

**ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA A
ESCALA 1:25000, MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS BIVARIADO Y
MULTIVARIADO PARA EL MUNICIPIO DE HELICONIA, DEPARTAMENTO DE
ANTIOQUIA**

PROYECTO DE GRADO

AUTOR:

HENRY YITKZSHAR DURAN FERREIRA

ASESOR:

MARCO FIDEL GAMBOA RAMÍREZ

MEDELLIN ANTIOQUIA

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Medellín, 22 de octubre de 2018

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	7
INTRODUCCIÓN.....	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2. PREGUNTA DEL TRABAJO	12
3. HIPÓTESIS	12
4. OBJETIVO GENERAL	12
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
6. METODOLOGÍA.....	13
7. CONCEPTUALIZACIÓN.....	15
8. LOCALIZACIÓN.....	16
9. MARCO REGIONAL.....	17
10. VARIABLES METODOLÓGICAS	19
10.1 Variables morfométricas	20
10.1.1 Pendiente.....	20
10.1.2 Relieve relativo.....	22
10.1.3 Curvatura.....	24
10.2 Variables de distancia.....	27
10.2.1 Distancia drenajes.....	27
10.2.2 Distancia vías	29
10.2.3 Distancia fallas.....	30
10.3 Variables temáticas.....	32
10.3.1 Geología.....	32
10.3.1.1 Paleozoico	34
10.3.1.2 Mesozoico.....	36
10.3.1.3 Cenozoico	48
10.3.2 Geomorfología	50
10.3.3 Cobertura.....	68
10.4 Morfodinámico	74
11. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	79
11.1 Susceptibilidad con el método estadístico bivariado	79
11.1.1 Susceptibilidad por deslizamientos	81

11.1.2	<i>Susceptibilidad por flujos</i>	85
11.1.3	<i>Susceptibilidad por Movimientos en masa</i>	88
11.2	<i>Susceptibilidad con el método estadístico multivariado</i>	92
11.2.1	<i>Susceptibilidad por Movimientos en masa (Regresión logística)</i>	95
12.	CONCLUSIONES	100
13.	RECOMENDACIONES	103
14.	BIBLIOGRAFÍA	105

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 flujograma metodológico</i>	13
<i>Ilustración 2 Mapa de localización del municipio de Heliconia</i>	17
<i>Ilustración 3 mapa de pendientes del municipio de Heliconia</i>	22
<i>Ilustración 4 mapa de relieve relativo del municipio de Heliconia</i>	24
<i>Ilustración 5 de curvatura del municipio de Heliconia</i>	26
<i>Ilustración 6 mapa de distancia drenajes del municipio de Heliconia</i>	28
<i>Ilustración 7 mapa de distancia vías del municipio de Heliconia</i>	30
<i>Ilustración 8 mapa de distancia fallas del municipio de Heliconia</i>	32
<i>Ilustración 9 mapa de geología del municipio de Heliconia</i>	33
<i>Ilustración 10 a) afloramiento de esquistos de Sabaletas (Esquistos grafitosos) b) afloramiento esquistos Sabaletas (Esquistos verdes)</i>	35
<i>Ilustración 11 afloramiento de metasedimentos de Sinifaná en la vía pueblito-Heliconia.</i>	36
<i>Ilustración 12 afloramiento de Diorita de Pueblito en la quebrada la sucia...</i>	38
<i>Ilustración 13 afloramiento de Monzogranito de Amagá en la vía Pueblito-Medellín</i>	39
<i>Ilustración 14 afloramiento de Gabros de Heliconia en la vía Heliconia-hacienda la cañada</i>	41

<i>Ilustración 15 afloramiento de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-hacienda la cañada</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 16 afloramiento de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-hacienda la cañada</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 17 muestra serpentizada de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-hacienda la cañada</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 18 afloramiento complejo QuebradaGrande en la vía Pueblito-Medellín</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 19 basalto verde rodado del complejo Quebrada grande vía Pueblito-Medellín.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 20 afloramiento Diorita de Heliconia en la vía Pueblito-Medellín.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 21 muestra Diorita de Heliconia en la vía Pueblito-Medellín.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 22 afloramiento Formación Amagá en la vía Heliconia-Hacienda la cañada.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 23 mapa geomorfológico del municipio de Heliconia.....</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 24 modelo de sombras donde se delimita la subunidad de cima a) cima del corregimiento Alto del Corral b) cima vereda Monte dentro</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 25 cono o lóbulo de deslizamiento rotacional. a) mapa de pendientes con delimitación de unidad. b) cono o lóbulo en la vía pueblito-Armenia.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 26 Escarpe de erosion menor. Mapa de pendientes con delimitación de unidad.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 27 Ladera ondulada. a) mapa de pendientes con delimitación de unidad vía Heliconia-Ebejico . b) ladera ondulada en las cercanías a Pueblito.</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 28 Lomo disectado bajo en limites Heliconia-Ebejico.</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 29 lomo denudado bajo de longitud larga. a) Lomo denudado bajo de longitud larga límite Heliconia-Ebejico b) Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 30 Lomo denudado moderado de longitud corta en límites Heliconia-Armenia.....</i>	<i>56</i>

<i>Ilustración 31 lomo desnudo moderado de longitud larga. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 32 sierra desnuda en límites Heliconia-Ebejico.</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 33 Espinazo en cercanías con la cabecera municipal vereda el Crucero.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 34 espolón facetado en cercanías con la cabecera municipal vereda la Chorrera.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 35 espolón bajo de longitud larga. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 36 espolón bajo de longitud moderada en cercanías del corregimiento Pueblito en la vereda el Crucero</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 37 espolón moderado de longitud baja en cercanías del corregimiento de el Alto del Corral en la vereda el Hatillo</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 38 espolón moderado de longitud media. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 39 Gancho de flexión en cercanías de la cabecera municipal en la vereda el Hatillo.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 40 Ladera de contrapendiente. Mapa de pendientes con delimitación de unidad.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 41 Ladera estructural vereda el Tablazo. Mapa de pendientes con delimitación de unidad.....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 42 Lomo de falla en cercanías del corregimiento de pueblito, por el trazo de la falla Sabaletas en la vereda el Crucero.</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 43 Lomo de presión vereda Monte dentro, por el trazo de la falla Quirimara.</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 44 Sierra estructural vereda Monte dentro, por el trazo de la falla Quirimara.</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 45 Llanura de inundación de la Quebrada la Sucia en el sector norte del municipio</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 46 Mapa de cobertura del municipio de Heliconia</i>	<i>74</i>

Ilustración 47 Mapa de distribución de movimientos en masa en el municipio de Heliconia	76
Ilustración 48 deslizamiento rotacional en cercanías del casco urbano sobre las Ultramafitas de Angelopolis	77
Ilustración 49 deslizamientos traslacionales en cercanías del corregimiento de pueblito sobre las Ultramafitas de Angelopolis	78
Ilustración 50 deslizamientos en cercanías a la cabecera municipal vía Heliconia- Medellín sobre la formación amaga.....	78
Ilustración 51 flujos de tierra a) vereda Monteadentro b) vereda el Guarnal .	79
Ilustración 52 metodología bivariada índice estadístico	80
Ilustración 53 cálculo del W_i, tomado de CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015.....	80
Ilustración 54 ecuación para la obtención de W_i.....	81
Ilustración 55 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico bivariado (índice estadístico)	82
Ilustración 56 Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia.....	83
Ilustración 57 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico bivariado (índice estadístico).....	85
Ilustración 58 Mapa de susceptibilidad por flujos según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia	86
Ilustración 59 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para movimientos en masa por el método estadístico bivariado (índice estadístico)	89
Ilustración 60 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia.....	90
Ilustración 61 metodología multivariada regresión logística	93
Ilustración 62 ecuación de regresión logística.....	94
Ilustración 63 ecuación de probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa según regresión logística.....	95

<i>Ilustración 64 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para movimientos en masa por el método estadístico multivariado (regresión logística).....</i>	96
<i>Ilustración 65 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia.....</i>	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de reclasificación para el mapa de pendientes	20
Tabla 2 valores de reclasificación para el mapa de relieve relativo	23
Tabla 3 valores de reclasificación para el mapa de relieve relativo	25
Tabla 4 valores de reclasificación para el mapa de distancia drenajes	28
Tabla 5 valores de reclasificación para el mapa de distancia vías	29
Tabla 6 valores de reclasificación para el mapa de distancia fallas	31
Tabla 7 datos para el mapa de cobertura	69
Tabla 8 distribución de movimientos en masa	76

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a todas las personas que de una u otra forma aportaron de una forma positiva a la realización de este proyecto y aquellas que brindaron un aporte en su conocimiento para mi formación como persona, agradecerle a mi asesor y profesor Marco Gamboa por todos los conocimientos aportados y todo su tiempo, también al profesor Henry Ladiano del departamento de ciencias matemáticas por su colaboración y a todas las personas que con sus aportes contribuyeron.

Muchas gracias.

INTRODUCCIÓN

Un fenómeno de origen natural como movimientos en masa, inundación, avenidas torrenciales, entre otros, constituye una amenaza para las vidas humanas y para los bienes y servicios de las personas, ya que la propagación de este puede generar un alto impacto en lo económico y social, haciendo necesario conocer, estudiar y entender los fenómenos, para que de este modo se pueda ejecutar o desarrollar un ordenamiento territorial idóneo para brindar una mejor calidad de vida a las personas y municipios.

Por lo tanto, en este estudio se encuentra el resultado de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Heliconia, el cual pretende brindar una orientación al municipio hacia un uso adecuado del suelo, con la finalidad de generar un bienestar a la población y un adecuado ordenamiento territorial.

En este caso en particular se desarrollaron dos metodologías para generar la zonificación de susceptibilidad, correspondiendo a las metodologías estadísticas bivariadas y multivariadas, de las cuales se obtienen resultados coherentes con las condiciones del municipio y con los parámetros predispuestos por el SGC, 2017.

Por lo tanto para poder desarrollar estas metodologías se requirió la generación de ciertas variables que son favorables para la propagación de fenómenos de remoción en masa tales como geología, geomorfología, curvatura, pendientes, relieve relativo, cobertura, distancia a fallas, drenajes y vías, y la realización de una base de datos de movimientos en masa en todo el municipio, para de este modo poder ejecutar las metodologías que posteriormente se explicaran a fondo.

Como resultados se puede mencionar que las metodologías cuentan con unas curvas de éxito resultantes que tiene una área bajo la curva superior a 0.70 lo cual hace que el mapa resultante sea aceptado y viable, también se puede destacar que el municipio tiene una mayor cantidad de área perteneciente a susceptibilidades medias y en menor proporción áreas de susceptibilidad alta y baja, que a lo largo de la ejecución del proyecto se muestran gráficamente y de forma porcentual.

Por último cabe mencionar y destacar que el municipio de Heliconia cuenta con un EOT (esquema de ordenamiento territorial) del año 2002, el cual no posee los elementos necesarios dispuestos por la legislación actual en temas relacionados a fenómenos naturales, por lo tanto el municipio no cuenta con estudios relacionados al análisis o a la zonificación de dichos fenómenos, haciendo necesario la realización de este proyecto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los movimientos en masa son fenómenos naturales que contribuyen a la evolución del paisaje y que para su propagación requieren de desencadenantes naturales o antrópicos tales como: cambios meteorológicos (precipitaciones intensas y prolongadas o deshielo), forzamientos tectónicos rápidos (sismos, o erupciones volcánicas) y perturbaciones humanas que incluyen cambios en el uso de la tierra, deforestación, excavación, cambios en el perfil de pendiente, entre otros (Guzzetti et al, 2005). En la tierra (planeta), el volumen de los movimientos en masa abarca una gran dimensión. Ya que estos pueden ocurrir aisladamente o en grupos de hasta varios miles (Guzzetti et al, 2005). Por lo tanto los deslizamientos representan un problema para la población asentada, ya que aumentan la vulnerabilidad y el riesgo de los municipios, afectando la infraestructura, los bienes y la vida (calidad de vida) (Mujica, 2013).

Globalmente, las metodologías utilizadas para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa son un área importante de investigación, que ha sido potenciada por el uso de tecnologías tales como los sistemas de información geográfica (SIG), datos e imágenes satelitales y la incorporación de procedimientos estadísticos (Roa, 2006). Una de las metodologías más utilizadas es la heurística, en la cual se utilizan las opiniones de expertos para estimar el potencial de deslizamientos a partir de los datos de las variables independientes del lugar (Castellanos y Van Westen, 2008). Otros métodos utilizados son los modelos estadísticos, los cuales combinan factores que han generado los movimientos en masa en el pasado y que se pueden determinar de forma numérica. De esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares (SGC, 2013). Un ejemplo de los muchos realizados en todo el mundo, es el trabajo realizado en Champagne, Francia, en el cual se realizó una comparación entre modelos heurísticos y estadísticos, determinando que los modelos estadísticos tiene una mejor capacidad de predicción en comparación con modelos heurísticos (Eeckhaut et al, 2010).

En Colombia, a partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), 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 (SGC, 2014), pero se hace referencia de que la mayor parte de estos estudios se desarrollan con metodologías heurísticas, que son los modelos con menor capacidad de predicción en comparación con los modelos estadísticos, generando un mayor rango de especulación (SGC,2014), pero dando por sentado que actualmente los estudios implementados se asocian a metodologías estadísticas.

En el Departamento de Antioquia, según cifras publicadas de la Unidad Nacional de la Gestión del Riego y Desastres (UNGRD) corresponde al departamento con mayor afectación en pérdidas de vida relacionadas a fenómenos hidrometeorológicos desde 2006-2014, siendo el evento de movimientos en masa (deslizamientos) la causa principal de muerte con un total de 283 (48%) de un total de 432 (departamento nacional de planeación, 2015). Por otra parte el occidente del departamento de Antioquia más específicamente el municipio de Heliconia, además de contar con las condiciones adecuadas para la propagación y generación de movimientos en masa (altas pendiente, condiciones estructurales) corresponde una zona en la cual no existe esta clase de estudios relacionados a amenazas naturales (Corantioquia, 2015), generando incertidumbre a los habitantes del municipio, y haciendo necesario la realización de estudios relacionados a amenazas naturales y en especial a fenómenos de remoción en masa para así generar un mejor ordenamiento territorial y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

2. PREGUNTA DEL TRABAJO

Por lo tanto esta investigación pretende elaborar mapas de susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Heliconia (ilustración.2) según la metodología estadística bivariada y multivariada, con el fin de determinar *¿cuáles son las zonas más propensas y recurrentes a movimientos en masa en el municipio de Heliconia y cuál es la variable que más incide en su ocurrencia?*, para de este modo clasificar o zonificar el municipio de acuerdo con el grado real o potencial de susceptibilidad por movimientos en masa y generar conclusiones y recomendaciones orientadas al uso adecuado del suelo.

3. HIPÓTESIS

Debido a las condiciones geológicas, tectónicas, geomorfológicas y físicas que presenta el municipio de Heliconia, se puede determinar que la variable que más afecta o incide en la ocurrencia en movimientos en masa corresponde a la variable de distancia fallas, teniendo en cuenta que una gran proporción de los movimientos en masa caracterizados se encuentran en cercanías a los trazos de fallas presentes en el municipio, haciendo así que las zonas más propensas sean también aquellas que se encuentren en cercanías de dichas estructuras.

4. OBJETIVO GENERAL

- Elaborar mapas de susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Heliconia a escala 1:25000.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar base de datos de movimientos en masa

- Elaborar cartografía geológica y geomorfológica, a su vez la generación de mapas de diferentes variables tales como pendientes, curvatura, relieve, cobertura, fallas, vías y drenajes para el municipio de Heliconia a escala 1:25.000 (rural)
- Zonificar el municipio de acuerdo con su grado real o potencial de susceptibilidad por movimientos en masa
- Generar Conclusiones y recomendaciones orientadas al uso adecuado del suelo

6. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la elaboración del presente proyecto, se sintetiza en el flujograma metodológico (Ilustración.1). Y se describe a continuación:

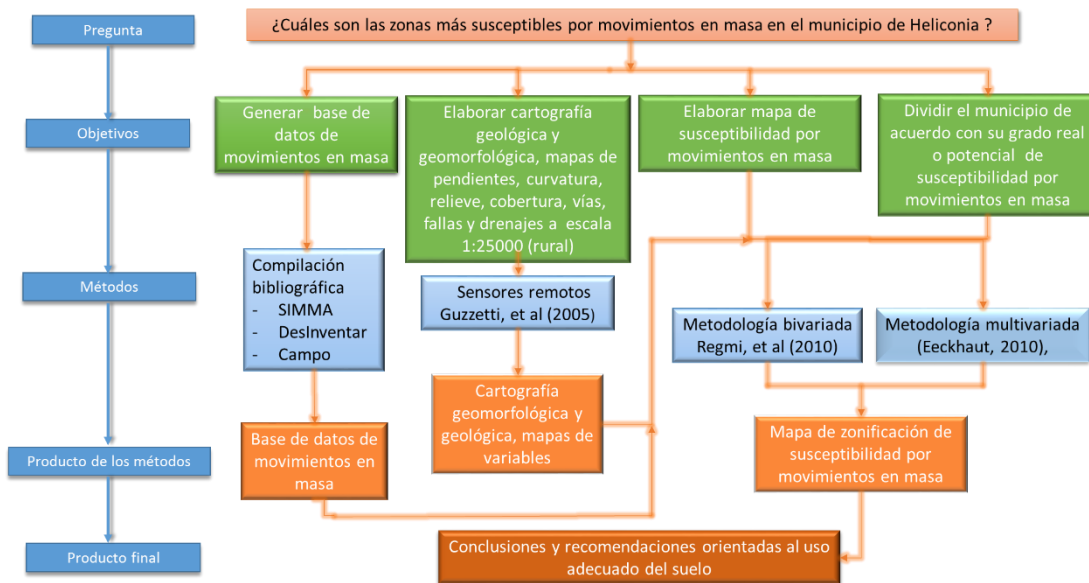


Ilustración 1 Flujograma metodológico

Compilación bibliográfica de movimientos en masa

Creación de base de datos: los datos relacionados a recurrencia de movimientos en masa en el municipio de Heliconia, serán recolectados a partir de las bases de datos presentes en el SIMMA (sistema de información de movimientos en masa), DesInventar y en el trabajo de campo a realizar. Con dicha información recolectada se generará un inventario de movimientos en masa con las especificaciones del SGC, 2017, las cuales corresponden a la caracterización de cada movimiento con una clasificación idónea a su forma o naturaleza y una asignación de siglas que caractericen su naturaleza.

Sensores remotos

A partir del análisis de sensores remotos se identificarán macro-unidades y variaciones espaciales locales enfocadas en la identificación morfológica, que de este modo permita evaluar las diferencias geomorfológicas presentes, para generar una delimitación geomorfológica espacial del municipio de Heliconia, tomando como referencia la metodología realizada en el trabajo de estudio de Guzzetti, 2005.

Análisis estadístico bivariado

El mapa de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa será realizado mediante metodología bivariada (Regmi, et al 2010), en las cuales se tiene en cuenta dos variables X y Y, siendo estas: los movimientos en masa (compilados anteriormente) y condiciones intrínsecas de la zona (geología, geomorfología, pendientes etc), que al combinarse van a generar un valor estimado de susceptibilidad por movimientos en masa, para que de este modo se pueda construir la zonificación de susceptibilidad.

Análisis estadístico multivariado

El mapa de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa será realizado mediante metodología multivariado (Eeckhaut, 2010), la cual permite relacionar

variables dependientes con variables independientes y en la cual se modela la probabilidad que un evento ocurra y en la cual para cada unidad muestreada se determina la presencia o ausencia de movimientos en masa

7. CONCEPTUALIZACIÓN

A continuación, se genera un glosario y se definen ciertos términos relacionados con el tema

Susceptibilidad: se entiende como la predisposición de un lugar a presentar algún fenómeno natural, y está relacionado a las condiciones en las cuales se encuentre el terreno, como por ejemplo su geología, pendiente, cobertura, entre otras (SGC, 2013). En otras palabras corresponde a una estimación en términos cuantitativos y cualitativos de una zona en la cual se pueden o no generar movimientos en masa, y esta susceptibilidad resulta de la correlación entre las variables que influyen a la propagación de movimientos en masa y determinar la relación entre las características del terreno y la ocurrencia de movimientos en masa (SGC, 2013).

Zonificación: se define como la división de la superficie del terreno en diferentes áreas y la clasificación de acuerdo a un grado de susceptibilidad por movimientos en masa (SGC, 2013)

Movimiento en masa: fenómenos naturales que contribuyen a la evolución del paisaje, he incluye todos aquellos movimientos de una masa de roca o tierra ladera bajo, y estos se clasifican respecto a su material y a la velocidad en la cual se generan.

Método estadístico bivariado: En el análisis estadístico bivariado cada factor de mapeo por ejemplo pendiente, geología, cobertura vegetal, se combina con la distribución de los movimientos en masa en el mapa y se calculan valores ponderados de densidades de movimientos en masa para cada clase (W_i), por ejemplo clase de unidad litológica, tipo, cobertura del suelo, entre otros (SGC, 2013).

Método estadístico multivariado: Para su aplicación se muestrean todos los factores relevantes como unidades morfométricas. Para cada unidad muestreada se determina la presencia o ausencia de movimientos en masa. La matriz que resulte se analiza usando regresiones múltiples o análisis discriminantes. Con estas técnicas se han tenido buenos resultados en zonas homogéneas o en áreas con apenas pocos movimientos en masa (SGC, 2013).

8. LOCALIZACIÓN

El municipio de Heliconia se encuentra localizado en la subregión occidental del departamento de Antioquia al occidente del municipio de Medellín, limitando con los municipios de Ebéjico, al norte, Angelópolis, al sur, Medellín, al este y con Armenia (Mantequilla) al oeste. El municipio abarca una extensión aproximada de 114,84km² y cuenta con una vía de acceso principal la cual es la que comunica la cabecera principal del municipio con el corregimiento de San Antonio de Prado del municipio de Medellín y con vías secundarias que comunican la cabecera con los corregimientos de Pueblito, Alto del Corral y Llanos de San José y con los municipios de Ebéjico y Armenia.

