

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**“EFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD
A DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA
DE IMBABURA”**

**PLAN DE TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

AUTOR:

Juan Luis Guerra Morales

DIRECTOR:

Ing. Darío Paúl Arias Muñoz, MSc.

IBARRA

FEBRERO, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA :	1002935011
NOMBRES Y APELLIDOS:	Juan Luis Guerra Morales
DIRECCIÓN:	Ibarra, Barrio La Victoria, Carrera Carlos Barahona 10-56
EMAIL:	jguerram@utn.edu.ec
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	062 615 903 0989341192

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Efectos de los cambios del paisaje en la susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi provincia de Imbabura
AUTOR:	Juan Luis Guerra Morales
FECHA:	19/02 / 2021

SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	Ing. Darío Paúl Arias MSc

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

2. CONSTANCIAS

El autor Juan Luis Guerra Morales, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de febrero del 2021

EL AUTOR:

Juan Luis Guerra Morales



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

CERTIFICACIÓN

Ing. Darío Paúl Arias MSc, director del trabajo de titulación desarrollado por el señor estudiante Juan Luis Guerra Morales.

CERTIFICA

Que, el proyecto de tesis de grado titulado "EFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA DE IMBABURA", ha sido realizado en su totalidad por el señor Juan Luis Guerra Morales, bajo mi dirección, para la obtención del título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Luego de ser revisada, considerando que se encuentra concluido y cumple con las exigencias y requisitos académicos de la facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales y Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, autoriza su presentación y defensa para que pueda ser juzgada por el tribunal correspondiente.

Ing. Darío Paúl Arias MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la vida por permitirme cumplir y superar diferentes desafíos que han hecho tener sentido a este camino de existencia, llenarme de los mejores recuerdos y lecciones.

A mis padres por inculcarme los mejores valores que reflejan la identidad de una persona, a no rendirme ante toda adversidad y a presentarle solución a los problemas de la vida.

A la Universidad Técnica del Norte por permitirme ser parte de su familia y abrirme las puertas de la educación superior.

A mi director Ing. Darío Paúl Arias, MSc, por toda la paciencia y consejos brindados en este arduo camino, por ser un amigo y trasmitirme todos sus conocimientos fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Juan Luis Guerra

DEDICATORIA

A mis padres, por ser un ejemplo y pilar fundamental en la familia. Por brindarme los mejores consejos cuando las circunstancias se han tornado grises.

A mis hermanos Vinicio y Alexis por ser mi motivo de superación profesional y a mi hermana María Paula por ser la luz de mis ojos y enseñarme que nunca es tarde para cumplir mis sueños.

A todos mis amigos que confiaron y me brindaron su amistad sincera durante el transcurso de la vida universitaria.

A Valeria por ser mi soporte y ayuda en la culminación de varios objetivos de mi vida.

Juan Luis Guerra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Páginas
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte	1
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Preguntas directrices de la investigación	6
1.4 Hipótesis	6
CAPÍTULO II	7
REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Marco Teórico Referencial	7
2.1.1 Cuenca Hidrográfica	7
2.1.2 Clasificación Supervisada	7
2.1.3 Usos de Suelo	7
2.1.4 Deslizamientos	9
2.1.5 Ecología de Paisaje	11
2.1.6 Métricas de Paisaje	14
<i>2.1.6.1 Métricas de Superficie, Área, Densidad y Variabilidad</i>	14
<i>2.1.6.2 Métricas de Forma</i>	15
<i>2.1.6.3 Métricas de Hábitat</i>	15
<i>2.1.6.4 Métricas de Distancia, Conectividad y del Vecino más Cercano</i> ..	16
<i>2.1.6.5 Métricas de Diversidad del Paisaje</i>	16
2.2 Marco Legal	16
2.2.1 Constitución de la República del Ecuador	16
2.2.2 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (Tulas, 2012)	17
2.2.3 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre .	18

2.2.4 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)	18
CAPÍTULO III	19
METODOLOGÍA	19
3.1 Caracterización del área de estudio	19
3.1.1 Aspectos Socioeconómicos	20
3.1.2 Relieve	20
3.1.3 Clima	20
3.1.4 Suelo	20
3.2 Metodología	21
3.2.1 <i>Análisis de los cambios del uso del suelo y cobertura vegetal</i>	21
3.2.1.1 <i>Búsqueda de imágenes de diferentes años en el servidor Earth Explorer del USGS</i>	21
3.2.1.2 <i>Tratamiento digital de imágenes</i>	21
3.2.1.3 <i>Recorte de imágenes con el área de estudio</i>	22
3.2.1.4 <i>Clasificación multitemporal de imágenes</i>	23
3.2.1.5 <i>Validación de la clasificación de las imágenes</i>	23
3.2.2 Determinación de la Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi	26
3.2.2.1 <i>Análisis de datos</i>	26
3.2.2.2 <i>Análisis de variables y relaciones</i>	26
3.2.2.3 <i>Análisis del modelo de frecuencias bivariada modificada</i>	31
3.2.2.4 <i>Radio de frecuencia (FR)</i>	32
3.2.2.5 <i>Área bajo la curva ROC (AUC)</i>	32
3.2.2.6 <i>Procesamiento de datos</i>	34
3.2.3 Determinación de la conectividad y cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi	35
3.2.4 Delimitación de los paisajes correspondientes a la subcuenca del río Ambi mediante el mapa de uso de suelo para el año 1996 y 2017	35
3.2.4.1 <i>Delimitación de los drenajes menores período 1996 y 2017</i>	35

3.2.4.2 Delimitación de la microcuenca del río Machángara período 1996 y 2017	35
3.2.4.3 Microcuenca del río Jatunyacu período 1996 y 2017	37
3.2.4.4 Microcuenca del río Chorlaví período 1996 y 2017	37
3.2.4.5 Microcuenca del río Tahuando período 1996 y 2017	38
3.2.4.6 Microcuenca del río Alambi período 1996 y 2017.....	38
3.2.4.7 Microcuenca del río Blanco período 1996 y 2017.....	40
3.2.4.8 Microcuenca del río Pichaví período 1996 y 2017	40
3.2.4.9 Microcuenca del río Yanayacu período 1996 y 2017.....	40
3.2.4.10 Quebrada del río Yanayacu período 1996 y 2017	42
3.2.5 Determinación de las métricas de paisaje para los paisajes establecidos en la subcuenca del río Ambi	42
3.3 Materiales y equipos	43
CAPÍTULO IV	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1. Cambios del paisaje de la Subcuenca del Río Ambi	44
4.1.1. Evaluación y validación de la clasificación multitemporal mediante la matriz de contingencia y el índice de Kappa	44
4.1.2. Cambios del paisaje para el período 1996 - 2007.	47
4.1.3. Cambios del paisaje para el período 2007 - 2017.	50
4.1.4. Cambios del paisaje para el período 1996 - 2017.	52
4.2. Determinación de susceptibilidad a deslizamientos	55
4.2.1. Factores de susceptibilidad reclasificados	55
4.2.1.1 Pendientes.....	55
4.2.1.2 Distancia a falla geológica.....	56
4.2.1.3 Distancia a la red hídrica.....	58
4.2.1.4 Rugosidad del suelo.....	59
4.2.1.5 Índice de vegetación de diferencia normalizada.....	60
4.2.1.6 Aspecto de la pendiente	61
4.2.1.7 Curvatura.....	62

4.2.1.8 Elevación.....	63
4.2.1.9 Uso del suelo.....	64
4.2.1.10 Litología.....	65
4.2.2 Análisis de asociación espacial mediante la función de creencia evidencial	66
4.2.3 Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 1996.....	70
4.2.4 Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 2017.....	72
4.2.5 Área bajo la curva (AUC)	76
4.2.6 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para el cambio de uso de suelo y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017	77
4.3. Efectos de deslizamientos en la conectividad y cambios del paisaje	80
4.3.1 Análisis de la conectividad y cambios del paisaje en la subcuenca del río Ambi.....	80
4.3.1.1 Análisis del número de parches (NP) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017	80
4.3.1.2 Análisis de área media del parche (AMN) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017.....	84
4.3.2 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de número de parches y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017	87
4.3.3 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de área media del parche y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017	90
CAPÍTULO V	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
5.1. Conclusiones	93
5.2 Recomendaciones.....	94
REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Páginas
Tabla 1. Métricas de Paisaje.....	14
Tabla 2. Métricas de Superficie, Área, Densidad y Variabilidad.....	15
Tabla 3. Métricas de Forma.....	15
Tabla 4. Métricas de Hábitat.	15
Tabla 5. Métricas de Distancia, Conectividad y del Vecino más Cercano.	16
Tabla 6. Métricas de Diversidad del Paisaje.....	16
Tabla 7. Características de las imágenes satelitales de los años 1996, 20017 y 2017.	21
Tabla 8. Matriz de confusión para la validación de la imagen LANDSAT L8-OLI del 2017 obtenida en ArcMap.	24
Tabla 9. Eventos de deslizamiento en la subcuenca del río Ambi 1996-2017.....	27
Tabla 10. Clasificación de pendientes en el terreno.....	28
Tabla 11. Puntos de validación de categorías de uso de suelo del año 2017.....	44
Tabla 12. Matriz de contingencia de clasificación supervisada de la imagen Landsat L8, 2017.	46
Tabla 13. Valoración del coeficiente kappa.	46
Tabla 14. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007....	48
Tabla 15. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996 – 2007.....	49
Tabla 16. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007-2017....	50
Tabla 17. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.....	51
Tabla 18. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2017....	52
Tabla 19. Matriz de transición de cambio del paisaje período 1996 – 2017.....	53
Tabla 20. Pendientes en el terreno.	55
Tabla 21. Área de distancia a la falla geológica.....	57
Tabla 22. Área de distancia a la red hídrica.	59
Tabla 23. Área de rugosidad del suelo en la subcuenca del río Ambi.	59

Tabla 24. Área del NDVI en la subcuenca del río Ambi.	61
Tabla 25. Área de curvatura en la subcuenca del río Ambi.	62
Tabla 26. Área de elevación en el terreno de la subcuenca del río Ambi.	63
Tabla 27. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 1996.	64
Tabla 28. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 2017.	65
Tabla 29. Área de la litología de la subcuenca del río Ambi.	65
Tabla 30. Coeficiente de función de creencia evidencial para factores espaciales, ponderación de clase y calificaciones de predictores (RF) basados en grados de asociaciones espaciales.	68
Tabla 31. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 1996.	72
Tabla 32. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 2017.	74
Tabla 33. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.	78
Tabla 34. Métrica de agregación mediante el indicador de número de parches (NP) para los paisajes de la subcuenca del río Ambi.	83
Tabla 35. Métrica de agregación mediante el indicador de área media del parche (AMN) para los paisajes de la subcuenca del río Ambi.	86
Tabla 36. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Páginas
Figura 1. Ubicación de la Subcuenca del río Ambi.	19
Figura 2. Recorte de imagen satelital de la subcuenca del río Ambi en composición de bandas (R7, G5, B3) LANDSAT L8-OLI del 2017.....	22
Figura 3. Imagen en pseudo falso color (R7, G6, B4) LANDSAT L8-OLI del 2017.	24
Figura 4. Imagen en color verdadero, 8 bandas (R4, G3, B2) LANDSAT L8-OLI del 2017.....	25
Figura 5. Imagen en Infrarrojo color (R5, G4, B3) LANDSAT L8-OLI del 2017....	25
Figura 6. Curva receiver operating characteristic (ROC)	34
Figura 7. Uso del suelo de los drenajes menores años 1996 y 2017.....	36
Figura 8. Uso del suelo de la microcuenca del río Machángara años 1996 y 2017. ..	36
Figura 9. Uso del suelo de la microcuenca del río Jatunyacu año 1996 y 2017	37
Figura 10. Uso del suelo de la microcuenca del río Chorlaví año 1996 y 2017.	38
Figura 11. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Tahuando años 1996 y 2017.....	39
Figura 12. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Alambi años 1996 y 2017.....	39
Figura 13. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Blanco años 1996 y 2017.....	40
Figura 14. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Pichaví años 1996 y 2017.....	41
Figura 15. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Yanayacu años 1996 y 2017.....	41
Figura 16. Delimitación y uso del suelo de la quebrada del río Yanayacu años 1996 y 2017.....	42
Figura 17. Cambios del paisaje en la subcuenca del río Ambi años 1996, 2007, 2017.	47
Figura 18. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007...	49

Figura 19. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.	51
Figura 20. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996 – 2017.	53
Figura 21. Pendientes de la subcuenca del río Ambi.	56
Figura 22. Distancia a la falla geológica de la subcuenca del río Ambi.	57
Figura 23. Distancia a la red hídrica de la subcuenca del río Ambi.....	58
Figura 24. Rugosidad del suelo de la subcuenca del río Ambi.	60
Figura 25. Índice de vegetación de diferencia normalizada de la subcuenca del río Ambi.....	61
Figura 26. Aspecto de la pendiente de la subcuenca del río Ambi.	62
Figura 27. Curvatura de la subcuenca del río Ambi.....	63
Figura 28. Elevación de la subcuenca del río Ambi.....	64
Figura 29. Litología de la subcuenca del río Ambi.	66
Figura 30. Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 1996.	72
Figura 31. Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 2017.	74
Figura 32. Área bajo la curva (AUC) factor de uso de suelo de la subcuenca del río Ambi año 1996.....	77
Figura 33. Área bajo la curva (AUC) factor de uso de suelo de la subcuenca del río Ambi año 2017.....	77
Figura 34. Correlación geográfica ponderada de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.....	78
Figura 35. Correlación geográfica ponderada de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.....	79
Figura 36. Correlación geográfica ponderada de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.....	80
Figura 37. Correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.....	88
Figura 38. Correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.....	89

Figura 39. Correlación geográfica ponderada del número de parches de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.....	90
Figura 40. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.....	90
Figura 41. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.	91
Figura 42. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.	92

ÍNDICE DE ECUACIONES

Contenido	Páginas
Ecuación 1	30
Ecuación 2	31
Ecuación 3	32
Ecuación 4	32
Ecuación 5	32
Ecuación 6	32
Ecuación 7	33
Ecuación 8	33

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

EFFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD A
DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA DE
IMBABURA

Juan Luis Guerra Morales

RESUMEN

Los humanos han transformado gran parte de la superficie del planeta en los últimos 300 años. La tala de bosques, las prácticas agrícolas de subsistencia, la intensificación de la producción agrícola y la expansión de los centros urbanos han cambiado drásticamente el paisaje. En la subcuenca del río Ambi se puede apreciar cada una de estas actividades que se han llevado con el transcurso de los años aumentando así el nivel agrícola y la presión demográfica. Es por ello que el presente estudio permitió conocer la evaluación de la variación de la cobertura vegetal de la subcuenca del río Ambi en el periodo 1996-2017, aplicando un análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales Landsat del portal USGS (United States Geological Survey) empleando softwares científicos para la elaboración de cartografía digital como ArcGIS 10.6. La subcuenca del río Ambi posee un gran potencial hídrico, en el que se valoran sitios hidrológicos de relevancia como son Lago San Pablo, Cascada de Peguche, Laguna Cuicocha y Laguna Yahuarcocha. Además, se evaluó la susceptibilidad a deslizamientos con la función de creencia evidencial que se encargó de ponderar la relación espacial entre la ocurrencia de deslizamientos de tierra y 10 factores espaciales (ángulo de pendiente, distancia a la falla geológica, distancia a la red hídrica, rugosidad del suelo, índice de vegetación de diferencia normalizada, aspecto de la pendiente, curvatura, litología, elevación y uso del suelo de los años 1996 y 2017. Finalmente se analizó la relación entre pérdida de cobertura vegetal con la susceptibilidad a deslizamientos, mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Los resultados muestran que la zona de alta susceptibilidad a deslizamiento tiene un área 6 243.76 ha del área de estudio. Esta categoría está distribuida principalmente en las faldas del volcán Imbabura y Cotacachi. También se puede evidenciar esta categoría en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua y Plaza Gutierrez. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser >70%, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo, pastizales y área sin vegetación.

Palabras claves: conservación, deslizamientos, fragmentación, paisaje, presión demográfica, susceptibilidad.

EFFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA DE IMBABURA

ABSTRACT

Humans have transformed much of the planet's surface over the past 300 years. Forest logging, subsistence agricultural practices, intensified agricultural production and the expansion of urban centers have drastically changed the landscape. In the sub-area of the Ambi River you can see each of these activities that have been carried out over the years, increasing the agricultural level and demographic pressure. That is why this study made it possible to know the assessment of the variation in plant cover of the Ambi River sub-area in the period 1996-2017, applying a multi-temporal analysis with the use of Landsat satellite images from the USGS (United States Geological Survey) portal using scientific software for the development of digital mapping such as ArcGIS 10.6. The sub-area of the Ambi River has great water potential, in which important hydrological sites are valued such as San Pablo lake, Peguche waterfall, Cuicocha lake and Yahuarcocha lake. Also, it evaluated the susceptibility to slides with the belief function evidential that was in charge of considering the spatial relation between the occurrence of landslides and 10 spatial factors. (slope angle, distance to geological fault, distance to water network, roughness of the soil, vegetation index of normalized difference, slope appearance, curvature, lithology, elevation and land use of the years 1996 and 2017. Finally, the relationship between loss of plant cover and susceptibility to slippage was analyzed, using Spearman's correlation coefficient. The results show that the area of high slip susceptibility has an area 6 243.76 ha of the study area. This category is distributed principally in the skirts of the volcano Imbabura and Cotacachi. Also it is possible to demonstrate this category in the parishes of San Blas, Imantag, Angochahua and Square Gutierrez. The factors that influence to make susceptibility high are: slopes that can become >70%, proximity to rivers and coverage being for the most part areas of cultivation, grasslands and area without vegetation.

Keywords: conservation, demographic pressure, fragmentation, landscape, landslides, susceptibility.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte

En América Latina existen estudios mediante el análisis de las fotografías aéreas e imágenes satelitales, para determinar los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo. En la Sierra Norte de Puebla, México, región con gran diversidad biológica y cultural, donde la cafecultura ha tenido un papel relevante en el uso del suelo, mediante imágenes satelitales que permiten monitorear a gran escala los cambios de cobertura. El análisis de cambio se realizó mediante una clasificación supervisada de dos imágenes de satélite Landsat, y se evaluó el cambio espacial entre las dos fechas mediante una matriz de detección de cambios. En ella se encontró que en el 58.4% del área no hubo cambios y en el 41.6% sí los hubo. Los principales tipos de cambio fueron de pastizal (cultivado e inducido) o agricultura anual a cafetales con sombra (Evangelista, López, Caballero y Martínez, 2010).

