calculará de acuerdo con la siguiente ecuación y las definiciones de la Figura 8.3

$$V = \left( \frac{1}{6} \pi D_r W_r L_r \right) f_{exp}$$



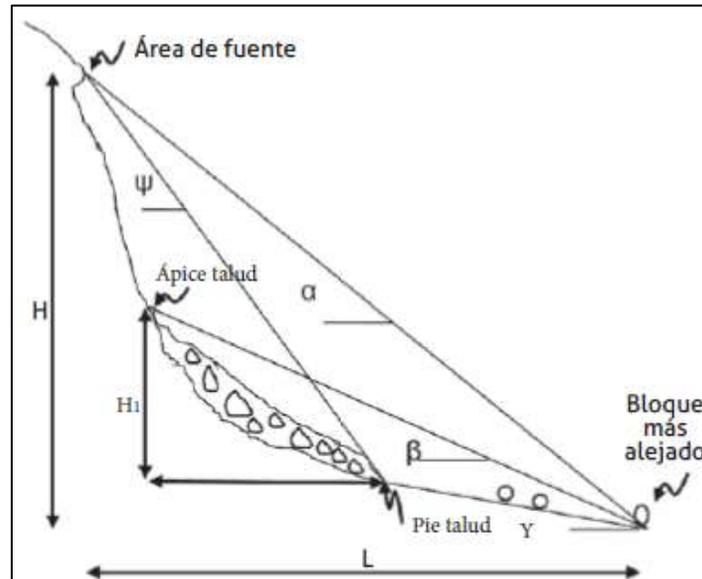
**Figura 8.3.** Determinación del volumen de un deslizamiento.  
**Fuente:** SGC, (2015).

Donde:

$V$  es el volumen del deslizamiento,  $D_r$  es la profundidad máxima de la superficie de falla,  $W_r$  es el ancho máximo de la superficie de falla,  $L_r$  es la longitud de la superficie de falla y  $f_{exp}$  es un factor de expansión del material deslizado; generalmente este factor es de 1,25 a 1,3 hasta 1,7, dependiendo de los materiales comprometidos.

## 8.2 DISTANCIA DE VIAJE

Los métodos geométricos se basan en la hipótesis de dependencia de la distancia de viaje a la configuración geométrica de la ladera (los parámetros considerados aparecen en la (Figura 8.4). Así, se han propuesto diversas correlaciones de tales variables para determinar el valor de la distancia de viaje,  $L$ . A continuación se presentan algunos resultados de las regresiones reportadas en Hungr et al. (2005) (Tabla 8.4 y Tabla 8.5).



**Figura 8.4.** Variables geométricas para definir la distancia de viaje de un deslizamiento.

**Fuente:** Hungr et al., (2005).

**Tabla 8.4.** Ecuaciones para determinar la distancia de viaje, obtenidas en Hong Kong

VARIABLE DEPENDIENTE		ECUACIÓN
Corte talud	LCI	$\text{Log } L = 0,062 + 0,965 \text{ Log } H - 0,558 \text{ Log } (\tan \delta)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,109 + 1,010 \text{ Log } H - 0,506 \text{ Log } (\tan \delta)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,156 + 0,155 \text{ Log } H - 0,166 \text{ Log } (\tan \delta)$
Relleno talud	LCI	$\text{Log } L = 0,269 + 0,325 \text{ Log } H - 0,166 \text{ Log } (V/W)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,453 + 0,547 \text{ Log } H - 0,305 \text{ Log } (V/W)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,693 + 0,768 \text{ Log } H - 0,443 \text{ Log } (V/W)$
Muro de contención	LCI	$\text{Log } L = 0,037 + 0,350 \text{ Log } H + 0,108 \text{ Log } (V/W)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,178 + 0,587 \text{ Log } H + 0,309 \text{ Log } (V/W)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,319 + 0,825 \text{ Log } H + 0,150 \text{ Log } (V/W)$
Caída de roca	LCI	$\text{Log } L = 0,041 + 0,515 \text{ Log } H - 0,629 \text{ Log } (\tan \delta)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,253 + 0,703 \text{ Log } H - 0,417 \text{ Log } (\tan \delta)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,466 + 0,891 \text{ Log } H - 0,206 \text{ Log } (\tan \delta)$

**Fuente:** Finlay et al. (1999), en Hungr et al. (2005).

**Nota:** H es la caída vertical,  $\delta$  es el ángulo del talud, V el volumen de deslizamiento y W el peso del deslizamiento. LCI y UCI son el intervalo superior e inferior del 95 % de confianza, respectivamente.

**Tabla 8.5.** Ecuaciones de regresión para  $\log (H/L) = A + B * \log V$

TIPO DE DESLIZAMIENTO	TRAYECTORIA	A	B	R2
Caída de rocas	Todo	0,210	- 0,109	0,76
	Obstruido	0,231	- 0,091	0,83
	Sin obstruir	0,167	- 0,119	0,92
Deslizamiento traslacional	Todo	- 0,159	- 0,068	0,67
	Obstruido	- 0,133	- 0,057	0,76
	Sin obstruir -	0,143	- 0,080	0,80
Flujo de detritos	Todo	- 0,012	- 0,105	0,76
	Obstruido	- 0,049	- 0,108	0,85

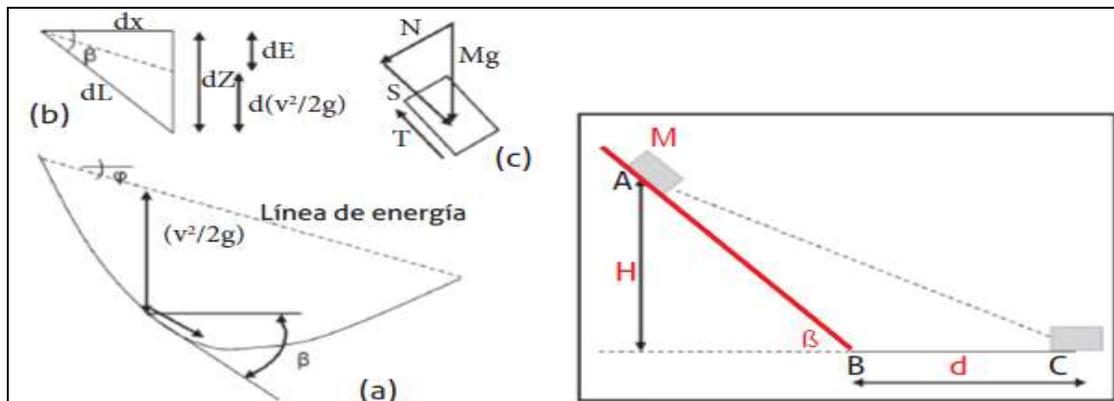
TIPO DE DESLIZAMIENTO	TRAYECTORIA	A	B	R2
	Sin obstruir -	0,031	- 0,102	0,87
Flujos de tierra	Todo	- 0,214	- 0,070	0,65
	Sin obstruir -	0,220	- 0,138	0,91