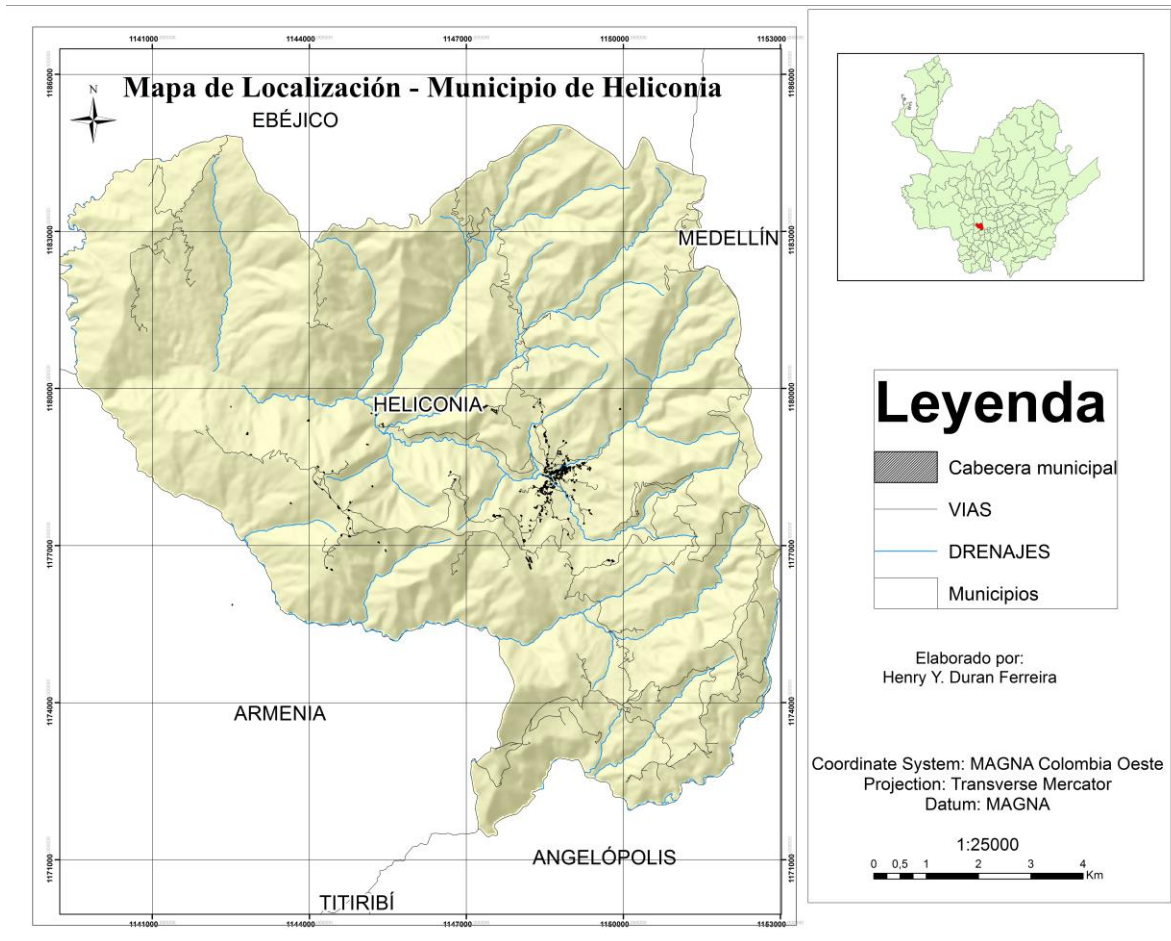


Ilustración 2 Mapa de localización del municipio de Heliconia

9. MARCO REGIONAL

El área de estudio se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la cordillera central y cuenta con una alta actividad tectónica compresiva que se refleja en la interacción de varios sistemas de fallas produciendo un fuerte plegamiento y fracturamiento de las rocas allí presentes, los cuales se representan en múltiples eventos deformativos, que en su mayoría se encuentran enmascarados por los diversos procesos ocurridos en el neógeno y cuaternario (Gonzales, 2001).

El municipio de Heliconia está conformado por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias de las cuales su basamento corresponde a rocas metamórficas del paleozoico el cual se encuentra afectado por intrusiones ígneas plutónicas que van desde el triásico al paleoceno (Restrepo, 2008) y posterior a ellas la depositación de rocas sedimentarias de origen fluvial y de depósitos cuaternarios que cubren gran parte de estos cuerpos.

Por lo tanto en el municipio afloran las siguientes litologías: El complejo Quebrada-Grande que nace de un sistema arco volcánico cuenca marginal durante el cretácico temprano (Álvarez, 1987), rocas metamórficas relacionadas al complejo Cajamarca (Metasedimentos de la Sinifana) y rocas metamórficas relacionadas al complejo Arquía (Esquistos de Sabaletas), diversas intrusiones plutónicas intermedias (Diorita de Pueblito, Monzogranito de Amaga y Diorita de Heliconia), un grupo de rocas ultramáficas (Ultramafita de Angelopolis, Gabros de Heliconia), posiblemente relacionadas a un conjunto ofiolítico desmembrado y la Formación Amaga, además de depósitos aluviales y coluviales.

En el lugar fueron identificados cuatro sistemas de fallas y algunos lineamientos, los cuales se encuentran localizadas de occidente del municipio, correspondiendo en este orden a:

Falla Quirimara

Definida por Grosse (1926) como el sobreescurreamiento de Quirimará, con una orientación general NS y rumbo 50°W, en la zona norte pone en contacto a los esquistos de sabaletas con la Diorita de Pueblito, mientras que en la zona más sur pone en contacto a él gabro de Heliconia con los esquistos de sabaletas (Tabares & Arredondo, 2006).

Falla de Llorosagrande

Definida por Montoya y Peláez (1993). Presenta una orientación similar a la de la Falla de Amagá (N40°W) en el sector más sur de la zona. A medida que se va acercando a la zona más sur del municipio de Heliconia toma una orientación norte-

sur. Pone en contacto la Diorita de Pueblito con el Gabro de Heliconia (Tabares & Arredondo, 2006).

Falla Sabaletas

Definida por Montoya y Peláez (1993), como una falla de alto buzamiento con dirección N40°W/46NE. Pone en contacto las rocas de la unidad de las Ultramafitas de Angelópolis con las de la unidad del Gabro de Heliconia (Tabares & Arredondo, 2006).

Falla Amaga

Dicha falla corresponde a una falla de tipo inversa la cual se extiende a lo largo del municipio de Heliconia con una orientación de N40°W, En el sector más sur, pone en contacto las Metasedimentitas de Sinifaná con las Ultramafitas de Angelópolis, mientras que en el sector más, dicha falla pone en contacto las rocas de la unidad Ultramafitas de Angelópolis con las del miembro inferior la Formación Amagá, (Tabares & Arredondo, 2006).

10. VARIABLES METODOLÓGICAS

Para el desarrollo de la metodología anteriormente mencionada (Ilustración 1), se generaron las siguientes variables, las cuales corresponden a características que pueden llegar a ser desencadenantes para la propagación de movimientos en masa, teniendo en cuenta que poseen características que facilitan la generación de estos. Por otra parte estas variables se clasificaron en 3 grupos: variables morfométricas, variables de distancia y variables temática y se explican a continuación.

10.1 Variables morfométricas

Corresponden a las variables que se generan a partir de un modelo digital de elevación (DEM) y de la ejecución de las mismas en un programa SIG, como lo son en este caso la pendiente, relieve relativo y curvatura.

10.1.1 Pendiente

Variable relacionada con el ángulo que se genera entre la superficie del terreno y la horizontal, sus valores van de 0° a 90° y es una variable de gran importancia para el análisis de la susceptibilidad ya que en su gran mayoría los movimientos en masa se relacionan con esta, debido a la relación entre el ángulo de las pendientes y los deslizamientos, dado que estos constituyen un fenómeno de tipo gravitacional y donde las pendientes muy altas y escarpadas corresponden a zonas con un mayor grado de aceleración, generando así la propagación de estos (Chen *et al.*, 2016).

Para el municipio de Heliconia la clasificación que se realizó fue basada en los valores presentados por Regmi *et al.* (2010) y se modifica de acuerdo a las características del municipio (tabla 1), en donde se establece que cada clase tiene una variación de la pendiente en un rango de 10 y así sucesivamente hasta obtener el factor 6 que corresponden a pendientes > a 50 es decir que son más propensas a la generación de movimientos en masa.

Tabla 1 Valores de reclasificación para el mapa de pendientes

Factor (gridcode)	Rango (°)	Área (ha)	% área
1	0-10	391,27	3,40
2	10-20	1863,92	16,23
3	20-30	3239,14	28,21
4	30-40	4383,57	38,18
5	40-50	1583,98	13,79
6	>50	16,97	0,14

De acuerdo al mapa de pendientes (ilustracion.3) podemos ver que los valores relacionados al rango de 0° - 10° se encuentran concentrados en la parte central del municipio y dispersos en el occidente y sur del municipio, pero se tiene en cuenta que estos datos no son muy significantes ya que solo representan el 3,4% del área total del municipio, contiguos a esto en la zona central (cabecera municipal) y sur (corregimiento de Pueblito) del municipio tenemos presencia de los valores relacionado al rango 10° - 20° y 20° - 30° que representan un 16,23% y un 28,21% del municipio que se asocian en si a las zonas más planas del municipio.

Las zonas con mayor inclinación del municipio se ubican en el sector nororiental que corresponde a las veredas La Chorrera, sector centro sur correspondiente a la vereda Monteadentro y también en la zona sur en la vereda Guarnal y dichas zonas corresponden al rango 30° - 40° y 40° - 50° y cuenta con un área de 38,18% y 13,79% del municipio.

Por ultimo las zonas con pendientes con rango $>50^{\circ}$ solo corresponde a un 0,14% del municipio por lo tanto dichas zonas corresponden a zonas poco representativas.

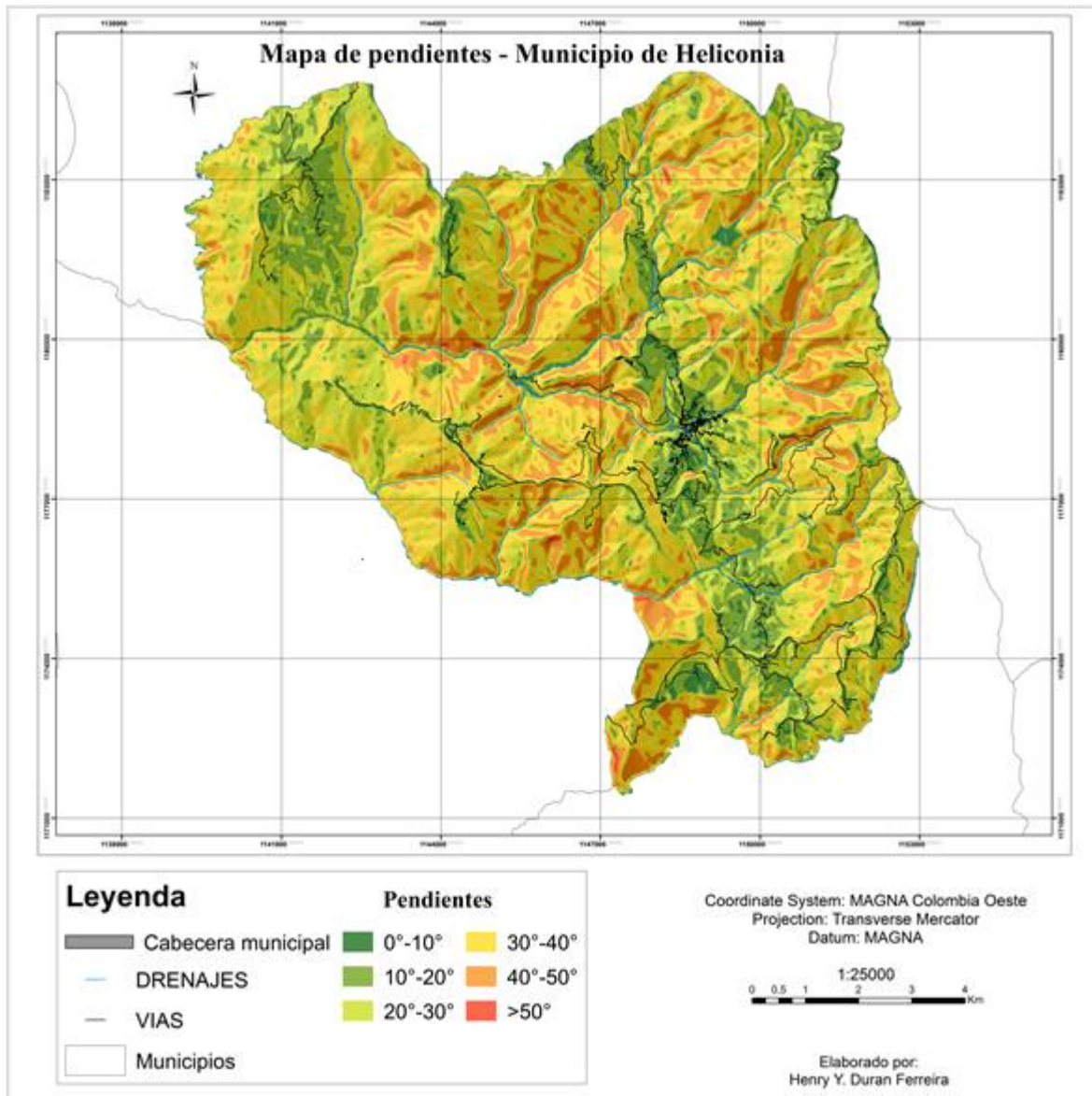


Ilustración 3 Mapa de pendientes del municipio de Heliconia

10.1.2 *Relieve relativo*

Representa la diferencia de altitud entre las unidades o geformas presentes, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, montaña, meseta, terraza y otros. (INGEOMINAS, 2004 en SGS, 2013), pero en el uso de algoritmos que permitan hacer esta evaluación tendremos que recurrir a la siguiente definición: El

índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área (Chacón, T., 1993 en SGS, 2013) y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por Km². Dicha variable está directamente relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial, asociados a la recurrencia de eventos de inestabilidad en materiales más erosionados o en aquellos que por su resistencia desarrollan un relieve con intervalos de altura extremadamente altos y pendientes escarpadas y abruptas (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a). Los valores de relieve relativo para el municipio de Heliconia se basaron en la clasificación dado por Regmi Et al (2010) (Tabla.2), en la cual los valores con factor más bajo es decir 0-50 m y 50-100 m representa las menores alturas y los valores con factor más alto las mayores alturas (200-300 m o >300 m) en el municipio.

Tabla 2 valores de reclasificación para el mapa de relieve relativo

Factor (gridcode)	Intervalo de altura (m)	Área (ha)	% área
1	0-50	133,32	1,16
2	50-100	1468,88	12,79
3	100-150	2692,86	23,45
4	150-200	3598,65	31,34
5	200-300	2713,34	23,63
6	>300	873,06	7,60

De acuerdo con el mapa de relieve relativo (ilustración.4) en el municipio de Heliconia se presenta un predominio de zonas con relieve relativo alto, es decir una altura aproximada entre los 100 y >300 m ya que la mayoría de sus datos se encuentran entre los rangos 150-200 y >300 que representan un 86,02% del área municipio, estos valores se distribuyen en : la zona oriental correspondientes a las veredas Chorrera y Morritos, zona sur vereda Guarnal y zona centro occidente veredas Alto del Corral, Pradera y la Hondura.

Por otra parte las zonas con relieve relativo bajo representan un 13,95% del municipio y se sectorizan en la zona centro (cabecera municipal), centro sur veredas el Crucero y Pueblito y occidental vereda la Pava.

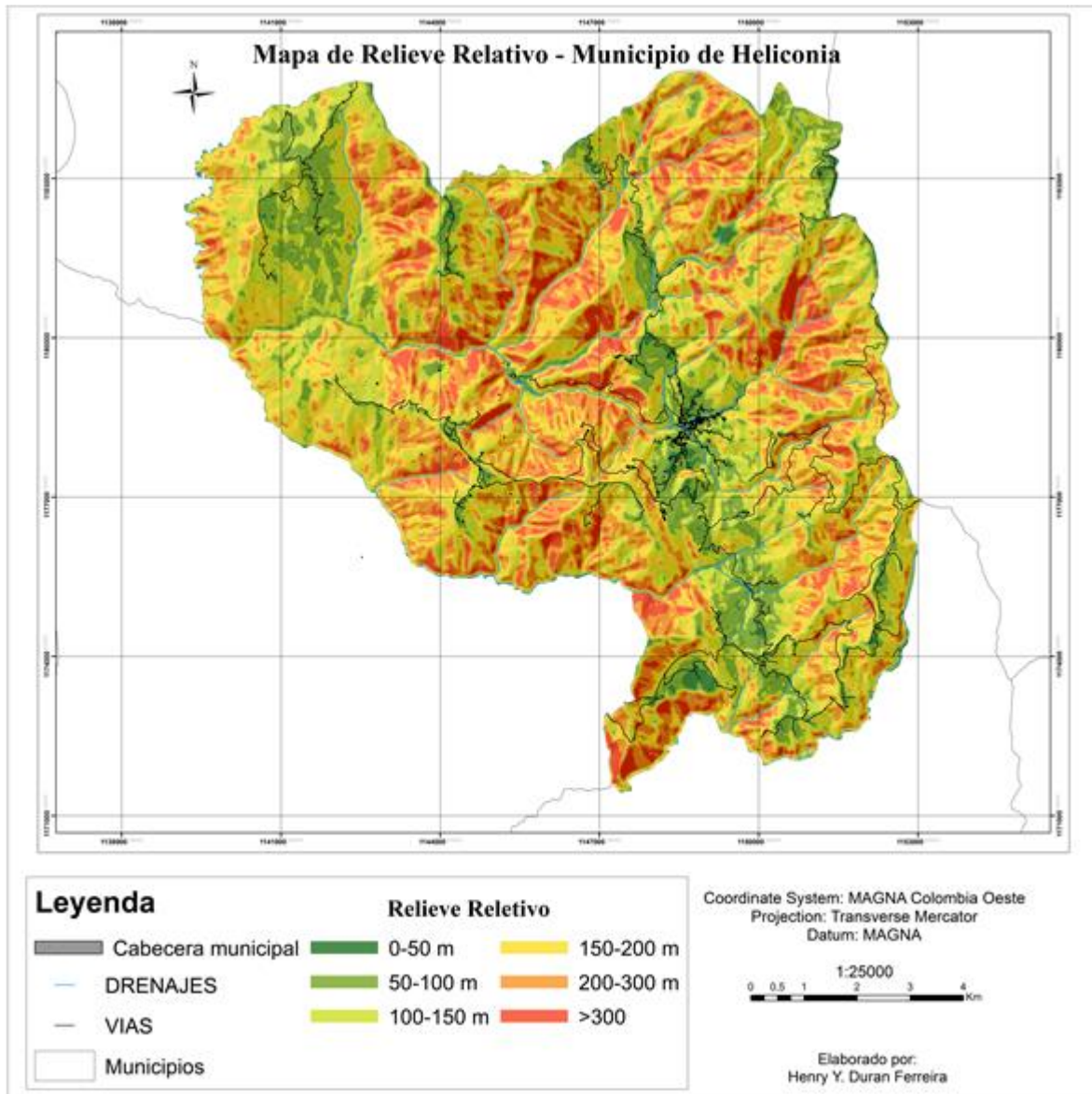


Ilustración 4 Mapa de relieve relativo del municipio de Heliconia

10.1.3 Curvatura

Esta variable representa la concavidad o convexidad de la superficie, los valores aquí presentes indican que si los datos corresponden a valores positivos esto

simboliza que la superficie es cóncava, por otra parte si los datos corresponden a valores negativos esto quiere decir que la superficie es convexa y por ultimo si los valores son 0 esto quiere decir que la superficie es plana. Dicha variable está asociada con la generación de movimientos en masa, ya que la forma del relieve está relacionada a la captación o concentración de agua, generando así de este modo una acumulación de agua provocando una presión de poros en los materiales allí presentes, cabe resaltar que dicha implicación se relaciona más a superficies con morfología cóncava y en menor proporción con morfologías convexas (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015a). Los valores de curvatura para el municipio de Heliconia se basaron en la clasificación dado por Regmi Et al (2010) (Tabla.3), en la cual los valores con rango más bajo es decir <-2 y $-2-(-0,001)$ representa los valores convexos y los valores con factor más alto $0,001-2$ y >2 representa los valores cóncavos en el municipio.

Tabla 3 valores de reclasificación para el mapa de relieve relativo

Factor (gridcode)	Intervalo	Rangos	Área (ha)	% área
1	<-2	Muy convexa	100,44	0,87
2	$-2-(-0,001)$	convexa	5874,28	51,17
3	$-0,001-0,001$	plana	9,65	0,08
4	$0,001-2$	cóncava	5228,75	45,54
5	>2	Muy cóncava	266,77	2,32

En el mapa de curvatura (ilustración.5) se observa que una predominancia de superficies convexas con un 51,1% y cóncavas con un 45,5%, ambas con unos valores muy similares y se encuentran relacionados a las unidades montañosas presentes en el municipio cubriendo el 96,6% del área de estudio, de las partes convexas sobresalen las cimas y las zonas de acumulación, mientras que de las partes cóncavas sobresalen las laderas de las unidades montañosas.

Por otra parte las unidades muy convexas y muy cóncavas representan el 3% del municipio y principalmente en las cimas y en las superficies de ruptura generadas por los movimientos en masa presentes en el municipio, cabe resaltar que estos no representan un porcentaje importante en el área total del estudio, debido a la homogeneidad de esta variable.

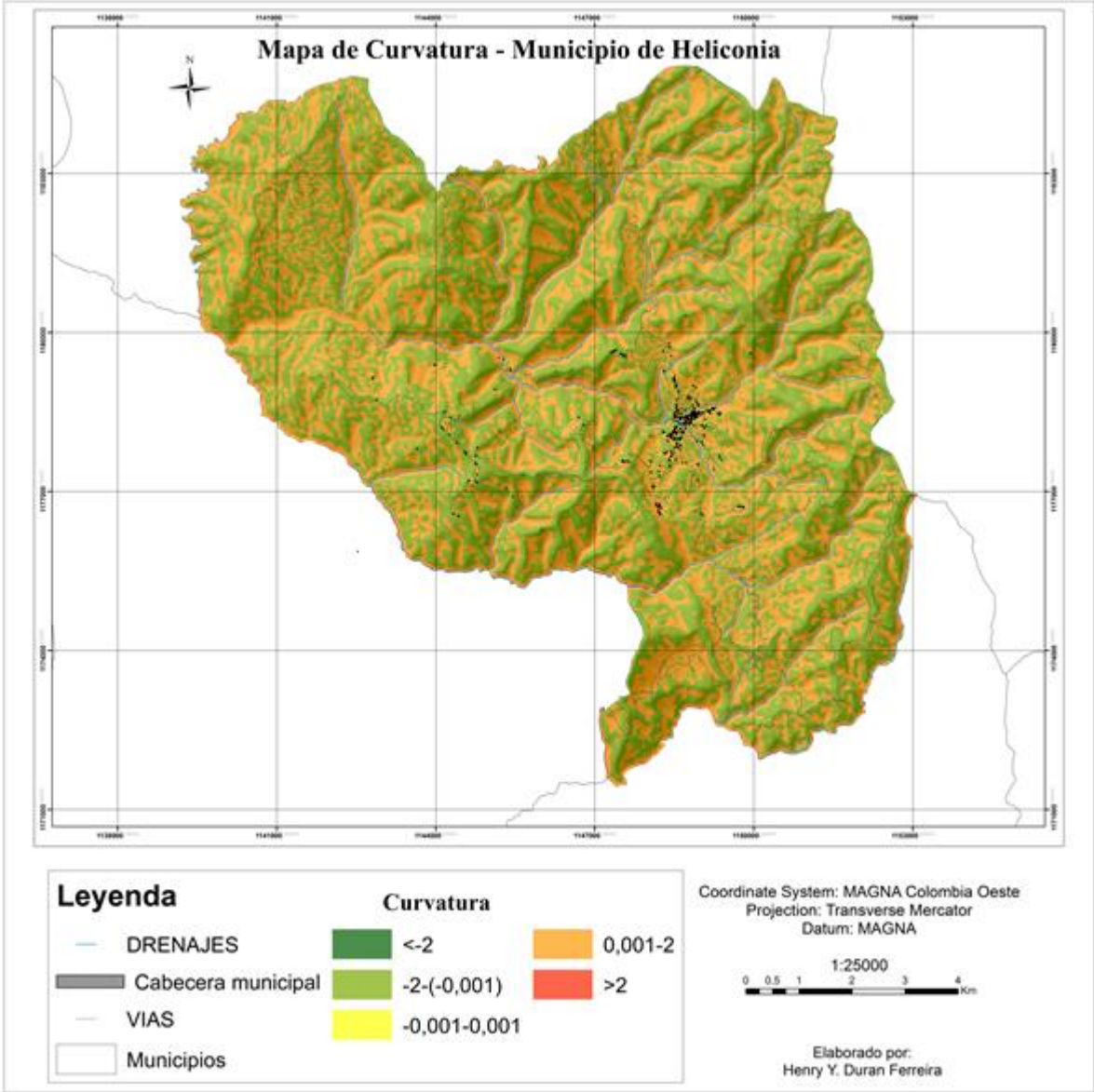


Ilustración 5 Mapa de curvatura del municipio de Heliconia

10.2 Variables de distancia

Corresponde a variables generadas a partir de líneas, las cuales se elaboran en un Sig obteniendo de este modo un raster de distancia predeterminada para cada uno de los datos obtenidos.