También, un estudio realizado en la ciudad de México presenta que el cambio de cobertura se debe al crecimiento poblacional de la zona urbana. El crecimiento poblacional en las zonas urbanas despliega irregularidad territorial y presión en sus recursos naturales. La extensión territorial nace en el año 1950, década donde la ciudad de México transformó sus recursos y medio ambiente por ciudades urbanas, aumentando desde 1950 un 500% de consumo de suelo. Los resultados obtenidos entre los años 1990 y 2000, presentan un crecimiento del 16%, que equivale a un área de 178 km². Sin embargo, esto solo representa un 3% del cambio geográfico registrado (López y Plata, 2009).

Por otro lado, se realizó un estudio en Costa Rica sobre la determinación del grado de fragmentación forestal durante tres años: 1997, 2000 y 2005. Se calculó las métricas de fragmentación por el software FRAGSTATS 3.3 para lo cual durante el período 1997-2000 se deforestó 9139 hectáreas, de las cuales el 54,8% se concentró en las

llanuras de Tortuguero, tierras bajas, mientras que durante el período 2000-2005 se deforestó 23699 hectáreas, de las cuales el 18,6% se concentró en las llanuras de Tortuguero, tierras bajas. Sin embargo, se presentó recuperación de la cobertura forestal (Calvo y Ortiz, 2012).

De igual manera, un estudio realizado en Ecuador presenta que aproximadamente el 45% de la población vive en los Andes o Sierra y es donde más se presenta la fuerte presión hacia los recursos naturales. El ser humano es el principal actor, dado por el crecimiento de la población, el cual afecta al ecosistema en general, las actividades más conocidas que afectan al ecosistema son deforestación, forestación, pastoreo y sobrepastoreo inadecuado, construcciones de vías inadecuadas, exceso de cultivos, quema de páramos, entre otros (Quichimbo, Tenorio, Borja, Cárdenas, Crespo y Célleri, 2012).

Además, en la ciudad de Manabí, se determinó una investigación donde muestra que existe una pérdida de diversidad biológica y pérdida de cobertura de suelos por el deterioro de hábitats, sobreexplotación de especies, contaminación de ecosistemas, deforestaciones, entre otras. El estudio de microcuencas determina que en la microcuenca Carrizal existe un cambio de suelo del 50% y un 50% de bosque, en la microcuenca de Bejuco existe un cambio del suelo del 70% sobre un 30% de bosque mientras que en la microcuenca Membrillo existe un 40% de cambio de uso de suelo y un 60% de bosque, también la microcuenca de Cañas presenta un 60% de cambio de suelo y el resto equivale a bosque (Velásquez, Calderón, Urdánigoca y Cárdenas, 2016).

En la actualidad, la contaminación, la fragmentación y la destrucción de los recursos naturales se presentan como una preocupación en la sociedad. Acciones como la ejecución y desarrollo de áreas protegidas son algunas formas de ratificar la estabilidad y continuidad biológica y ecológica (Cristeche y Penna, 2008).

Skokanová, y Ereimiášová, en el año de 2013 mencionan al paisaje como una configuración topográfica con un patrón de cobertura y de uso de la tierra, que delimita procesos naturales y actividades humanas de manera coherente. El paisaje es heterogéneo compuesto por un conjunto de ecosistemas, los mismos interactúan y se repiten en forma similar en el área que son los encargados de determinar (Aguilera, Valenzuela y Botequilha, 2011).

La pérdida de hábitat y la fragmentación se consideran las principales amenazas que afectan a la diversidad biológica (Torres, 2016; Jost y González, 2012; Luna, Castaño y Raz, 2011). La fragmentación es un proceso continuo y dinámico, cuyos efectos en la estructura del paisaje pueden describirse mediante índices como el porcentaje de hábitat natural, número de fragmentos entre otros. La fragmentación del hábitat se refiere cuando un área continua de hábitat es fraccionada en dos o más fragmentos comprimiéndose su área. Estos fragmentos son separados entre sí por un paisaje altamente modificado. La fragmentación también se da cuando el área del hábitat no es muy afectada como el caso de que el hábitat original es dividido por caminos, carreteras, vías férreas, canales, líneas de energía, cercas u otras barreras al flujo de las especies (García, 2011; Cotler, Cram, Trinidad y Bunge, 2015).

La subcuenca del río Ambi se caracteriza por poseer un paisaje cambiante, dinámico y presentar variaciones a lo largo de tiempo. Skokanová, y Ereimiášová (2013), sostienen que la ecología del paisaje consiste en el estudio de la estructura, función y cambio del paisaje, área de terreno heterogéneo que contiene ecosistemas que interactúan entre sí.

Esta subcuenca cubre un área de 11 529.60 hectáreas extensión y está conformada por los Cantones: San Miguel de Urcuquí, Antonio Ante, Cotacachi, Otavalo, e Ibarra en donde la creciente poblacional y sus actividades ha aumentado el deterioro de los recursos naturales haciendo que estos se vean afectados directamente.

La subcuenca del río Ambi se conoce como una ecorregión que ofrece múltiples servicios ambientales, resaltando la oferta hídrica, su diversidad ecosistémica y biológica que se encuentra amenazada debido a diferentes procesos de degradación antrópica y a la fragmentación de sus bosques (Carmona, Aravena, Bustamante, Celis, Charrier, Díaz y Hernández, 2010). La subcuenca del río Ambi ha experimentado procesos intensos de modificaciones y alteraciones consecuencia de la dinámica de cambios de usos del suelo. Dichos cambios, impulsados por actividades antrópicas, socioeconómicas y naturales se han reflejado en la transformación del paisaje, en el que las modificaciones del uso del suelo son más evidentes (Carmona, Aravena, Bustamante, Celis, Charrier, Díaz y Hernández, 2010).

Las actividades antrópicas, el aumento del nivel agrícola y la presión demográfica dentro de los sectores de la subcuenca del río Ambi han generado un fuerte declive a los sistemas biológicos de soportar y satisfacer las necesidades humanas (Schramski, Gattie y Brown, 2015). El cerro Imbabura es claro ejemplo de los efectos de actividades antrópicas que han producido alteración de la cobertura vegetal herbácea por causa de incendios y pérdida de los relictos de bosque nativo por desarrollo de la frontera agrícola, siendo de vital importancia la cobertura vegetal existente permite el almacenamiento de agua que abastecen a las poblaciones bajas del cantón Ibarra. (Cristeche y Penna, 2008).

En el cantón Ibarra, cabecera cantonal de la provincia de Imbabura, se determinó que existe cuatro niveles de amenaza respecto a deslizamiento de tierras: alto, medio, bajo y nulo; donde la pendiente es la variable que mayor influye en el modelo, dentro de los factores condicionantes y la precipitación, dentro de los factores detonantes.

Esta investigación realizará un análisis de los efectos de los cambios del paisaje en la susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi mediante el uso de tecnologías de Información Geográfica, que generará información destacada sobre los procesos ecológicos relacionados a la evolución del paisaje, que permitirá abordar las

causas de fragmentación evaluando sus etapas, los patrones de asentamiento humano y uso de la tierra que los determinan, las relaciones entre la transformación de los paisajes, y la evolución en la conectividad, tanto estructural como funcional, entre otros (Forman, 2014; Leal, 2011; González, Ochoa, Pozo, Gordon, Rangel, Arriaga y Kampichler, 2011; Armenteras y Vargas, 2016; Valdés, 2011; Song, Liu, Wang, Zhang, Jin, Li y Liu, 2008). Aportará información cartográfica multitemporal del uso del suelo que permitirá conocer los impactos que se han generado tanto para la diversidad ecosistémica y biológica en los años 1993, 2001, 2008, 2016.

La subcuenca del río Ambi está conformada por las Parroquias de Mariano Acosta, Tumbabiro, Salinas, Cahuasquí San Blas, Imantag, San Roque, Atuntaqui, Pablo Arenas, La Esperanza, San Miguel de Ibarra, Angochagua, Olmedo, Ambuquí, Urcuquí, Cotacachi, San Francisco de Natabuela, Otavalo, San José de Chaltura, San Juan de Ilumán, San Antonio, Imbaya, Apuela, Eugenio Espejo, San Pablo, San Rafael, Gonzales Suarez, San José de Quichinche, Cotacachi, Cayambe, Tabacundo entre otros poblados. Se beneficiarán de los resultados que se obtengan del proyecto a través de actividades de vinculación con las comunidades rurales de la Región Norte del Ecuador.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar los efectos de los cambios del paisaje en la susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los cambios en el paisaje para el periodo 1996-2017.
- Determinar la susceptibilidad de deslizamientos para el periodo 1996-2017.
- Evaluar la relación espacial entre los cambios del paisaje y la variación a deslizamientos.

1.3 Preguntas directrices de la investigación

- a) ¿Cuáles son los cambios del paisaje generados en los últimos 25 años en la subcuenca del río Ambi?
- b) ¿Qué riesgo a deslizamiento presenta la subcuenca del río Ambi?
- c) ¿Cómo se relaciona la configuración y estructura del paisaje con la conectividad espacial y funcional del área de estudio?

1.4 Hipótesis

Los cambios en el paisaje han alterado la susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco Teórico Referencial

2.1.1 Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica está constituida por redes de corrientes provenientes de territorios naturales que desembocan generalmente en ríos, océanos, etc. Se hacen presentes en zonas urbanas o rurales para las necesidades del pueblo en sus actividades productivas (Aguirre, 2011).

Los límites de una cuenca se encuentran definidas por la misma naturaleza, se utiliza cotas topográficas, homogeneidad de territorios con el fin de proteger la biodiversidad del área y además se delimita el territorio asociadas con cuencas hidrográficas ya sea por agua superficiales o subterráneas (López, 2014).

2.1.2 Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud es aplicada en la percepción remota y evalúa cuantitativamente tanto la varianza como la covarianza de los patrones de respuesta espectral de las categorías de beneficio. Esto se puede realizar para cada categoría y para la clasificación se asigna cada píxel a la categoría que maximice la función de probabilidad (Chuvienco, 2010).

2.1.3 Usos de Suelo

La naturaleza ha sufrido variaciones en el uso del suelo, por las diversas ocupaciones que el ser humano ha dado para mejorar su estilo de vida. La expansión urbana y rural son las principales causas las cuales han provocado transformaciones del paisaje.

Las intervenciones humanas traen destrucción de los ecosistemas valiosos, pérdida de biodiversidad, alteración de fauna y flora nativa de las regiones afectadas (Rocha, Delgado y Sendra, 2009).

La vegetación arbustiva se encarga de aprovechar de los nutrientes que brinda el suelo, que a su vez permiten equilibrar el balance de agua en el ecosistema (Marchesini, Sobrino, Hidalgo y Di Bella, 2009).

Los bosques nativos son originarios de una región en particular, especie endémica que nace en esa región sin la necesidad de introducir al ecosistema (Fonseca, Alice y Rey, 2009).

Los cuerpos de agua proceden de depósitos subterráneos y superficiales tales como ríos, lagunas, ojos de agua, etc. Los cuerpos de agua superficiales se utilizan en las actividades del ser humano, las cuales aportan a la agricultura, por otro lado, los cuerpos de agua subterráneos son usados en espacios urbanos y rurales para el consumo y el uso doméstico (Fuentes y Mendieta, 2015).

Los cultivos y áreas intervenidas están directamente relacionados con cuerpos de agua, pues para obtener una producción eficaz se necesita abundante agua, por otro lado, los cultivos se ven influenciados por el cambio climático, las expansiones agrícolas, efecto invernadero, carbono y nitrógeno en la biosfera. Tanto en áreas rurales como urbanas la producción agropecuaria y las industrias han generado un aporte para la ciudadanía al generar ingresos. Por otro lado, han generado una alerta por la invasión del ecosistema nativo ya que invaden zonas para poder expandir la agricultura lo cual provoca una degradación ambiental (Aizen, Garibaldi y Dondo, 2009).

Las zonas urbanas son diferenciadas por la cantidad de habitantes que viven en el área, la densidad de edificios, carencia de áreas agrícolas, lugares con altas funciones económicas, la diversidad de actividades comerciales que se realizan en la misma (Arregui, 2014). Uno de los problemas que se tiene es no saber definir la geografía urbana ya que por cotidianidad lo relacionan con ciudad, sin identificar cuáles son las características esenciales.

La infraestructura agrícola es un proceso que se realiza con una serie de pasos relacionados a las cosechas, desde la materia prima hasta su producto final. Para ello se necesitan maquinarias, herramientas, mantenimientos adecuados para la conservación de las cosechas. Por lo general, estos procesos se los realizan en invernaderos, ya que el exterior depende de las plagas y del cambio climático para obtener una producción eficaz (Sánchez, 2014).

Los páramos son ecosistemas ubicados en regiones tropicales, mayormente se los encuentra en altitudes mayores a los 3000 y 4000 metros. Un claro ejemplo es la Cordillera de los Andes la cual se encuentra en toda Sudamérica (Ruiz, Moreno, Gutiérrez y Zapata, 2008).

El páramo cumple una función importante pues se encarga de regular el sistema hídrico del ecosistema, lo cual permite que la diversidad nativa siga evolucionando al igual que las diversas actividades agrícolas en la región. Existen diversos tipos de páramos: páramos herbáceos, secos de almohadillas, etc., todo depende de la naturaleza en la cual se encuentren (Cristeche y Penna, 2008).

Los pastos son considerados los vegetales importantes para el alimento de ganado, por lo general son pastos naturales los cuales crecen extensivamente (Olea, Verdasco y Paredes, 2011).

2.1.4 Deslizamientos

Los deslizamientos se hacen visibles cuando el suelo presenta grietas en su cobertura, lo cual provoca pendientes con movimientos de masas de suelo y rocas. Estos deslizamientos a su vez pueden provocar derrumbes con rocas y suelo a grandes velocidades (Román y Feoli, 2018).

Los deslizamientos rotacionales nacen cuando la cobertura del suelo se parte en forma de una superficie cóncava, creando deslizamientos paralelos de masas de suelos hasta

llegar a una superficie plana. Además, la cobertura del suelo se sesga para la parte posterior de la pendiente, provocando que la masa de suelo tenga degradación de masa interna leve (Cabrera, Dáger, Rojas y García, 2010).

Los deslizamientos traslacionales se producen en una sola superficie ya sea plana u ondulada, a medida que desliza el flujo de masa la velocidad de este movimiento se mantiene constante. Existe la presencia de rupturas de área si es que la superficie es muy inclinada o continua (Villacorta, Fidel, y Zavala, 2012).

Los flujos son movimientos continuos y su potencia dependerá de la cantidad de materiales que se encuentren a su alrededor y puede convertirse en avalanchas o corrientes. Los flujos pueden ser de rocas, de arena o corrientes de agua (Singh, Botha, Richards y McCarthy, 2008).

Los desprendimientos son declives de rocas, suelos en caída libre con gran velocidad tras el impacto con la superficie (Samodra, Chen, Sartohadi, Hadmoko, Kasama y Setiawan, 2016).

Los vuelcos son movimientos similares a los desprendimientos, se originan por las fracturas del terreno, provocando separación de laderas en forma de columnas (Castro, 2013).

Las avalanchas rocosas son desplazamientos secos de materiales rocosos alborotados que generalmente se evidencia en zonas montañosas (Perucca y Esper, 2008).

Para dar origen a las **avalanchas de derrubios** se necesita que grandes cantidades de masas rocosas colapsen, desplazando una avalancha de rocas de diversos tamaños.

La amenaza a deslizamiento es una probabilidad de que ocurra un deslizamiento el cual afecte de manera directa o indirecta al área específica en un tiempo determinado (Bohórquez, 2013).

Para evaluar **la susceptibilidad** del área se realizan estudios de mapas dependiendo del rango del peso que tiene el área, de esto dependerá que tan susceptible es el terreno (Gómez, Pérez y Sarmiento, 2014). El método de **cartografía de susceptibilidad** se basa en los valores obtenidos y análisis del terreno, creando así intervalos de susceptibilidad.

Los intervalos de susceptibilidad se basan entre muy mala a muy alta entre un rango de 0.25 a 1.26. Si existe valores menores de 0.50 se obtiene un rango de susceptibilidad bajo, por el contrario, un intervalo entre 1.01 y 1.25 la probabilidad de susceptibilidad es alta (Camargo, Vidal y Andrades, 2014).

La herramienta **DesInventar** fue diseñada por los grupos de investigación que conforman La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. DesInventar permite mostrar los alcances que un factor detonante puede tener y los desastres que puede generar, sobre una o más unidades geográficas de resolución mínima, facilitando los recuentos de todas las variables posibles en torno a la zona afectada desde una perspectiva espacio/temporal georreferenciada; hacer levantamientos gráficos, obtener estadísticas sobre las pérdidas o afectación directa o indirecta en vidas humanas, la economía, la cultura, el patrimonio histórico, la infraestructura física, etc (Marulanda, Cardona y Barbat, 2010).

2.1.5 Ecología de Paisaje

La ecología del paisaje es el estudio de la estructura, función y cambio del paisaje en un área de terreno heterogéneo que contiene ecosistemas que interactúan entre sí, tomando en cuenta vínculos e interacciones entre los ecosistemas naturales y los efectos de las perturbaciones naturales y humanas en el área (Skokanová, y Ereimiášová, 2013).

La línea de estudio de la academia europea, considera a los paisajes a escala humana, siendo este un nivel adecuado para estudiar la interacción entre sociedad y naturaleza,

ya que el ser humano estima la naturaleza e interviene sobre está a escala de paisaje (Godoy, 2009).

Por otro lado, en la línea de estudio predominante en Norteamérica y Australia, estudia cómo los patrones en el paisaje típicamente producidos por comunidades de plantas y ensamblajes de coberturas vegetales pueden ser analizados (Skokanová, y Ereimiášová, 2013). Cuando se realizan estudios en ecología del paisaje se hace referencia a como las relaciones funcionales de los patrones observables en el paisaje pueden ser determinadas, interpretadas y estudiadas. Eventualmente, estas relaciones interactúan logrando ser cuantificables (Jorgenson, 2008).

El paisaje es la manifestación en el espacio de la interacción entre el medio y las actividades humanas, formando un mosaico heterogéneo de partes con diferentes características. Constituye una superficie heterogénea compuesta por un conjunto de ecosistemas que interactúan que se repite en forma similar a lo largo. El paisaje constituye un ecosistema de naturaleza heterogénea, acotado espacialmente a nivel de meso escala con una estructura inseparable. Esta estructura está conformada por parches homogéneos en sus características tanto abióticas como biológicas.

El paisaje es heterogéneo compuesto por un conjunto de ecosistemas, los mismos interactúan y se repiten en forma similar en el área (Aguilera, Valenzuela y Botequilha, 2011; Skokanová, y Ereimiášová, 2013).