**Fuente:** Corominas (1996) para diferentes materiales (Hungar et al., 2005).

La distancia de viaje también se podrá estimar mediante la aplicación del método del bloque deslizante, como se muestra en la descripción de la intensidad. Los profesionales que desarrollen el estudio de riesgo evaluarán la correlación más adecuada, de acuerdo con las condiciones del terreno y los materiales en la zona de estudio. Se podrán emplear otras correlaciones reportadas en la bibliografía técnica internacional, como las expresiones de Hsu (1975) y Domaas (1994). En este caso, se indicará la referencia donde se presenta la correlación usada.

### 8.3 INTENSIDAD

Se define como parámetro de intensidad la velocidad de la masa involucrada. Para evaluar esta velocidad se propone emplear el método del bloque deslizante, el cual modela el movimiento del deslizamiento como el movimiento de un bloque sobre una superficie curva, con una resistencia friccional constante (Figura 8.5).



**Figura 8.5.** Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema.

**Fuente:** Yue, (2014).

Al aplicar las leyes de Newton y para una condición de se obtienen las siguientes ecuaciones.  $Mg \sin \beta - Mg \cos \beta \tan \phi = Ma(t)$  de A hasta B  $-Mg \tan \phi = Ma(t)$  de B hasta C)

Donde:

$M$  es la masa deslizada y

$g$  la aceleración de la gravedad.

$\beta$  es la inclinación del terreno.

$\phi$  es el ángulo de fricción interna en el talud (A-B)

$\phi_p$  es el ángulo de fricción interna en la zona plana (B-C).

$a(t)$  es la aceleración desarrollada por la masa.

De esta manera, la velocidad desarrollada por la masa deslizada mientras baja por el tramo  $A-B$  está definida por la ecuación

$$V_{AB} = \sqrt{2Hg\left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)} \quad 1$$

Presumiendo que no hay pérdida de energía a causa del impacto en el punto  $B$ , debido al cambio de pendiente, cambiando la dirección de la velocidad, la distancia de viaje  $d$  y el ángulo de viaje desde  $A$  hasta  $C$  están dados por las expresiones

$$d = \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right) \frac{H}{\tan\phi_p} \quad 2$$

Y la velocidad en el tramo  $B-C$  puede determinarse de acuerdo con la ecuación

$$V_{BC}^2 = V_{AB}^2 - 2g\tan\phi_p d \quad 3$$

Las velocidades calculadas permiten estimar la intensidad del deslizamiento para los diferentes escenarios.

$$V_{inclinado} = \sqrt{2gh * \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)} \quad 4$$

$$E_c = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad 5$$

$$E_p = mgh \quad 6$$

$$E_c = \frac{1}{2} E_p \quad 7$$

$$\frac{1}{3} E_p = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad \text{Igualamos las ecuaciones 1 y 3} \quad 8$$

$$\frac{1}{3} mgh = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad \text{Remplazamos } E_p \text{ en la ecuación 4} \quad 9$$

$$V_{plano}^2 = \frac{\frac{1}{3} mgh}{\frac{1}{2} m} \quad 10$$

$$V_{plano}^2 = \frac{2}{3} gh \quad 11$$

$$V_{plan} = \sqrt{\frac{2}{3} gh} \quad 12$$

$$V_{plan} = \begin{cases} V_{inclinado} - V_{plano} \\ V_{plano} - V_{inclinado} \end{cases} \quad \text{depende de que tan grandes sean los valores de } \phi \text{ y } \beta$$

En la evaluación del riesgo por movimientos en masa, es fundamental predecir el modo de falla de las laderas y cuantificar el desplazamiento de la masa, incluyendo la distancia de viaje y la velocidad (Hung et al., 2005). Entre los parámetros que definen la magnitud de los movimientos en masa se deben incluir todos aquellos que describan su capacidad destructiva (AGS, 2007). En la (Tabla 8.6) se presentan los resultados de dichos parámetros (Magnitud, intensidad y distancia de viaje).

**Tabla 8.6.** Caracterización de la Amenaza para el municipio de Roldanillo

CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA			
SECCIÓN	MAGNITUD Vol (m3)	INTENSIDAD Vel (m/s)	DISTANCIA DE VIAJE (m)
B-B'	52930	6.0	49
C-C'	64569	0.3	13
D-D'	65500	0.7	15

**Fuente:** Elaboración propia.

## 9. CONCEPTO TÉCNICO PARA EL BARRIO LA CEIBA

Por petición de la Alcaldía Municipal de Roldanillo, en el presente documento se da un informe preliminar resumido sobre las posibles condiciones de estabilidad de los taludes sobre los cuales se localiza el barrio La Ceiba del municipio de Roldanillo. Este informe se realiza conforme a las actividades hasta ahora desarrolladas en el marco del **Convenio Interadministrativo N° 0205 DE 2017 CVC – UNIVALLE** que tiene por objeto “Aunar esfuerzos técnicos y recursos económicos para la elaboración de los estudios de zonificación de amenaza y vulnerabilidad y escenarios de afectación para las áreas urbanas de los municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”.

Las actividades realizadas en la zona en cuestión corresponden a los siguientes estudios:

### Historicidad de Eventos

Este estudio corresponde a la revisión rigurosa de fuentes documentales escritas y relatos de la comunidad para investigar la posible ocurrencia de eventos históricos por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Roldanillo en una ventana de tiempo que comprende el periodo 1970 – 2018. Se implementaron los métodos intensivista y extensivista para la búsqueda y análisis de la información y para el procesamiento y espacialización de los resultados se utilizó los métodos, la Densidad de Kernel y Modelo Digital de Terreno DTM para el nivel de cotas.

Las fuentes de información que se consultaron en el proceso de investigación corresponden a: Archivos, Bibliográficas, Hemerográficas y Bases de Datos.