10.2.1 Distancia drenajes

Los cuerpos de agua tanto superficiales como subsuperficiales son uno de los factores que más tienen peso en el momento de generar un deslizamientos debido a su capacidad de erodar y de infiltrarse en el terreno, esto sumado con la topografía y el tipo de material disponible, puede dar lugar a un movimiento en masa ya sea a pequeña o gran escala dependiendo de las condiciones iniciales, también la escorrentía juega un papel importante para la remoción en masa, ya que es un mecanismo de gran importancia para la generación de los mismos sobre todo en regiones montañosas (Chen *et al.*, 2016).

Por lo tanto el mapa de distancia drenajes (ilustración.6) se basó en la clasificación dada por Regmi et al (2010) (Tabla.4), teniendo en cuenta que para dicho mapa los valores con rango 0-25 m y 25-50 m corresponde a los valores más cerca al afluente o drenaje y en este caso corresponderían a las zonas más propensas a la generación de movimiento en masa, mientras que los valores con rango >250 corresponde a las zonas más alejadas a los afluentes y son las zonas con menor propensión a eventos en remoción en masa.

Tabla 4 valores de reclasificación para el mapa de distancia drenajes

Factor (gridcode)	Intervalo (m)	Área (ha)
1	0-25	4269,27
2	25-50	1756,81
3	50-100	2878,18
4	100-250	2406,71
5	>250	167,68

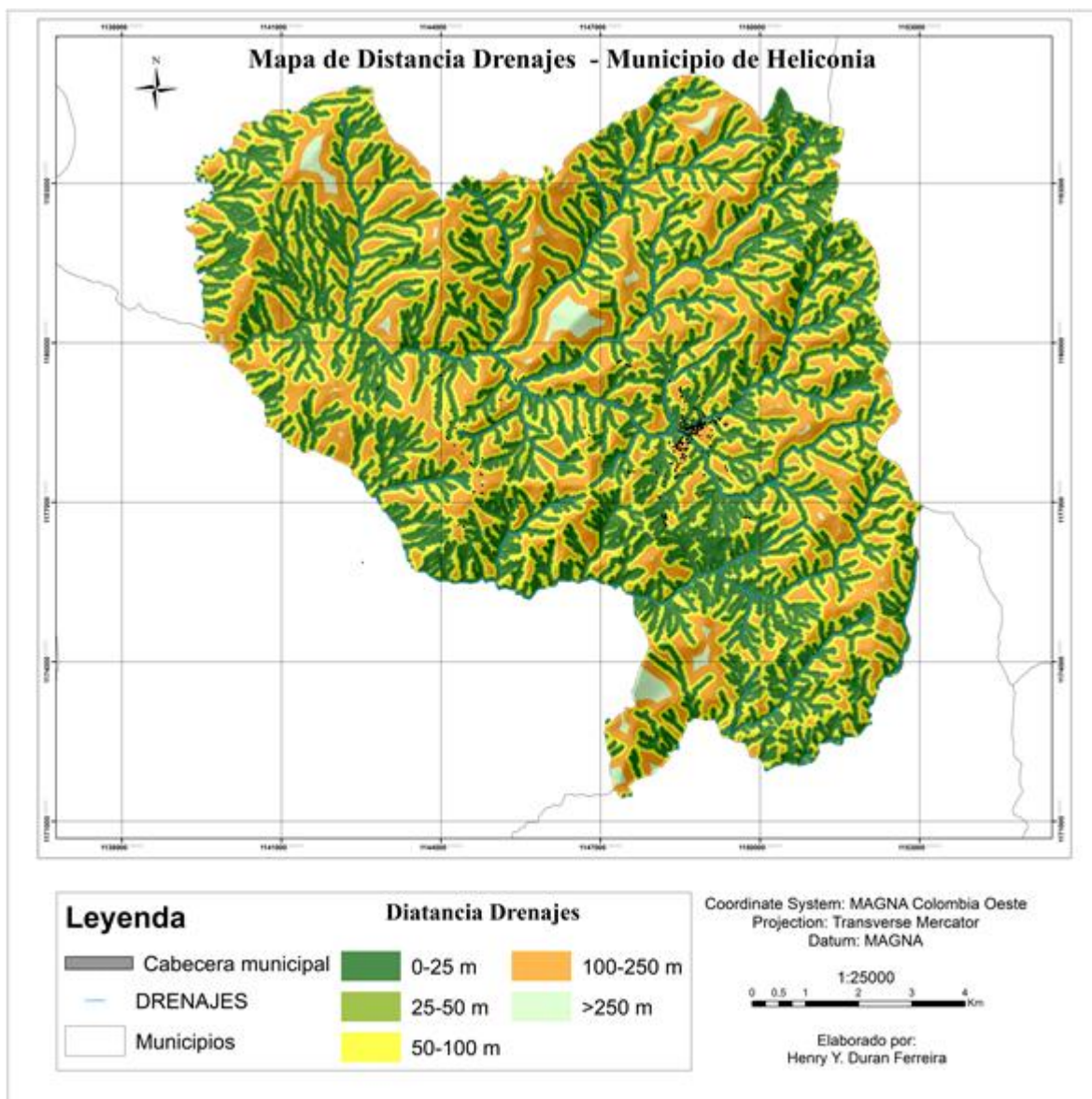


Ilustración 6 Mapa de distancia drenajes del municipio de Heliconia

10.2.2 Distancia vías

Esta variable está relacionada a las intervenciones antrópicas que pueden generar inestabilidad, estos pueden ser generados a causa de cortes en los trazos de vías, ocasionando una inestabilidad en el terreno si no se encuentran desarrollados con adecuados parámetros geotécnicos o por la vibración generada por los vehículos al pasar.

Los valores de reclasificación para esta variable se basaron en los valores aportados por Regmi et al. (2010), los cuales se generaron 5 rangos (Tabla. 5), donde los rangos con menos distancia (0-20 m, 20-40m) corresponderían a los valores más susceptibles a la generación de movimientos en masa, mientras que los rangos con mayor (>350 m) distancia corresponderían a los valores menos susceptibles a la generación de movimientos en masa.

Tabla 5 valores de reclasificación para el mapa de distancia vías

Factor (gridcode)	Intervalo (m)	Área (ha)
1	0-20	421,27
2	20-40	725,36
3	40-100	1152,89
4	100-350	1483,69
5	>350	7698,18

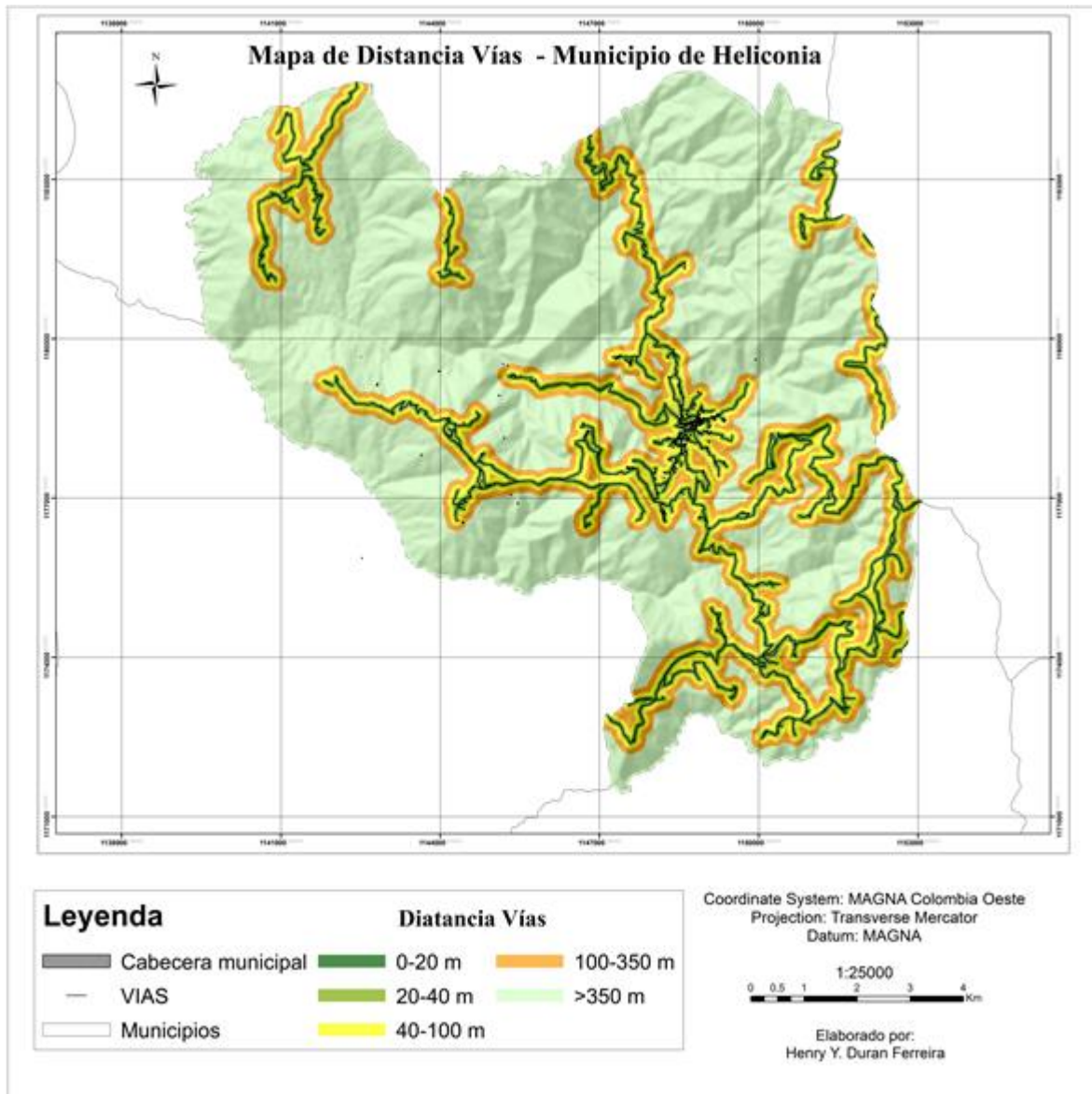


Ilustración 7 Mapa de distancia vías del municipio de Heliconia

10.2.3 Distancia fallas

Es un factor de gran importancia debido a que tiene en cuenta la neotectónica y cómo puede o no afectar a una zona determinada. Las fallas geológicas van a tener un factor de incidencia dependiendo de su distancia euclidiana, es decir que a mayor cercanía a esta, va a ser más susceptible un lugar para desencadenar un deslizamiento o movimiento en masa (SGC, 2012).

El grado de influencia de las fallas en una área determinada, fue obtenido por medio de la función *Euclidean distance* y posteriormente reclasificada en cuatro categorías basadas en el documento de Regmi et al 2010 (Tabla.6), que establece que las zonas que van a ser más afectadas en caso de deslizamientos, son las que se encuentran en un radio comprendido entre los 0-25m ya que en este radio se genera un mayor movimiento de bloques dando así el desprendimiento de materiales, a este rango se le asigna un factor de incidencia 1 y las zonas que menos se ven perjudicadas son las que se encuentran a partir de los 350 m.

Tabla 6 valores de reclasificación para el mapa de distancia fallas

Factor (gridcode)	Intervalo (m)	Área (ha)
1	0-25	389,86
2	25-75	490,87
3	75-150	742,67
4	150-350	1915,03
5	>350	7943,24

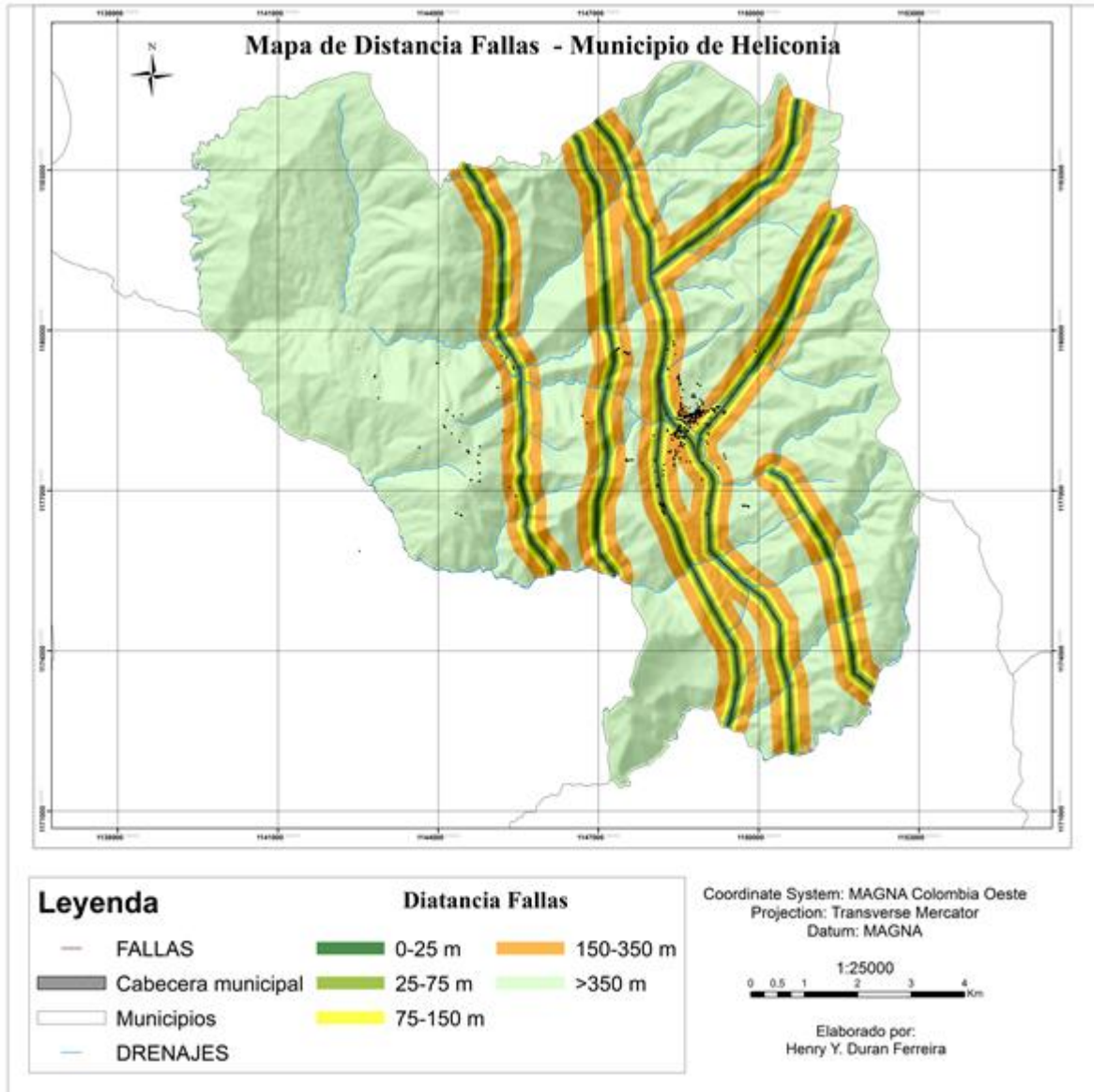


Ilustración 8 Mapa de distancia fallas del municipio de Heliconia

10.3 Variables temáticas

10.3.1 Geología

En el municipio de Heliconia afloran una serie de rocas que varían entre edades paleozoicas y cuaternarias, las cuales se basaron en la cartografía y cronología realizada por Tabares & Arredondo, 2006 a escala 1:2500 y posteriormente corroboradas en campo y corregidas. Por lo tanto en el área de estudio se

encuentran una serie de cuerpos o unidades metamórficas, ígneas y secuencias sedimentarias de origen aluvial además de depósitos cuaternarios, las cuales se describen a continuación en orden cronológico de más antigua a más reciente (ilustración.9).

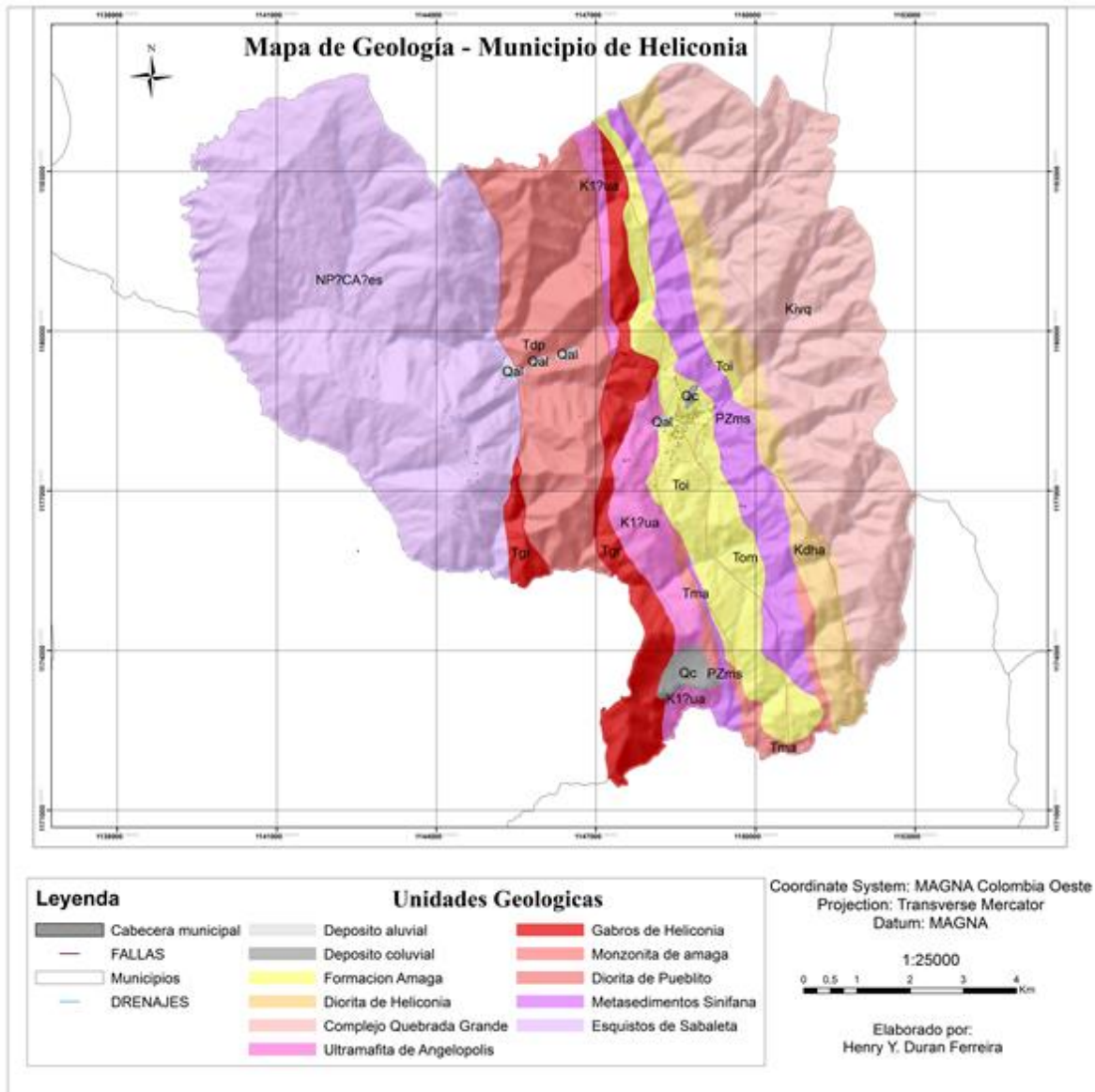


Ilustración 9 Mapa de geología del municipio de Heliconia

10.3.1.1 Paleozoico

El paleozoico en este municipio está representado por rocas metamórficas de medio a bajo grado; principalmente esquistos verde y metasedimentos (Tabares & Arredondo, 2006).

Esquistos de Sabaletas (PZ?es)

Fue designada por Restrepo & Toussaint (1978) con este nombre porque corresponde a una serie de esquistos verdes que aflora en la margen derecha del río Cauca, que se encuentran cubiertos por sedimentos continentales.

Esta unidad geológica está conformada por esquistos cuarzo sercíticos, esquistos anfibólicos y anfibolitas granatíferas, los cuales presenta una intercalación de rocas macizas de color gris, verde y negro con una muy buena esquistosidad. Estratigráficamente esta unidad se encuentra en contacto fallado con la Diorita de Pueblito y Gabros de Heliconia y petrográficamente las rocas poseen una textura granonematoblástica con un bandeamiento constituido principalmente por cristales de calcita, cuarzo, clorita y algo de anfíbol, separados entre sí por algunos minerales opacos; como minerales accesorios se presenta turmalina, plagioclasa y feldespatos (Tabares & Arredondo, 2006).

Se presentan como una franja continua N-S al occidente del municipio y afloran en la carretera que comunica la cabecera municipal con el corregimiento del Alto del Corral, se caracteriza por presentar variaciones a lo largo del recorrido en algunos casos se encuentran afloramientos más grafitosos en otros más verdes, en algunos casos se nota una diferencia en la granulometría correspondiente a cambios en su textura ya que al tacto se siente arenoso y en otros un poco más lodosos, dicha unidad se encuentra en la mayoría de los casos con un alto grado de meteorización.



Ilustración 10 a) Afloramiento de esquistos de Sabaletas (Esquistos grafitosos)
b) afloramiento esquistos Sabaletas (Esquistos verdes).

Metasedimentos de Sinifaná (PZms)

Esta unidad fue inicialmente definida por Grosse (1926) como pizarras arcillosas a filíticas, pero posteriormente Gonzales (1976) describe estas rocas como una rocas metamórficas de muy bajo grado y les otorgó este nombre “Metasedimentos de Sinifaná” debido a que afloran a en dicha quebrada (Tabares & Arredondo, 2006).

Dicha unidad geológica se describe como una intercalación de intercalación de rocas de color gris, gris claro, gris verdoso y pardo compuestas por metalodolitas y metareniscas; estas últimas, varían de tamaño medio a fino, con presencia de cristales de cuarzo y feldespato incluidos en una matriz de color gris y se diferencian de los Esquisto de Sabaletas por ser más lodosa y presentar una foliación no muy bien definida además de conservar algo de la estratigrafía de su protolito. Estratigráficamente se encuentra intruida por el Monzogranito de Amagá y suprayacen, en discordancia angular, a las rocas de la Formación Amagá, además de estar en contacto fallado al oeste Ultramafitas de Angelopolis y al este con la Diorita de Heliconia (Tabares & Arredondo, 2006).

De esta unidad se encuentran dos cuerpos alargados y discontinuos en el municipio que afloran en la vía que dirige al corregimiento de Pueblito a Armenia (Mantequilla) y la vía que dirige a Medellín con Heliconia, dichos cuerpos en su mayoría se

encuentra cubiertos por los sedimentos de la Formación Amaga, pero en los cuerpos visibles se caracterizan por ser de color grisáceo y lodosas con poca esquistosidad y en algunos casos con presencia de diques de cuarzo y algunas plegamientos producto de la fuerte actividad estructural de la zona.



Ilustración 11 Afloramiento de metasedimentos de Sinifaná en la vía Pueblito-Heliconia.

10.3.1.2 Mesozoico

El mesozoico en el municipio de Heliconia está definido por una fuerte actividad ígnea que se encuentra representados por intrusión de cuerpos plutónicos, los cuales corresponden a Diorita de Pueblito, Gabro de Heliconia, Monzogranito de Amaga Y Diorita de Heliconia, además de la presencia de otras unidades ígneas como el complejo Quebradagrande y las Ultramafitas de Angelopolis.

Diorita de Pueblito (Tdp)

En un comienzo Gross (1926) define este cuerpo como “diorita anfibolítica” conformada por algunos gabros anfibólicos y peridotitas, formados por diferenciación magmática, pero posteriormente González (1976) lo describe con el nombre de Diorita de Pueblito ya que parte de esta se encuentra en cercanías al corregimiento de Pueblito (Tabares & Arredondo, 2006).