La estructura del paisaje es el modelo de disposición de los elementos que interactúan y que conforman el sistema. Permite considerar los componentes del sistema, los procesos que los integra uno con otros, en sus diferentes niveles jerárquicos (Tiscornia, Achkar y Brazeiro, 2014). La estructura el paisaje presenta tres elementos principales que son la matriz, los parches y los corredores. El conjunto de estos elementos demuestra la dominancia y heterogeneidad de cada paisaje con las propiedades

características pertenecientes a cada uno de estos estableciendo las funciones del paisaje que comprenden un ecosistema que funciona efectivamente.

Los parches de hábitat son áreas que reúnen las condiciones necesarias para tolerar la reproducción de las especies focales, estas áreas se manifiestan como un conjunto de píxeles que son lo suficientemente buenos es decir que tienen recursos adecuados para la especie en particular, suficientemente grandes significa que haya espacio suficiente para mantener una población relativamente estable y suficientemente cercanos que se refiere a que los parches de hábitat adecuado se agrupan para mantener la movilidad entre ellos (Beier, Majka y Spencer, 2008).

Parches de hábitat cobra relevancia al integrar no solo la cobertura sino demás variables ecológicas; definiéndose como la unidad fundamental en la que los procesos funcionales de la conectividad pueden ser medidos (Kent, 2009).

La composición del paisaje se refiere a la variedad y abundancia de los tipos de parche sin tener en cuenta su carácter o configuración espacial (Benavente y Botequilha, 2012). En este sentido, las métricas de configuración del paisaje no son espacialmente explícitas, pero presentan importantes efectos espaciales (Aguayo, Pauchard, Azócar y Parra, 2009).

Un ecosistema requiere de hábitats de diferentes plantas, animales y microorganismos para poder mantenerse, estos sólo son valiosos si están conectados entre sí de alguna forma. Un ecosistema no solo suministra elementos a los ecosistemas aledaños, sino que se ajusta y regula mediante los elementos provenientes de los ecosistemas vecinos. Esta conectividad puede darse de manera espacial como funcional.

La conectividad espacial se refiere a la cercanía de los parches en el área, cuanto más alejados se encuentren los fragmentos de hábitat, menor conectividad tendrá este hábitat. La conectividad funcional comprende la capacidad que tiene el espacio para

permitir el desplazamiento de las especies con recursos a través de los parches (Gurrutxaga y Lozano 2008).

El concepto de conectividad se maneja para representar cómo la configuración espacial y la calidad de elementos en el paisaje afectan el desplazamiento de organismos entre parches de hábitat (San Vicente y Valencia, 2012).

2.1.6 Métricas de Paisaje

Las métricas o índices de paisaje son métodos cuantitativos donde se estudia la composición, estructura y forma del paisaje. Además, tiene la capacidad de comparar distintos paisajes, por ejemplo, la comparación de un área específica en diferentes años (Tabla 1).

Tabla 1. Métricas de Paisaje.

A Nivel de Fragmento (Patch Level)	Se realiza individualmente para cada parche, Los índices se aplican de manera individual a cada fragmento. Determina cuál es el fragmento de mayor tamaño en consideración a todos los demás elementos.
A Nivel de Clase (Class Level)	Los índices se aplican a cada conjunto de fragmentos de una misma clase. Este nivel se encarga de calcular las superficies donde se encuentra una cobertura de suelo específica, por ejemplo, los fragmentos de un bosque.
A Nivel de Paisaje (Landscape Level)	Los índices se aplican al conjunto del paisaje, esto implica a todos los fragmentos y clases a la vez. Se determina el grado de heterogeneidad o de homogeneidad del conjunto del área bajo estudio. (González, Villarreal y Castro, 2012)

Fuente. McGarigal, (2015).

Las métricas paisaje pueden ser aplicados a tres diferentes niveles dependiendo del objeto de estudio (Giné, 2014; Ayram, Andrés, Mendoza y López, 2014), y cumple con la finalidad de interpretar cada índice adecuadamente sea su escala. Las métricas de paisaje se dividen en cinco tipos (McGarigal, 2015):

2.1.6.1 Métricas de Superficie, Área, Densidad y Variabilidad

Se basa en el analizar las características del área de estudio, para obtener un supuesto acerca del paisaje y sus propiedades morfológicas (Tabla 2).

Tabla 2. Métricas de Superficie, Área, Densidad y Variabilidad.

Métrica	Descripción
Área	Calcula el área de cada fragmento
Área Total del Paisaje	Evalúa el área total del fragmento
Número de Parches	Encontrar el número de fragmentos totales y de cada una de las clases.
Densidad de Parche	Calcula el número de fragmentos de cada una de las clases por unidad de superficie.
Tamaño Medio del Parche	Área determinada por una clase y el número de los fragmentos de la misma clase estudiada.

Fuente. McGarigal, (2015).

2.1.6.2 Métricas de Forma

Se enfoca en las propiedades de los fragmentos y en el estudio de área y perímetro del paisaje, asociando su análisis morfológico y funcional (Tabla 3).

Tabla 3. Métricas de Forma.

Métrica	Descripción
Índice de Forma	Evalúa los fragmentos en alto grado de complejidad.
Índice de Forma Media	Evalúa la forma media a nivel de clase y paisaje.
Índice de Forma Horizontal	Analiza el área y perímetro para el paisaje.
Dimensión Fractal	Análisis de la complejidad del cálculo entre el área y el perímetro de un fragmento.

Fuente. McGarigal, (2015).

2.1.6.3 Métricas de Hábitat

Se encarga de analizar los bordes de hábitat en relación con el hábitat interior, estudia las características ambientales para cada fragmento. El hábitat interior se caracteriza por el desarrollo y mejora de la flora y fauna del paisaje. (Tabla 4).

Tabla 4. Métricas de Hábitat.

Métrica	Descripción
Perímetro	Calcula el conjunto de fragmentos.
Área Principal	Superficie total del hábitat interior referente a cada uno de los fragmentos.
Densidad de Borde	Perímetro del hábitat de borde del paisaje.
Área central total	Calcula la superficie del hábitat interior.
Porcentaje del Área Central	Evalúa el porcentaje del hábitat interior del paisaje.

Fuente. McGarigal, (2015).

2.1.6.4 Métricas de Distancia, Conectividad y del Vecino más Cercano

Se encarga de estudiar la conectividad entre fragmentos, además, permite calcular el espacio que existe entre el hábitat de borde hasta el próximo fragmento (Tabla 5).

Tabla 5. Métricas de Distancia, Conectividad y del Vecino más Cercano.

Métrica	Descripción
Distancia del Vecino más Cercano	Calcula la distancia entre los fragmentos de la misma clase.
Distancia Euclidiana del Vecino Más Cercano Media	Calcula la distancia media entre los fragmentos de la misma clase.
Distancia Máxima	Calcula la distancia que existe al fragmento más distante.
Índice de Proximidad	Calcula la distancia entre los fragmentos de la misma clase, pero en un radio determinado.
Índice de Proximidad Medio	Se encarga de evaluar el índice de proximidad medio entre los fragmentos de una clase en un determinado radio de búsqueda.

Fuente. McGarigal, (2015).

2.1.6.5 Métricas de Diversidad del Paisaje

Permite la comparación de paisajes en diferentes escalas de tiempo. Muestra la variabilidad de especies o la permanencia de las mismas en los distintos paisajes lo cual permite calcular el estudio de especies en un área determinada (Tabla 6).

Tabla 6. Métricas de Diversidad del Paisaje.

Métrica	Descripción
Índice de diversidad de Shannon	Determina la heterogeneidad de paisajes a partir de la variabilidad de fragmentos.
Índice de diversidad de Simpson	Se calcula un valor el cual representa de manera aleatoria la diversidad heterogeneidad, cuanto mayor sea el valor mayor es la diversidad.

Fuente. McGarigal, (2015).

2. 2 Marco Legal

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador

Capítulo II: Derechos del buen vivir

Sección segunda: Ambiente sano

En el artículo 14 el estado brinda a la población la potestad de vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Es de interés público la preservación del ambiente, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Capítulo IX: Responsabilidades

Título VII: Régimen Del Buen Vivir

Capítulo II: Biodiversidad y recursos naturales

Sección primera: Naturaleza y ambiente

En el artículo 397 corresponde directamente garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas en casos de daños ambientales. El Estado actuará sobre el ejecutor de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral.

Sección tercera: Patrimonio natural y ecosistemas

Es de suma importancia regular la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados se destaca directamente en el artículo 406 y está bajo control del estado.

2.2.2 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (Tulas, 2012).

Título II

De la Investigación, Colección y Exportación de Flora y Fauna Silvestre

Las investigaciones científicas referentes a la flora y fauna silvestre a realizarse en el Patrimonio Nacional de Áreas Naturales requieren de la autorización pronunciada por el Distrito Regional correspondiente, fuera de ella, no se requiere autorización de investigación así determina el artículo 6. Consecuentemente en el artículo 11 si el Ministerio del Ambiente considere necesario, los proyectos de investigación serán sometidos a conocimiento y evaluación de especialistas designados por el Ministerio del Ambiente.

2.2.3 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre

Capítulo III

De la Conservación de la Flora y Fauna Silvestres

Ocupar tierras del patrimonio de áreas naturales del Estado está totalmente ilegal o alterar o dañar la demarcación de los mecanismos de manejo u ocasionar deterioro de los recursos naturales en ellas existentes así lo decreta el artículo 75.

2.2.4 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)

Capítulo III

Sección Primera

Naturaleza Jurídica, Sede y Funciones

Los gobiernos autónomos descentralizados parroquiales rurales según el artículo 136 promoverán dinanismos de preservación de la biodiversidad y protección del ambiente con lo cual estimularán proyectos de manejo sustentable de los recursos naturales y recuperación de ecosistemas frágiles dentro de su competencia.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

Para la determinación de los cambios en el paisaje en la susceptibilidad a deslizamientos se usó imágenes landsat correspondiente al período de 1996 – 2017 en conjunto con el registro de eventos adversos de deslizamientos ocurridos en la subcuenca del río Ambi previamente corroborados en campo.

3.1 Caracterización del área de estudio

El área de estudio corresponde a la subcuenca del río Ambi, localizado al Norte del Ecuador en la provincia de Imbabura situada geográficamente en la parte alta de la cuenca del río Mira presentando una superficie de 1070 km². El área de estudio presenta a los cantones de Antonio Ante, Cotacachi, Ibarra, Otavalo y Urcuquí que poseen área de predominio territorial.

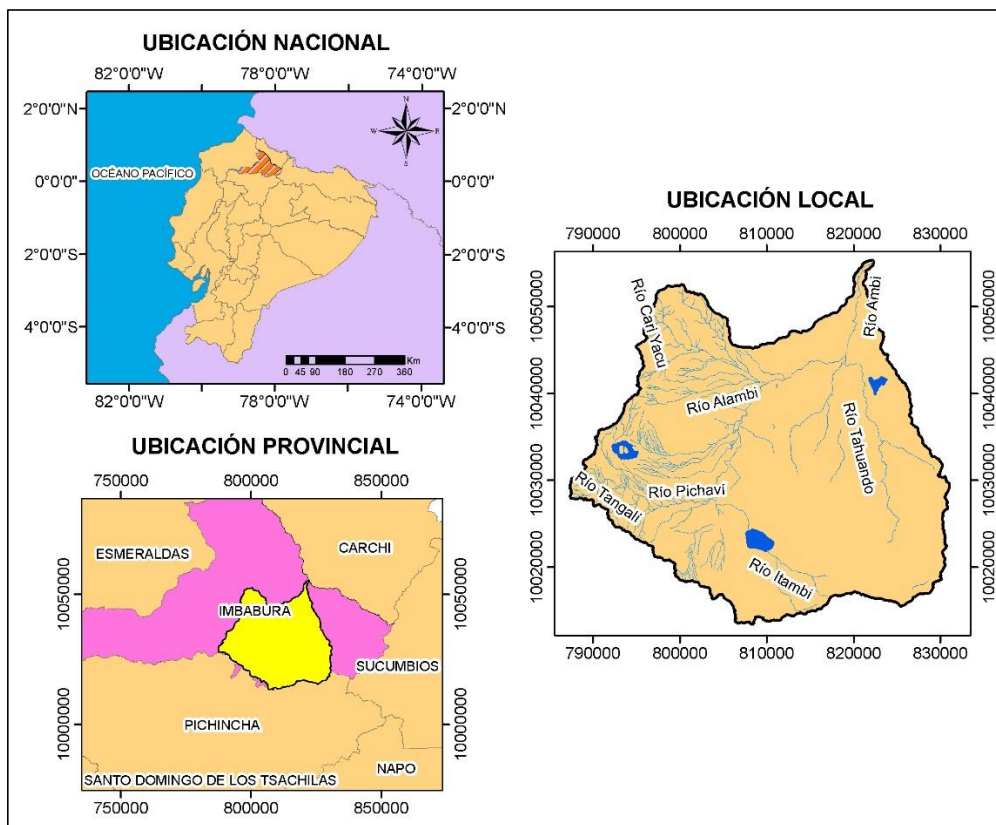


Figura 1. Ubicación de la Subcuenca del río Ambi.

3.1.1 Aspectos Socioeconómicos

De acuerdo al PDyOT del cantón Antonio Ante 2012-2030 (2012) las malas prácticas agrícolas, el uso descomunal de agroquímicos, aguas servidas y una diversidad de factores han ocasionado la contaminación de esta subcuenca.

El río Ambi es el primordial afluente, cruza cinco de los seis cantones en la provincia de Imbabura, considerado la principal fuente de riego de acuerdo con datos del exInstituto Nacional de Riego (2009), se señaló que el 60% del agua de riego de la provincia provenía del río Ambi y el 40% del río Tahuando.

3.1.2 Relieve

La subcuenca del río Ambi presenta una altitud entre los 1515 en su parte baja a los 4866 m.s.n.m en la parte alta, lo que permite tener diversidad de pendientes formando diferentes tipos de relieves. El 25.31% del territorio tienen un relieve plano, el 18.68% un tipo de relieve ligeramente ondulado, luego un 14,21% relieve ondulado, un 17.15% presenta un relieve montañoso, el 16.04% presenta un relieve muy montañoso y 8.61% un relieve escarpado.

3.1.3 Clima

La temperatura media anual corresponde a 16,3 °C y una precipitación de 223 mm al año (INAMHI, 2008). Los tipos de clima representativos en la subcuenca son: clima Mesotérmico templado cálido, Mesotérmico templado frío, Mesotérmico semifrío (INAMHI, 2017).

3.1.4 Suelo

La subcuenca del río Ambi presenta suelos de tipo inceptisoles denominados suelos jóvenes poco desarrollados debido a que el desarrollo del perfil es evidente y suelos tipo mollisoles que son suelos oscuros y suaves que se han desarrollado bajo una vegetación herbosa y en general se encuentran en áreas de pradera (Carrera, Guevara, Tamayo, y Guallichico, 2015).

3.2 Metodología

La metodología empleada consistió en la utilización de imágenes multispectrales de los satélites LANDSAT (Imágenes ASTER) (Figura 2).

3.2.1 Análisis de los cambios del uso del suelo y cobertura vegetal

3.2.1.1 Búsqueda de imágenes de diferentes años en el servidor Earth Explorer del USGS

Se descargó imágenes a partir del satélite de la tierra, destacado como LANDSAT, procedentes de los sensores: ETM, TM y OLI para los años: 1996, 2007 y 2017, que se obtuvo de la página de la NASA www.usgs.gov proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS. El Geoportal Earth explorer contiene imágenes de los satélites Landsat y Terra (Imágenes Aster), que en efecto distribuye ventajosamente imágenes de todo el globo terrestre de manera libre (Tabla 7).

Tabla 7. Características de las imágenes satelitales de los años 1996, 2007 y 2017.

	1996	2007	2017
Fecha de adquisición	1996 – 07 – 24	2007 – 12 – 06	2017 – 01 – 23
Tiempo del centro de escena	14:41:11	15:16:34	15:26:24
Satélite	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Sensor	TM	ETM	OLI TIRS
Path	10	10	10
Row	60	60	60
Elevación del sol	46.31	55.20	54.94
Distancia entre la tierra y el sol	1.01	0.98	0.98

3.2.1.2 Tratamiento digital de imágenes

Se realizó un pre-tratamiento y un tratamiento de las imágenes satelitales usando el software ARCGIS con licencia temporal. Se trabajó con esta herramienta para realizar correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas.

El realce radiométrico optimizó la imagen para reducir efectos atmosféricos como el vapor de agua y las partículas de polvo.

La corrección geométrica permitió la proyección de la imagen satelital desde la zona 17 Norte hacia la zona 17 Sur en el sistema WGS 1984 UTM Zona 17S.

La corrección atmosférica permitió la corrección del relieve y el descarte de las sombras de nubes en las imágenes, se aplicó una corrección atmosférica, con la herramienta DOS (*Dark Object Subtraction*). Optimizar la imagen para reducir efectos atmosféricos como la nubosidad es recomendable realizar la corrección atmosférica a la imagen Landsat entera.

3.2.1.3 Recorte de imágenes con el área de estudio

En el software ArcGIS 10.6, se procedió a recortar las escenas de imágenes con el polígono del área de estudio. Para delimitar el área de estudio se consideraron los aspectos de altitud del terreno, red hídrica de la subcuenca del río Ambi (Figura 2).

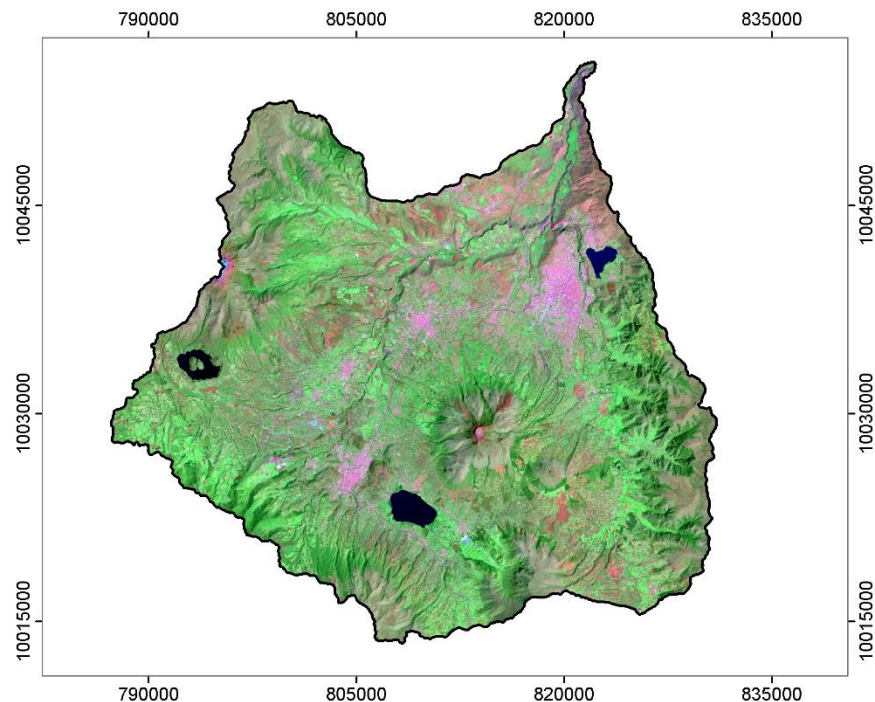


Figura 2. Recorte de imagen satelital de la subcuenca del río Ambi en composición de bandas (R7, G5, B3) LANDSAT L8-OLI del 2017.