Los archivos consultados fueron actas de reuniones, de visitas, certificaciones e informes del Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres -CLOPAD, adscrito a la Secretaría de Gobierno de la Alcaldía de Roldanillo, esta información fue suministrada por el Archivo Central de la Alcaldía, el cual abarca desde el año 2004 hasta el 2014; reportes de las minutas de guardia del Cuerpo de Bomberos Voluntario de Roldanillo, localizados en sus instalaciones desde 1970

hasta la fecha, y el cuaderno del Comandante Operativo de la Defensa Civil Colombiana de Roldanillo que es de su propiedad desde julio del 2012 hasta el 31 de diciembre del año 2017. Las fuentes bibliográficas se refieren a documentos de publicación puntual especializada de un tema específico. En esta categoría se encuentran los libros, informes técnicos de investigaciones, etc. Se consultaron el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del año 2000, el Plan de Desarrollo de 2016-2019 y el Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastre (2012), siendo estos planes la mejor herramienta de planificación del municipio.

La fuente hemerográfica se refiere a los documentos de publicación con cierta periodicidad como revista y periódicos, en ellos se registran los hechos y sucesos a nivel local, regional y nacional. En ellas se consultaron los periódicos de orden regional y nacional como el periódico El País y el Tiempo, respectivamente.

Como base de datos se consultaron el Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (Desinventar) (2017), que dispone de inventarios de desastres y pérdidas causadas por los eventos en diferentes escalas, registrados por fecha, lugar y daños asociados a su ocurrencia, y El Sistema de Inventario de Movimientos en Masa (SIMMA) (2018).

Por relatos de la comunidad para el presente estudio, se entiende, por un lado, la información aportada por las personas que habitan en las zonas visitadas por los profesionales que desarrollaron el trabajo de campo durante el desarrollo del proyecto, y, por otro lado, la información y datos suministrados durante la socialización de los resultados del estudio de historicidad realizado con los funcionarios de la alcaldía municipal, miembros del Comité Municipal de Gestión del Riesgo y miembros de la comunidad en general.

Como resultado de esta actividad no se encontraron evidencias documentales históricas ni relatos de la comunidad que den cuenta de la ocurrencia de eventos de movimientos en masa asociados espacialmente al barrio La Ceiba del municipio de Roldanillo.

## **Geología**

Geológicamente, el barrio La Ceiba se encuentra localizado sobre depósitos de abanicos aluviales. Estos corresponden a un relieve en forma de cono invertido que presenta pendientes moderadas a bajas (entre 1 y 5 grados). Se forman por la erosión de materiales en las partes altas de las montañas en que son depositados en su base (pie de monte) cuando una corriente de agua fluye rápidamente y entra en una zona más amplia y de menor pendiente haciendo que su velocidad disminuya.

Esta estructura geomorfológica no representa riesgo significativo actual, dada la naturaleza de los materiales que la constituyen. Sin embargo, un aspecto importante a tener en cuenta en los depósitos del barrio La Ceiba es la presencia de un material tobáceo de color blanco y muy fino con clastos de basalto que, en condiciones de exceso de aporte de agua, puede ocasionar erosión e inestabilidad. Además, se observó en el barrio la Ceiba, un inadecuado manejo de aguas residuales y aguas lluvias, que podría generar inestabilidad del talud por acción antrópica.

## Geotecnia

A partir de la expedición de la Ley 1523 de 2012 y el Decreto 1807 de 2014, todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas encaminadas a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible.

En el PBOT del municipio de Roldanillo se encuentra el barrio La Ceiba en amenaza alta, por consiguiente, es una de las zonas a evaluar en detalle para determinar técnicamente cual es la calificación de la amenaza futura.

A partir de las visitas técnicas de campo se observó lo siguiente:

- En el barrio La Ceiba se presentan agrietamientos en algunas viviendas, **debido posiblemente a deficiencias constructivas**, dado que no poseen mampostería confinada (Columnas, Vigas etc.), (Ver Figura 9.1).



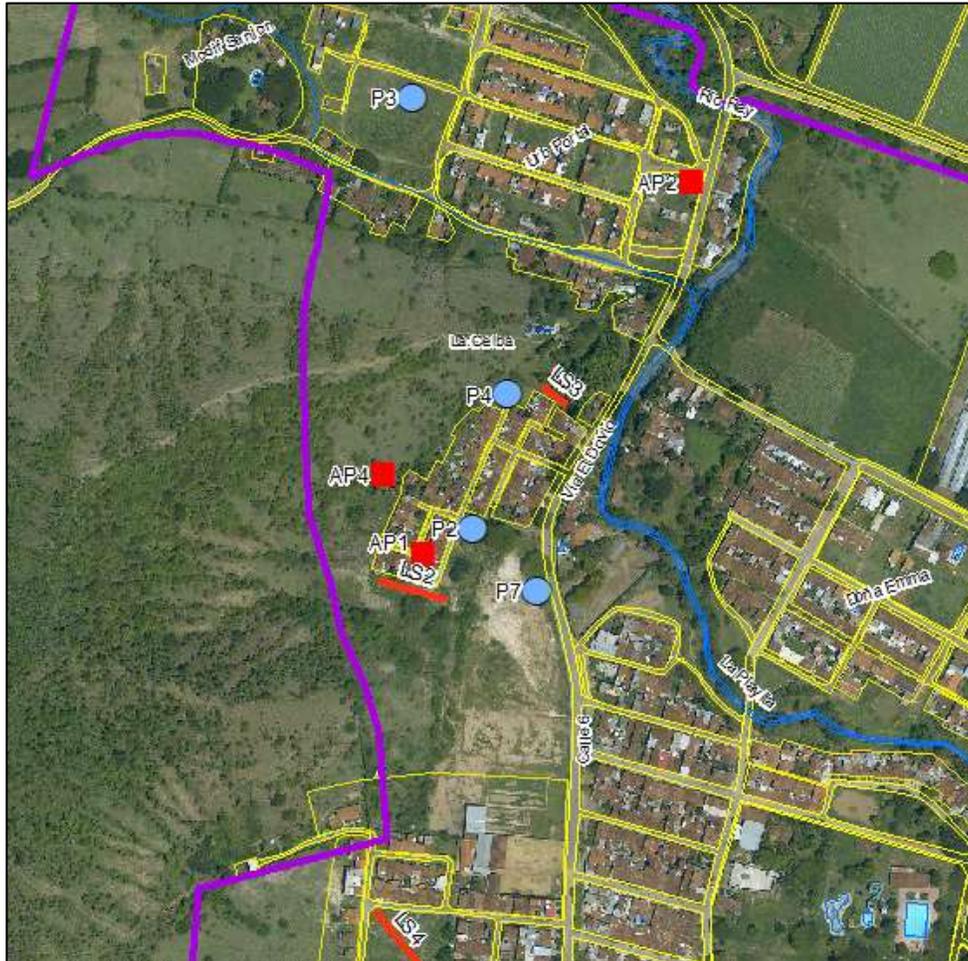
**Figura 9.1.** Fotos de viviendas del barrio La Ceiba