Esta unidad se define como una roca fanerítica maciza de grano fino a medio con una variación de color gris medio y rara vez oscuro, compuesta por plagioclasa y hornblenda en proporciones variables, dicha unidad se encuentra limitado por la Falla Quirimará, la cual lo separa al norte y centro de los Esquistos de Sabaletas y del Gabro de Heliconia, mientras que la falla Llosagrande lo separa al norte de las Ultramafitas de Angelópolis y más al sur de los Gabros de Heliconia (Tabares & Arredondo, 2006).

En el municipio afloran en las quebradas La Sucia y Sabaletas y por las carreteras que va en dirección al corregimiento de al Alto del Corral, en la vía que conduce a la vereda el Tablazo y en la vía que conduce del corregimiento de Pueblito a Armenia (mantequilla), se encuentran como rocas en un alto grado de meteorización en las secciones que afloran en las vías, pero las secciones que afloran en las quebradas se encuentran mucho más frescas y se logran diferenciar, en algunos casos se puede encontrar con una granulometría muy fina y de difícil diferenciación, pero en su mayoría se encuentra el cuerpo porfídico muy bien diferenciado de color grisáceo.



Ilustración 12 Afloramiento de Diorita de Pueblito en la Quebrada La Sucia

Monzogranito de Amagá (Tma)

Inicialmente fue nombrada por Grosee (1926) como rocas plutónicas tipo Amagá, pero posteriormente Giraldo y Toro (1985) las nombraron como granito de Amagá, ya que mineralógicamente corresponden a un granito con variaciones a facies básicas (diorita) y finalmente Gonzales y Londoño, 2002 los nombran Monzogranito de Amagá ya que su composición predominante es de monzogranito con algunas variaciones a granítica-cuarzomonzonítica y cuarzodiorítica-diorítica (Tabares & Arredondo, 2006).

Dicha unidad corresponde a rocas mayormente macizas, faneríticas y inequigranulares que varían de color rosado a gris claro que composicionalmente presentan plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo, biotita y minerales accesorios como circones, epidotas, esfena y minerales opacos (González & Londoño, 2002). Los contactos de esta unidad son de tipo intrusivo, por lo tanto hacia el oeste se encuentra en contacto con los metasedimentos de Sinifaná y un poco más al noreste con las Ultramafitas de Angelópolis, al este este cuerpo se encuentra en contacto con la Diorita de Heliconia que intuye este cuerpo y finalmente sobre dicho cuerpo

se encuentra depositado una serie de sedimentos de origen aluvial correspondientes a la formación Amagá (Tabares & Arredondo, 2006).

En el municipio aflora en diferentes quebradas como la Sucia y Sabaletas además de aflorar en la vías que conducen el corregimiento de Pueblito a Medellín y la vía que comunica Pueblito con Armenia (Mantequilla), y corresponden a cuerpos muy pequeños en una dirección N-S muy meteorizados de color amarillento que no afloran en grandes proporciones y que presentan una variación en sus granos de medios gruesos.



Ilustración 13 Afloramiento de Monzogranito de Amagá en cercanías del corregimiento de Pueblito por la vía Pueblito-Medellín

Gabros de Heliconia (Tgr)

Inicialmente Grosse (1926) les otorga el nombre de Gabros Anfibólicos a esta franja de gabros que se encuentra ubicados dentro del sistema de falla Romeral los cuales bordean a la diorita de Pueblito, en una segunda instancia Mejía (1984) les pone como nombre Gabros de Romeral ya que corresponde a estos gabros ubicados en este sistema de falla, pero finalmente Montoya y Peláez (1993) los nombra Gabros de Heliconia a consecuencia a que sus mejores afloramientos se encuentran en cercanías del municipio (Tabares & Arredondo, 2006).

Corresponde a rocas faneríticas de color claro a negro y de grano fino a grueso, con un bandeamiento de minerales máficos y félsicos, composicionalmente está constituido por anfíboles que presenta epidotizacion y piroxenos cloritizados además de presentar algunas plagioclasas sectores (Tabares & Arredondo, 2006). Estas rocas se encuentran hacia el este en contacto fallado con las Ultramfitas de Angelópolis y en el occidente principalmente se encuentra en un contacto con la Diorita de Pueblito (Tabares & Arredondo, 2006).

En el municipio el cuerpo aflora en la vía que conduce del municipio a la hacienda La Cañada (Vereda el Tablazo) y en la vía que comunica el corregimiento de Pueblito con Armenia (Mantequilla), corresponde a rocas macizas en algunos casos color claro a causa de la meteorización con granos gruesos y finos y con un bandeamiento entre los minerales máficos (piroxenos, anfíbol) y félsicos (plagioclasas) y en algunos cantos rodados se observa textura pegmatítica.



Ilustración 14 Afloramiento de Gabros de Heliconia en la vía Heliconia-hacienda la Cañada

Ultramafitas de Angelópolis (K1?ua)

este grupo de rocas son consideradas por Restrepo y Toussaint (1974) como rocas de origen comagtico y se asocian a una posible ofiolita en conjunto con los Gabros de Heliconia, posteriormente González (2001), define esta unidad como un grupo de rocas ultramaficas asociadas con gabros y lavas basálticas de afinidad ofiolitica, conformado por peridotitas y dunitas serpentinizados y finalmente Tabares y Arredondo (2006), definen a las rocas ultramáficas que afloran al occidente de Heliconia y Angelópolis como la Ultramáfita de Angelópolis debido que allí se encuentran sus mejores afloramientos.

Dicho unidad rocosa corresponde a rocas macizas de grano fino de colore negro a verdoso, compuestas por olivino, ortopiroxeno, anfíbol y serpentina (Tabares y Arredondo, 2006), estas rocas se encuentran en contacto en el oeste con los Gabros de Heliconia y al este con los metasedimentos de Sabaletas y la formación Amagá a su vez se encuentra intruida por el Monzogranito de Amagá (Tabares y Arredondo, 2006).

En el municipio aflora en la vía que conduce de la cabecera municipal a el corregimiento de el Alto del Corral, y en la vía que lleva de Heliconia a la hacienda la Cañada (Vereda el Tablazo), actualmente dicha roca es explotada con fines de usos industriales principalmente como materiales de construcción, en afloramientos en el Alto del Corral se encuentra una roca serpentizada de color crema y muy meteorizada con presencia de minerales máficos y con algunos diques.



Ilustración 15 Afloramiento de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-hacienda la Cañada



Ilustración 16 Afloramiento de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-hacienda la Cañada



Ilustración 17 Muestra serpentizada de Ultramafitas de Angelópolis en la vía Heliconia-Hacienda la Cañada

Complejo QuebradaGrande (Kivq)

Inicialmente es definida por Grosse (1926) como “Formación Porfirítica” que corresponde a una serie de derrames volcánicos con intercalación de sedimentos marinos, posteriormente Botero (1963) la define como Formación Quebradagrande la cual comprende un grupo de sedimentos y rocas verdes, asociando estas rocas verdes a una composición ofiolítica, las cuales resultan de un vulcanismos y sedimentación de un eugesinclinal. Por lo tanto Maya y Gonzales (1995) lo redefinen como complejos Quebradagrande, el cual se presenta en la cordillera central como una frenaja alargada y se propone este nombre para el litodema volcánico y el litodema sedimentario (Tabares & Arredondo, 2006).

La unidad volcánica que es la que se encuentra en el municipio de Heliconia corresponde a tobas, pórfidos y basaltos de coloración verde, generalmente porfídica y con cristales de cuarzo y feldespatos en una matriz afanítica, las tobas contienen fragmentos líticos y textura amigdaloides, estas rocas se encuentran en contacto hacia el occidente con la diorita de Heliconia (Tabares y Arredondo, 2006).

En el municipio estas rocas afloran en la vía Heliconia-Medellín y en la vía Pueblito-Medellín, por la carretera que de Pueblito lleva a Medellín se encuentra una serie de intercalaciones que definen una especie de bandeamiento, además de corresponder a una unidad muy extensa, en lo general los afloramientos de esta roca se encuentran cubiertos por la vegetación y presentan un avanzado estado de meteorización y corresponde a las zonas con mayor relieve en el municipio.



Ilustración 18 Afloramiento complejo QuebradaGrande en la vía Pueblito-Medellín



Ilustración 19 Basalto verde rodado del complejo Quebrada grande vía Pueblito-Medellín

Diorita de Heliconia (Kdha)

En un comienzo fue descrita por Grosse (1926) como “Diorita tipo Heliconia”, refiriéndose a este tipo de rocas que afloran al sureste de la población, que corresponden a dioritas cuarzosas de grano medio, color blanco a gris, cuyo componente blanco predomina sobre la presencia de algunos anfíboles (horblendas), posteriormente Gonzales (2001) describe las facies de esta unidad clasificándolas como facies ácidas y facies básicas, la facie ácida corresponde a una cuarzodiorita-tonalítica biotítica, de grano fino con pocos minerales máficos, con abundante cuarzo, feldespato y plagioclasas, mientras que las facies básicas corresponde a una diorita augítica con uralización intensa de los piroxenos y la plagioclasa esta saussuritizada y zonada, adicionalmente dicho cuerpo corresponde a un cuerpo intrusivo del cretácico superior que posiblemente intruyó al Monzogranito de Amagá y los Metasedimentos de la Sinifaná, por lo tanto esta unidad se encuentra en contacto intrusivo al oeste con los Metasedimentos de la Sinifaná y con el Monzogranito de Amagá y al este con el Complejo QuebradaGrande (Tabares & Arredondo, 2006).

En el municipio dicho cuerpo se encuentra aflorando en la vía que lleva de pueblito a Medellín, en esta vía se caracteriza por ser un cuerpo porfídico con un grado de meteorización no tan elevado, pero se logra diferenciar los fenocristales de plagioclasas y cuarzo de matriz afanítica, dicho cuerpo se asocia a la facie ácida del cuerpo descrito anteriormente.



Ilustración 20 Afloramiento Diorita de Heliconia en la vía Pueblito-Medellín.



Ilustración 21 Muestra Diorita de Heliconia en la vía Pueblito-Medellín.

10.3.1.3 Cenozoico

El cenozoico en el municipio de Heliconia está definido por una actividad de sedimentación y despositación que se encuentra representados por rocas sedimentarias y depósitos cuaternarios, los cuales corresponden a la formación Amaga dos de sus miembros inferior y medio, además de la presencia de depósitos de origen coluvial y aluvial.

Formación Amagá (Toi, Tom)

Inicialmente fue nombrada por Grosse (1926) como Terciario Carbonífero de Antioquia y corresponde a todos los estratos compuestos por sedimentos de origen aluvial (continentales) que afloran en la zona de Amagá, la división realizada por Grosse se basa en el grado de explotabilidad que tienen los carbones estableciendo que los pisos explotables están limitados al piso medio, mientras que los pisos inferiores solo tienen una importancia local, posteriormente González (1980) nombra este grupo de sedimentos Formación Amagá y propone una división en miembro inferior, medio y superior debido a sus características litológicas.

La Formación Amagá es una sucesión de rocas clásticas de origen continental, que corresponden a conglomerados, areniscas, lodolitas con intercalación de mantos de carbón, en el municipio se observan los miembros inferior que corresponde a una intercalación de estratos de areniscas, lodolitas y mantos de carbón que gradan a arenisca conglomerática y conglomerado y el miembro medio que está compuesto por estratos de areniscas y arcillolitas de tamaño medio a fino y mantos de carbón (Tabares & Arredondo, 2006), dichas rocas reposan discordantemente sobre los Gabros de Heliconia y sobre los Metasedimentos de Sinifaná (González, 2001).

En el municipio la Formación Amagá aflora en la vía que lleva de la cabecera municipal al corregimiento de Pueblito, la vía que lleva de Heliconia a la Hacienda la Cañada y en la vía que conecta Medellín con Armenia (Mantequilla), en la cual se observa una arenisca meteorizada con una poca de material carbonífero color grisáceo en forma laminar.



Ilustración 22 Afloramiento Formación Amagá en la vía Heliconia-Hacienda la Cañada.

Depósitos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se encuentran distribuidos en todo el municipio y corresponde a depósitos de origen aluvial y coluvial de bloques angulares, rocas ultramáficas, gabros, dioritas, granitos, areniscas y metasedimentos, los depósitos más representativos son los aluviales y corresponde a depósitos asociados a fuentes de agua que se encuentran a lo largo del municipio, principalmente en los cuerpos de agua que desembocan en el Río Cauca y los depósitos coluviales se localizan en zonas de alta pendiente y se asocian a posibles deslizamientos anteriormente ocurridos y corresponden a bloques de rocas angulares.

10.3.2 Geomorfología

El mapa geomorfológico del municipio de Heliconia (ilustración.23) se desarrolló mediante la interpretación en campo de las unidades y posteriormente una corrección de estas a partir de sensores remotos e imágenes satelitales, se clasificaron mediante la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombia (2012) la cual consiste en la clasificación según su ambiente geomorfológico y se caracterizaron las unidades presentes en cada ambiente, no se determinó subunidad ya que la escala en la que se desarrolló no corresponde a dicho nivel de detalle.

En el municipio se encontraron principalmente 3 ambientes geomorfológicos, correspondientes al ambiente estructural con mayor predominancia en el municipio a causa de la fuerte actividad estructural presente en el área, ambiente denudacional, que corresponde principalmente a estas geoformas no afectadas por las estructuras presentes en el municipio, que en este caso sufren un proceso erosivo, se caracteriza principalmente en las unidades sedimentarias y un ambiente fluvial presente en las quebradas del municipio y más visiblemente en la quebrada la Sucia.

Para el mapa geomorfológico se clasifico dichas unidades mediante el glosario geomorfológico del Servicio Geológico (2013) que corresponde a unidades a escala 1:25000 y dicho mapa está conformado por las unidades de ambientes estructural color morado, ambiente denudacional color café y ambiente fluvial color azul.

Cima (Dc): superficie amplia convexa a plana y alargada, con pendientes planas y anchas de 350 y 100 metros, se encuentran limitadas por laderas cuyas pendientes son moderadas y su origen corresponde a procesos de erosión, meteorización y actividad antrópica (SGC, 2013).

Las cimas cartografiadas en el municipio se encuentran principalmente en los centros poblados, en este caso la cima cartografiada se encuentra en el corregimiento del Alto del Corral y corresponden a una cima alargada ancha con pendiente plana a suave, regular y ancha, otra cima cartografiada corresponde a un asentamiento de casas en la vereda Monte dentro y corresponde a una cima alargada regular angosta y suave.

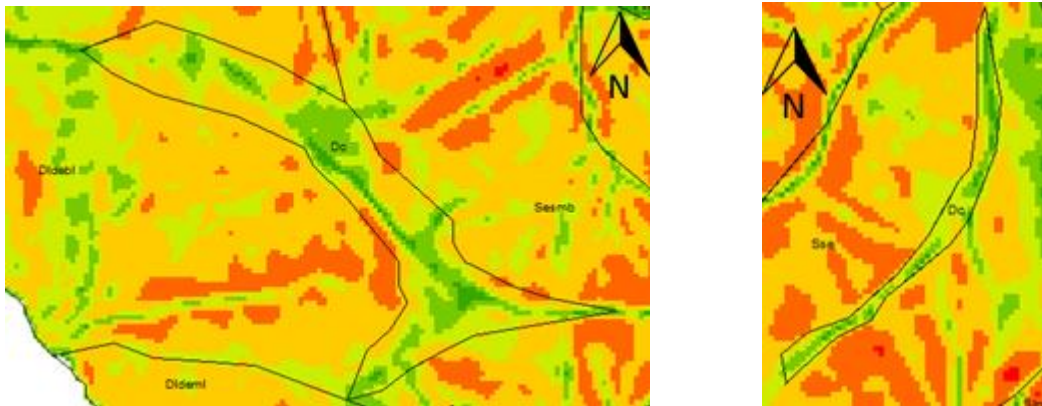


Ilustración 24 Modelo de sombras y pendientes donde se delimita la subunidad de cima a) cima del corregimiento Alto del Corral b) cima vereda Monte dentro

Lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt): estructura en forma de cono o lóbulo con morfología alomada baja, de longitud corta irregular y su origen se asocia a la acumulación de bloque y tierra (SGC, 2013)

En el municipio se cartografió un cuerpo relativamente grande y amplio en la vía que comunica el corregimiento de Pueblito con Armenia (mantequilla) y corresponde a un lóbulo ancho y con algunos procesos erosivos.

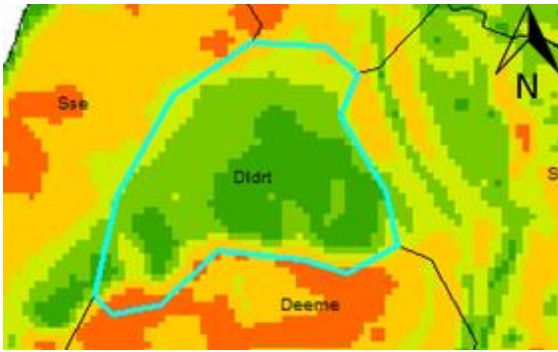


Ilustración 25 Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional. a) mapa de pendientes con delimitación de unidad. b) cono o lóbulo en la vía Pueblito-Armenia.

Escarpe de erosión menor (Deeme): ladera abrupta o desplome de longitud media, de forma cóncava y eventualmente recta, con pendientes muy fuerte, generada a partir de la socavación de ríos o por procesos erosivos y movimientos en masa (SGC,2013).

Esta unidad se localiza al sur occidente del municipio en cercanías con la vía que lleva del corregimiento de Pueblito a Armenia, se cree que dicho escarpe está asociado a los movimientos en masa ya que se encuentra limitando una unidad generada a partir de un deslizamiento rotacional.

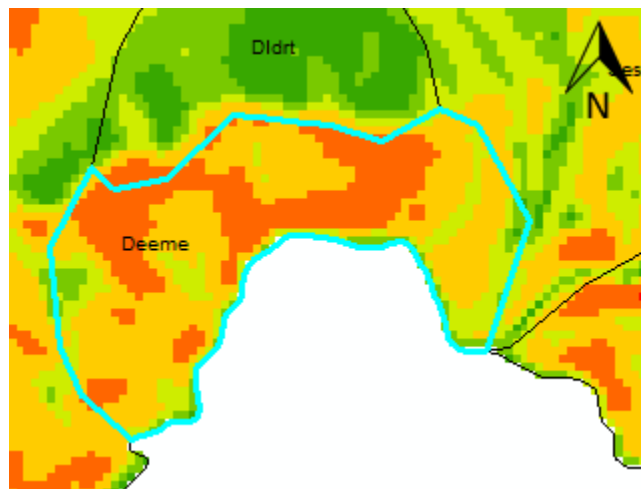


Ilustración 26 Escarpe de erosión menor. Mapa de pendientes con delimitación de unidad.

Ladera ondulada (Dlo): corresponde a una superficie en declive de geomorfología alomada, con pendiente suaves y longitudes largas, la ladera es de predominantemente de forma irregular en sentido trasversal de la pendiente, generalmente el patrón de drenajes más característico en estas subunidades corresponden a drenajes subdendríticos y estas formas se pueden formar sobre suelos residuales y depósitos coluviales (SGC,2013).

Esta subunidad se localiza en las cercanías con el corregimiento de Pueblito y en el noroccidente del municipio en la vía que comunica Heliconia con Ebejico, corresponde a geoformas de longitud larga, principalmente de forma irregular a la pendiente y con pendiente muy suaves, en las cuales por lo general no se evidencia movimientos en masa activos ni ningún tipo de proceso erosivo.



Ilustración 27 Ladera ondulada. a) mapa de pendientes con delimitación de unidad vía Heliconia-Ebejico . b) ladera ondulada en las cercanías a Pueblito.

Lomo bajo disectado (Dlbd): corresponde a prominencias topográficas de morfología colinada, con cimas redondeadas y amplias , de laderas moderadamente largas cóncavas y convexas, con pendientes moderadas y con índice de relieve bajo, dichas subunidades geomorfológicas son originadas a partir de procesos denudacionales intensos y cuyas laderas se caracterizan por ser moderadamente disectadas, es posible que se encuentren deslizamientos de tipo rotacional (SGC, 2013).

Se identificó un lomo bajo disectado en la parte noroccidental del municipio en límites con el municipio de Ebejico, esta unidad presenta un relieve relativo bajo y un alto grado de disección además de presenta algunos movimientos en masa en límites con el municipio de Ebejico y también diversos procesos erosivos.



Ilustración 28 Lomo disectado bajo en límites Heliconia-Ebejico.

Lomo desnudado bajo de longitud larga (Dldebl): corresponde a una serie de lomos o filos, con un índice de relieve relativo menor a 250 m y una longitud del eje principal mayor a 1000 m, con formas alargadas y son formar alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal (SGC, 2013).

Este cuerpo se localiza al occidente del municipio limitando con el municipio de Ebejico en la vereda Alto del Corral y presenta un relieve relativo de 200 m aproximadamente y su eje principal de 1100 m por lo tanto se le otorgo esta clasificación, dicha unidad cuenta con algunos movimientos en masa activos y procesos erosivos.

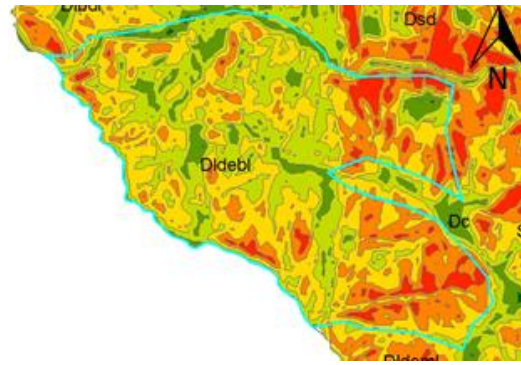


Ilustración 29 lomo denudado bajo de longitud larga. a) Lomo denudado bajo de longitud larga límite Heliconia-Ebejico b) Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad.

Lomo denudado moderado de longitud corta (Dldemc): corresponde a un grupo de lomos o filos, con relieve relativo entre 100 m y 250 m y la longitud del eje principal es menor de 250 m, corresponde a formas alargadas en dirección perpendicular del drenaje principal (SGC, 2013).

Este cuerpo se localiza en el centro occidente del municipio limitando con el municipio de Armenia (Mantequilla) en la vereda la Hondura que presenta un relieve relativo de 260 m aproximadamente y su eje principal de 115 m por lo tanto se le otorgo esta clasificación, dicha unidad no cuenta con algún movimientos en masa activo pero si cuenta con algunos procesos erosivos.



Ilustración 30 Lomo denudado moderado de longitud corta en límites Heliconia-Armenia

Lomo desnudo moderado de longitud larga (Dldeml): corresponde a un conjunto de lomos y filos con índice relativo entre 100 m y 250 m y la longitud del eje principal es mayor a 1000 m, con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal (SGC, 11).

Este cuerpo se localiza en el occidente del municipio limitando con el municipio de Armenia (Mantequilla) en la vereda la Hondura y presenta un relieve relativo de 310 m aproximadamente y su eje principal de 1145 m por lo tanto se le otorgo esta clasificación, dicha unidad cuenta con algunos movimientos en masa activos y con algunos procesos erosivos.

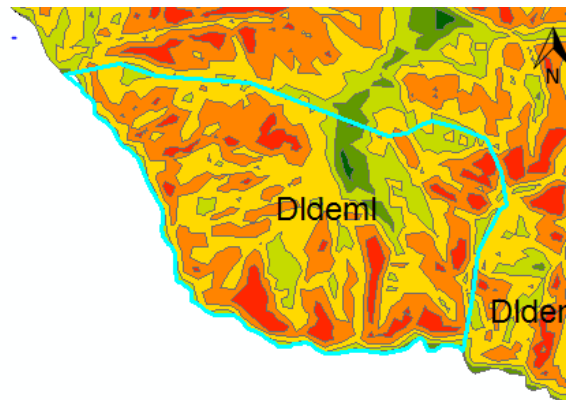


Ilustración 31 Lomo desnudo moderado de longitud larga. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad

Sierra desnuda (Dsd): prominencia topográfica de morfología montañosa y elongada de laderas largas, convexas y con pendientes muy fuertes, donde prevalece procesos erosivo o movimientos en masa, su origen se relaciona a procesos erosivos acentuados en sustratos de rocas ígneas y metamórficas (SGC, 2013).