3.2.1.4 Clasificación multitemporal de imágenes

Se realizó clasificaciones supervisadas de imágenes validadas con comprobaciones de campo para los años 1996, 2007 y 2017; para esto se consideró una superficie mínima de 2 hectáreas (unidad mínima cartografiable).

Se empleó un **realce multiespectral**, mediante la combinación de bandas de la imagen satelital, con el fin de obtener una imagen en infrarrojo o falso color, útil para interpretar las diferentes coberturas existentes en la microcuenca.

Se aplicó una **clasificación supervisada** en las imágenes mediante la definición de firmas espectrales formando conjunto o grupo de píxeles con características similares para identificar las categorías y análisis visual. Se clasificó en nueve categorías: bosque, vegetación arbustiva, cuerpos de agua, cultivos, páramo, pastos, zona agrícola, zona urbana y área sin vegetación. Para finalizar se calculó los cambios, intercambios y transiciones ocurridos en el periodo de tiempo mediante el uso de la matriz de transición en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG).

3.2.1.5 Validación de la clasificación de las imágenes

Después de obtener las imágenes clasificadas, se realizó comparaciones entre los píxeles de la imagen y la distribución espacial de las clases de formaciones vegetales presentes en el campo. Mediante la composición de bandas se tomó en consideración combinaciones importantes para la identificación de formas vegetales. La composición R4, G3, B2 permitió identificar el color natural y una aproximación de la vista de la superficie terrestre desde el aire, la composición R5, G4, B3 identificó un falso color, se observó colores rojos intensos que representó la vegetación para masas forestales y regadíos. La composición R6, G4, B3 permitió detectar infraestructuras artificiales con tonalidades azules. La composición R7, G5, B3 permitió detectar aplicaciones geológicas y la concentración de clorofila se pronunció de color verde.

La confirmación de los resultados de clasificación de imágenes se realizó aplicando la técnica de matriz de confusión o de error, que evalúa la exactitud de la clasificación

multitemporal. (Rodríguez, 2011) Igualmente se calculó el índice Kappa (López, 2014) para determinar el grado de significancia entre los datos obtenidos en la clasificación supervisada y los datos levantados en campo (Figura 3 y Tabla 8).

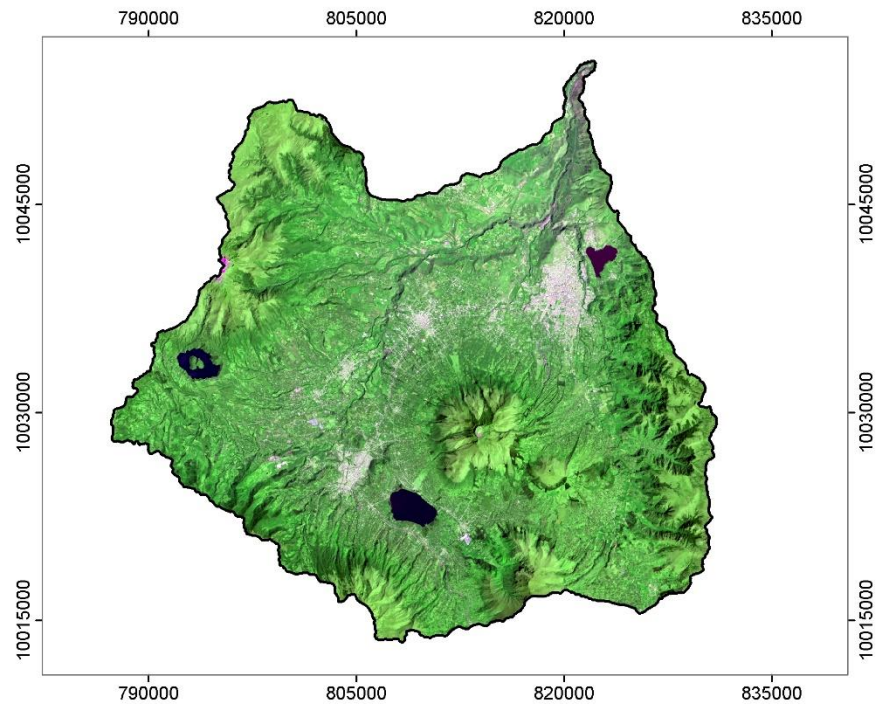


Figura 3. Imagen en pseudo falso color (R7, G6, B4) LANDSAT L8-OLI del 2017.

Tabla 8. Matriz de confusión para la validación de la imagen LANDSAT L8-OLI del 2017 obtenida en ArcMap.

Matriz de confusión		Objetivo			
		Positivo	Negativo		
Modelo	Positivo	a	b	Valor predictivo positivo	$a/(a+b)$
	Negativo	c	d	Valor predictivo negativo	$d/(c+d)$
		Sensibilidad	Especificidad	Accuracy = $(a+d)/(a+b+c+d)$	
		$a/(a+c)$	$d/(b+d)$		

Se clasificó la imagen por el procedimiento supervisado manejando el algoritmo de las mínimas distancias. Las áreas de entrenamiento de interés se definieron en base al análisis

de las combinaciones RGB de color natural (Figura 4) y falso infrarrojo (Figura 5) apoyadas por el análisis de los perfiles espectrales.

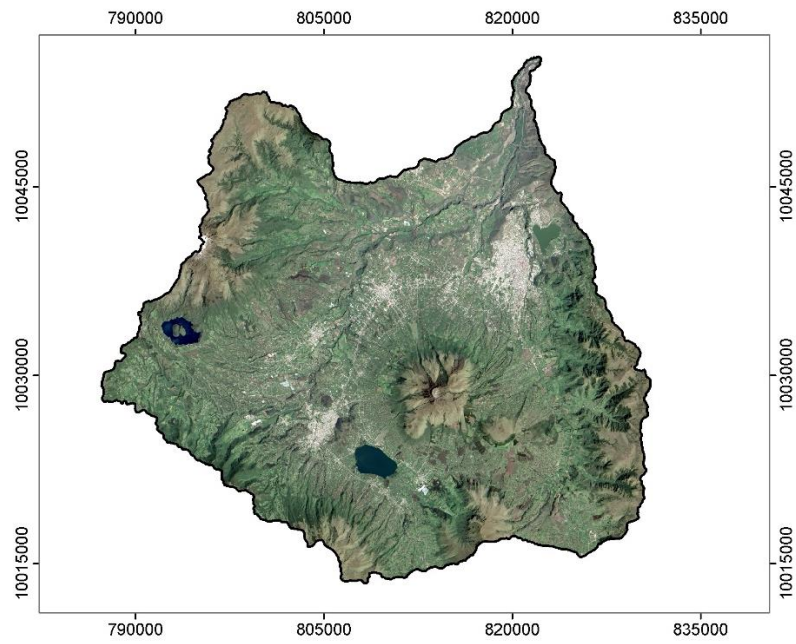


Figura 4. Imagen en color verdadero, 8 bandas (R4, G3, B2) LANDSAT L8-OLI del 2017.

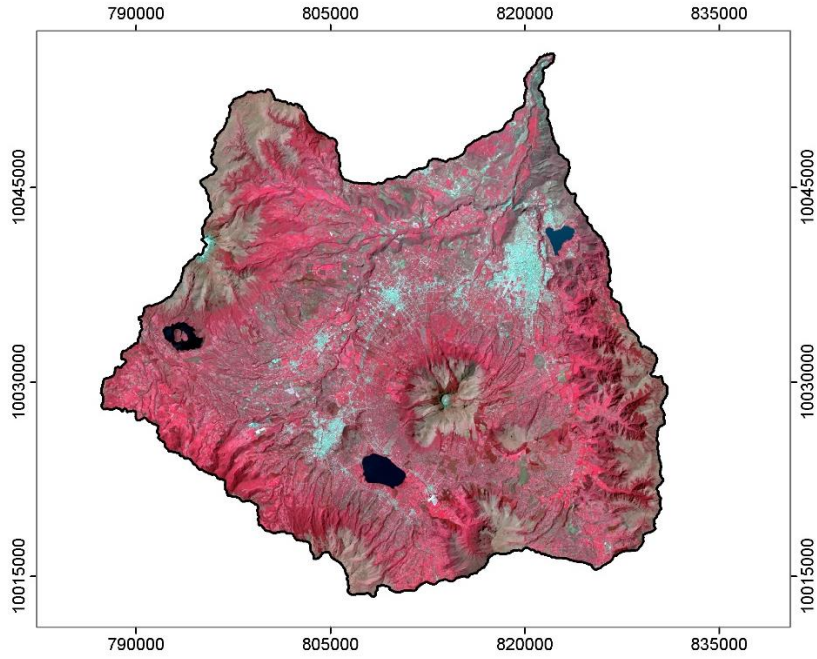


Figura 5. Imagen en Infrarrojo color (R5, G4, B3) LANDSAT L8-OLI del 2017.

3.2.2 Determinación de la Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi

Para representar la susceptibilidad de un terreno a deslizamiento y de los diferentes factores espaciales que interceden en este fenómeno, se da una vez levantada la información de ocurrencia del hecho en la zona de estudio. Para esto fue necesario la aplicación de la metodología de Radio Frecuencia (FR).

3.2.2.1 Análisis de datos

La generación de antecedentes y su análisis se realizó desde la información disponible y a partir del perfil del área de estudio. Para este estudio, se consideraron diferentes variables que interceden y la analogía que estas adquieren en la susceptibilidad a deslizamientos. Para aplicar la metodología de Radio Frecuencia en la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio, se recopiló toda la información existente y se analizó el producto de esta mediante el coeficiente de función de creencia evidencial, que facilitó la estructura y la actualización de datos de la zona.

3.2.2.2 Análisis de variables y relaciones

Para establecer las variables a interponerse, se consideró los eventos auténticos ocurridos históricamente, criterios técnicos de veracidad, zonas de estudios y la disponibilidad de datos. De acuerdo al análisis de cada variable, en relación en la susceptibilidad se estableció:

La variable dependiente se logró mediante la base de datos Desinventar, mediante el cual se obtuvo información sistemática sobre la ocurrencia de desastres cotidianos de pequeño y mediano impacto. El desarrollo de Desinventar permite ver a los desastres desde una escala espacial local, facilita diálogos para gestión de riesgos entre actores e instituciones y sectores, y con gobiernos provinciales y nacionales (Tabla 9).

Tabla 9. Eventos de deslizamiento en la subcuenca del río Ambi 1996-2017.

Evento de deslizamiento	X	Y
Antonio Ante	807241	10036972
San Antonio	815037	10036924
San Blas	811074	10045912
La Esperanza	820623	10032926
Tanguarín	815282	10036118
Rumipamba	822006	10031158
Caranqui, barrio 10 de Agosto	820221	10035630
Areas Urku	812989	10021550
Yambiro	801215	10024672
Yambiro	801239	10024638
Tangali	795174	10027210
San Clemente-El Prado	819852	10031101
La Victoria	821285	10037770
Imantag	806306	10039554
Comunidad de Cambugan	801665	10026459
Comunidad de Cambugan	789954	10029806
San Pablo	812989	10021550
Huaraczapas	823715	10025892
Yuracrusito	824184	10037866
El Olivo	821636	10040286
Carabuela, Comunidad Sintsi Uco	805836	10030560
Barrio Santa Marianita, Tanguarin Sur	815282	10036118
Yuracrusito	824184	10037866
Barrio San Vicente, quebrada Guaytara	801665	10026459
Santiago del Rey (sector)	813207	10041232
Yahuarcocha	822476	10039370
19 de Enero atrás del Estadio	818103	10033599
Los Granados – Río Pisque	804794	10039270
Iruquincho	805948	10044592
Iruquincho	805980	10044905
La Gruta de la Virgen	805755	10033659
Panamericana sector redondel de González Suarez	810986	10019533
Vía Imantag - Atuntaqui	807983	10037348
Las Malvinas	822592	10036660
Urcusiqui	790928	10033524
Vía el Arcangel	822381	10038400
Tangalí	795106	10027292
Tangalí	795744	10027089
La Merced, vía Atuntaqui – Cotacachi	805908	10036514
La Merced, vía Atuntaqui – Cotacachi	807982	10037350

Se recolectó información y registros de eventos de deslizamientos de tierra desde el período 1996 - 2017 partir de análisis de información histórica (Guzzetti, Ardizzone, Cardinali, Rossi y Valigi, 2009). Además, mediante las visitas de campo se registró los puntos de muestras. Cada punto posee características referentes a las diferentes variables utilizadas para la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio.

El mapa de inventario de deslizamientos de tierra es considerado como el método más simple de mapeo y es el primer requisito para el desarrollo temático de susceptibilidad a deslizamientos de tierra (Aceves, Legorreta, Lugo, Umaña y Legorreta, 2016).

Entre **las variables independientes** se consideró el factor **pendiente** y se realizó a partir de un modelo digital de elevación (SRTM 30m) perteneciente al área de estudio de la subcuenca en formato raster. Mediante la herramienta Slope se calculó la pendiente de cada celda del raster digital de elevación. En correspondencia a los cambios de pendientes, se consideró como condicionante de los movimientos de masa en el terreno. Para el cálculo de ésta se tomó en cuenta la clasificación establecida por Vargas Rojas (2009) (Tabla 10). Los deslizamientos se basan en la premisa que, a mayor pendiente, mayor la probabilidad de que ocurra un deslizamiento (Mujica y Pacheco, 2013).

Tabla 10. Clasificación de pendientes en el terreno

Relieve	Pendiente-Rango	Clase
Plano	0-5%	1
Ligeramente Ondulado	5-12%	2
Ondulado	12-25%	3
Montañoso	25-50%	4
Muy Montañoso	50-70%	5
Escarpado	>70%	6

Fuente: Vargas, 2009

La litología a través del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) se obtuvo el shape de geología a escala 1:25 000 del Ecuador. Posteriormente, mediante la barra de

geoprocesamiento Clip se obtuvo el shape para el área de estudio. La erosión del suelo depende de la perspectiva topográfica, la pendiente del terreno o factores antrópicos y las propiedades del suelo.

Para el factor de **rugosidad** se estableció la ondulación de la superficie topográfica y es una derivada de las pendientes y de las orientaciones. El agua tiende a escurrirse rápidamente desde pendientes suaves y regulares. Sin embargo, si una pendiente es irregular, rugosa y con cambios en su micro topografía, el movimiento del agua se ve obstaculizado. Parte de ella se detiene temporalmente, la tasa de infiltración aumenta y la escorrentía se ralentiza (Arnáez, Ortigosa, Flaño y Martínez, 2012).

El aspecto de la pendiente se realizó mediante la herramienta Aspect de Spatial Analyst Tools se identificó la dirección de la brújula que enfrenta la pendiente cuesta abajo para cada ubicación. Para el factor aspect o de orientación se consideró como punto de importancia en el inicio de un movimiento de pendiente, debido al espacio afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, limitado y definido por la consolidación de los suelos.

La elevación no es un predictor de deslizamientos de tierra, pero fundamentalmente en estudios a pequeña escala incorpora el efecto de dependencia implícita de caminos y desarrollo residencial (o actividades humanas) (Sabatakakis, Koukis, Vassiliades y Lainas, 2012).

La curvatura se obtuvo mediante la herramienta de Curvature de Spatial Analyst tolos determinó a través del raster de elevación la curvatura de la superficie celda por celda, ajustada a través de esa celda y sus vecinos circundantes. La curvatura es la derivada segunda de la superficie, o la pendiente de la pendiente propiamente dicha. Se estableció tres categorías de formas de curvatura: cóncava, convexa, y plana. Las formas convexas son más sólidas que las formas cóncavas porque estas tienden a erosionarse menos en sus secciones superiores, pero a erosionarse rápidamente en sus

secciones inferiores, depositando frecuentemente grandes cantidades de sedimento en tierras bajas y planas. Sin embargo, las pendientes cóncavas tienden a erosionarse en sus secciones superiores más empinadas donde la escorrentía se mueve rápidamente (Arnáez, Ortigosa, Flaño y Martínez, 2012).

El índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) se calculó por la diferencia entre el valor de reflectancia en el rango infrarrojo y rojo, dividido por la suma entre el valor de reflectancia en el rango infrarrojo y rojo (Ecuación 1). Se determinó el índice de densidad de vegetación con valores que fluctúan entre -1 y 1. Es de hacer notar que en este análisis se trabajó con el NDVI normalizado inverso, el cual es meramente la inversión de los valores del índice original; de esta manera, los valores bajos representarían alta cobertura vegetal mientras que los valores altos una baja cobertura.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

NDVI = Valor del índice de vegetación de diferencia normalizada

IVP = Valor de reflectancia en el rango infrarrojo

V = Valor de reflectancia en el rango rojo

La cobertura vegetal obtenida para el año 2017 permitió relacionar la influencia de la vegetación ante la protección de suelo para el origen a deslizamientos, ya que, ésta influye en el control de los procesos de erosión del suelo.

Se consideró variables como **distancia a la red hídrica y distancia a fallas geológicas** de acuerdo a su proximidad, de esta forma, se determinó que mientras más cercano se encuentra un punto a estas variables, su probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento es mayor. Para la determinación de esta variable, se realizó, mediante el software ArcMap y usando la herramienta de Fishnet la cual generó una cuadrícula que constituye un centroide, a partir de ahí se calculó las diferentes distancias a la red hídrica y distancia a la falla geológica.

La variable de **distancia a recursos hídricos** se determinó mediante el cálculo desde el punto más alejado de la subcuenca hacia la red de drenajes, ya que entre menor sea la distancia más incrementará la susceptibilidad a deslizamientos. En la variable de **distancia a fallas geológicas** se realizó un análisis de proximidad con la finalidad de constituir las zonas más cercanas a las fallas geológica. Cabe recalcar que entre menor es la distancia a la falla, mayor es la susceptibilidad a deslizamientos.