**Fuente:** fotografías propias

- Algunos predios presentan asentamientos, **posiblemente por fugas en el sistema de alcantarillado**, lo cual fue validado con la comunidad.
- El barrio en mención presenta **problemas con el manejo de aguas de escorrentía** debido a que está construido sobre la trayectoria de los drenajes.
- En la antigua ladrillera localizada en la parte baja del barrio, donde la actividad antrópica pudo haber generado problemas de inestabilidad del talud, dentro de este convenio se ha realizaron ensayos geotécnicos para determinar su estado actual.
- No se constatan evidencias de grietas de tracción, fallas o movimientos en masa que afecten la estabilidad de las laderas que se encuentran cercanas al barrio La Ceiba, debido a sus parámetros de resistencia ( $c=24$  KPa,  $\phi=25^\circ$  y  $\gamma=18.3$  KN/m<sup>3</sup>) de los materiales encontrados en la zona de estudio.

Para el barrio La Ceiba se realizó en el marco del convenio citado, la siguiente exploración geotécnica, la cual fue un insumo fundamental para determinar las condiciones de amenaza por movimientos en masa:

- Tres perforaciones a 6 metros de profundidad (Puntos de color azul en la Figura 9.2)
- Dos apiques a dos metros de profundidad (Cuadrados de color rojo en la Figura 9.2)
- Dos líneas de refracción sísmica a 30 metros de profundidad. (Líneas de color rojo en la Figura 9.2).
- Ensayos de Laboratorio (Corte directo, clasificación, granulometría, consolidación etc.)



**Figura 9.2.** Distribución y ubicación de los ensayos geotécnicos realizados en el marco del Convenio N°0205 de 2017 entre la CVC- Universidad del Valle para el estudio de amenaza por movimientos en masa en el barrio La Ceiba del municipio de Roldanillo.

**Fuente:** Elaboración propia

En la (Tabla 9.1), se resumen los niveles freáticos medidos, notándose que por lo general los niveles de agua son relativamente profundos, exceptuando los registrados en el sector más suroriental del área, debido seguramente al tipo de material predominantemente fino en dicho sector.

**Tabla 9.1.** Medición de los niveles freáticos durante las labores de exploración en el municipio de Roldanillo.

PERFORACIÓN / APIQUE	UGS	FECHA DE MEDICIÓN	NIVEL FREÁTICO (m)	CÁLCULO NIVEL FREÁTICO CON LLUVIA
P1	sa	Octubre 2018)	5	En superficie
P2	star	Octubre 2018)	4.3	En superficie
P6	Stct	Octubre 2018)	1,4	En superficie
AP-5	Stat	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-7	Sale	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-8	Saj	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-9	Staa	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-10	Stco	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-20	Sar	Octubre 2018)	-	En superficie
AP-21	Stc	Octubre 2018)	-	En superficie