Esta unidad se localiza al norte del municipio en límites con el municipio de Ebejico en las veredas La Pradera y Llano de San José, este cuerpo está formado sobre rocas de origen metamórfico (Esquistos de Sabaletas) y en ella se evidencia movimientos en masa activos de tipo rotacional y otros procesos erosivos por lo tanto se le asigno dicha calificación.



Ilustración 32 sierra denudada en límites Heliconia-Ebejico.

10.3.2.2 Ambiente estructural

Está conformado por geofomas relacionadas con la dinámica interna de la tierra, principalmente a procesos tales como plegamientos y fallamiento y se expresan morfológicamente por la tendencia y la variación en la resistencia de las rocas (SGC, 2013). En el municipio se cuenta con gran cantidad de dichas unidades ya que hay un fuerte control estructural, debido a las características tectónicas de la región como las fallas regionales, locales y lineamientos. Las geofomas presentes en el municipio corresponden a:

Espinazo (Se): sierra simétrica o asimétrica, con crestas agudas a redondeadas, definida por la intercalación de estratos de unidades con diferentes resistencias con un patrón escalonado de planchas o chevrones, acentuados en estratos sedimentarios (SGC, 2013).

Esta unidad se localiza en el centro del municipio en la vereda el Crucero, este cuerpo está formado sobre rocas de origen sedimentario (Formación Amagá) y cuenta con el patrón característico de crestas agudas y escalonadas (corte de los estratos) además de contar con algunos movimientos en masa activos en uno de sus flancos y algunos procesos erosivos.



Ilustración 33 Espinazo en cercanías con la cabecera municipal vereda el Crucero.

Espolón (Ses): saliente de morfología alomada, posicionado perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, mayormente desarrollados sobre todo tipo de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, con laderas de longitud variable y con pendientes que van de abruptas a medias (SGC, 2013).

Espolón facetado (Sefc): saliente natural de un conjunto de sierras que se desprenden de estructuras mayores por medio de procesos de plegamiento, fallamiento y erosión diferencial sobre rocas con distintas resistencia. Es producto de fallamiento inverso y de rumbo que generan truncamientos a manera de facetas triangulares.

Esta unidad se encuentra al este del municipio en límites con Medellín en la vereda la Chorrera sobre rocas de origen ígneo (QuebradaGrande), asociado a trazos de falla Sabaletas en dirección NS y con formación de facetas triangulares, su longitud es media, es irregular con pendientes moderadas y presenta movimientos en masa.



Ilustración 34 Espolón faceteado en cercanías con la cabecera municipal vereda la Chorrera

Espolón bajo de longitud corta (Sesbc): corresponde a un espolón con relieve relativo de menos de 250 m aproximadamente unos 182 m y su longitud del eje principal es aproximadamente de 236 m, cuenta con un patrón de drenaje subparalelo y está asociada a la traza de la falla Amaga, está ubicado en cercanías de la cabecera municipal de Heliconia y cuenta con algunos movimientos en masa.

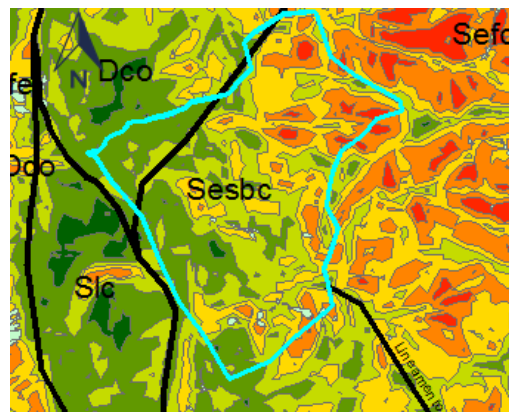


Ilustración 35 Espolón bajo de longitud larga. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad

Espolón bajo de longitud media (Sesbm): la particularidad es que corresponde a una unidad con un relieve relativo menor de 250m y una longitud del eje principal

de 430m aproximadamente, sin presencia significativa de facetas triangulares, su patrón de drenajes corresponde a subparalelo y está asociado al trazo de la falla Amagá, en el municipio está localizada al este cerca del corregimiento de pueblito en la vereda el Crucero, además presenta algunos movimientos en masa y procesos erosivos activos.



Ilustración 36 Espolón bajo de longitud moderada en cercanías del corregimiento Pueblito en la vereda en Crucero

Espolón moderado de longitud baja (Sesmb): esta unidad cuenta con un relieve relativo entre 250 m y 100 m y posee una longitud del eje principal de 196 m se encuentra ubicado al centro oeste de la cabecera municipal en la vereda el Hatillo, cuenta con pendientes fuerte a muy fuertes y se asocia al trazo de la falla Quirimara, dicha unidad cuenta con algunos movimientos en masa activos y procesos erosivos.



Ilustración 37 Espolón moderado de longitud baja en cercanías del corregimiento de el Alto del Corral en la vereda el Hatillo.

Espolón moderado longitud media (Sesmm): estos espolones tiene un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m y su eje principal esta aproximadamente en 830 m de longitud, esta unidad se asocia a un lineamiento presente en el sureste del municipio en cercanías con el corregimiento de Pueblito en la vereda Pueblito, además de contar con movientes en masa y procesos erosivos.

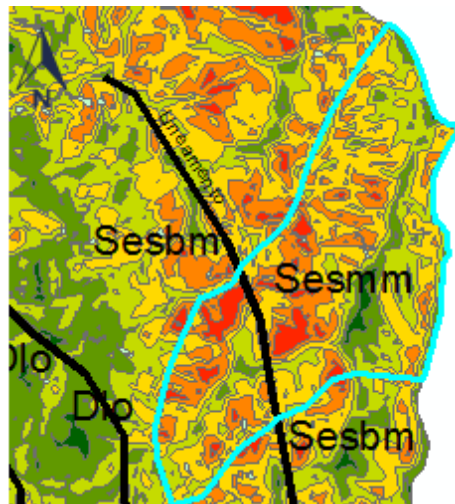


Ilustración 38 Espolón moderado de longitud media. Mapa de relieve relativo con delimitación de unidad

Gancho de flexión (Sgf): corresponde a un espolón estructural de morfología alomada, con una geometría en planta en forma de gancho, se originan por el efecto combinado generado por el desplazamiento lateral a lo largo de una falla de rumbo (SGC, 2013).

Esta geoforma se encuentra asociada al trazo de la falla Llorosagrande en cercanías con la cabecera municipal del municipio en las veredas el Tablazo y el Hatillo, se desarrolla sobre roca ígnea (Ultramafitas de Angelopolis), presenta una cima subredondeada, laderas de longitud media con pendientes moderas e irregulares



Ilustración 39 Gancho de flexión en cercanías de la cabecera municipal en la vereda el Hatillo

Ladera contrapendiente (Slc): superficie en declive, de morfología irregular, definida por planos (estratos, foliación) dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno, se presenta con longitud media y con pendientes suavemente inclinadas y no se asocia a ninguna estructural regional (SGC, 2013).

Esta unidad se localiza en el centro del municipio en cercanías con la cabecera municipal en las veredas el Hatillo y el Tablazo asociado a la formación Amagá, cuenta con una pendiente suave, de forma regular y una longitud larga además de no contar con presencia de movimientos en masa activos.

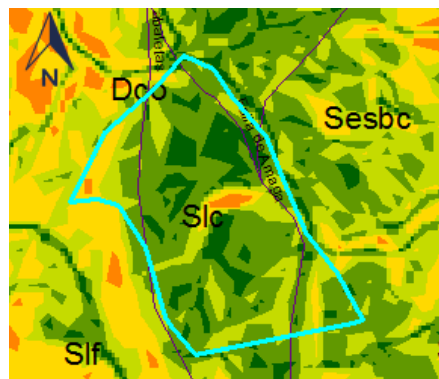


Ilustración 40 Ladera de contrapendiente. Mapa de pendientes con delimitación de unidad.

Ladera estructural (Sle): superficie en declive, de morfología irregular definida por tectónica y control estructural, con pendientes bajas y no se asocia a ninguna estructura de tipo regional (SGC, 2013).

La zona de estudio se encuentra marcada por un fuerte control estructural, de acuerdo con sus características se asociaron dos ladera estructurales las cuales se asocian a rocas sedimentarias y sus estratos se encuentran inclinados a favor de la pendiente, estas unidades se ubican en cercanías a la cabecera municipal en el centro norte del municipio en la vereda el Tablazo y morfológicamente cuenta con una longitud moderada, una forma regular y pendiente moderada.

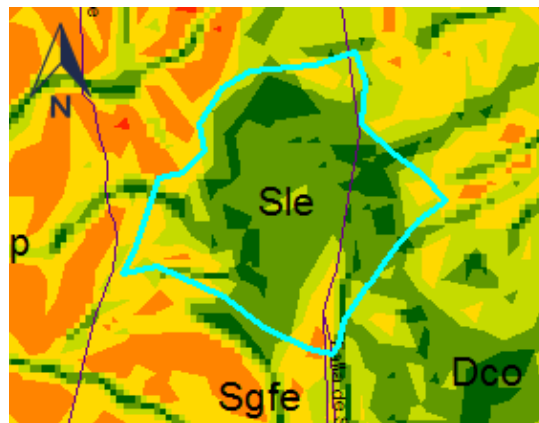


Ilustración 41 Ladera estructural vereda el Tablazo. Mapa de pendientes con delimitación de unidad

Lomo de falla (Sif): corresponde a prominencias topográficas de morfología alomada, con laderas cortas a largas, de forma irregulares y con pendientes generalmente fuertes o escarpes, se localizan a lo largo de una falla de rumbo y formados por el efecto combinado de del desplazamiento lateral y la geometría del plano de falla que originan la expulsión de un bloque del terreno (SGC,2013), como se mencionó anteriormente su longitud puede variar de corta a larga su forma de regular a irregular o cóncava o convexa y con pendiente generalmente fuertes.

En el municipio se definieron 5 unidades de lomos de falla que en su mayoría se asocian al trazo de la falla Sabaletas a lo largo del municipio es decir de sur a norte en las veredas Guarnal, Crucero y Llanos de San José y otros cuerpo se asocian al

trazo de un lineamiento al este del municipio en las veredas Monte dentro y la Chorrera. En su mayoría dichos cuerpos corresponde a cuerpos con una longitud media de forma cóncava y con pendientes abruptas y otra a unos lomos cortos y bajos de forma convexa y pendientes moderadas a suaves, en los primeros descritos se asocian una gran cantidad de movimientos en masa activos y múltiples procesos erosivos.



Ilustración 42 Lomo de falla en cercanías del corregimiento de Pueblito, por el trazo de la falla Sabaletas en la vereda el Crucero.

Lomo de presión (Slp): prominencia topográfica a elongada, localmente curva, asociada a zonas compresivas, su origen se relaciona al truncamiento y desplazamiento vertical o lateral por procesos de fallamiento intenso (SGC, 2013).

En el municipio se definieron dos unidades de lomo de presión, las cuales se encuentran asociadas a los trazos de las fallas Quirimara y Llorosagrande en el centro del municipio en las veredas de la Hondura y Monte dentro, en este caso corresponden a cuerpos alargados curvos, de relieve relativo medio, pendientes moderadas e irregulares y longitud media con presencia de movimientos en masa activos en los dos cuerpos y procesos erosivos.

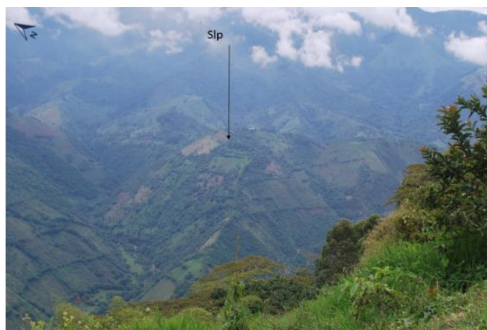


Ilustración 43 Lomo de presión vereda Monte dentro, por el trazo de la falla Quirimara.

Sierra estructural (Sse): prominencia topográfica de morfología colinda, con laderas de longitud corta a largas, cóncavas a irregulares, la unidad presenta pendientes muy fuertes abruptas a escarpadas las cuales han sido parcialmente aisladas de las zonas montañosas por fallamiento, de acuerdo con su longitud pueden ser (cortas, medias o largas) con forma (regular, irregular, cóncava, convexa) (SGC, 2013).

En el municipio se definieron 3 unidades de sierras estructurales las cuales se encuentran al norte y al sur del municipio en las veredas Guarnal y Llanos de San José asociados al trazo de las fallas Quirimara para las unidades al norte y Al trazo de Llorosagrande para la unidad del sur, se caracterizan por ser sierras medias con pendientes fuertes y de forma regular además de presentar un gran porcentaje de movimientos en masa y otros procesos erosivos.



Ilustración 44 Sierra estructural vereda Monte dentro, por el trazo de la falla Quirimara.

10.3.2.3 Ambiente fluvial

Este ambiente corresponde a geoformas producto de procesos erosivos relacionados con la corriente de los ríos por la acumulación o sedimentación de materiales de los ríos, en épocas relacionadas a la dinámica normal de la corriente en periodos secos o en épocas de avenidas e inundaciones (SGC, 2013)

El municipio de Heliconia cuenta con un numero representativo de afluentes de agua pero debido a las condiciones morfológicas con las que cuenta no son muchas las unidades fluviales que se encuentran en el municipio, las unidades más representativas se asocian a la quebrada La Sucia y El Saladero al norte del municipio la cual desemboca en el rio Cauca y la geoforma que se caracterizó corresponde a la Llanura de inundación en un tramo del rio ya que en su gran mayoría estos afluentes y los demás presentes en el municipio se encuentran encañonados por lo tanto no se genera una acumulación de material en el rio a esta escala.

Llanura de inundación (Flli): superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable las cuales se localiza bordeando los cauces fluviales. En regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, en red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial (SGC, 2013).

Las llanura de inundación en el municipio se asocia a la quebrada La Sucia y El Saladero en la zona norte del municipio la cual por la morfología del terreno ya que en su mayoría se encuentra encañonado por lo tanto corresponde a una llanura angosta y alargada.



Ilustración 45 Llanura de inundación de la Quebrada la Sucia en el sector norte del municipio

10.3.3 Cobertura

La cobertura del suelo corresponde a aquellos elementos que se encuentran sobre la superficie del terreno ya sean naturales o artificiales generados por el hombre, por lo tanto esto quiere decir que corresponde a toda la vegetación presente y todo tipo de construcción destinada al desarrollo de actividades relacionadas a las necesidades humanas, dichas actividades generan la aparición de diferentes patrones que afectan las formas del relieve, el ciclo hidrológico y deterioro en el ecosistema, de este modo se puede generar de forma negativa la propagación de diferentes procesos erosivos tales como movimientos en masa y haciendo así de esta variable un factor importante para el estudio de la susceptibilidad por movimientos en masa (SGC, 2013).

El mapa de cobertura para el municipio de Heliconia (ilustración.45) se desarrolló mediante la metodología Corine Land Cover en IDEAM, 2008. En la tabla.7 se muestra las coberturas presentes en el municipio, con su respectiva área y porcentaje total en el municipio.

Tabla 7 datos para el mapa de cobertura

Código	Unidad	Área (ha)	% área
1	Aguas continentales	101,86	0,88
2	Áreas abiertas sin o con poca vegetación	49,30	0,42
3	Áreas agrícolas heterogéneas	1285,11	11,18
4	Áreas con vegetación herbácea o arbustiva	279,81	2,43
5	Bosques	4726,41	41,14
6	Cultivo transitorio	63,61	0,55
7	Cultivo permanente	139,29	1,21
8	Pastos	3772,77	32,83
9	Territorios agrícolas	867,2	7,54
10	Zonas de extracción minera y escombrera	17,45	0,15
11	Zonas urbanas	18,47	1,5
12	Zonas industriales o comerciales	3,14	0,02

Aguas continentales: Son cuerpos de aguas naturales permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales, y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales (IDEAM, 2008).

En el municipio se encuentran representadas por las quebradas que en él se encuentran, siendo las más representativas la quebrada la Sucia y el Saladero, pero siendo apenas el 0,88% del área total del municipio

Áreas abiertas con o sin poca vegetación: Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas (IDEAM, 2008).

Estas áreas son poco significativas en el municipio ya que son el 0,42% del área del municipio y se encuentra caracterizadas en la zona este del municipio.

Áreas agrícolas heterogéneas: Son unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y naturales, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales; los arreglos geométricos están relacionados con el tamaño reducido de los predios, las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tenencia de la tierra. Se incluyen las siguientes unidades: Mosaico de cultivos, Mosaico de pastos y cultivos, Mosaico de pastos cultivos y espacios naturales, Mosaico de pastos y espacios naturales y Mosaico de cultivos y espacios naturales (IDEAM, 2008).

Estas áreas agrícolas corresponden a la tercera unidad con mayor representación en el municipio con un 11,18% y su localización se asocia a los sectores aledaños a la cabecera municipal y a los corregimientos como Pueblito y Llanos de San José.

Áreas con vegetación herbácea o arbustivo: Comprende a Áreas con vegetación herbácea las cuales son un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica. Incluye la unidad de Herbazales (Herbazal denso de tierra firme, Herbazal denso de tierra firme no arbolado, Herbazal denso alto de tierra firme no arbolado, Herbazal denso bajo de tierra firme no arbolado, Herbazal denso de tierra firme arbolado, Herbazal denso de tierra firme con arbustos, Herbazal denso inundable, Herbazal denso inundable arbolado, ArracachaL, Helechal, Herbazal abierto, Herbazal abierto arenosos, Herbazal abierto rocoso). También Áreas con vegetación arbustiva que comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados de forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida. Abarca los Arbustales densos, Arbustal abierto, Arbustal abierto esclerófilo y Arbustal abierto mesófilo. Y por último vegetación secundaria o en transición que comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde por la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida. No se presentan elementos intencionalmente introducidos por el hombre. Abarca la Vegetación secundaria alta y la Vegetación secundaria baja (IDEAM, 2008).

Son poco representativos en el municipio ya que son solo el 2,43% del área total, y se encuentra localizado en la zona centro del municipio

Bosques: constituido por bosque naturales que comprende las áreas naturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Incluye las unidades de Bosques densos, Bosques abiertos. Y constituido por bosques seminaturales que corresponden a las áreas seminaturales, constituidas

principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Comprende las unidades de Bosque fragmentado con pastos y cultivos, Bosque fragmentado con vegetación secundaria y Bosque de galería y ripario (IDEAM, 2008).

Es la unidad más representativa en el municipio ya que el sector este del municipio cuenta con una gran extensión de estos casi en su mayoría corresponde a bosques, además que en la zona limítrofe con Armenia se encuentra otro sector representativo de bosques, estos llegan a ocupar un 41,14% del área del municipio.

Cultivo transitorio: Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de solo unos pocos meses, como, por ejemplo, los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto. Tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo (IDEAM, 2008).

Esta unidad se encuentra relacionada a las áreas y territorios agrícolas, por lo tanto dicha unidad se ubica en cercanías a las zonas urbanas en el municipio sea cabecera municipal y corregimientos.

Cultivo permanente: Comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao; y los cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales, los cultivos agroforestales y los cultivos confinados (IDEAM, 2008).

Esta unidad se encuentra relacionada a las áreas y territorios agrícolas, por lo tanto dicha unidad se ubica en cercanías a las zonas urbanas en el municipio sea cabecera municipal y corregimientos.

Pastos: Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística, dedicadas a pastoreo permanente por un periodo de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes

cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente, y en el manejo posterior que se le hace. Incluye los pastos limpios, pastos arbolados, pastos enmalezados y pastos degradados (IDEAM, 2008).

Es la segunda unidad con mayor predominancia en el municipio con un 32,83 del área del municipio y se localiza por todo el municipio pero con una mayor presencia en el sector occidental.

Zonas de extracción minera y escombrera: Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen (IDEAM, 2008).

Se caracterizó esta unidad en cercanías con la cabecera municipal, en el proyecto relacionado con la extracción de la roca ultramáfica

Zonas urbanas: Incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas que configuran un tejido urbano. Incluye el tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo (IDEAM, 2008).

Corresponde a la cabecera municipal ubicada en la zona centro del municipio y de tres corregimientos, Pueblito ubicado en el sur del municipio, Alto del Corral al este del municipio y Llanos de San Jose al norte del municipio, juntos corresponde un 1.5% del área total del municipio.

Zonas industriales y comerciales: Comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad. La superficie debe ser mayor a una hectárea y el ancho de la vía debe ser superior a 14 metros (IDEAM, 2008).

Se relaciona esta unidad a la estación eléctrica que se está construyendo en el sector este del municipio en límites con Ebejico.

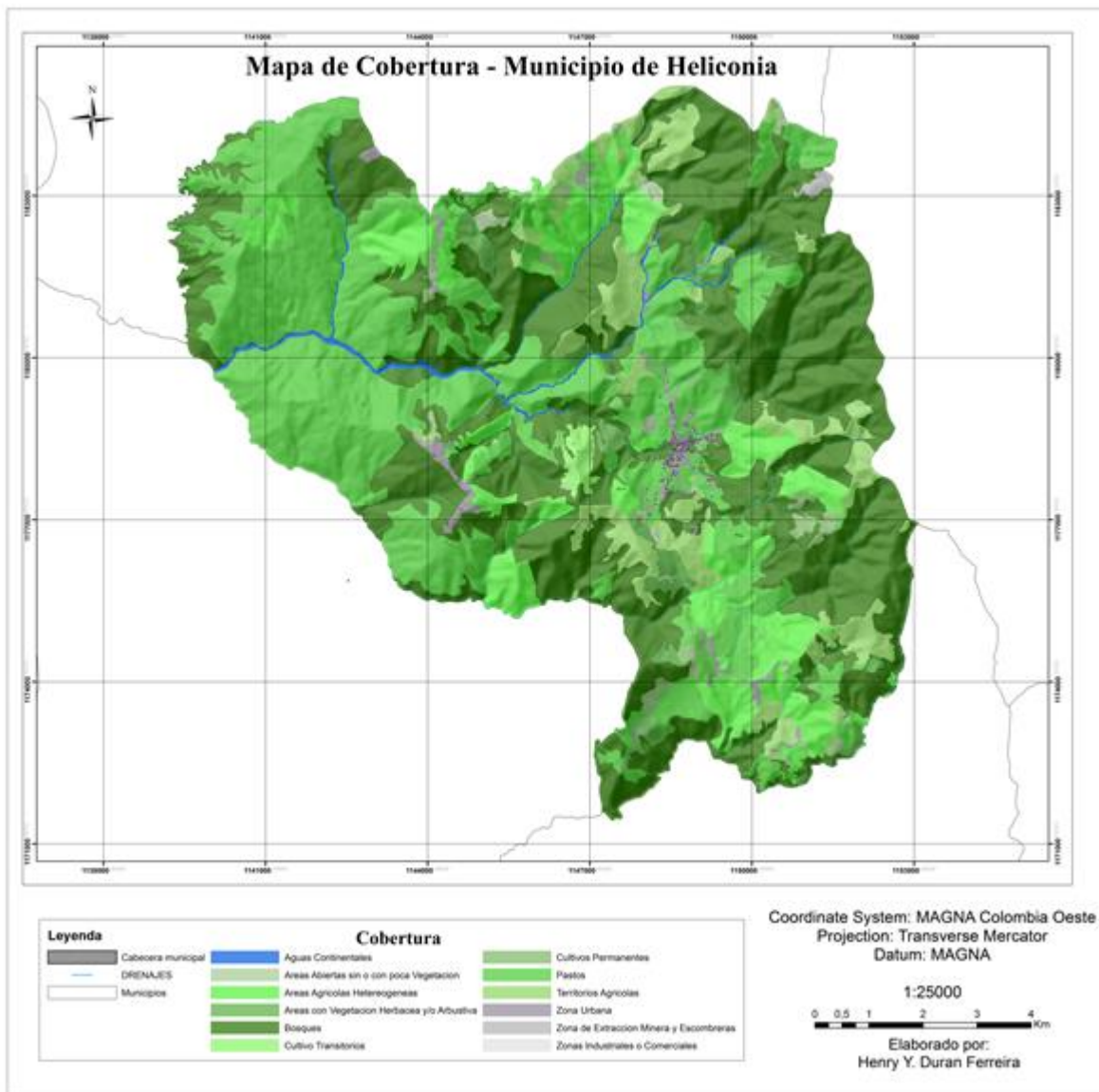


Ilustración 46 Mapa de cobertura del municipio de Heliconia

10.4 Morfodinámico

Los movimientos en masa se distribuye a lo largo del municipio, pero con una mayor concentración de estos hacia el norte y centro del municipio, en general, los movimientos en masa se relacionan a los trazos de las fallas y a las zonas de alta

pendiente además de estar estrechamente relacionado a las rocas del complejo Quebrada Grande y a las Ultramafitas de Angelópolis.