3.2.2.3 Análisis del modelo de frecuencias bivariada modificada

El modelo estadístico bivariado consistió en la idea de comparar un mapa de inventario de deslizamiento con mapas de parámetros que influyen en deslizamientos de tierra para determinar la clase correspondiente según su papel en la ocurrencia de deslizamientos de tierra (Yilmaz, 2009). Durante la aplicación del modelo las capas temáticas (factores de acondicionamiento de deslizamientos) se transformaron en capas de datos evidenciables que se integraron para generar un mapa predictivo de susceptibilidad a deslizamientos mediante la explotación del conocimiento cuantitativo de la relación espacial entre deslizamientos de tierra y acondicionamiento de factores de deslizamientos.

Mediante el software ArcGIS se procedió a reclasificar los mapas temáticos (factores predictores) y se tabuló el área de datos de entrenamiento de deslizamientos mediante la herramienta Tabulate Área (Spatial Analyst) para cada factor predictor. Los resultados de evidencia se lograron mediante la proporción de ocurrencia de deslizamiento y la proporción de áreas de deslizamientos (Ecuación 2).

$$\lambda(\mathbf{Tp})\mathbf{Eij} = \frac{[N(L \cap Eij) / N(L)]}{[N(Eij) - (L \cap Eij) / (N(A) - N(L))]} = \frac{N}{D} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$N(L \cap Eij)$ = Cantidad de píxeles de deslizamientos de tierra en el dominio

$N(L)$ = Número total de deslizamientos de tierra o $\sum N(L \cap Eij)$

$N(E_{ij})$ = Número de píxeles en el dominio

$N(A)$ = Número total de píxeles en el dominio o $\sum N(E_{ij})$

N = Proporción de ocurrencia de deslizamiento.

D = Proporción de áreas de deslizamiento.

3.2.2.4 Radio de frecuencia (FR)

El método FR se basó en las relaciones entre la distribución de sitios de ocurrencia de deslizamientos de tierra y cada uno de los factores que intervinieron en estos para revelar la correlación entre ellos (Viloria, Viloria, Pineda y Valera, 2016). (Ecuación 3) y (Ecuación 4). Los valores de FR mayores que 1 indican la gran proporción de deslizamientos de tierra en el área y una alta correlación. Por el contrario, los valores de FR más pequeños que 1 muestran una correlación débil (Akgun, Dag y Bulut, 2008). La siguiente ecuación permitió los resultados de FR:

$$FR = \frac{\% \text{ ocurrencia objetiva en cada subcategoría}}{\% \text{ categoría de un factor independiente}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$FR = \frac{\frac{\text{puntos en factor clases}}{\text{total puntos}}}{\frac{\text{área de clase de factor}}{\text{total área}}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para considerar las interrelaciones mutuas entre los factores independientes (Ecuación 5) y (Ecuación 6):

$$PR = \frac{(RF_{Max} - RF_{Min})}{(RF_{Max} - RF_{Min})} \text{Min} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$SI = \frac{\sum (RF \times PR)}{\text{Max} (RF \times PR)} (100) \quad (\text{Ecuación 6})$$

3.2.2.5 Área bajo la curva ROC (AUC)

Los valores del área bajo la curva (AUC) de éxito indicaron la habilidad del modelo para distinguir entre zonas susceptibles y no susceptibles a movimientos en masa. La

sensibilidad representó la proporción de casos positivos predichos correctamente. Sin embargo, el error negativo es la relación entre los falsos positivos y el total de negativos.

En la aplicación de la curva de ROC se tomaron en cuenta la sensibilidad (número de deslizamientos) y la especificidad (parroquias en donde se presentaron eventos de deslizamientos). Para el cálculo se aplicó (Ecuación 7) y (Ecuación 8). (Amorim, Corominas, Baeza, Portilla, M. y Angulo, 2009).

$$\text{SENSIBILIDAD} = \text{FVP} = \frac{VP}{(VP+FN)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\text{ESPECIFICIDAD} = \text{FVN} = 1 - \text{FFP} = \frac{VN}{N} = \frac{VN}{VN+FP} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

FVP= Fracción de verdaderos positivos

FVN= Fracción de verdaderos negativos

FFP= Fracción de falsos positivos

VP= Verdadero positivo

VN= Verdadero negativo

FP= Falso positivo

FN= Falso negativo

Se trazó la curva AUC, en el eje Y se presenta la sensibilidad y en el eje X la especificidad. El resultado se obtuvo mediante el área bajo la curva, por lo que, un valor menor a 0,5 revela que el modelo no tiene capacidad predictiva, mientras que, un valor de 1 indica que el modelo tiene alta capacidad predictiva (Figura 6) (Gutiérrez, Cámara, Senciales, y García, 2018).

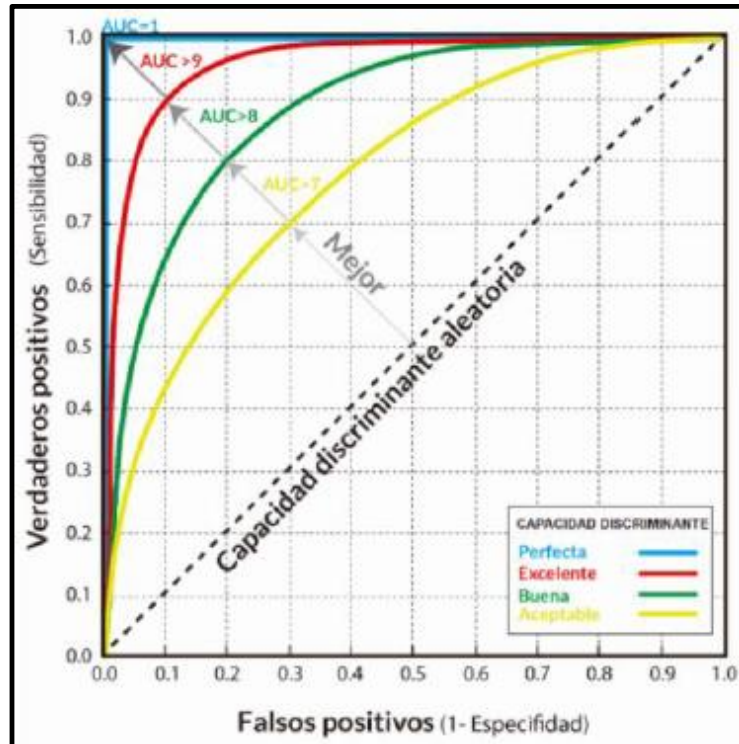


Figura 6. Curva receiver operating characteristic (ROC)

Fuente: Gutiérrez, Cámara, Senciales, y García, 2018

3.2.2.6 Procesamiento de datos

Los datos procesados fueron obtenidos en la investigación y tabulados mediante el programa informático Microsoft Excel, y el programa ArcGis. Primeramente, se realizó el planteamiento de las hipótesis, H_0 = No existe correlación entre los datos y H_a = Existe correlación entre los datos, después se procedió a ingresarlos datos tabulados de Excel a ArcGis. Para la regresión geográfica ponderada se necesitó las coberturas de uso de suelo del período 1996 – 2017, para lo cual se determinó el cambio de uso de suelo para cada cobertura entre la diferencia de estos dos años. Posteriormente, se determinó la significancia mediante el programa ArcGis y la herramienta Zonal Statistics as Table, antes de este proceso se procedió a delimitar las microcuencas principales de la subcuenca del río Ambi para la determinación de la asociación espacial.

3.2.3 Determinación de la conectividad y cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi

Para representación de la conectividad y cambios del paisaje se determinó 10 paisajes correspondientes a la subcuenca del río Ambi para los períodos de 1996 y 2017. Se clasificaron de acuerdo a las principales microcuencas integradas por los drenajes Menores de la subcuenca del río Ambi, microcuenca del río Machángara, microcuenca del río Jatunyacu, microcuenca del río Chorlaví, microcuenca del río Tahuando, microcuenca del río Alambi, microcuenca del río Blanco, microcuenca del río Pichaví, microcuenca del río Yanayacu y quebrada Yanayacu.

3.2.4 Delimitación de los paisajes correspondientes a la subcuenca del río Ambi mediante el mapa de uso de suelo para el año 1996 y 2017

En el software ArcGIS se determinó la delimitación de las microcuencas que conforman la subcuenca del río Ambi de acuerdo a las microcuencas principales. Se trabajó con los mapas de uso del suelo de los años 1996 y 2017 realizados en el estudio para previo análisis por paisajes.

3.2.4.1 Delimitación de los drenajes menores período 1996 y 2017

Se delimitó los drenajes menores de la subcuenca del río Ambi y se estableció el mapa de uso de suelo. Mediante la herramienta extract by mask en Arcgis se procedió a extraer del raster de uso de suelo para cada área delimitada con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 7).

3.2.4.2 Delimitación de la microcuenca del río Machángara período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Machángara y se estableció el mapa de uso de suelo. Mediante la herramienta extract by mask en Arcgis se procedió a extraer del raster de uso de suelo para cada área delimitada con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 8).

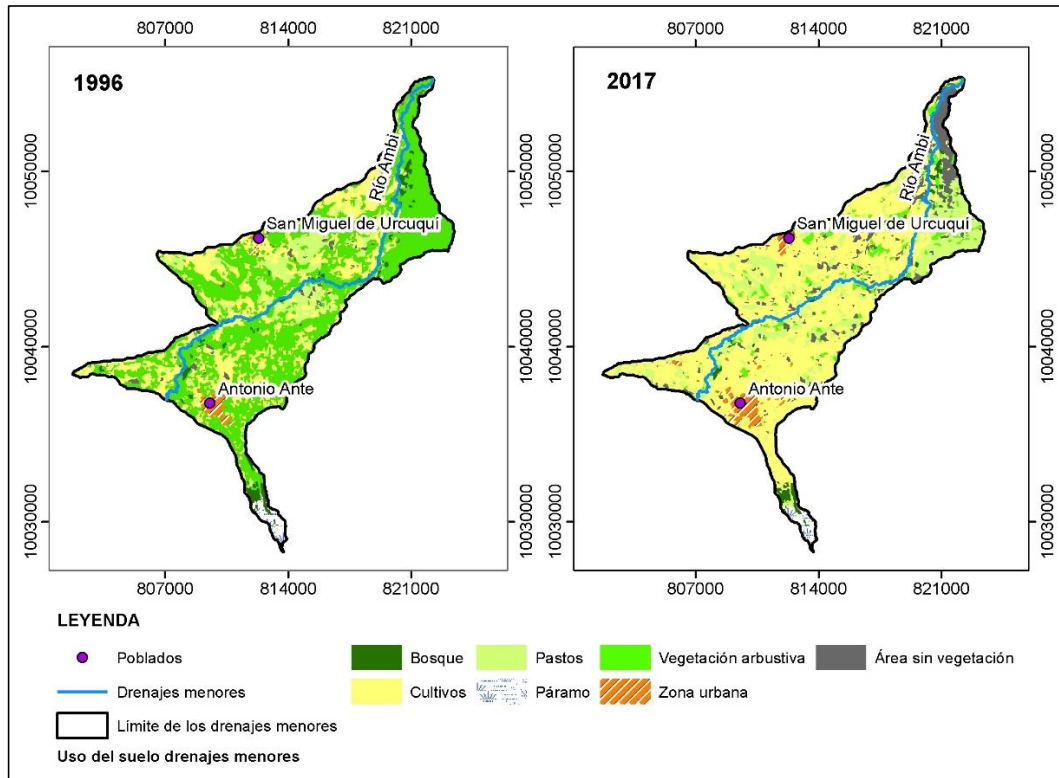


Figura 7. Uso del suelo de los drenajes menores años 1996 y 2017.

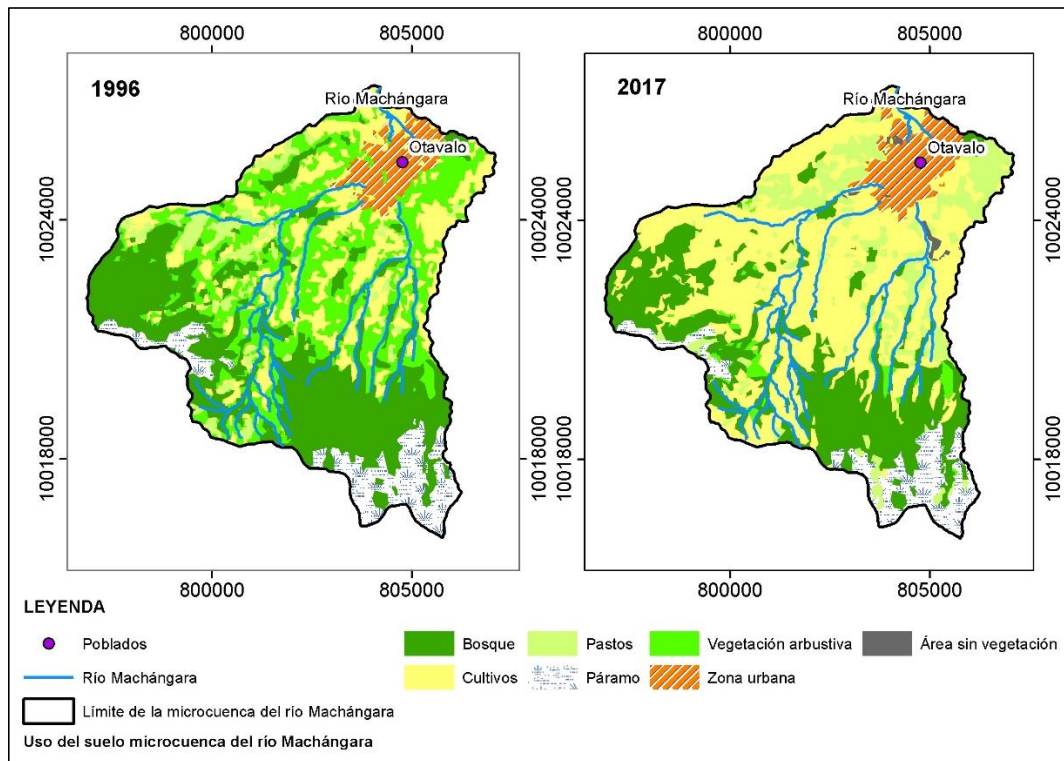


Figura 8. Uso del suelo de la microcuenca del río Machángara años 1996 y 2017.

3.2.4.3 Microcuenca del río Jatunyacu período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Jatunyacu y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo para cada área delimitada (Figura 9).

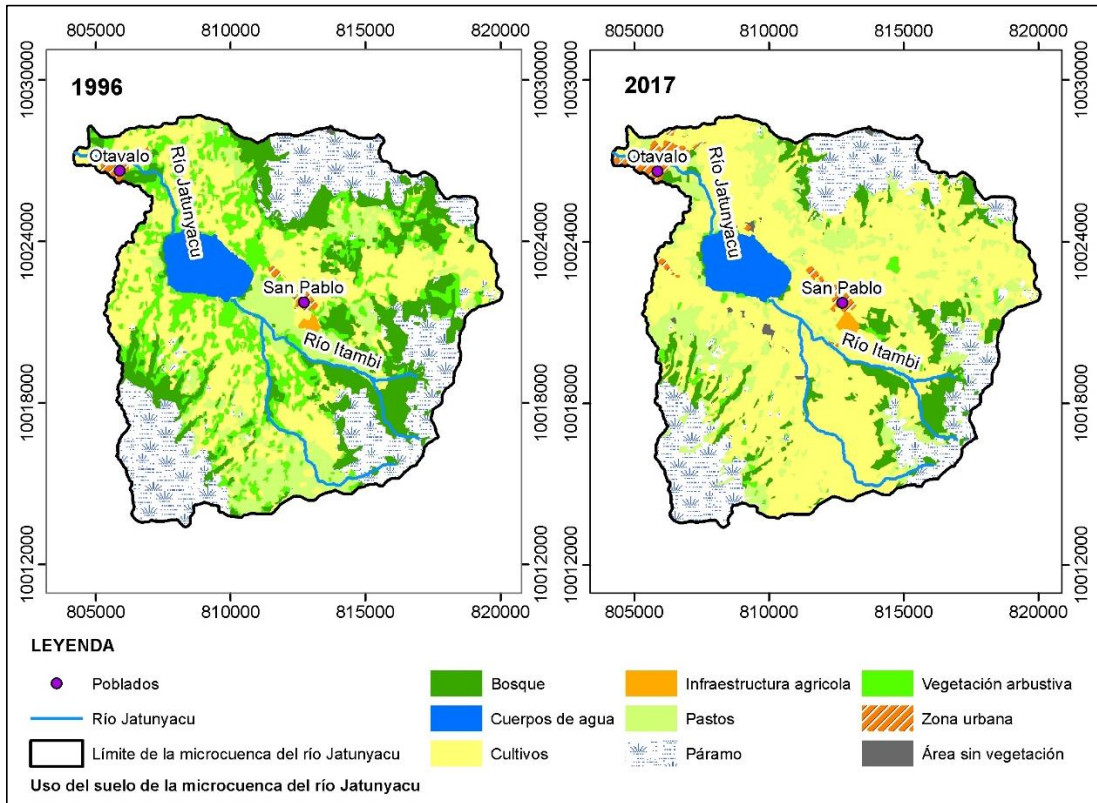


Figura 9. Uso del suelo de la microcuenca del río Jatunyacu año 1996 y 2017

3.2.4.4 Microcuenca del río Chorlaví período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Chorlaví y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo para cada área delimitada con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 10).