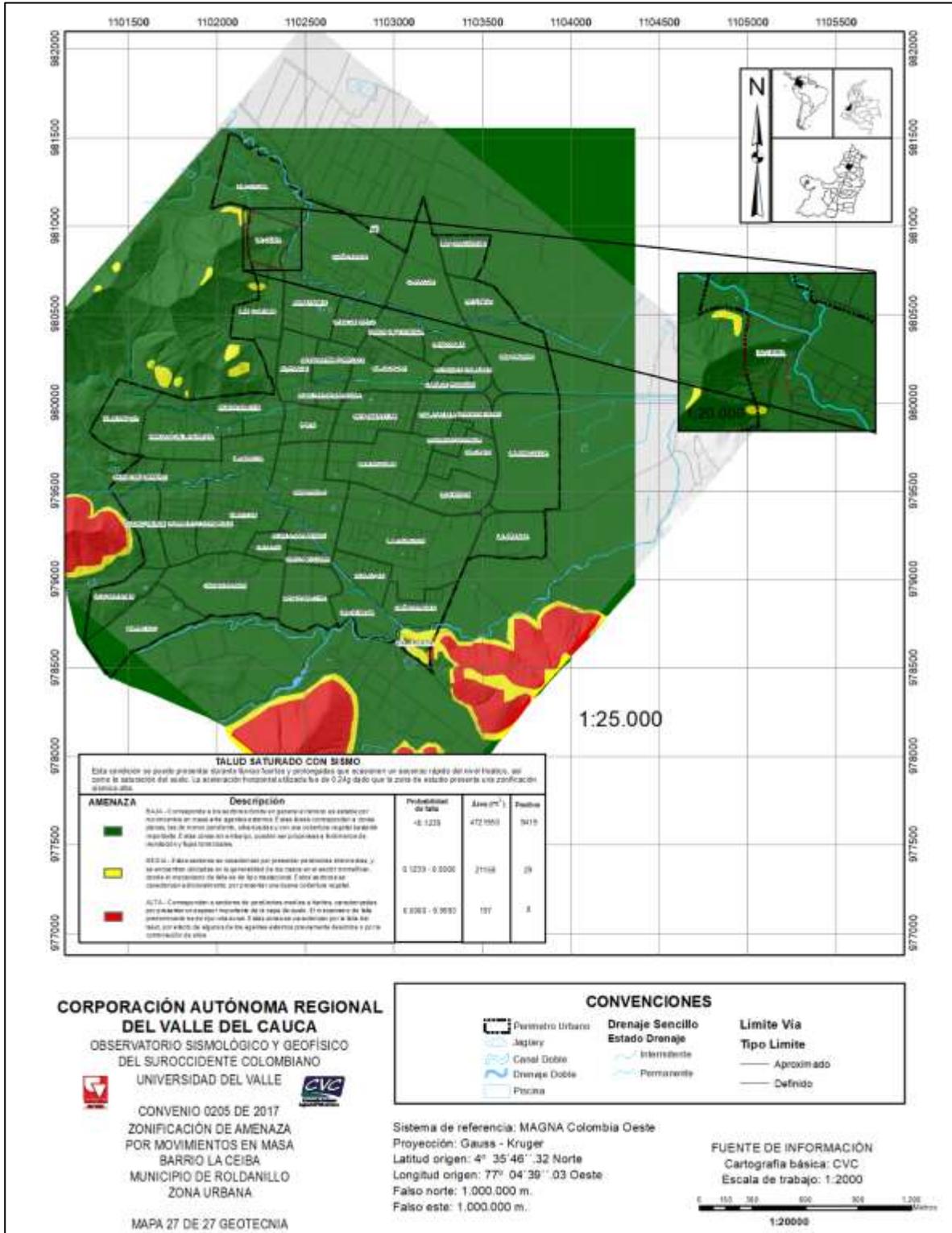
**Fuente:** Elaboración propia

Considerando los resultados, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, localiza a Roldanillo en zona de amenaza sísmica alta, asignándole un coeficiente de aceleración pico efectiva (Aa) de 0,25g a nivel de roca. Por otro lado, en el Título H (NSR-10), establece los coeficientes sísmicos pseudoestáticos (Kst), el cual específicamente para la zona de estudio es de 1,0.

La amenaza movimientos en masa para este estudio se obtuvo mediante diferentes modelaciones (talud infinito, método de Montecarlo y método constitutivo de resistencia de Mohr-Coulomb) de los parámetros de resistencia (cohesión, peso unitario de suelo y ángulo de fricción del suelo) lluvia (24 horas) y sismo (0,25 g) para la zona de estudio. Esta se evaluó en función de la probabilidad de falla, dado que este parámetro es más representativo que expresarlo en factor de seguridad.

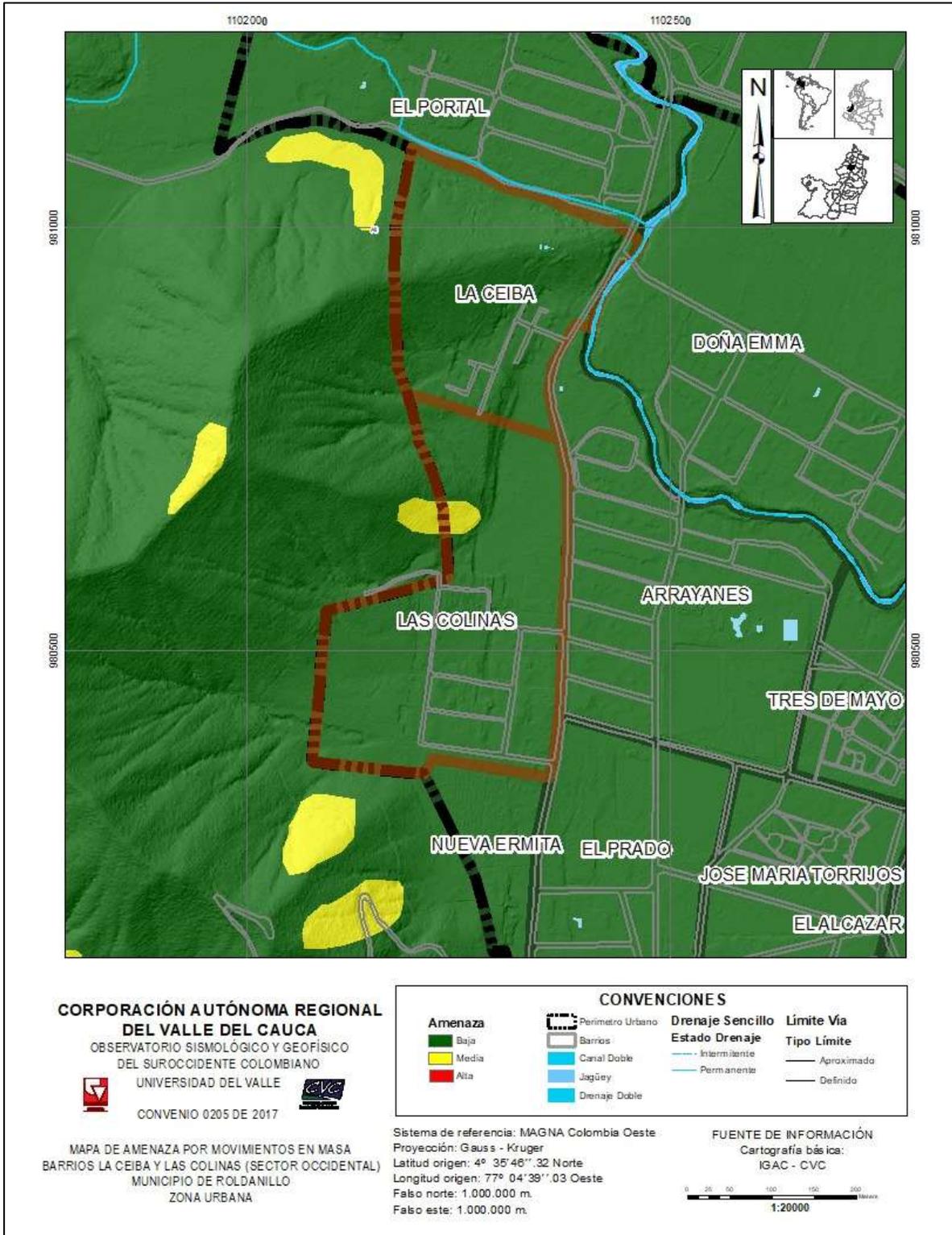
En la Figura 9.3, se presenta el mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Roldanillo, obteniendo los siguientes resultados.

- El barrio La Ceiba presenta amenaza baja por movimientos en masa debido a la resistencia de los materiales (Figura 9.4).
- El barrio Las Colinas presenta amenaza media en la zona de ladera entre el límite urbano y rural.
- El barrio Villa Rosita localizado al suroriente del municipio presenta amenaza media.