Estos procesos fueron cartografiados mediante sensores remotos (ortofotos y fotos aéreas) y con el levantamiento en campo, además de la recopilación de datos presentes en el SIMMA y DESinventar, por lo tanto para el municipio se tiene un registro de 421 movimientos en masa los cuales contemplan una área afectada de 83,58 ha, de los cuales 319 (75%) corresponden a deslizamientos rotacionales y traslacionales y el 25% corresponde a flujos los cuales tienen registro de 102 flujos entre los cuales se encuentran flujos de tierra, flujos de detritos y flujos de lodo y una área afectada de 18,07 ha , todos estos registros se muestran en la tabla.8. y la ilustración.46 muestra la distribución en el municipio.

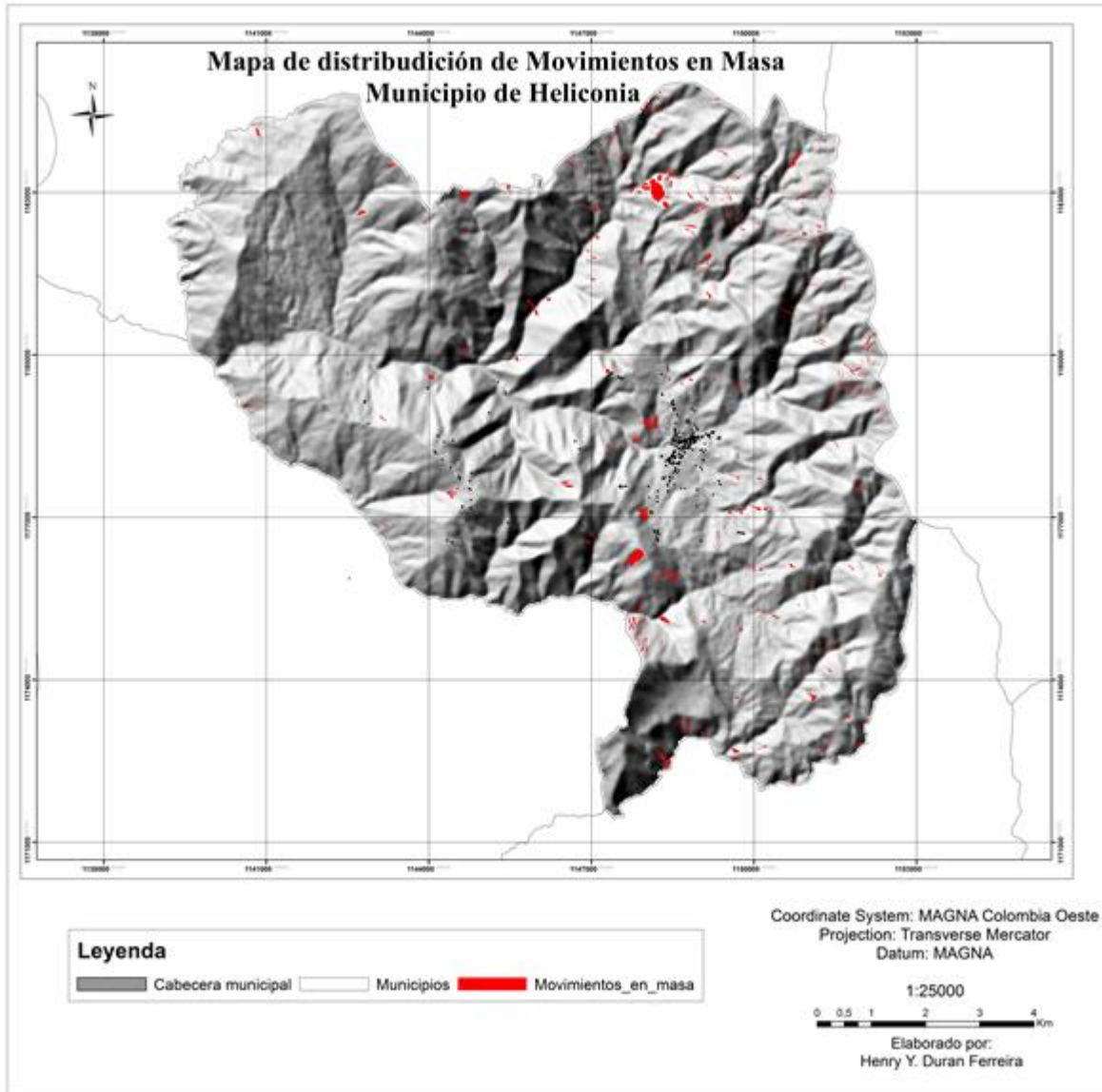


Ilustración 47 Mapa de distribución de movimientos en masa en el municipio de Heliconia

Tabla 8 distribución de movimientos en masa

Movimiento en masa	# MM	Área afectada (ha)	% área
Deslizamientos	319	65,44	75
Flujos	102	18,07	25

Estos eventos se asocian a diversos factores tanto naturales como antrópicos, entre los cuales se encuentran la inestabilidad a causa del fallamiento, saturación de poros a en periodos lluvioso, altas pendientes, su forma y longitud, entre los factores antrópicos se relaciona la construcciones de vías y el inadecuado manejo de los taludes, deforestación y mal manejo del uso del suelo.

Como se mencionó anteriormente los procesos morfodinámicos se encuentran distribuido en su gran mayoría al norte y centro del municipio en las veredas de Monte dentro, La Chorrera, Tablazo, Hatillo y El Crucero además de contar con una presencia significativa de flujos en la vereda el Guarnal y Monte dentro y una mayor concentración de deslizamientos en la veredas el Tablazo y Hatillo.

Algunos de estos procesos morfodinámicos en el municipio de Heliconia se presentan a continuación



Ilustración 48 Deslizamiento rotacional en cercanías del casco urbano sobre las Ultramafitas de Angelópolis



Ilustración 49 Deslizamientos traslacionales en cercanías del corregimiento de Pueblito sobre las Ultramfitas de Angelopolis



Ilustración 50 Deslizamientos en cercanías a la cabecera municipal vía Heliconia-Medellín sobre la Formación Amaga

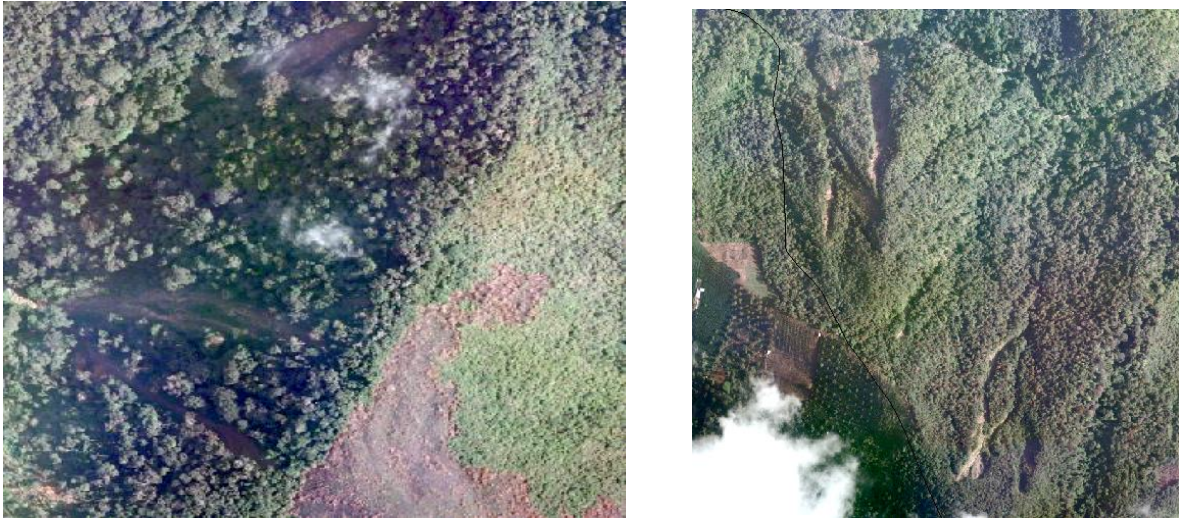


Ilustración 51 Flujos de tierra a) vereda Monte dentro b) vereda el Guarnal

11. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para el cálculo de esta se escogió el método estadístico bivarado y multivariado, ya que se busca reducir la subjetividad y relacionar o contrastar las diferencias de los estos métodos estadísticos con complejidades operativas diferentes.

11.1 *Susceptibilidad con el método estadístico bivariado*

Para el análisis de este se desarrolló el método de índice estadístico (Regmi, 2010) ilustracion.52, en el cual se tienen dos variables en este caso una variable se relaciona a los valores condicionantes en este caso corresponden a geología, geomorfología, cobertura, pendiente, relieve relativo, curvatura, distancia vías, distancia drenajes y distancia fallas y la otra se relaciona a la frecuencia de los movimientos en masa (Corantioquia-Eafit, 2015).

Para el desarrollo de esta se pretende obtener un valor de peso W_i para cada parámetro es decir un valor de W_i para cada una de las variables por ejemplo para curvatura, pendientes, relieve, geología, geomorfología, cobertura, distancia fallas, distancia drenajes, distancia vías y este valor de W_i se define como el valor del área afectada por unidad el cual se divide por el valor del área de la unidad, al mismo

tiempo se obtiene el valor de la división del área afectada total sobre el área total del municipio y una vez obtenidos estos dos valores se dividen para obtener W_i como se observa en la ilustración.54.

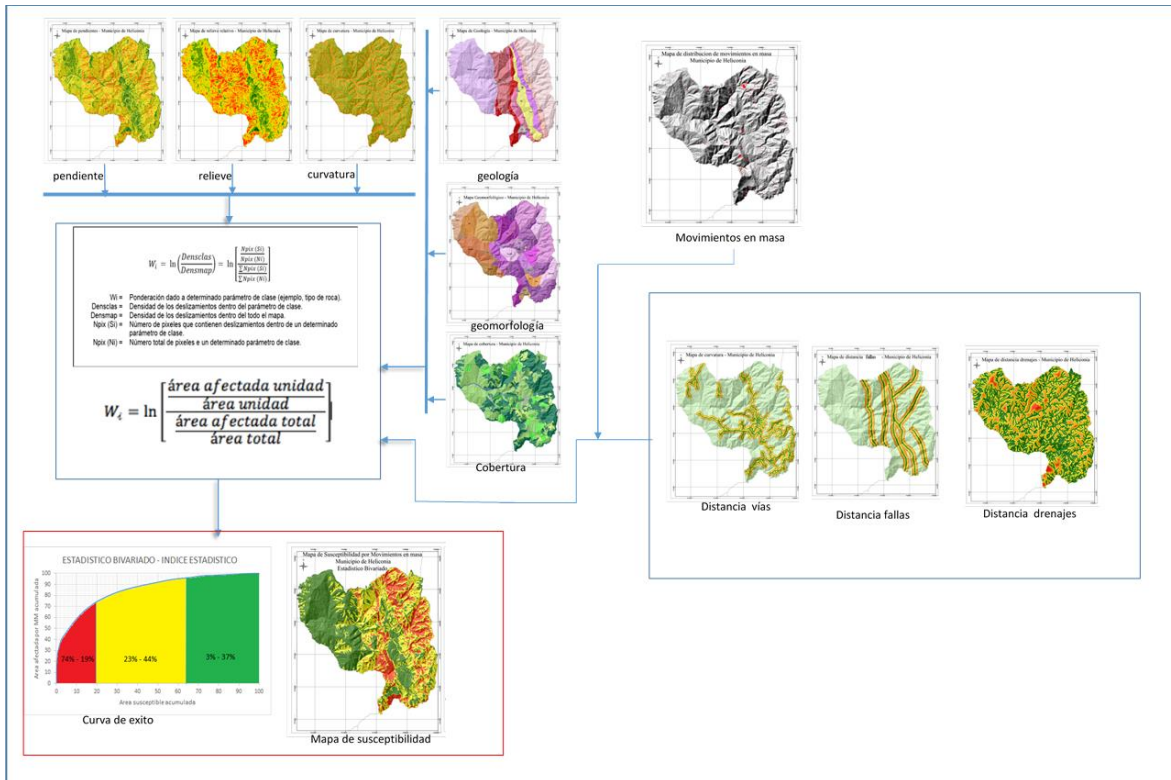


Ilustración 52 metodología biviariada índice estadístico

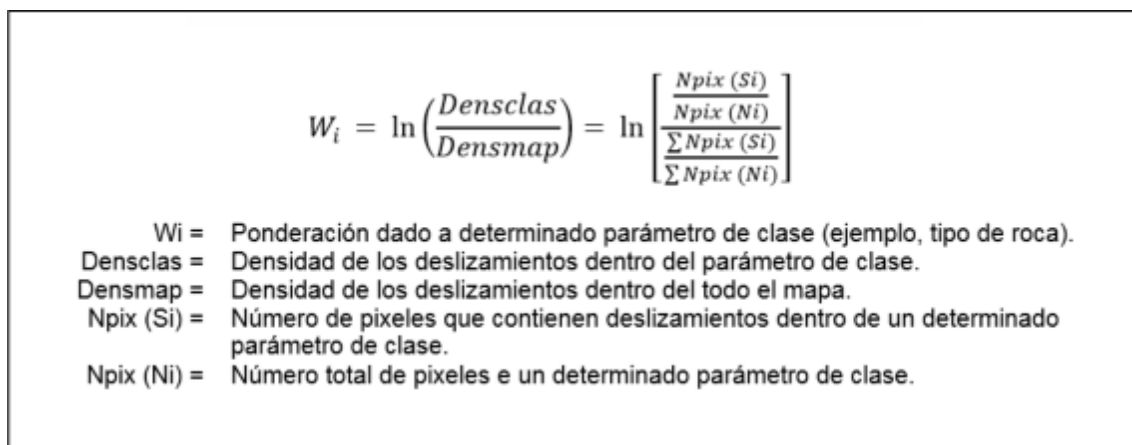


Ilustración 53 cálculo del W_i , tomado de CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015

Por lo tanto la ecuación con la que se encontró el valor de W_i corresponde a

$$W_i = \ln \left[\frac{\frac{\text{área afectada unidad}}{\text{área unidad}}}{\frac{\text{área afectada total}}{\text{área total}}} \right]$$

Ilustración 54 ecuación para la obtención de W_i

Posterior a obtener los valores de W_i se graficaron los porcentajes de área acumulada de los diferentes rangos de susceptibilidad los cuales se dividieron en 50 clases versus el porcentaje de área acumulada de movimiento en masa y se establecieron los rangos con susceptibilidad alta, media y baja, obteniendo de este modo las curvas de éxito y el mapa de susceptibilidad por el método estadístico.

11.1.1 Susceptibilidad por deslizamientos

La clasificación de las susceptibilidades alta, media y baja se basó en la metodología aportada por el SGC, 2017 y se obtuvo una curva de éxito con una área bajo la curva de 0,864 haciendo válido el modelo, por lo tanto se clasificó la susceptibilidad alta el 75% de los deslizamientos lo cual representa en este caso el 23% del área del municipio, la susceptibilidad media que representa el 22% de los deslizamientos que corresponde al 44% del área del municipio y por lo tanto el 3% de los deslizamientos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja correspondiendo al 33% del área total.

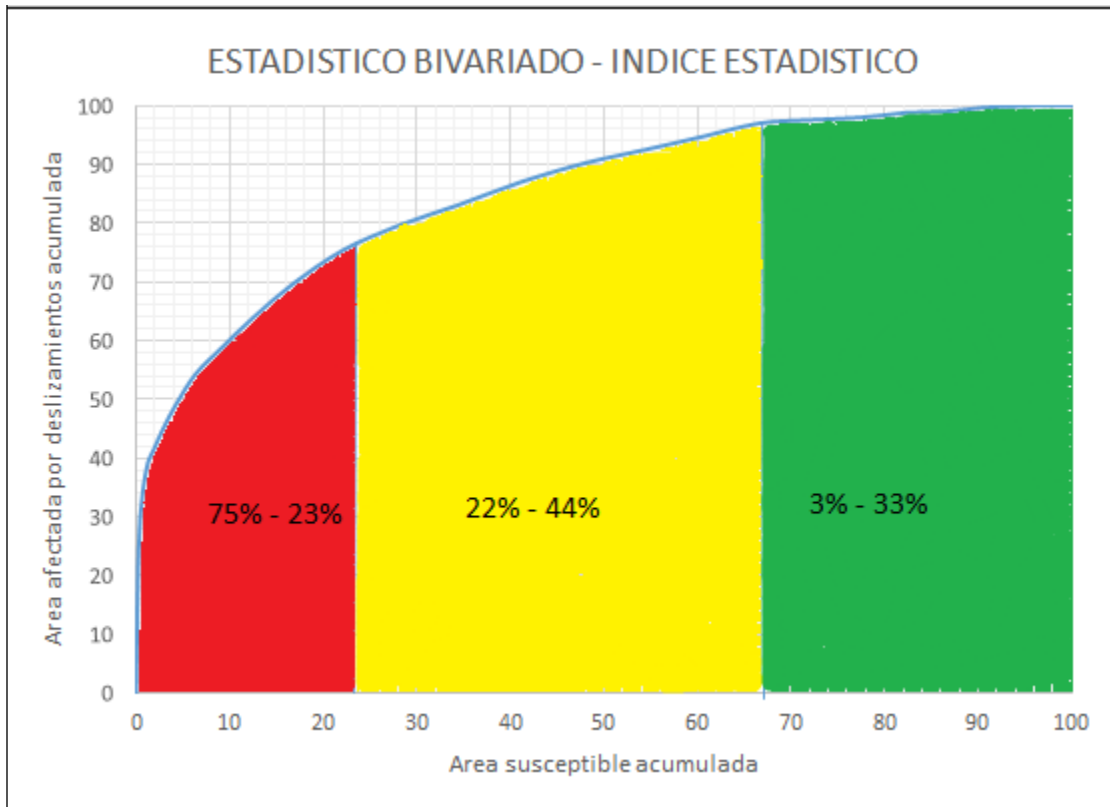


Ilustración 55 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para deslizamientos por el método estadístico bivariable (índice estadístico)

El mapa de susceptibilidad por deslizamiento en Heliconia, según el método estadístico bivariable, (ilustración. 56) se categorizó en 3 rangos alto, medio y bajo y se muestra a continuación.

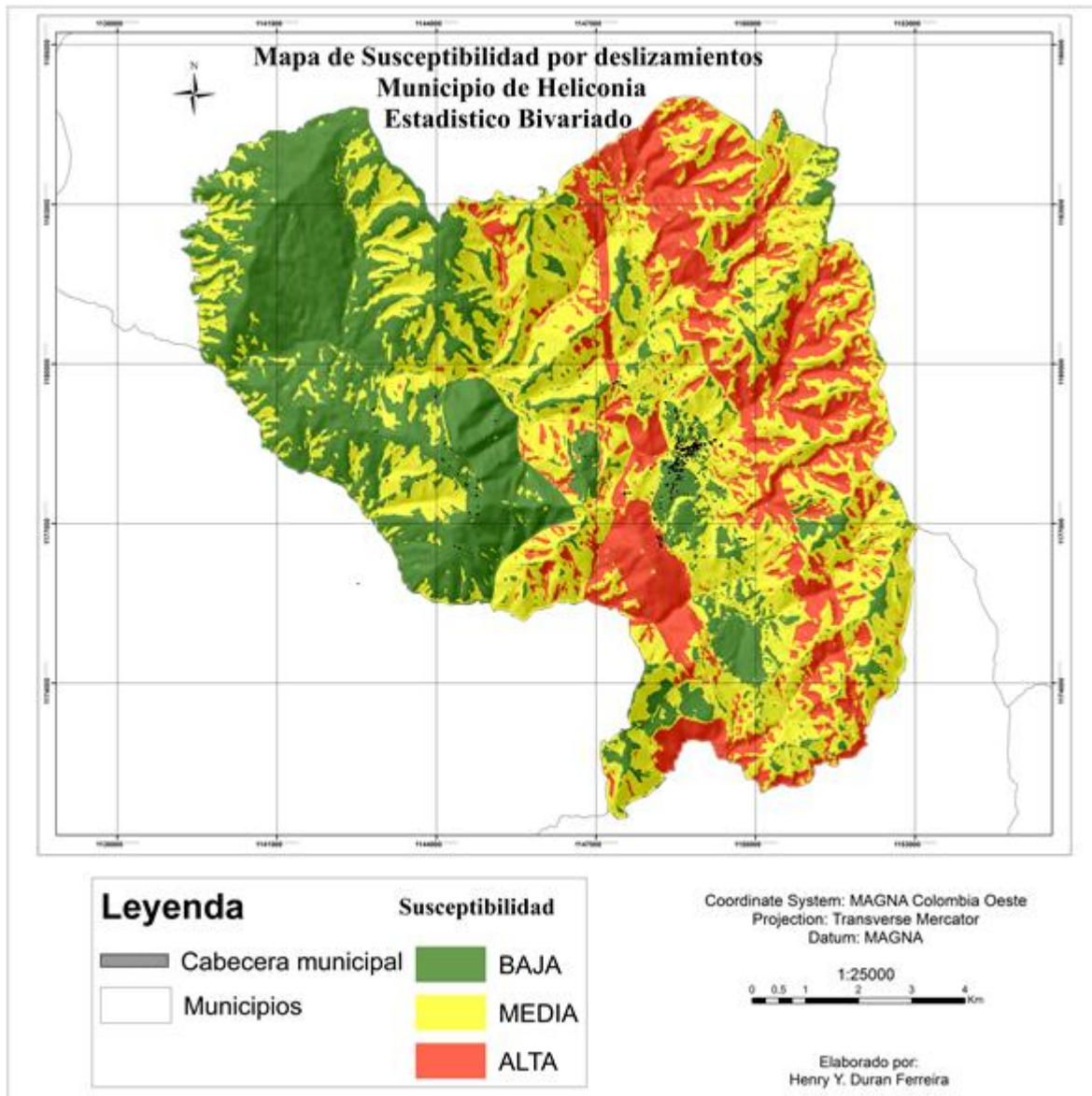


Ilustración 56 Mapa de susceptibilidad por deslizamientos según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia

Susceptibilidad alta

En el municipio la susceptibilidad alta ocupa una extensión de 23% del área total y se encuentra distribuido en la zona noreste (Veredas Monteadentro, Llanos de San José, la Chorrera y Morritos), en la zona centro en límites con Armenia Mantequilla (veredas la Hondura y Crucero) y al sur en límites con Angelópolis (vereda el Guarnal).

Esta susceptibilidad alta principalmente tiene una correlación con las zonas cercanas al trazo de las fallas Sabaletas y Llorosagrande, también se encuentran asociadas a geoformas de ambiente estructural tales como espolones moderado con longitud media, faceteados, ganchos de flexión y lomos de falla además se asocia a la geoforma de ambiente denudacional correspondiente a escarpe de erosión menor, litológicamente están asociados en su mayoría a al complejo Quebrada Grande y a la Ultramafita de Angelopolis y a pendientes moderadas a fuertes y en lo relacionado con su cobertura se asocia a áreas agrícolas y a zonas con poca vegetación entre otros.