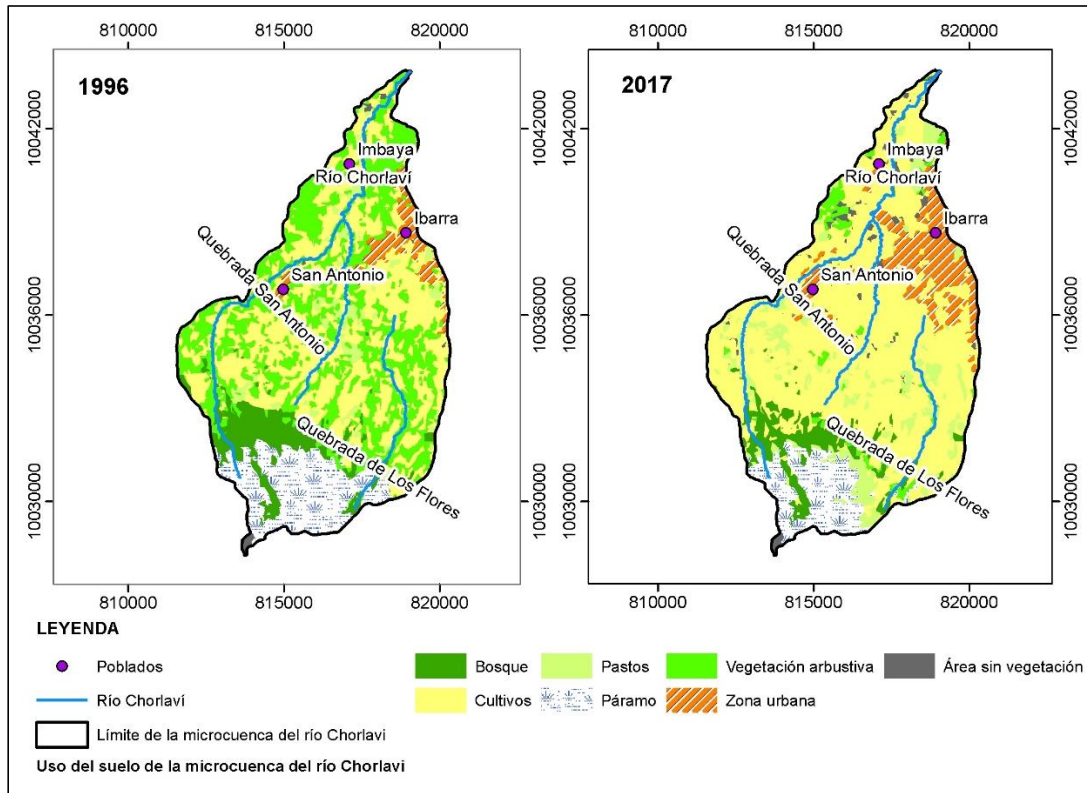


Figura 10. Uso del suelo de la microcuenca del río Chorraví año 1996 y 2017.

3.2.4.5 Microcuenca del río Tahuando período 1996 y 2017

Se delimitó el paisaje de la microcuenca del río Tahuando y se estableció el mapa de uso de suelo de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo para cada área delimitada. (Figura 11).

3.2.4.6 Microcuenca del río Alambi período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Alambi y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 12).

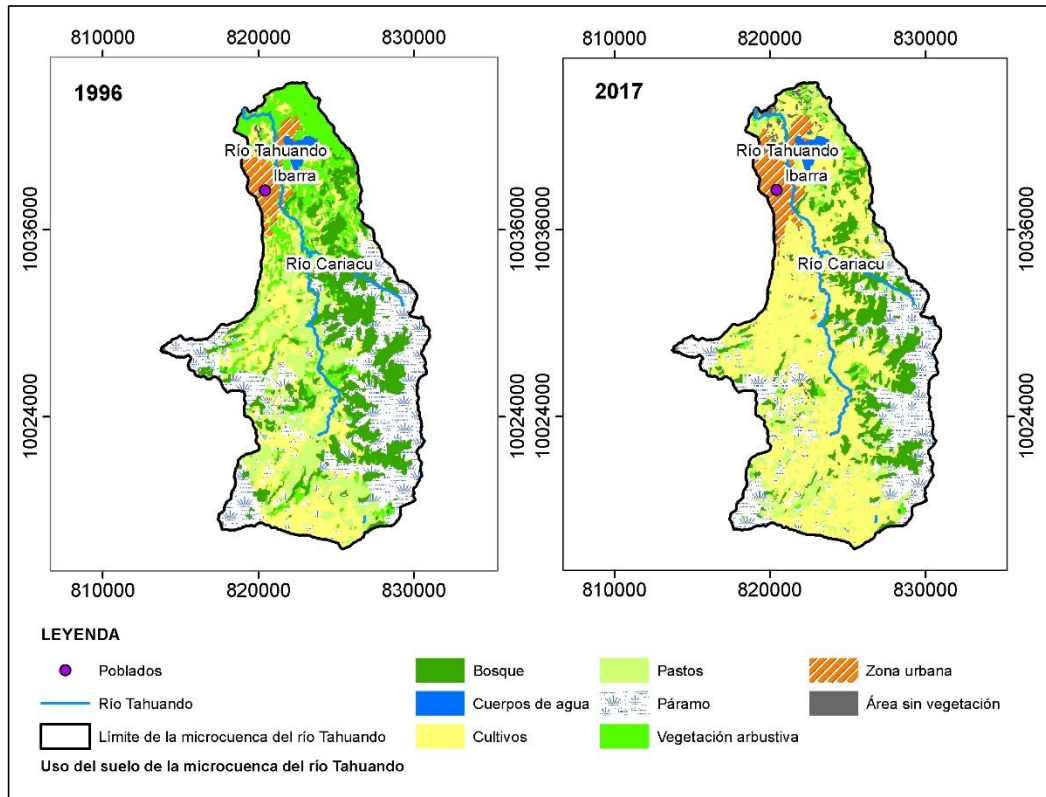


Figura 11. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Tahuando años 1996 y 2017.

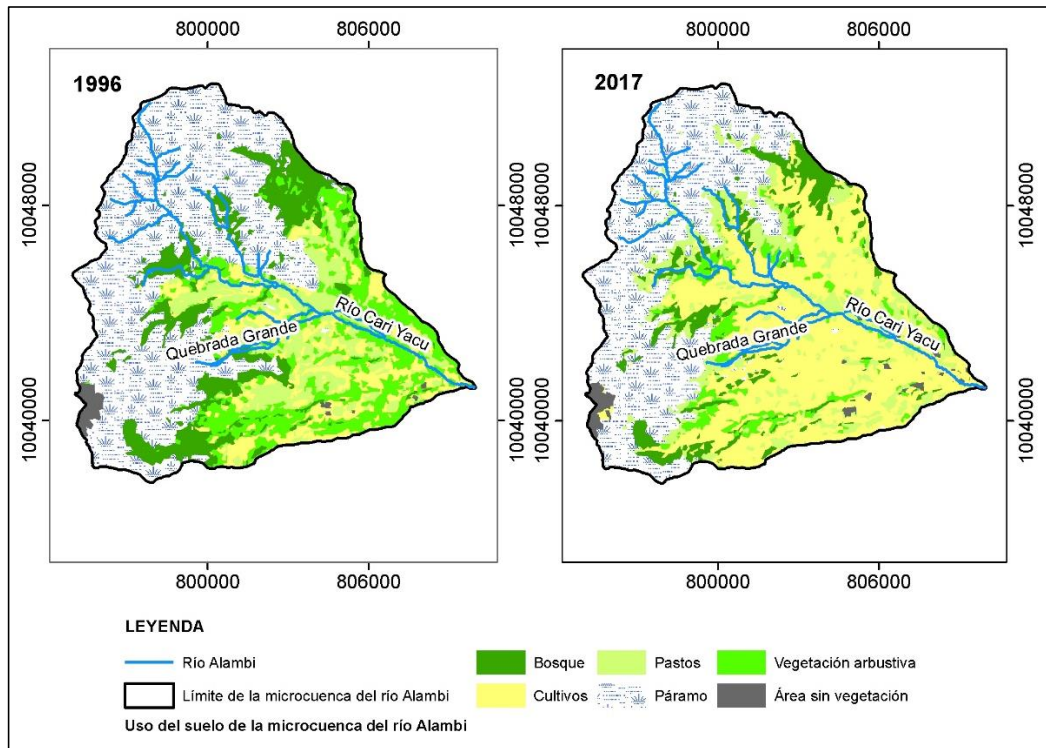


Figura 12. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Alambi años 1996 y 2017.

3.2.4.7 Microcuenca del río Blanco período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Blanco y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo (Figura 13).

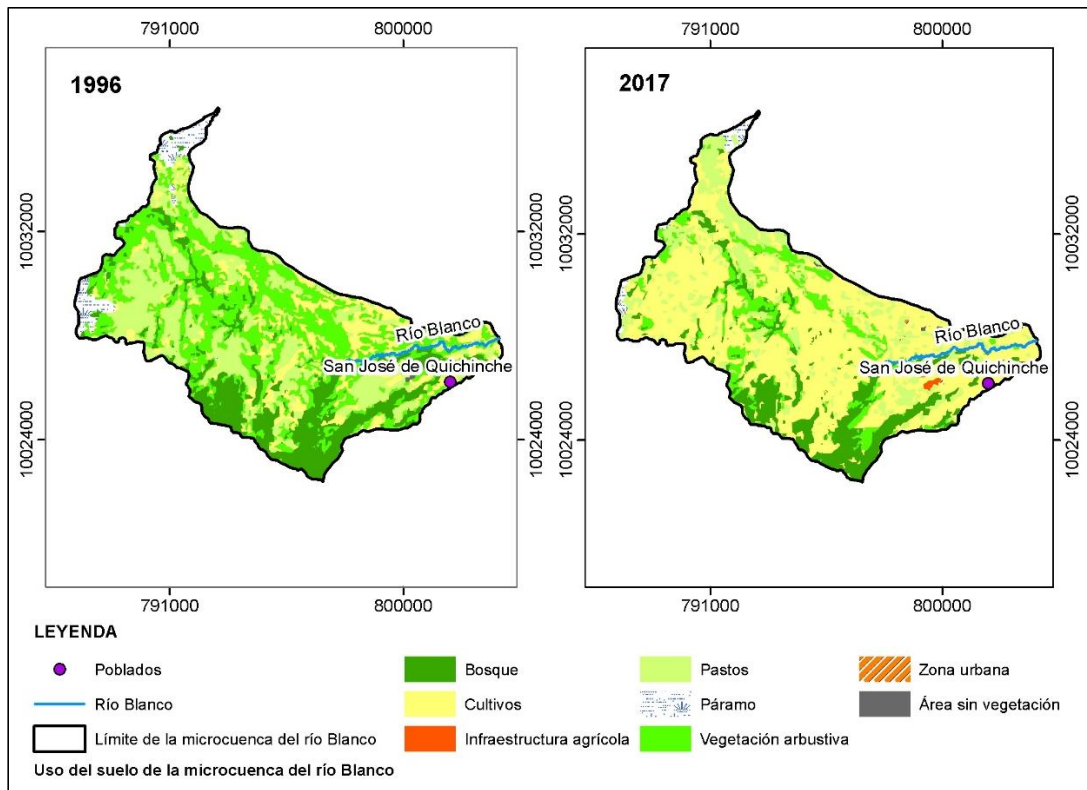


Figura 13. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Blanco años 1996 y 2017.

3.2.4.8 Microcuenca del río Pichaví período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Pichaví y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 14).

3.2.4.9 Microcuenca del río Yanayacu período 1996 y 2017

Se delimitó la microcuenca del río Yanayacu y se estableció el mapa de uso de suelo para los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask (Figura 15).

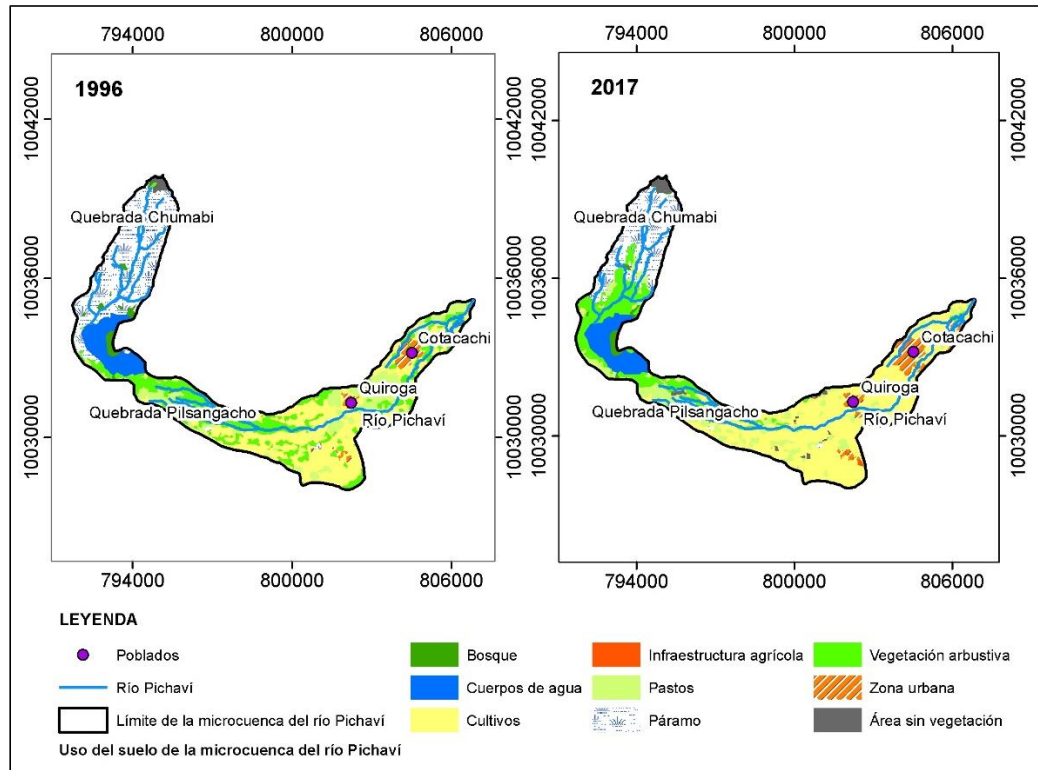


Figura 14. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Pichavi años 1996 y 2017.

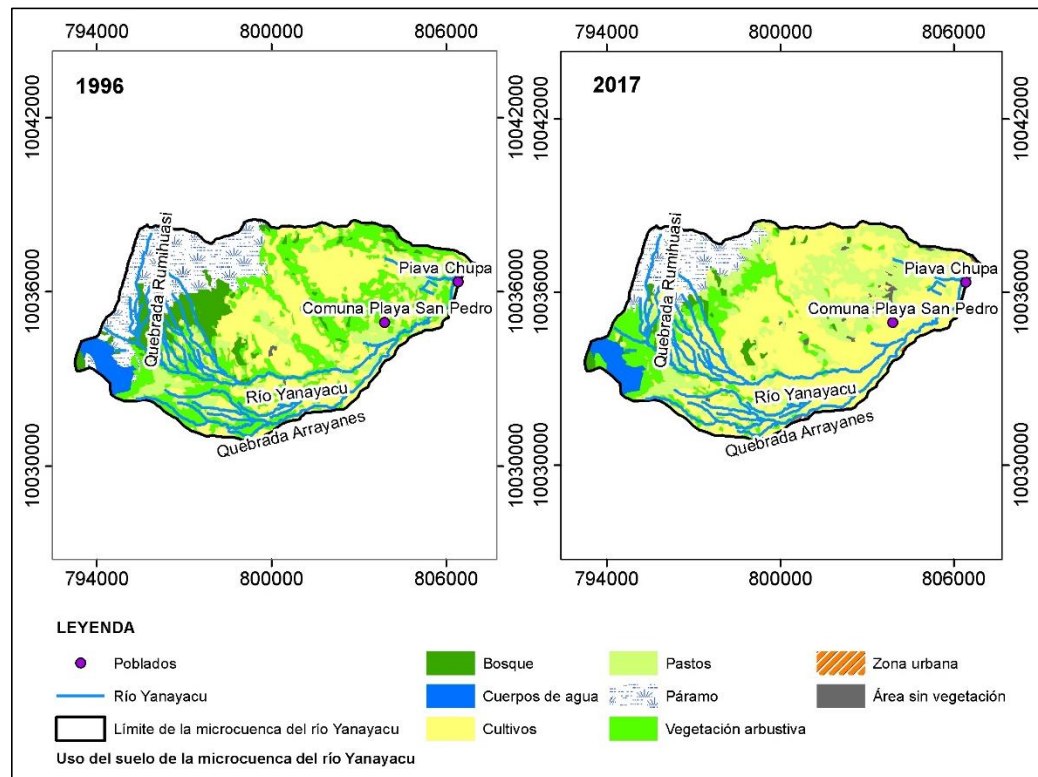


Figura 15. Delimitación y uso del suelo de la microcuenca del río Yanayacu años 1996 y 2017.

3.2.4.10 Quebrada del río Yanayacu período 1996 y 2017

Se delimitó la quebrada del río Yanayacu y se estableció el mapa de uso de suelo para la microcuenca de los años 1996 y 2017. Mediante la herramienta extract by mask en ArcGIS se procedió a extraer del raster de uso de suelo con los datos obtenidos a partir de la determinación del cambio de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi para el año 1996 y 2017 (Figura 16).

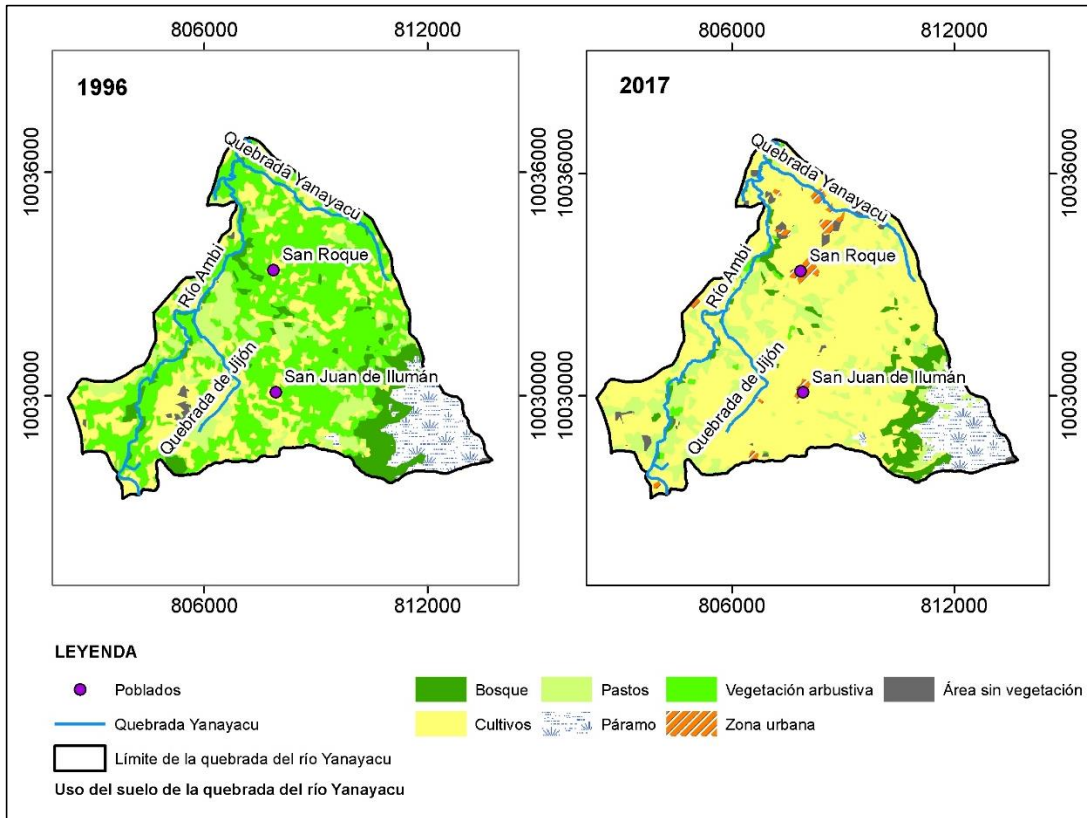


Figura 16. Delimitación y uso del suelo de la quebrada del río Yanayacu años 1996 y 2017.