**Figura 9.3.** Mapa de Zonificación de Amenaza por movimientos en masa del municipio de Roldanillo

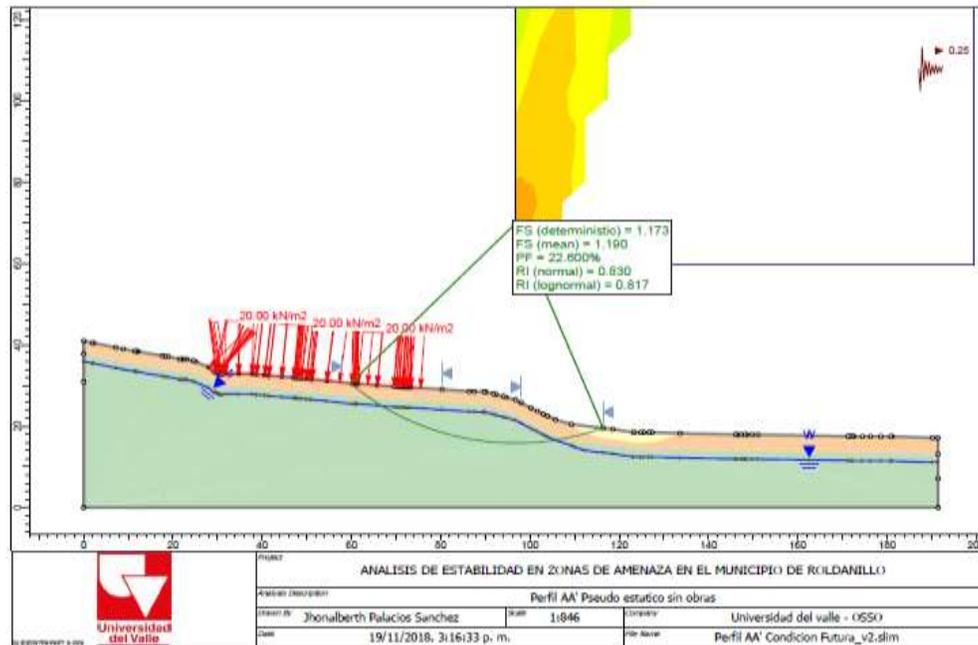
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 9.4.** Mapa de Zonificación de Amenaza por movimientos del barrio La Ceiba en el área urbana del municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia

En Figura 9.5, se muestra el perfil A-A' ubicado en el barrio La Ceiba, el cual presenta un factor de seguridad  $FS = 1,19$ , de acuerdo a la norma NSR-10 (2010) se considera que el talud posiblemente no va a fallar si no se cambia su estado actual.



**Figura 9.5.** Perfil A-A' ubicado en el barrio La Ceiba en el área urbana del municipio de Roldanillo

**Fuente:** Elaboración propia

### • Conclusiones y recomendaciones

Con respecto al barrio La Ceiba, después de realizar los estudios geotécnicos y definir las zonas de amenaza alta, media y baja ante movimiento en masa, se puede concluir que este barrio se encuentra en **Amenaza Baja**. **Este resultado es concordante con la información** histórica, en el cual no se obtuvieron registros de datos documentales ni relatos de la comunidad que den cuenta de la ocurrencia de este tipo de fenómenos en el sector.

De igual manera, las observaciones de campo, desde el punto de vista geológico y geotécnico, no revelaron manifestaciones de condiciones de inestabilidad de los taludes; sin embargo, se tienen prácticas antrópicas que podrían conducir a que se presenten algunas situaciones de erosión e inestabilidad.

Se recomienda que la zona de influencia de amenaza media de los posibles desprendimientos en el barrio Las Colinas, se definan unas restricciones en el uso o se construyan obras que disminuyan dicho nivel de amenaza, dado que estos desprendimientos por magnitud, intensidad y distancia de viaje, probablemente se van a depositar sobre la parte plana del barrio, antigua cantera.

## CONCLUSIONES

Este estudio ha sido elaborado principalmente con información primaria recolectada en un amplio trabajo de campo realizado por un grupo interdisciplinario de profesionales y metodologías acorde a las necesidades expuestas en el proyecto.

Se debe tener en cuenta que una unidad territorial como el municipio, posee unas dinámicas especiales, donde se presentan diferentes escenarios, como, infraestructuras, varias fuentes hídricas, que prestan una serie de servicios, y posee una amplia variedad de recursos naturales y económicos, que también se encuentran sometidas a actividades antrópicas que en su mayoría afectan de manera negativa la conservación de este tipo de lugares, razón por la cual deben considerarse las áreas susceptibles y que pueden llegar a convertirse en un riesgo futuro. Es necesario valorar el efecto adverso al cual se encuentran sometidos el territorio y la población asentada en el área de estudio, con el fin de tomar medidas en pro de la reducción de la amenaza. Los estudios de susceptibilidad por movimientos en masa sirven como base a la hora de elaborar proyectos relacionados con la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, la vulnerabilidad, el riesgo, gestión de riesgos y posibles escenarios de riesgos, pero no se recomienda ser tomado como un elemento para la planificación o toma de decisiones por parte del municipio o cualquier otro actor.

Es importante identificar y demarcar las zonas susceptibles a sufrir movimientos en masa, con el fin de ejercer una protección especial en estos sectores buscando que disminuya el proceso erosivo, se debe realizar un control en la zona de ladera ya que factores como las coberturas de la tierra inadecuadas a las condiciones del terreno, las aguas de escorrentía se convierten en un factor desestabilizador del suelo, y las obras que se realicen deben ser acorde con los tipos de suelo, las obras no deben aportar peso al suelo.

Se concluye que no se deben utilizar las zonas identificadas como inestables para localizar actividades antrópicas, las cuales pueden tener las siguientes características: altas pendientes, zonas con erosión, áreas aledañas a las riberas de los ríos, quebradas, o antiguos cauces, hasta que no se implementen las medidas ingenieriles adecuadas para reforzar y estabilizar el terreno.

En la zona de amenaza alta se recomienda no realizar construcciones y/o adecuaciones del terreno siempre y cuando no se realicen obras que mitiguen el impacto.

Las áreas con susceptibilidad alta se localizan al norte y noroccidente del municipio. En los barrios La Ceiba y El Portal, más exactamente hacia el límite municipal. En su mayoría la susceptibilidad alta se localiza por fuera del municipio.

El área afectada con susceptibilidad alta es pequeña representando un total de 1,02 Ha y un porcentaje de 0,21%, la susceptibilidad media abarca 41,12 Ha y un porcentaje de 8,73%, y la susceptibilidad baja es la más representativa con un área de 428,44 Ha y un porcentaje de 91,04% del área urbana del municipio de Roldanillo.