Susceptibilidad media

Para el municipio de Heliconia se encuentra una predominancia a la susceptibilidad media ya que esta ocupa un 44% del área total y se encuentra distribuida en todo el municipio pero con mayor presencia en la zona sur (veredas Pueblito y Pueblo Viejo) y en el norte (vereda Llano de San José y Monteadentro).

Estas zonas de susceptibilidad media se asocian a pendientes moderadas a fuertes y geomorfológicamente se asocian a geoformas de ambiente estructural correspondientes a lomos de presión, sierras estructurales y espolones bajos y medios de longitud corta y en cobertura se relacionan a zonas medianamente boscosas y algunas zonas agrícolas entre otras.

Susceptibilidad baja

La susceptibilidad baja por deslizamiento ocupa un 33% del área total del municipio y se encuentra distribuida principalmente en el occidente del municipio (veredas la Pava, Alto del Corral y la Pradera) pero también está presente en todo el municipio en pequeños sectores.

Dicha susceptibilidad se asocia a las zonas con menor actividad tectónica y geomorfológicamente se asocia a geoformas de ambiente denudacional tales como laderas onduladas las cuales corresponderían a esos parches ubicados en el centro y sur del municipio, a lomos denudados, a las cimas presentes en algunas geoformas del municipio y a algunas geoformas que se asocian a zonas de

deposicion, litológicamente esta susceptibilidad corresponde en su gran mayoría rocas metamórficas (esquistos de Sabaletas), la Formación Amagá y a depósitos cuaternarios.

11.1.2 Susceptibilidad por flujos

La clasificación de las susceptibilidades alta, media y baja para flujos se basó en la metodología aportada por el SGC, 2017 y se obtuvo una curva de éxito con una área bajo la curva de 0,928 haciendo valido el modelo, por lo tanto se clasifico la susceptibilidad alta como el 72% de los flujos lo cual representa en este caso el 7.6% del área del municipio, la susceptibilidad media que representa el 24% de los flujos correspondiendo al 26.4% del área del municipio y por lo tanto el 6% de los flujos se ubican en la categoría de susceptibilidad baja correspondiendo al 66% del área del municipio.

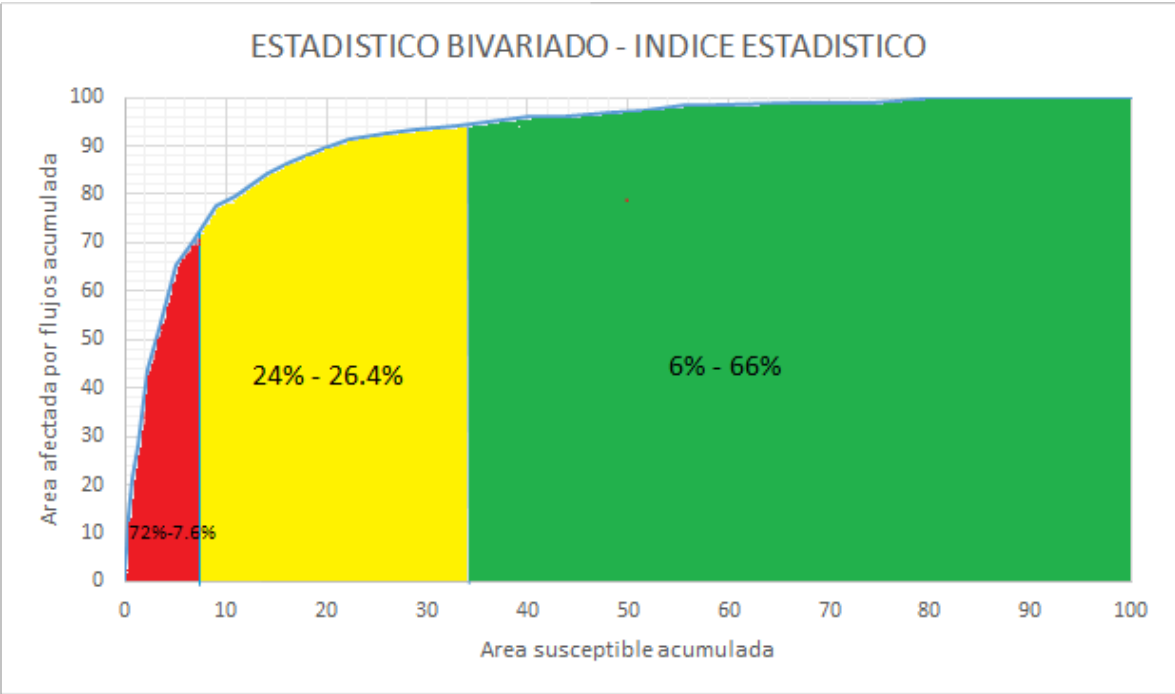


Ilustración 57 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para flujos por el método estadístico bivariado (índice estadístico)

El mapa de susceptibilidad por flujos en Heliconia, según el método estadístico bivariado, (ilustración. 58) se categorizo en 3 rangos alto, medio y bajo y se muestra a continuación.

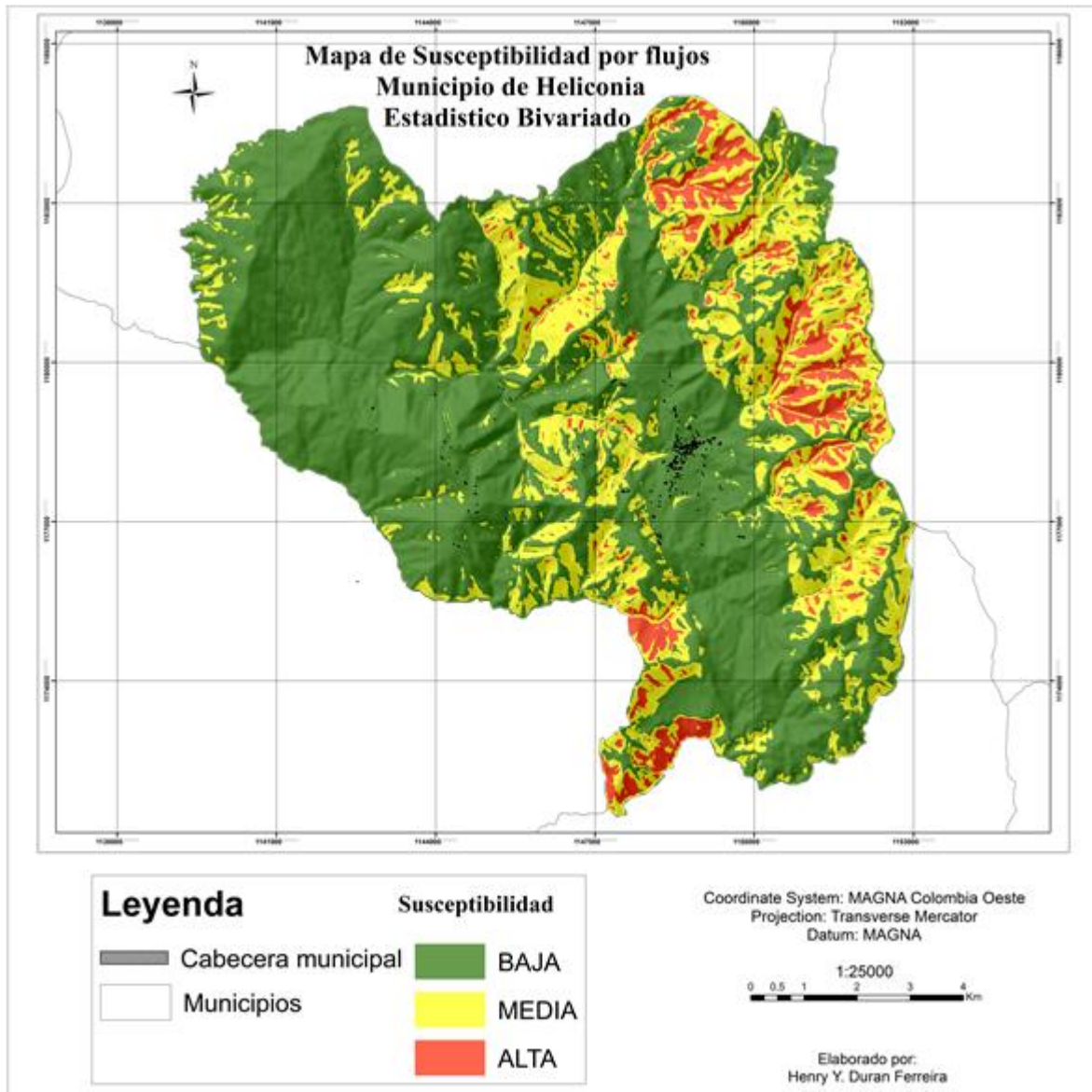


Ilustración 58 Mapa de susceptibilidad por flujos según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia

Susceptibilidad alta

La susceptibilidad alta por flujos tiene una densidad o distribución baja y comprende alrededor del 7.6% del área total del municipio, los flujos presentes en el municipio se asocian a flujos de tierra y se localizan en la zona noreste (veredas Monte dentro, Llanos de San José y la Chorrera) relacionadas litológicamente al complejo Quebrada Grande y en la zona sur (vereda el Guarnal) en límites con Angelópolis y Armenia (Matequilla) que litológicamente corresponde a los Gabros de Heliconia, se caracterizan por pertenecer a zonas con pendientes muy fuertes a moderadas, geomorfológicamente se asocian a geoformas de origen estructural tales como espolones en lo que corresponde a la zona noreste y en el sur a la geoforma denudación de escarpe de erosión menor y la geoforma estructural de cerro estructural, su cobertura se relaciona a zonas con cobertura boscosa en su gran mayoría.

Susceptibilidad media

La susceptibilidad media por flujos en el municipio de Heliconia tiene una extensión de 26.4% del área total del municipio y se encuentra distribuido en pequeños parches alrededor de toda la zona pero con una predominancia al este del municipio aledaño a las zonas de susceptibilidad alta del noreste, litológicamente está relacionado a rocas ígneas (Complejo Quebrada Grande, Diorita de Heliconia, Diorita de Pueblito, Gabros de Heliconia) en su mayoría y con pequeñas presencias en las rocas metamórficas y sedimentarias, geomorfológicamente está relacionada a un ambiente estructural con predominancia en los espolones de faceteados y espolones moderado de longitud media.

Susceptibilidad baja

La predominancia en el municipio corresponde a este tipo de susceptibilidad ya que corresponde al 66% del área total del municipio y se encuentra distribuido al occidente y al centro del municipio, litológicamente se encuentra relacionado a rocas metamórficas (Esquistos de Sabaletas, Metasedimentos de Sinifana) y a rocas sedimentarias (Formación Amagá), en lo relacionado a la geomorfología está

asociado a geoformas de origen denudacional como lomos denudados y laderas onduladas y esta zona ocupa una cobertura perteneciente de pastos y bosques en zonas con pendientes moderadas a bajas.

11.1.3 Susceptibilidad por Movimientos en masa

En este caso en particular se quería caracterizar como era la susceptibilidad de los fenómenos de remoción en masa juntos, por esta razón en este caso en particular se elaboró una zonificación de los dos tipos de movimientos en masa que se definieron (deslizamientos, flujos) teniendo en cuenta que es la suma de la susceptibilidad por flujos más la susceptibilidad por deslizamientos.

La clasificación de las susceptibilidades alta, media y baja para movimientos en masa se basó en la metodología aportada por el SGC, 2017 y se obtuvo una curva de éxito con una área bajo la curva de 0,866 haciendo válido el modelo, por lo tanto se clasificó la susceptibilidad alta como el 74% de los movimientos en masa lo cual representa en este caso el 19% del área del municipio, la susceptibilidad media que representa el 23% de los movimientos en masa es decir 44% del área del municipio y por lo tanto el 3% de los movimientos en masa se ubican en la categoría de susceptibilidad baja correspondiendo al 37% del área del municipio.

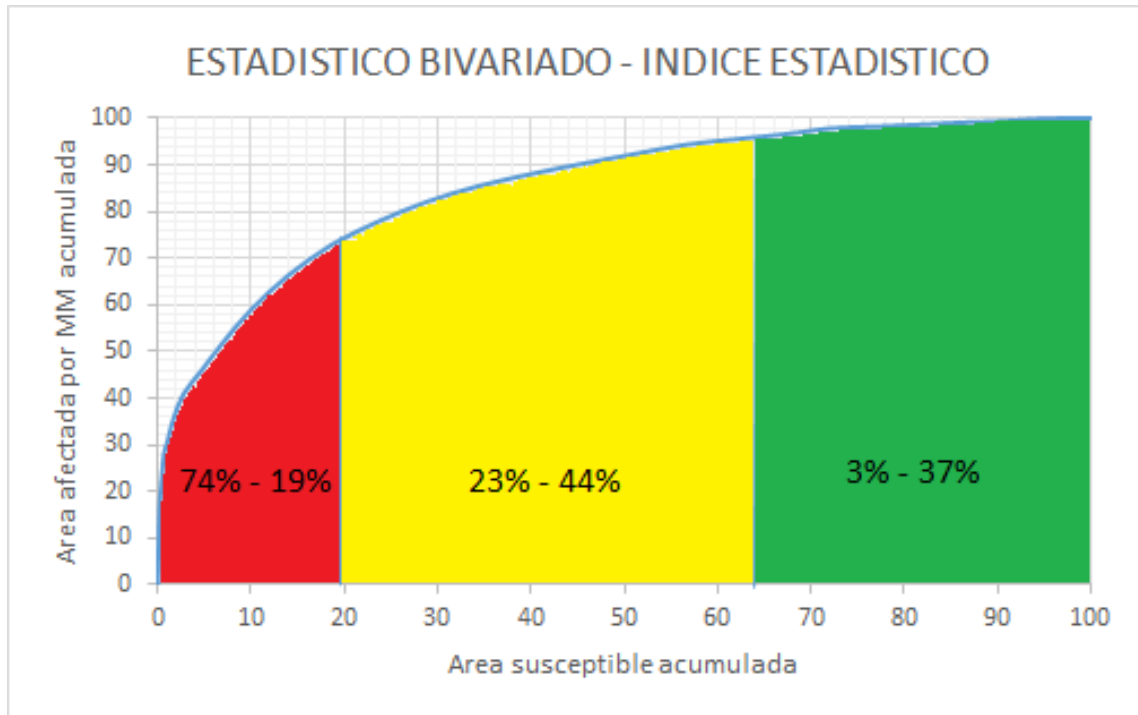


Ilustración 59 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para movimientos en masa por el método estadístico bivariable (índice estadístico)

El mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en Heliconia, según el método estadístico bivariable, (ilustración.60) se categorizó en 3 rangos alto, medio y bajo y se muestra a continuación.

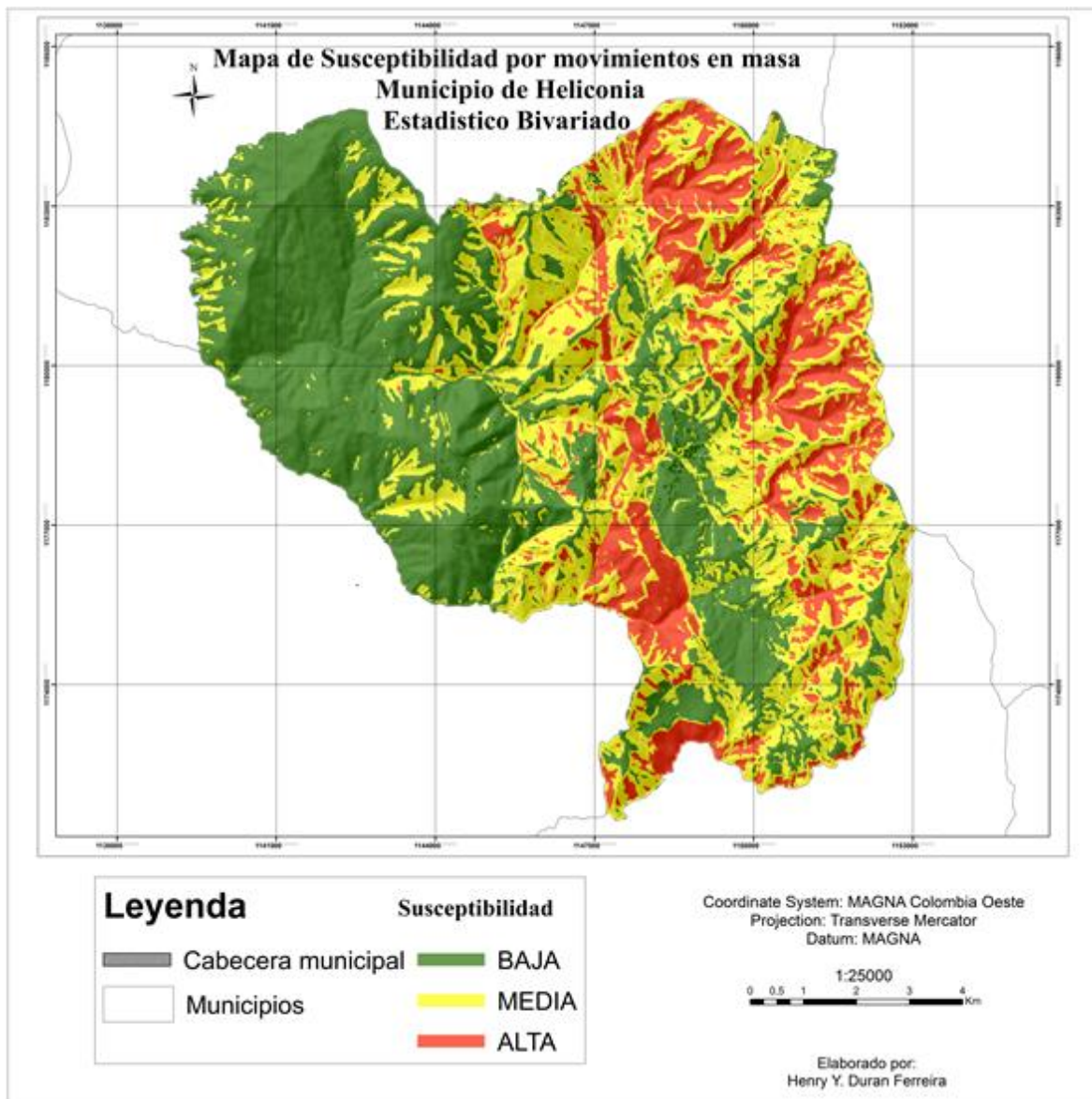


Ilustración 60 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia

Ya que este mapa no corresponde a la unión o a la suma de los mapas de deslizamientos y flujos y si corresponde a el análisis de todo los movimientos, independiente de los tipos, los resultados de las susceptibilidades van a ser muy similares a los obtenidos anteriormente, solo cambiando en el porcentaje de área perteneciente a cada una de las categorías de susceptibilidad (alta, media, baja).

Susceptibilidad alta

La susceptibilidad alta ocupa una extensión de 19% del área total del municipio y se encuentra distribuido en la zona noreste (veredas Monte dentro, Llanos de San José, la Chorrera y Morritos), centro en límites con Armenia Mantequilla (veredas la Honduras y Crucero) y en el sur en límites con Angelópolis (vereda el Guarnal).

Esta susceptibilidad alta principalmente tiene una correlación con las zonas cercanas al trazo de las fallas Sabaletas y Llorosagrande, también se encuentran asociadas a geoformas de ambiente estructural tales como espolones moderado con longitud media, faceteados, ganchos de flexión y lomos de falla además se asocia a la geoforma de ambiente denudacional correspondiente a escarpe de erosión menor, litológicamente están asociado en su mayoría a al complejo Quebrada Grande y a la Ultramafita de Angelópolis y a pendientes moderadas a fuertes y en lo relacionado con su cobertura se asocia a áreas agrícolas y a zonas con poca vegetación entre otros.

Susceptibilidad media

Para el municipio de Heliconia se encuentra una predominancia a la susceptibilidad media ya que esta ocupa un 44% del área total y se encuentra distribuida en todo el municipio pero con mayor presencia en la zona sur (veredas Pueblito y Pueblo Viejo) y en la zona norte (vereda Llano de San José y Monte dentro).

Estas zonas de susceptibilidad media se asocian a pendientes moderadas a fuertes y geomorfológicamente se asocian a geoformas de ambiente estructural correspondientes a lomos de presión, sierras estructurales y espolones bajos y medios de longitud corta y en cobertura se relacionan a zonas medianamente boscosas y algunas zonas agrícolas entre otras además de corresponder a a litologías ígneas y sedimentarias (Formación Amaga).

Susceptibilidad baja

La susceptibilidad baja por movimientos en masa ocupa un 37% del área total del municipio y se encuentra distribuida principalmente en el occidente del municipio

(veredas la Pava, Alto del Corral y la Pradera) pero también está distribuida en todo el municipio en pequeños sectores.

Dicha susceptibilidad se asocia a las zonas con menor actividad tectónica y geomorfológicamente se asocia a geoformas de ambiente denudacional tales como laderas onduladas las cuales corresponderían a esos sectores ubicados en el centro y sur del municipio, a lomos denudados, a las cimas presentes en algunas geoformas del municipio y a algunas geoformas que se asocian a zonas de depositación, litológicamente esta susceptibilidad corresponde en su gran mayoría rocas metamórficas (esquistos de Sabaletas), la Formación Amagá y a depósitos cuaternarios.

11.2 Susceptibilidad con el método estadístico multivariado

Para el desarrollo de este, se empleó el método de regresión logística (Eeckhaut, 2010) ilustración.61, en el cual tenemos una serie de variables independientes que corresponden a cada una de las variables evaluadas en el documentos anteriormente (pendiente, curvatura, relieve, geología, geomorfología, cobertura, distancia drenajes, distancia vías, distancia fallas) y una variable dependiente binaria que corresponde a la presencia o ausencia de movimientos en masa y a partir de estas se calcula la probabilidad de ocurrencia o generación de movimiento en masa en el municipio, este método es eficiente en lo que respecta a la predicción de la presencia o ausencia de movimientos en masa.