3.2.5 Determinación de las métricas de paisaje para los paisajes establecidos en la subcuenca del río Ambi

Una vez finalizado la extracción de los respectivos Raster de las microcuencas se procedió a ingresar los datos en el programa estadístico Fragstat para el cálculo de las categorías métricas de superficie, área, densidad y variabilidad que correspondió al número de parches (NP) y área media del parche (AMN). Cabe recalcar que para poder ingresar los valores al programa Fragstat es necesario trabajar con imágenes en formato TIF o en formato IMG.

3.3 Materiales y equipos

En esta sección se presentan los materiales y equipos empleados para la investigación.

Materiales

- a) Cartas topográficas digitales del IGM a escala 1:50.000
- b) Coberturas digitales del Sistema Nacional de Información a escala 1:50.000
- c) Imágenes de los satélites: LANDSAT y ASTER de los años 1996, 2007 y 2017.
- d) Modelo digital del terreno (SRTM 30m)
- e) Software ArcGIS 10.6
- f) Software QGIS 3.8
- g) Libretas de campo

Equipos

- a) Navegador GPS
- b) Cámara fotográfica
- c) Computador portátil
- d) Vehículo

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cambios del paisaje de la Subcuenca del Río Ambi

En la cuantificación de cambios de uso de suelo de la subcuenca del río Ambi se obtuvo la superficie en hectáreas para cada cobertura. De esta manera se conoció el porcentaje de variación de las mismas y el número de hectáreas que se modificaron.

4.1.1. Evaluación y validación de la clasificación multitemporal mediante la matriz de contingencia y el índice de Kappa

La matriz de contingencia para la clasificación supervisada de la imagen LANDSAT OLI-8 indica los valores calculados en columnas por el usuario y en filas los valores calculados como predicción por el software. En campo se registró 45 puntos de uso de suelo que mediante la herramienta Extract multi values to point se obtuvo el campo de predictibilidad en relación al raster de cobertura del año 2017. La herramienta frequency determinó la frecuencia entre los puntos levantados y la predictibilidad. Finalmente, la herramienta pivot determinó los valores de la matriz (Tabla 11).

Tabla 11. Puntos de validación de categorías de uso de suelo del año 2017 coordenadas WGS 1984 UTM Z17S.

Categoría	Elevación	X	Y
Área sin vegetación	2 119	821621	10049107
	1 787	821067	10049565
	1 833	819399	10045451
	4 649	795249	10039550
	4 459	813856	10028549
Bosque	3 135	797730	10034972
	3 167	793186	10033693
	3 365	815557	10025916
	3 209	810804	10027488
	3 582	804052	10018135
Cuerpos de agua	2 189	822348	10041121
	2 189	823077	10041116
	3 059	794306	10032751
	2 662	808790	10022854
	2 662	809744	10022637

	2 690	816195	10032932
	2 520	802086	10032494
Cultivos	2 375	806692	10034304
	2 838	809746	10026225
	2 852	805560	10021103
	2 570	802033	10029176
	2 658	799820	10026287
Infraestructura agrícola	2 667	799459	10026079
	2 691	813039	10020885
	2 689	813181	10020657
	3 712	794851	10035777
	3 803	828767	10029628
Páramo	3 899	815243	10027071
	3 721	818427	10025480
	3 730	806209	10016622
	1 842	818847	10044783
	2 744	816034	10032744
Pastos	2 986	795596	10032525
	2 598	819826	10032289
	3 043	794012	10030856
	2 219	823972	10041341
	2 329	821848	10037304
Vegetación arbustiva	2 289	808203	10039546
	2 297	807968	10037538
	3 247	794942	10033648
	2 204	819865	10039129
	2 410	809847	10036525
Zona urbana	2 449	804301	10033094
	2 547	804840	10025401
	2 698	812714	10021754

Se encontró valores para la categoría 1 (Área sin vegetación) de 5 en usuario y 3 en predicción; en la categoría 2 (Zona urbana) un valor de 5 en usuario y 5 en la predicción; en la categoría 3 (Bosque) 5 en usuario y 3 en predicción; en la categoría 4 (Cultivos) un valor de 5 en usuario y 12 en la predicción; en la categoría 5 (Pastos) un valor de 5 en usuario y 5 en predicción; categoría 6 (Vegetación arbustiva) un valor de 5 en usuario y 3 en predicción; en la categoría 7 (Cuerpos de agua) un valor de 5

usuario y 5 en predicción; categoría 8 (Infraestructura agrícola) un valor de 5 para usuario y 4 para predicción y para la categoría 9 (Páramo) un valor de 5 para usuario y 5 para predicción (Tabla 12).

El índice de Kappa indica que la clasificación supervisada es significativa, ya que el valor es de 0.73 que se clasifica en categoría de considerable (los valores del índice menores a 0,6 se clasifican en categoría moderada), en concordancia entre la predicción del software y el usuario, validando los resultados del análisis multitemporal en los periodos de estudio (Tabla 13).

Tabla 12. Matriz de contingencia de clasificación supervisada de la imagen Landsat 8, 2017.

CLASE	Datos verdaderos									C.G	Precisión del Producto
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	100
2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	100
3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	100
4	1	0	1	4	3	2	0	1	0	12	33.333
5	1	0	0	1	2	1	0	0	0	5	40
6	0	0	1	0	0	2	0	0	0	3	66.667
7	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	100
8	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4	100
9	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	100
V.G	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45	
Precisión del Usuario	60	100	60	80	40	40	100	80	1	0	0
Exactitud General	73.3										
Índice Kappa	0.73										Fuerza de la concordancia Considerable

Tabla 13. Valoración del coeficiente kappa.

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch, 1977.

4.1.2. Cambios del paisaje para el período 1996 - 2007.

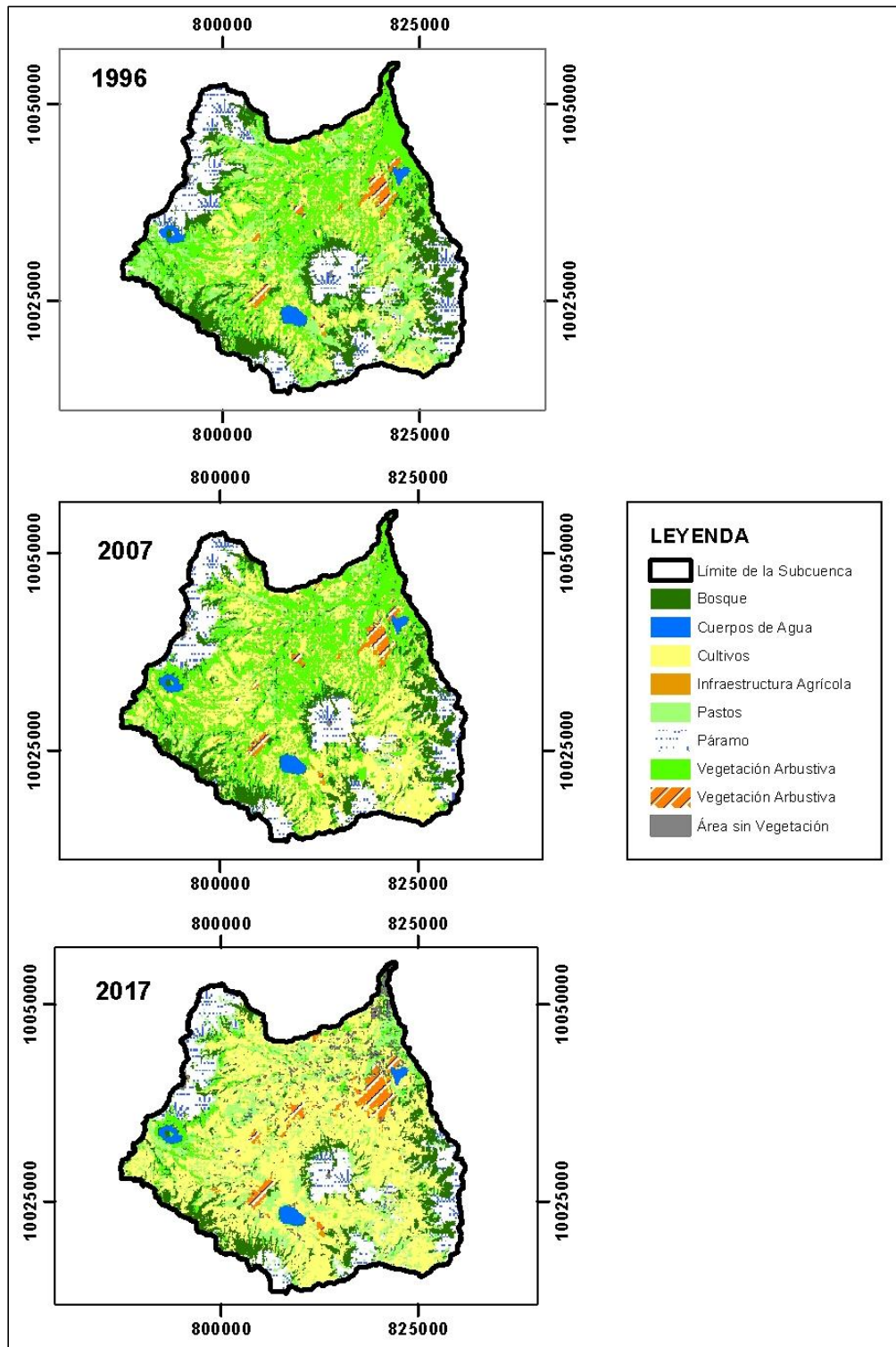


Figura 17. Cambios del paisaje en la subcuenca del río Ambi años 1996, 2007, 2017.

El paisaje más distintivo para el período 1996 a 2007, fue el aumento de cultivos de 24.22% a 36.99% que representó un cambio de 27 251.33 a 41 623.11 hectáreas. La disminución de la cobertura bosque de 13.73% a 10.39%, se observó un cambio de 15 450.6 a 11 694.24 hectáreas. Los páramos y pastos se redujeron por lo que para el año 2007 se estableció cambios de 20.21% a 16.48% para páramo y 11.89% a 3.42% para pastos, cabe recalcar que los páramos son fundamentales en la conservación del recurso hídrico. La vegetación arbustiva, zona urbana e infraestructura agrícola incrementaron su paisaje en consideraciones poco significativas (Figura 17 y Tabla 14).

Tabla 14. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007.

Coberturas	Año 1996		Año 2007	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Area sin Vegetación	526.75	0.47	676.42	0.60
Bosque	15 450.6	13.73	11 694.24	10.39
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20	1 332.88	1.18
Cultivos	27 251.33	24.22	41 623.11	36.99
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03	53.54	0.05
Páramo	22 741.03	20.21	18 547.71	16.48
Pastos	13 384.45	11.89	3 852.97	3.42
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41	32 676.41	29.04
Zona Urbana	2 062.96	1.83	2 072.05	1.84
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

En la subcuenca del río Ambi para el periodo 1996-2007, el 77.52 % del territorio permaneció sin cambio alguno, mientras que el 22.48% presentó cambios en el paisaje, de esta forma se estableció la transición del mismo durante el período. El bosque disminuyó en un 6.80%, de este porcentaje se observó que el 3.23% modificó su vegetación de bosque a cultivos, el 2.73% de bosque a pastos y el 0.03% de bosque a zona urbana. La vegetación arbustiva disminuyó en 2.66 %. De este porcentaje el 1.71% se reemplazó por cultivos y generó un declive de la vegetación arbustiva.

Se obtuvo una ganancia de 14.64% de cultivos, de este valor el 3.23% de bosque experimentó un cambio de cobertura a cultivos, el 8.56% se modificó de pastos a cultivos y el 1.71% de vegetación arbustiva cambió a cultivos entre los registros que

sobresalen en el estudio. Igualmente los pastos poseen una ganancia del 3.58% de cobertura, de este porcentaje el 2.22% corresponde al cambio de cultivos a pastos (Figura 18 y Tabla 15).

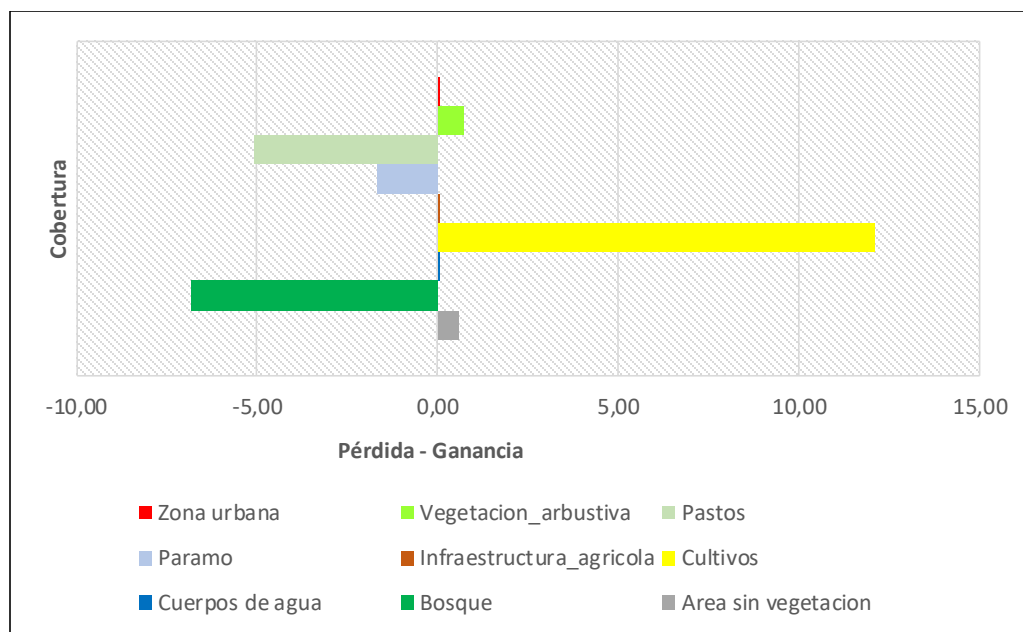


Figura 18. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007.

Tabla 15. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996 – 2007.

Cobertura	2007									Total 1996	Pérdida
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU		
1996											
ASV	0.65	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.87	0.21
BSQ	0	35.65	0	3.23	0	0	0.79	2.73	0.3	42.46	6.80
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0.28	0.0029
CTV	0.24	0	0	8.52	0.02	0	2.22	0	0	11.03	2.51
IEA	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0.09	0
PM	0.01	0	0	0.91	0	15.79	0.05	0.66	0	17.45	1.65
PST	0.06	0	0	8.56	0.006	0	2.46	0	0.005	11.11	8.64
VA	0.44	0	0	1.71	0	0	0.49	13.69	0.001	16.36	2.66
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.35	0
Total 2007	1.44	35.66	0.27	23.17	0.13	15.80	6.04	17.10	0.39	100	22.48
Ganancia	0.78	0	0	14.64	0.04	0	3.58	3.40	0.04	22.48	

4.1.3. Cambios del paisaje para el período 2007 - 2017.

En el intervalo de los años 2007 al 2017 se evidenció cambios de paisaje predominantes en la subcuenca. Los cultivos aumentaron de 41 623.11 a 56 957.45 hectáreas que significó el cambio de 36.99% a 50.62% en el paisaje. Los pastos aumentaron de 3.42% a 13.59% para el año 2017 representando 15 290.74 hectáreas. Por otra parte, el bosque y páramos perdieron paisaje de forma paulatina por lo que para el año 2017 se estableció 9.60% para bosques y 15.28% para páramo. De igual forma, la vegetación arbustiva disminuyó de forma drástica de 32 676.41 a 5 087.44 hectáreas que significó el cambio de 29.04% a 4.52%. La variación menos significativa correspondió a cuerpos de agua en un 0% y consolidó la permanencia de la cobertura (Tabla 16).

Tabla 16. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007-2017.

Coberturas	Año 2007		Año 2017	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Area sin Vegetación	676.42	0.60	2 168.73	1.93
Bosque	11 694.24	10.39	10 797.0	9.60
Cuerpos de Agua	1 332.88	1.18	1 332.88	1.18
Cultivos	41 623.11	36.99	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	53.54	0.05	72.45	0.06
Páramo	18 547.71	16.48	17 195.45	15.28
Pastos	3 852.97	3.42	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	32 676.41	29.04	5 087.44	4.52
Zona Urbana	2 072.05	1.84	3 626.29	3.22
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

En el periodo 2007 al 2017 en la subcuenca del río Ambi, el 75.99% del territorio se mantuvo sin modificaciones, mientras que el 24.01% representó cambios en el paisaje por lo que se estableció la matriz de transición y se analizó sus cambios. El bosque disminuyó en 2.37%. El 1.24% de cobertura de bosque cambió a cultivos, el 0.68% a pastos y el 0.44% a vegetación arbustiva. De igual importancia, el 3.95% de cobertura de cultivos se perdió de los cuales el 3.43% se transformó a pastos. Se registró pérdida de vegetación arbustiva en 12.88%, entre este porcentaje el 6.56% de vegetación arbustiva cambio a cultivos y el 5.30% a pastos.

Los cultivos aumentaron en un 11.72%, de este porcentaje el 6.56% de vegetación arbustiva cambió a cultivos, el 3.90% de pastos a cultivos y el 1.24% de bosque a cultivos. De igual manera los pastos poseen una ganancia de 10.30% de paisaje, de este porcentaje el 5.30% cambió de vegetación arbustiva a pastos, el 3.43% de cultivos a pastos y el 0.87% pertinente a la transformación de páramo a pastos (Figura 19 y Tabla 17).

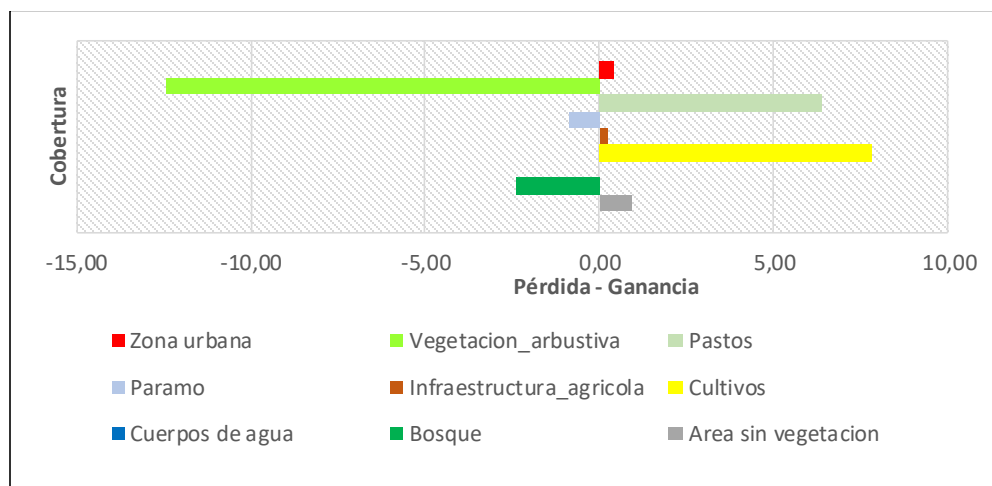


Figura 19. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.