Los barrios más afectados por la susceptibilidad alta son: La Ceiba con un 3% del total del área del barrio, El Portal con un 2%. La susceptibilidad media se presenta en los barrios Las Colinas con un 61%, Nueva Ermita con 52%, El Portal con 11%, El Mirador con 72% y La Ceiba en un 61%

San Jose Obrero con 57% etc. La susceptibilidad baja se presenta en el resto del área del municipio siendo más representativa en los barrios Los Arrayanes con 99%, La Ermita con 99%, Ciudad Jardín con 97%, El Prado con 96%, Los Samanes con 90%, Humberto González con 72% etc.

Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes moderadas del abanico de Roldanillo, el cual se encuentra urbanizado y está ubicado hacia las zonas de piedemonte, al norte, occidente y noroccidente del municipio, en esta zona se encuentran localizados los barrios, El Portal, Las Colinas, Nueva Ermita, El Mirador, San José Obrero, al norte de Ciudad Verde, occidente de Ciudad Jardín y en Villa Rosita.

La amenaza por movimientos en masa en el municipio de Roldanillo se obtuvo al realizar modelaciones de los parámetros de resistencia, la lluvia y sismo que se presenta en la zona de estudio. La amenaza es baja en la mayor parte del territorio (99,50%), y media en un porcentaje notoriamente inferior (0,49%), y alta es del (0,01%), lo cual es el resultado de una baja susceptibilidad y la poca incidencia de los detonantes sobre el terreno.

Por otra parte, la amenaza media y alta más representativa se presenta en áreas pequeñas localizadas en los sectores sur, suroccidente y suroriente del municipio, cabe resaltar que estas áreas se encuentran por fuera del área de estudio.

El sector más afectado con amenaza media es donde se encuentra localizado el barrio Villa Rosita, esta área se ubica en el extremo sur del municipio de Roldanillo, y su nivel de afectación por amenaza media es de (56,22%) correspondiente a un área de 1.97 Ha.

Las zonas que presentan amenaza alta y media se deben contemplar como zonas de especial protección, con el fin de controlar su posterior deterioro, previniendo que nuevos asentamientos se den en estos lugares.

## REFERENCIAS

- Alcaldía del Municipio de Roldanillo (2000). Acuerdo N° 157 del 14 de noviembre de 2000, por medio del cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial PBOT. Roldanillo. Colombia
- Alcaldía del Municipio de Roldanillo (2012). Formulación del Plan Municipal de Gestión del Riesgos de Desastre. Roldanillo. Colombia
- Alcaldía de Roldanillo, (2016). Acuerdo 006 del 31 de mayo de 2016, Por el cual se adopta el Plan de Desarrollo del Municipio de Roldanillo- Roldanillo, Colombia
- Alcaldía de Roldanillo, (1999). Acuerdo municipal N° 102 del 20 de septiembre de 1999. Recuperado de:  
<http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/roldanillovalledelcaucapd2012-2015.pdf>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá. 226 p. disponible en: [http://www.r-crisis.com/Content/files/EstudioGeneraldeAmenazaSismicadeColombia2009\\_AIS\\_lowres.pdf](http://www.r-crisis.com/Content/files/EstudioGeneraldeAmenazaSismicadeColombia2009_AIS_lowres.pdf)
- Australian Geomechanics Society-AGS (2007). Commentary on guideline for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Aust Geomech, 42(1), 37-62.
- Baeza, C. 1994. Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Becerra Y; Chamba L; Chillón E; Cusma J; Manchay A; Monja Y; Roncal A; Torres R (2015). Ensayo Consolidación de Suelos. Informe de Laboratorio. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, (Usat). Universidad católica. Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.
- Cardona, O (2013). Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y el Caribe. Washington, D.C.
- Carrara, A. (1983). Multivariate model for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, vol. 15, No. 3 pp. 403 - 427
- Charman y Murphy. (2000). Soils: their properties and management / editors, P.E.V. Charman, B.W. View the summary of this work. Disponible en línea en: <https://trove.nla.gov.au/work/5879575>
- Congreso de la Republica de Colombia (24 de abril de 2012). Ley de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Ley 1523 de 2012). DO: 48.411
- Corominas et al (2013): Evaluating Measurement Invariance for Social and Political Trust in Western Europe over Four Measurement Time Points (2002-2008), Ask Research & Methods, 22(1), 37–54.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Universidad del Valle (2010). Zonificación de Amenazas y Escenarios de Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Crecientes Torrenciales del Área Urbana y de Expansión de los Municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión. Proyecto Midas, Contrato Interadministrativo CVC – Univalle 188 De 2008.

- Corporación OSSO- Colombia, LA RED y UNIDR (2017). Desinventar. Sistema de inventario de efectos de desastres. Recuperado de: <http://www.desinventar.org/es/>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), (2015) Illustrated guide to soil taxonomy. 2015, segunda edición. Recuperado de: [file:///D:/Users/osso/Downloads/Illustrated\\_Guide\\_to\\_Soil\\_Taxonomy.pdf](file:///D:/Users/osso/Downloads/Illustrated_Guide_to_Soil_Taxonomy.pdf)
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) (2014). Claves para la taxonomía de los suelos. Recuperado de: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051546.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf)
- Domaas, U. (1994). Geometrical methods of calculating rockfall range Oslo. NGI, 585910-1. 21 pp.
- Duque, G y Escobar, C. E. (2002). 1. MECÁNICA DE LOS SUELOS I. Notas del curso Suelos I. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Duque Escobar, G. y Escobar P., C. E. (2016). Origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas. Geomecánica para ingenieros. Geomecánica. Universidad Nacional de Colombia. Documento en línea, (consultado el 10/10/2018). Disponible en <http://galeon.com/geomecanica>
- Escobar, C. y Duque, E. (2002) Geotecnia para el trópico andino. N/A, Manizales, Colombia. (No publicado). Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>
- Finlay, P.J., Mostyn, G.R. y Fell, R. (1999). Landslide risk assessment: prediction of travel distance. Canadian Geotechnical. Journal 36: 556-562.
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005): Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, Ra-Ma.
- González, A. J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana.
- González, A. J., y Millan, J. A. (2005). Landslide hazard evaluation for Bogotá, Colombia. In Proc. of the International Conference on Landslide Risk Management. Balkema Publisher (Hungr, Fell, Couture y Eberhardt Editors). Vancouver, Canada. pp. 475-485.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Editorial Pearson, 744p.
- Guzzetti, F (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy
- Hermelín, M. Toro, G. Velásquez (1984), Génesis de los depósitos de las vertientes en el sur del Valle de aburra. Resúmenes 1, conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburra.
- Hervás de Diego, Javier (2001). Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación al Barranco de Tirajana (Gran Canaria) V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Madrid España.
- Heuvelink, G. (1996). Error propagation in quantitative spatial modelling: applications in geographical information systems. Nederlandse Geografische Studies. 163.
- Hsu, K. J. (1975). Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. Geological Society of America Bulletin, 86 (1), 129-140.
- Hubp J. (2011). Diccionario Geomorfológico. Geografía para el siglo XXI. Serie: textos universitarios, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. México D.F.
- Hungr, O., Corominas, J. y Eberhardt, E. (2005). State of the Art Paper # 4. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. Landslides Risk Management. Proceedings. Vancouver, Canadá.