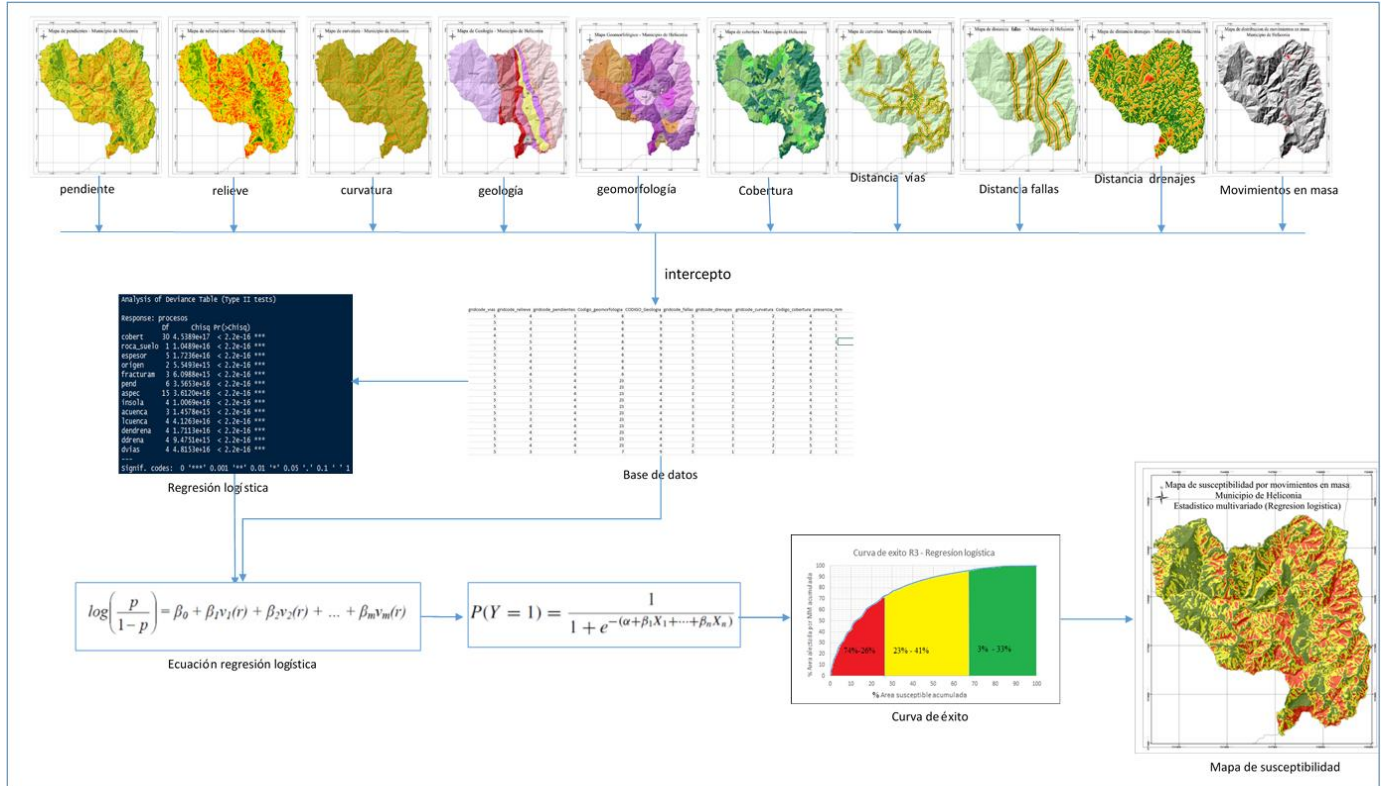


Ilustración 61 metodología multivariada regresión logística

Para la ejecución de esta en una primera estación se requería una base de datos de todos los valores de las variables independientes (pendiente, curvatura, relieve, geología, geomorfología, cobertura, distancia drenajes, distancia vías, distancia fallas) correspondiendo al intercepto realizado de todas las variables en Arcgis y se le agregara una columna adicional la cual corresponderá a la variable dependiente (presencia o ausencia de movimiento en masa) la cual estará representada por valores de 1 y 0 y simbolizaran si en ese polígono hay presencia o ausencia de movimiento en masa, respectivamente.

Al obtener estos datos se requiera la realización de un modelo de regresión logística que en este caso se desarrolló en el software MATLAB, el cual corre el modelo y relaciona la ocurrencia de movimiento en masa y las variables y de este modo se obtiene unos valores β_0 y β_n que corresponden al intercepto del modelo (β_0) y los

coeficientes del modelo para cada una de las variables en la regresión logística (β_n) (ilustra.62).

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 v_1(r) + \beta_2 v_2(r) + \dots + \beta_m v_m(r)$$

Ilustración 62 ecuación de regresión logística

Cabe mencionar que es necesario saber si cada una de las variables son relevantes en el modelo o no, por lo tanto se realizó un análisis de los valores estadísticos P Y T, mediante el software MATLAB, de este modo se determinó que para los valores estadísticos de P la variable no es significativa si su valor corresponde a un valor mayor a 0.05 y para los valores estadísticos de T la variable no es significativa si se encuentra fuera del rango de -2 a 2, en este caso particular para toda la muestra de datos que se utilizaron se identificó que la variable distancia vías no es significativa por lo tanto no se tiene en cuenta en el modelo.

Como se mencionó anteriormente se utilizaron varias muestras de datos ya que el porcentaje de área sin movimiento en masa es mucho mayor al área con movimientos en masa, en este caso en particular se utilizaron 3 muestras diferentes (R1, R2, y R3), que corresponden a muestras que contienen 9207 datos (R1) distribuidos en 4603 datos con presencia de movimiento en masa y 4603 con no presencia de movimiento en masa, otra muestra con 13809 datos (R2) distribuidos en 4603 datos con presencia de movimiento en masa y 9207 con no presencia de movimiento en masa y por último una muestra de 18412 datos (R3) distribuidos en 4603 datos con presencia de movimiento en masa y 13809 con no presencia de movimiento en masa, cabe mencionar que se utilizaron todos los datos de presencia de movimiento en masa y se seleccionaban aleatoriamente los datos sin movimiento en masa teniendo en cuenta que los datos seleccionados estuvieran distribuidos en todo el municipio.

Posterior a la obtención de los valores β se desarrolla la fórmula y se obtienen los valores de la ecuación (Ilustración 62) que en este caso los llamamos Z y por último

se obtiene la probabilidad que correspondería a la predicción de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa ilustración.63 y la generación de las curvas de éxito y el mapa de susceptibilidad

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

Ilustración 63 ecuación de probabilidad de ocurrencia de movimiento en masa según regresión logística

Ya que se trabajó con 3 muestras diferentes, se requiere determinar cuál de estas es la que tiene el mayor acercamiento a la realidad, de este modo se realizan las curvas de éxito y se define si cuenta con el área bajo la curva adecuado para hacer válido el modelo, en este caso se obtiene que las 3 curvas son mayores a 0.70 (R1, 0,806 R2, 0,810 y R3, 0,813) haciendo válido los 3 modelos, pero se decidió generar el mapa con los datos de las muestras R3 ya que tiene un mayor área bajo la curva dando así el mapa de susceptibilidad por la metodología multivariada (regresión logística).

11.2.1 Susceptibilidad por Movimientos en masa (Regresión logística)

Ya que los datos obtenidos por cada uno de los tipos de movimientos en masa (deslizamientos, flujos) dejarían mucho rango de fallo si se ejecutan de modo individual, debido a que en el caso particular de los flujos los datos de estos serían mínimos, se ejecutó la metodología combinando los dos tipos de movimientos en masa, ya que los dos cubrirían una mayor presencia en el municipio obteniendo unos datos más acordes a la realidad.

Por lo tanto la clasificación de las susceptibilidades alta, media y baja para movimientos en masa se basó en la metodología aportada por el SGC, 2017 y se obtuvo una curva de éxito con un área bajo la curva de 0,813 haciendo válido el modelo, por lo tanto se clasificó la susceptibilidad alta como el 74% de los

movimientos en masa lo cual representa en este caso el 26% del área del municipio, la susceptibilidad media que representa el 23% de los movimientos en masa es decir el 41% del área del municipio y por lo tanto el 3% de los movimientos en masa se ubican en la categoría de susceptibilidad baja correspondiendo al 33% del área del municipio.

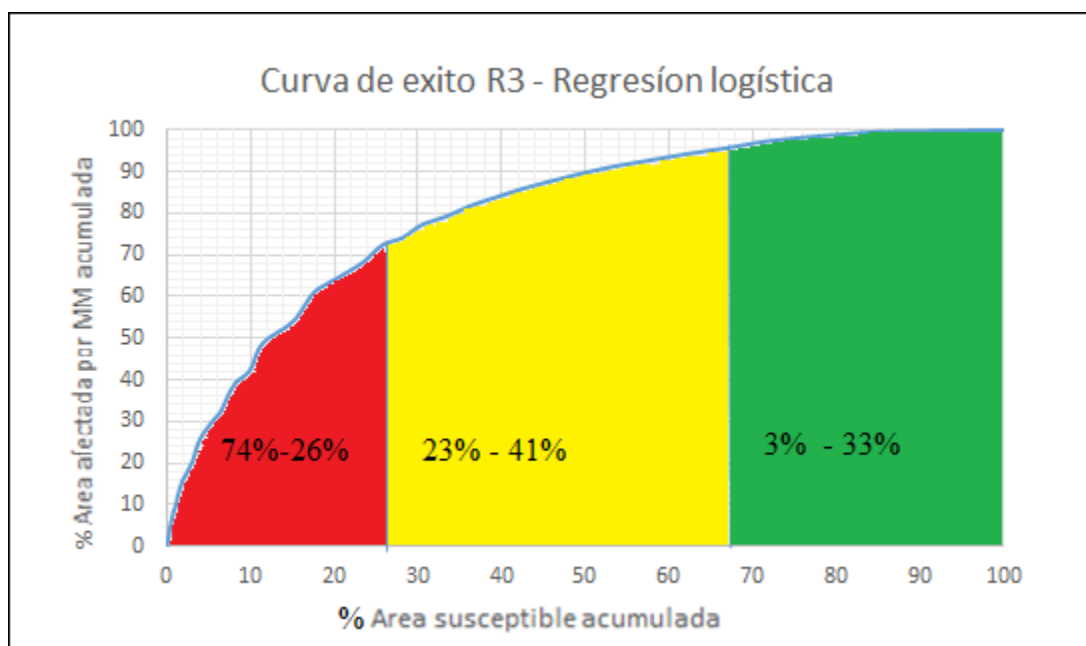


Ilustración 64 curva de éxito para los valores de susceptibilidad para movimientos en masa por el método estadístico multivariado (regresión logística)

El mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en Heliconia, según el método estadístico multivariado, (ilustración.65) se categorizo en 3 rangos alto, medio y bajo y se muestra a continuación.

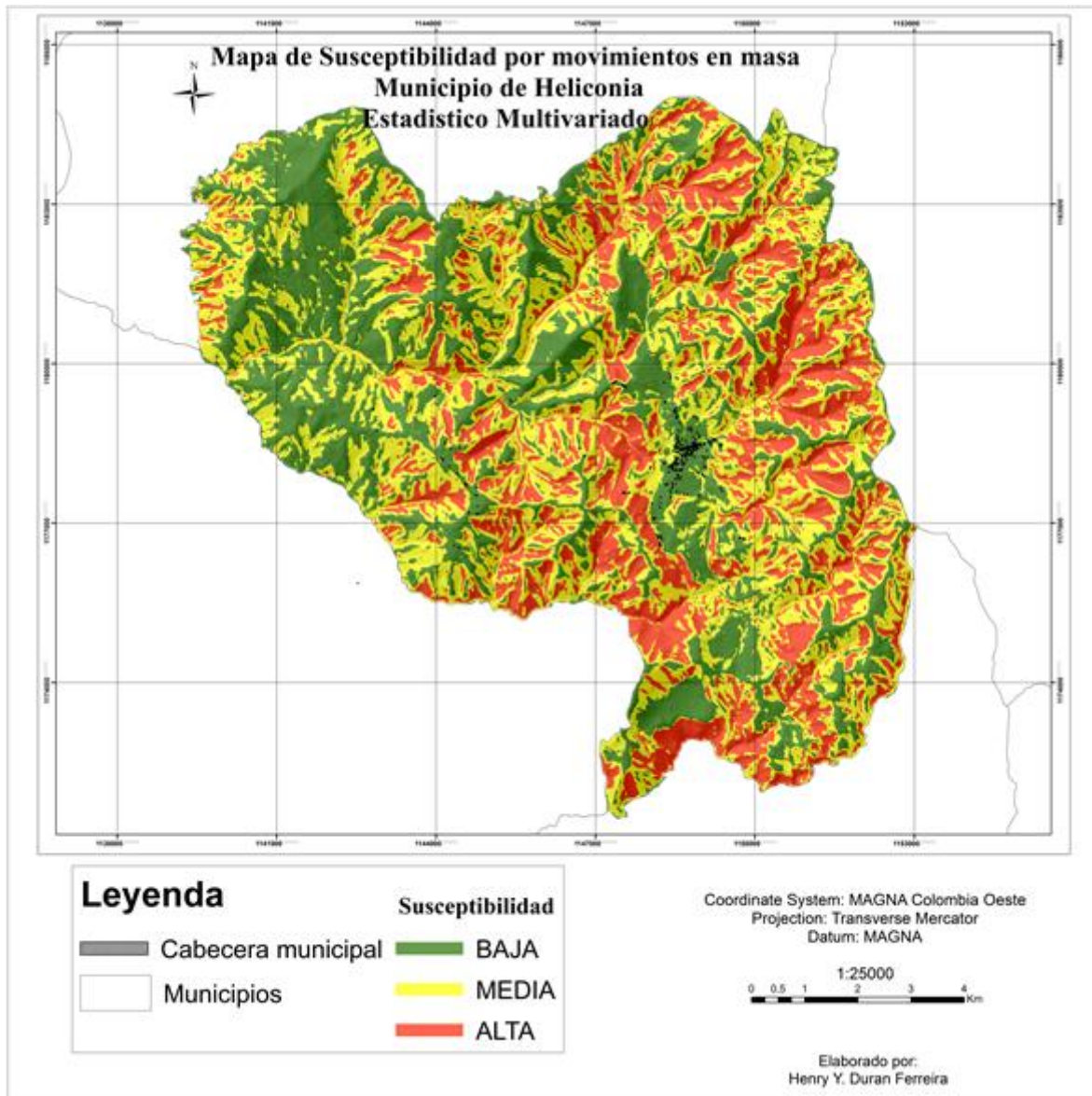


Ilustración 65 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa según método estadístico bivariado, municipio de Heliconia

Susceptibilidad alta

La susceptibilidad alta ocupa una extensión del 26% del área total del municipio y se encuentra distribuido en todo el municipio pero principalmente en la zona noreste (veredas Monte dentro, Llanos de San José, la Chorrera y Morritos), en la zona centro en límites con Armenia Mantequilla (veredas la Hondura y Crucero) y en el sur en límites con Angelópolis (vereda el Guarnal), a diferencia con la metodología

bivariada se puede ver que en el sector oeste se encuentran manchas con susceptibilidad alta ya que esta metodología es una predicción y no depende de ningún factor como en el caso bivariado que depende de la presencia de movimientos en masa, por lo tanto esta zona oeste se diferencia en las dos metodologías.

Esta susceptibilidad alta no cuenta con una correlación tan notable con las zonas cercanas al trazo de las fallas presentes en el municipio pero si se ve una relación de estas zonas y la cercanía a las fallas, también se encuentran asociadas a geoformas de ambiente estructural tales como espolones moderado con longitud media, faceteados, ganchos de flexión y lomos de falla además se asocia a las geoformas de ambiente denudacional correspondiente a escarpe de erosión menor y en la zona occidental con lomos bajos disectados y sierra denudacional pero se asocian en su mayoría con las geoformas de ambiente estructural, litológicamente están emparentadas al complejo Quebrada Grande, a la Ultramaquita de Angelópolis y algunas unidades ígneas ubicadas en el centro del municipio tales como Diorita de Pueblito y Gabros de Heliconia, también se relacionan a pendientes moderadas a fuertes y en lo relacionado con su cobertura se vinculan a áreas agrícolas y a zonas con poca vegetación entre otros.

Susceptibilidad media

Para el municipio de Heliconia se encuentra una predominancia a la susceptibilidad media ya que esta ocupa un 41% del área total un poco menor que en la metodología bivariada y se encuentra distribuida en todo el municipio pero con mayor presencia en la zona sur (veredas Pueblito y Pueblo Viejo) y en el norte (veredad Llano de San José y Monteadentro).

Estas zonas de susceptibilidad media se asocian a pendientes moderadas a fuertes y geomorfológicamente se relacionan geoformas de ambiente estructural correspondientes a lomos de presión, sierras estructurales y espolones bajos y medios de longitud corta principalmente a las laderas de todas estas unidades y en cobertura se relacionan a zonas medianamente boscosas y algunas zonas agrícolas entre otras.

Susceptibilidad baja

La susceptibilidad baja por deslizamiento ocupa un 33% del área total del municipio y se encuentra distribuida principalmente en el centro del municipio (cabecera municipal y cercanías) y zona occidental (veredas la Pava, Alto del Corral y la Pradera) pero en menor proporción en comparación con la metodología bivarada, pero también está distribuida en todo el municipio en pequeños sectores.

Dicha susceptibilidad se asocia a las zonas con menor ángulo de pendiente y geomorfológicamente se asocia a geoformas de ambiente denudacional tales como laderas onduladas las cuales corresponderían a estos sectores ubicados en el centro y sur del municipio, a lomos denudados, a las cimas presentes en algunas geoformas del municipio y a algunas geoformas que se vinculan a zonas de depositación, litológicamente esta susceptibilidad corresponde en su gran mayoría rocas sedimentarias (Formación Amaga), parches verde en la zona occidental a rocas metamórficas (Esquistos de Sabaleta) y a depósitos cuaternarios.

12. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos por el método estadístico bivariado, el municipio de Heliconia cuenta con una susceptibilidad por movimientos en masa alta de 19% del área total del municipio un 44% de susceptibilidad media y un 37% de susceptibilidad baja y muestra una concentración de las susceptibilidades altas en la zona noreste, sur y centro (límites con Armenia) del municipio.

Según los resultados obtenidos por el método estadístico multivariado, el municipio de Heliconia cuenta con una susceptibilidad por movimientos alta de 26% del área total del municipio un 43% en susceptibilidad media y un 33% de susceptibilidad baja y a diferencia del método estadístico bivariado este muestra una dispersión por todo el municipio de la susceptibilidad alta pero cuenta con una concentración en las zonas noreste, centro y sur haciendo referencia a las zonas mostradas con esta susceptibilidad en la metodología estadística bivariada.

En el municipio de Heliconia las condiciones propias del terreno son generadores de la ocurrencia de movimiento en masa, por lo tanto las variables que tienen más relevancia en la propagación de estos corresponden a todas aquellas que se ven involucradas en el desarrollo morfológico del terreno, tales como pendientes, geomorfología, geología y fallas (control estructural), ya que al desarrollar el modelo de regresión logística, este proporciona un acercamiento a cuales variables pueden llegar a tener un mayor peso en lo relacionado a la propagación de los fenómenos de remoción en masa y cuales son irrelevantes como en este caso las vías, teniendo en cuenta que la presencia de estas es mínima en el municipio y se corrobora en campo que en las principales vías que comunican al municipio no se encuentran movimientos en masa importantes.

Los resultados obtenidos con las dos metodologías nos muestran ciertas diferencias en la zonificación, esto se debe a que la metodología bivariada depende de la presencia y densidad de movimientos en masa, es decir, si en algún sector del municipio el desarrollo de fenómenos en remoción en masa en bajo o nulo estas zonas corresponderán a zonas de susceptibilidad baja además teniendo en cuenta que los pesos de los procesos y movimientos se relacionan a la geomorfología y a las condiciones estructurales del municipio. Por otro lado, en la metodología multivariada tenemos una predicción de acuerdo a las condiciones en las cuales se encuentra el municipio (variables) y el modelo de regresión logística genera una probabilidad de ocurrencia a partir de estos, generando así algunas diferencias entre los mapas resultantes ya que es claro que con esta metodología se encuentra una diferencia en el sector oeste y esta puede ser a causa de las pendientes o geomorfología del municipio.

Se determinó que las dos metodologías son aceptadas según el criterio del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), puesto que así se visualiza en las curvas de éxito, debido a que el área bajo la curva es superior a 0.70, siendo 0,866 para el método bivariado y 0,813 para el multivariado.

Se puede concluir que las zonas más susceptibles a movimientos en masa en el municipio de Heliconia corresponde a la zona noreste (veredas Monte dentro, Llanos de San José, la Chorrera y Morritos) ya que en las dos metodologías es la zona con mayor presencia de susceptibilidad alta, además están asociada a zonas con pendientes fuertes y esta es una variable determinante en la generación de fenómenos de remoción en masa, además que este sector cuenta con un control estructural por parte de la falla Sabaletas y Amaga.

En el municipio de Heliconia se encuentra una mayor predominancia de susceptibilidad media y se encuentra distribuida por todo el municipio como se

puede observar en las dos metodologías y estas se asocian en su gran mayoría a las laderas presentes en el municipio.

Las zonas con susceptibilidad baja son las segunda con mayor extensión en el municipio y en ellas se encuentran asentados el casco urbano y los corregimientos del municipio, estas están relacionadas a las zonas más bajas del municipio litológicamente a rocas sedimentarias de la formación Amaga y depósitos cuaternarios.

Para el municipio de Heliconia, se determina que los estudios realizados con metodologías estadísticas bivariada y multivariada, son eficientes e idóneos para la generación de mapas de susceptibilidad por movimientos en masa, ya que permiten el manejo de varias variables que son posibles generadores del problema (movimientos en masa) y finalmente los resultados obtenidos por las dos metodologías son aportantes y satisfactorios.

De igual forma ya que este proyecto no pretendía dar una comparación entre los métodos, si no generar una zonificación de susceptibilidad, teniendo en cuenta la viabilidad de los métodos según los criterios establecidos por el SGC, 2017, se puede establecer que las dos zonificaciones obtenidas son idóneas, pero se concluye que la metodología multivariada es la metodología más satisfactoria en este caso en particular, ya que nos da una mejor predicción (probabilidad) en zonas con baja densidad de movimientos en masa, teniendo en cuenta que el modelo bivariado puede ser ineficiente para predicciones futuras si no cuenta con presencia de movimientos en masa.

13.RECOMENDACIONES

Ya que en el municipio se determinaron zonas de susceptibilidad alta en las cuales muy cerca de ellas se encuentran asentadas construcciones, se recomienda realizar medidas de manejo, mediante el desarrollo del uso del suelo teniendo en cuenta que para las zonas altas con pendientes fuertes se recomiendan usos de suelo forestales de bosques y para las zonas con pendientes medias un uso agroforestal que favorecen a desarrollar un control en la erosión, para así garantizar el bienestar de los bienes y la vida de los habitantes más específicamente de las personas asentadas en el corregimiento de Llanos de San José y en las veredas al noreste del municipio como Monte dentro, La Chorrera, Llanos de San José.

Puesto que los mapas realizados solo caracterizan que tan susceptible es el terreno según sus características propias, se requiere realizar estudios de amenaza en los cuales se tenga en cuenta como detonantes la lluvia y sismos, debido a las altas precipitaciones y las condiciones geológicas (geología estructural) en la que se encuentra el municipio, para de este modo determinar el grado real o potencial de amenaza por movimientos en masa del municipio, pero como recomendación, se debe asistir al municipio en aquellos puntos críticos sobre las vías para que haga las revisiones pertinentes

En cuanto a lo relacionado con los mapas resultantes, dado que la metodología multivariada arroja que la variable distancia vías no es muy relevante, se aconseja no tener en cuenta esta variable para posibles futuros estudios a desarrollar en el tema en el municipio.

Teniendo en cuenta las especificaciones del decreto 1807 del 2014 se aconseja al municipio incorporar unos objetivos o estrategias para la incorporación de la gestión

del riesgo en el municipio, para este modo implementar medidas para el conocimiento y la reducción, empezando con la realización de estudios básicos en todos los fenómenos naturales y posterior la realización de estudios a detalle

.

Se recomienda que el municipio incluya este estudio y posibles estudios a futuro en próximas actualizaciones de su EOT (esquema de ordenamiento territorial) y en su plan de gestión del riesgo.

14. BIBLIOGRAFÍA

Chen, T., Niu, T., Jia, X., 2016. Comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. *Environmental Earth Sciences*. 75: 867 – 882.

CORANTIOQUIA - EAFIT. 2015a. Convenio 1502-6. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de CORANTIOQUIA.

Eeckhaut, M. Van Den, Marre, A., Poesen, J. 2010. Geomorphology Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne – Ardenne region (France). *Geomorphology*, 115(1–2), 141–155.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72, 272–299.

IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.

Montoya, D., Peláez, I. 1993. Ultramafitas y rocas relacionadas de Heliconia, Antioquia. Trabajo de grado. Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Regmi, N. R., Giardino, J. R., Vitek, J. D. 2010. Geomorphology Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1–2), 172–187.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2012. Propuestas sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá, D.C. 88 p. Informe técnico

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2013. Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. 1-158. Informe técnico.

Servicio Geológico Colombiano. 2014. Guía metodológica para Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo Por movimientos en masa. 1-179, Informe técnico.

Servicio Geológico Colombiano. 2017. Guía metodológica pata la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000. 1-2016, Informe técnico.

Tabares, G., & Arredondo, L. 2006. Cartografía geológica de 132 Km² entre los municipio de Angelópolis y Heliconia (Departamento de Antioquia, Colombia). Medellín, Antioquia, Colombia, 112p. INGEOMINAS.