- Ibañez, D., Castro, E., Arturo J., Perez, R. y Cuellar M. (2012). Geología y Geomorfología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Intituto Geografico Agustín Codazzi -IGAC. (2012). Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos en Masa. Bogotá D.D., Cundinamarca, Colombia.
- INGEOMINAS (2012). Instituto Colombiano de Geología y Minería. Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental Estudios de Geología y Geomorfología Escala 1:25.000 para la Reubicación del Casco Urbano del Municipio de Gramalote, Departamento Norte de Santander. Volumen 1. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS (2006), Mapa Geológico de Colombia, Escala 1:2.800.000, Bogotá
- INGEOMINAS (2002). Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Movimientos en Masa en Colombia. Bogotá D.C.
- INGEOMINAS y CVC. (2001). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa: Guía Metodológica. Cali, Valle, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2018) documento en línea, consultado el 1/08/2018). Recuperad de: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. [Documento en línea]. [16 de junio de 2018]. Recuperado de: [http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM\\_oficial\\_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745](http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745)
- Jimeno, C. L. (Ed.). (2013). Ingeniería del terreno. UD Proyectos, ETSI Minas, UPM.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. Land degradation & development, 12(6), 519-539. Disponible en, consulta 10 de dic de 2018 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.472>
- Medina Quira Yeidy (2017). Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Patía – departamento del Cauca. Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Manizales, Colombia.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NRS 10. Título H- Estudios geotécnicos. Bogotá DC.
- Ministerio de Vivienda, Salud y territorio de Colombia (2014). Decreto 1807: "Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones" [Documento en línea]. [16 de junio de 2018]. Recuperado <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/SEPTIEMBRE/19/D ECRETO%201807%20DEL%2019%20DE%20SEPTIEMBRE%20DE%202014.pdf>
- Mora, Chaves, Vásquez Fer (2013). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación de método Mora – Vahrson. Costa Rica. [Consulta: 31/07/2018] Disponible en: <https://www.slideshare.net/JUANCA650/deslizamientos-26707366>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), (2018). Taxonomía de suelos USDA. Recuperad en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/taxonomia-de-suelos-de-usda/es/>

- Pérez, J.L., Salcedo-Hurtado, E.J., y Mora-Páez, H. (2014). Análisis Sismotectónico Regional como Contribución al Estudio de las Fuentes Sismogénicas Locales en la Zona del Embalse Calima, Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Geología*, 36 (2): 101-124.
- Restrepo y Velásquez (1997). *Resiliencia de los Ecosistemas Tropicados de Montaña Frente al Cambio: Biodiversidad, Procesos y Deslizamientos de Tierra*. Cali: OSSO para COLCIENCIAS. Propuesta, 62 p.
- Romana, M. (1995). "The geomechanical classification SMR for slope correction". En: FUJII (ed.) *Proc. 8th Int. ISRM Congress*.
- Santacana. (2001). *Análisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregar. Análisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregar*. Barcelona, Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C (13 de julio de 2006). Resolución 227 de 2006. "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=20845>
- Servicio Geológico Colombiano- SGC (s.f). *Glosario de términos*. En línea. 20 de junio de 2018 Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx#InplviewHash5aa0669c-85e8-44a8-a289-25b056edb64e=>
- Servicio Geológico Colombiano -SGC- SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa) (2018). *Catálogo de movimientos en masa*. Recuperado de: <http://simma.sgc.gov.co/>
- Servicio Geológico Colombiano -SGC. (2013). *Servicio Geológico Colombiano. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa Escala 1:100.000, versión 2*. Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano -SGC. (2015). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia
- Servicio Geológico Colombiano -SGC y Universidad Nacional de Colombia (2010). *Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años. Escala 1:1.500.000*.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (s.f). *Degradación de suelos*. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/erosion>
- Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A. (2007). *Reconocimiento geotécnico del terreno*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Suárez J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Recuperado de: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Universidad Tecnológica de Pereira, 2008. *Scientia et Technica El Proceso de Análisis Jerárquico (Ahp) y la Toma de Decisiones Multicriterio. Ejemplo de Aplicación*. No 39. ISSN 0122-1701 247 Fecha de Recepción: 7 de junio de 2007. Fecha de Aceptación: 13 de agosto de 2008.
- Van Westen C. J., Castellanos E., y Kuriakose S. L. (2008) *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview*. *Engineering Geology* 102(3-4):112-131

- Varnes, D. (1978). Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. Washington. D.C: National Academy of Sciences.
- Villalta A y González M (2011). Zonificación de Amenazas Geológicas por Movimientos en Masa que permita el Ordenamiento Territorial en la Urbanización Ciudad Victoria de Loja (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador  
<http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16301/1/Gonz%C3%A1lez%20Capa%20Mar%C3%ADa%20Paola%20Villalta%20Castillo%20Azucena%20Ondina.pdf>
- Yue, Z. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distance underdense gas expanding power. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 3. Springer, pp. 233-240.

## **ANEXOS**

- Anexo 1. Cartografía susceptibilidad por movimiento en masa
- Anexo 2. Archivo fotográfico amenaza MM
- Anexo 3. Registros de perforaciones, apiques y líneas sísmicas
- Anexo 4. Ensayos de laboratorio
- Anexo 5. Análisis de estabilidad en zonas de amenaza alta y media
- Anexo 6. Cartografía Amenaza por MM