Tabla 17. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.

Cobertura	2017										Total 2007	Pérdida
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU			
2007												
ASV	1.41	0	0	0	0	0	0	0	0,02		1,44	0,03
BSQ	0	33.28	0	1.24	0	0	0.68	0.44	0		35.66	2,37
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0		0,27	0
CTV	0	0	0	19.22	0.23	0	3.43	0	0,28		23.17	3,95
IEA	0	0	0	0	0.12	0	0	0	0		0,13	0
PM	0	0	0	0	0	14.92	0.87	0	0		15.80	0,88
PST	0	0	0	3.90	0	0	2.12	0	0		6.04	3,92
VA	0.92	0	0	6.56	0	0	5.30	4.21	0,07		17.10	12,88
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0,39		0,39	0
Total 2017	2.34	33.29	0.27	30.95	0.36	14.92	12.42	4.66	0,79		100	24.01
Ganancia	0.93	0	0	11.72	0.23	0	10.30	0.44	0,39		24.01	

4.1.4. Cambios del paisaje para el período 1996 - 2017.

Se determinó dos cambios de paisaje de mayor relevancia durante el periodo 1996 al 2017. El bosque de 15 450.6 hectáreas disminuyó en 10 797.0 hectáreas, esto representó el cambio de 13.73% a 9.60% de paisaje. Los cultivos aumentaron del 24.22% al 50.62% y significó 56 957.45 hectáreas para el año 2017. La vegetación arbustiva de 29 722.67 hectáreas disminuyó a 5 087.44 hectáreas y representó el 4.52% para el año 2017. El páramo disminuyó de 20.21% a 15.28% y representó el cambio de 22 741.03 hectáreas a 17 195.45 hectáreas de paisaje para el año 2017. Para zona urbana, cuerpos de agua e infraestructura agrícola alcanzó cambios pocos significativos (Tabla 18).

Tabla 18. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2017.

Coberturas	Año 1996		Año 2017	
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Area sin Vegetación	526.75	0.47	2 168.73	1.93
Bosque	15 450.6	13.73	10 797.0	9.60
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20	1 332.88	1.18
Cultivos	27 251.33	24.22	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03	72.45	0.06
Páramo	22 741.03	20.21	17 195.45	15.28
Pastos	13 384.45	11.89	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41	5 087.44	4.52
Zona Urbana	2 062.96	1.83	3 626.29	3.22
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

Durante el periodo 1996-2017, el 64.19 % del territorio de la subcuenca del río Ambi permaneció sin cambios, mientras que el 35.81 % presentó cambios en la cobertura vegetal. El tipo de cobertura de mayor pérdida es el bosque con el 9.17%. De tal manera, se analizó que el 5.11% cambió su vegetación de bosque a cultivos, el 2.58% de bosque a pastos y el 1.42% de bosque a vegetación arbustiva.

La vegetación arbustiva disminuyó 13.48 %. Los cultivos con 7.64% reemplazó a la vegetación arbustiva y provocó un declive del paisaje y el 4.39% de la vegetación arbustiva del año de 1996 cambió a pastos. Del 8.38% de la cobertura de pastos el

8.25% se perdió y significó el aumento de cultivos por competencia de las actividades antrópicas presentes en la subcuenta del río Ambi.

Se obtuvo una ganancia de 21.93% de cultivos, el 5.11% de bosque cambió de paisaje a cultivos, el 8.25% disminuyó de pastos a cultivos y el 7.64% de vegetación arbustiva a cultivos entre los registros de mayor significancia. De igual manera los pastos poseen una ganancia del 9.69% de paisaje, de este porcentaje el 2.58% corresponde al cambio de bosque a pastos, 4.39% de vegetación arbustiva a pastos y el 1.41% referente a la pérdida de páramo a pastos (Figura 20 y Tabla 19).

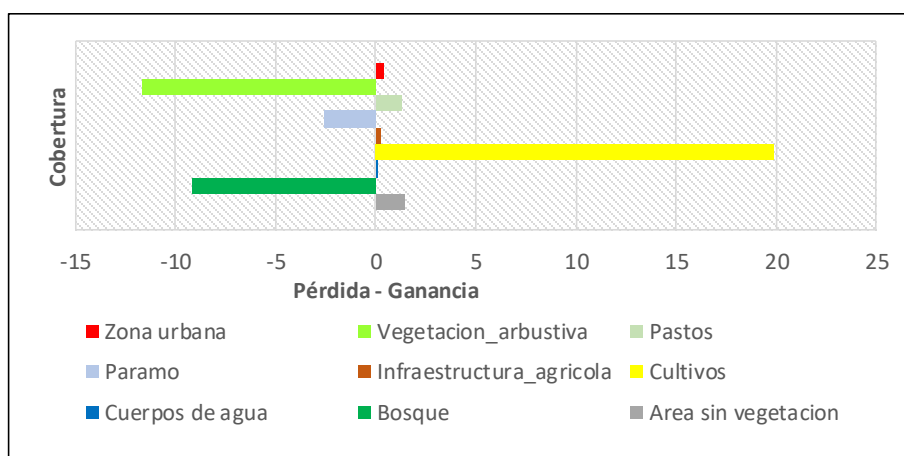


Figura 20. Cambios del paisaje de la subcuenta del río Ambi período 1996 – 2017.

Tabla 19. Matriz de transición de cambio del paisaje período 1996 – 2017.

Cobertura	2017									Total 1996	Pérdida
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU		
1996											
ASV	0.64	0	0	0.18	0	0	0.02	0	0.01	0.87	0.22
BSQ	0	33.28	0	5.11	0	0	2.58	1.42	0.03	42.46	9.17
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0.28	0
CTV	0.23	0	0	9.01	0.22	0	1.27	0	0.27	11.03	2.02
IEA	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0.09	0
PM	0.02	0	0	0.73	0	14.92	1.41	0.35	0	17.45	2.52
PST	0.06	0	0	8.25	0.04	0	2.73	0	0.02	11.11	8.38
VA	1.36	0	0	7.64	0	0	4.39	2.87	0.07	16.36	13.48
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.35	0
Total 2017	2.34	33.29	0.27	30.95	0.36	14.92	12.42	4.66	0.79	100	35.81
Ganancia	1.70	0	0	21.93	0.27	0	9.69	1.78	0.43	35.81	

Resultados similares se determinó el estudio de análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1990–2000 en la cual a través del análisis derivado de la matriz de tabulación llevó a conclusiones erróneas sobre la dinámica del territorio debido a que ésta es abrumadoramente superior a los cambios producidos, ya que en la zona la superficie que se mantuvo estable fue alrededor del 92%, por otra parte, hay que tomar en cuenta que, en la mayoría de los paisajes, la superficie de no cambio es lo que domina en el medio ambiente (López y Plata, 2009).

En este sentido, se analizó los datos fuera de la diagonal principal ya que permitió identificar patrones dominantes y sistemáticos presentes en los análisis de cambios. Analizada la tabla de esta forma, se observó que en la zona ocurrieron 32 transiciones entre categorías (ganancias y pérdidas), y excepto lo urbano que presentó solamente ganancias, las otras categorías sufrieron intercambios, por lo que de esta manera se observa que en realidad el área en estudio presenta una dinámica de cambio muy considerable.

Resultados diferentes se registraron en el estudio de cambio de uso de suelo en el azolvamiento del embalse “La Esperanza” Manabí-Ecuador el cuál el cambio de uso de suelo ha provocado la degradación y transformación de muchos ecosistemas de las microcuencas aportantes al embalse “La Esperanza”. La labor de las actividades agropecuarias en la zona son un factor significativo de cambio, el 81 815.68 ha de suelo están dedicadas en un 70% a la arboricultura tropical y el 30% restante corresponde a bosque intervenido producto de la deforestación. En la zona de estudio, entre las microcuencas aportantes al embalse, la deforestación estimada para el período 1994-2015 es de 733.08 ha/año o equivalente a un 0.091% anual (Velásquez, Calderón, Urdánigoca y Cárdenas, 2016).

4.2. Determinación de susceptibilidad a deslizamientos

En la determinación de la susceptibilidad a deslizamiento se obtuvo como resultado modelos cartográficos a cada una de las variables analizadas de forma independiente enfatizando cada una de sus particularidades. Los modelos cartográficos correspondieron a ángulo pendientes, distancia a la falla geológica, distancia a la red hidrográfica, rugosidad del suelo, índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI), aspecto de la pendiente, curvatura, litología, elevación y uso del suelo para los años de 1996 y 2017.

4.2.1. Factores de susceptibilidad reclasificados

Se elaboraron de forma independiente modelos cartográficos de cada una de las variables analizadas, las cuales influyen dentro de la ocurrencia a deslizamientos.

4.2.1.1 Pendientes

En el mapa se estableció que las pendientes entre 25% a 50% denominadas montañoso y 50% a 70% llamado muy montañoso son de alta vulnerabilidad y mayor preponderancia a deslizamientos debido a su alta inclinación en el terreno por lo tanto el riesgo de deslizamiento es de mayor pronunciación, este tipo de pendientes se encontró en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua, Mariano Acosta, Plaza Gutierrez y Ambuquí. Las pendientes para terrenos planos que van desde 0% a 5%, pendientes ligeramente ondulados desde 5% a 12% y pendientes ondulados desde 12% a 25% se establece una baja susceptibilidad a deslizamientos (Figura 21 y Tabla 20).

Tabla 20. Pendientes en el terreno.

Pendiente - Rango	Área (ha)	Porcentaje (%)	Relieve
0 – 5%	28 484.52	25.31	Plano
5 – 12%	21 018.50	18.68	Ligeramente ondulado
12 – 25%	15 990.00	14.21	Ondulado
25 – 50%	19 299.82	17.15	Montañoso
50 – 70%	18 050.41	16.04	Muy montañoso
>70%	9 686.60	8.61	Escarpado
Total	112 529.85	100	

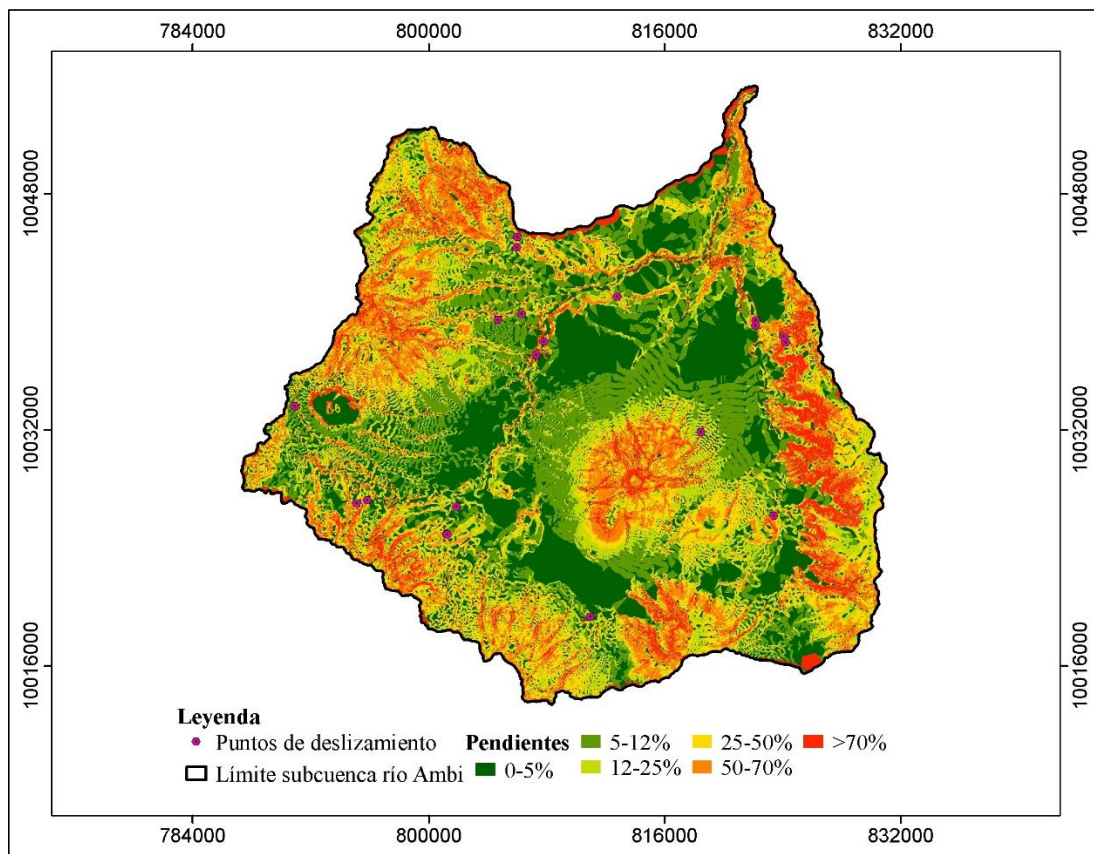


Figura 21. Pendientes de la subcuenca del río Ambi.

4.2.1.2 Distancia a falla geológica

Se evidenció varios puntos de fallas geológicas distribuidas a lo largo de la subcuenca del río Ambi, en relación al área de estudio se determinó que la distancia a 1 km de la falla geológica se pondera una alta probabilidad a deslizamientos debido a su efecto por la cercanía a eventualidades de sismicidad. Sin embargo, para distancias entre 1 km a 2 km y 2 km a 3 km se considera una probabilidad media a deslizamientos en consideración a la falla geológica. De igual importancia, las distancias mayores a 4 km se consideran de baja susceptibilidad a pesar que existen eventualidades registradas a esta distancia.

Para las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Francisco de Natabuela, Quiroga, Cotacachi, Atuntaqui, Otavalo, San José de Quichinche, San Miguel de Ibarra, Angochahua, Selva Alegre se determinó cercanías a la falla geológica, por lo

tanto, debido a su aproximación a la falla geológica se estableció que existe susceptibilidad a deslizamientos en gran magnitud en la subcuenca del río Ambi (Figura 22 y Tabla 21).

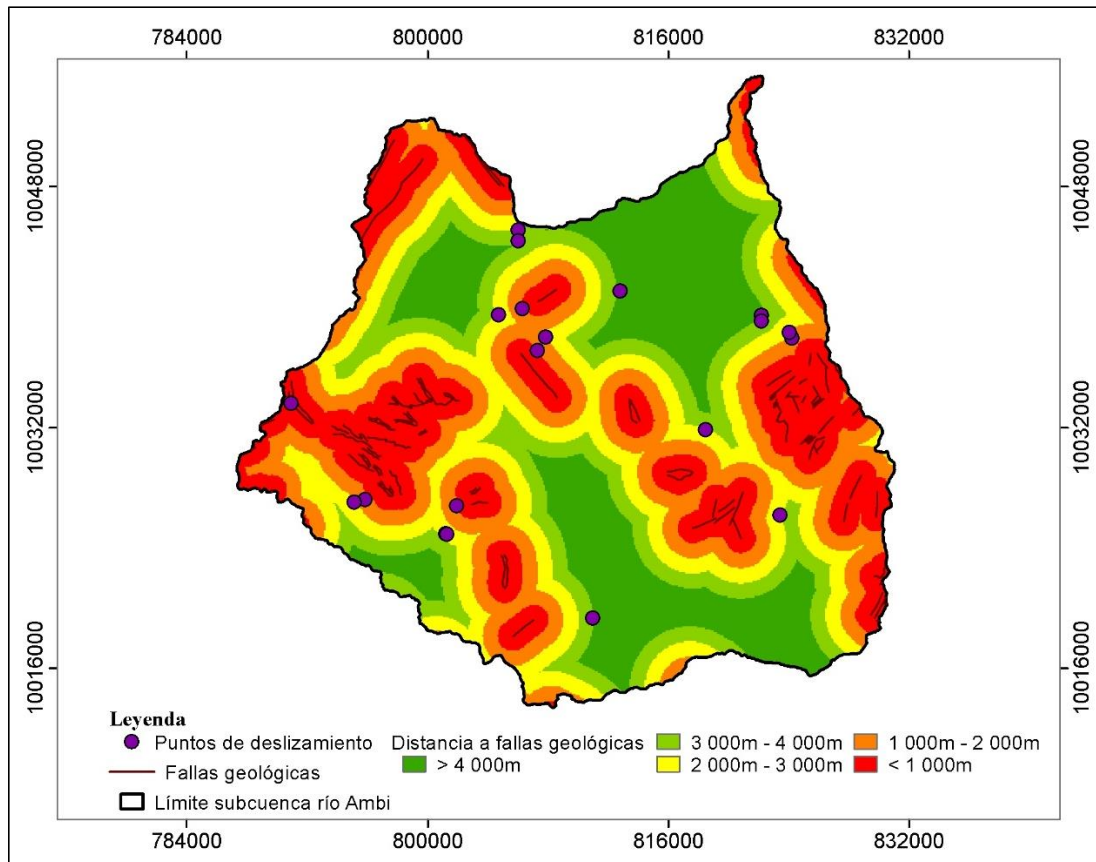


Figura 22. Distancia a la falla geológica de la subcuenca del río Ambi.

Tabla 21. Área de distancia a la falla geológica.

Distancia a la falla geológica	Área (ha)	Porcentaje (%)
>4 000m	25 433.45	22.60
3 000m – 4 000m	17 401.51	15.46
2 000m – 3 000m	22 027.53	19.58
1 000m – 2 000m	23 921.45	21.26
<1 000m	23 741.27	21.10
Total	112 525.21	100

4.2.1.3 Distancia a la red hídrica

En la determinación de distancias con afinidad a la red hídrica se estableció la susceptibilidad, se destacó que a una distancia de 200 m en relación a la red de drenaje existe una alta probabilidad a deslizamientos debido a los registros establecidos en salidas de campo donde se corroboró su cercanía con la red hídrica. Para distancias de 200 m a 400 m y 400 m a 600 m se estableció una susceptibilidad media a deslizamientos mientras que para distancias de 600 m a 800 m y mayores de 800 m se califica susceptibilidades bajas (Figura 23).

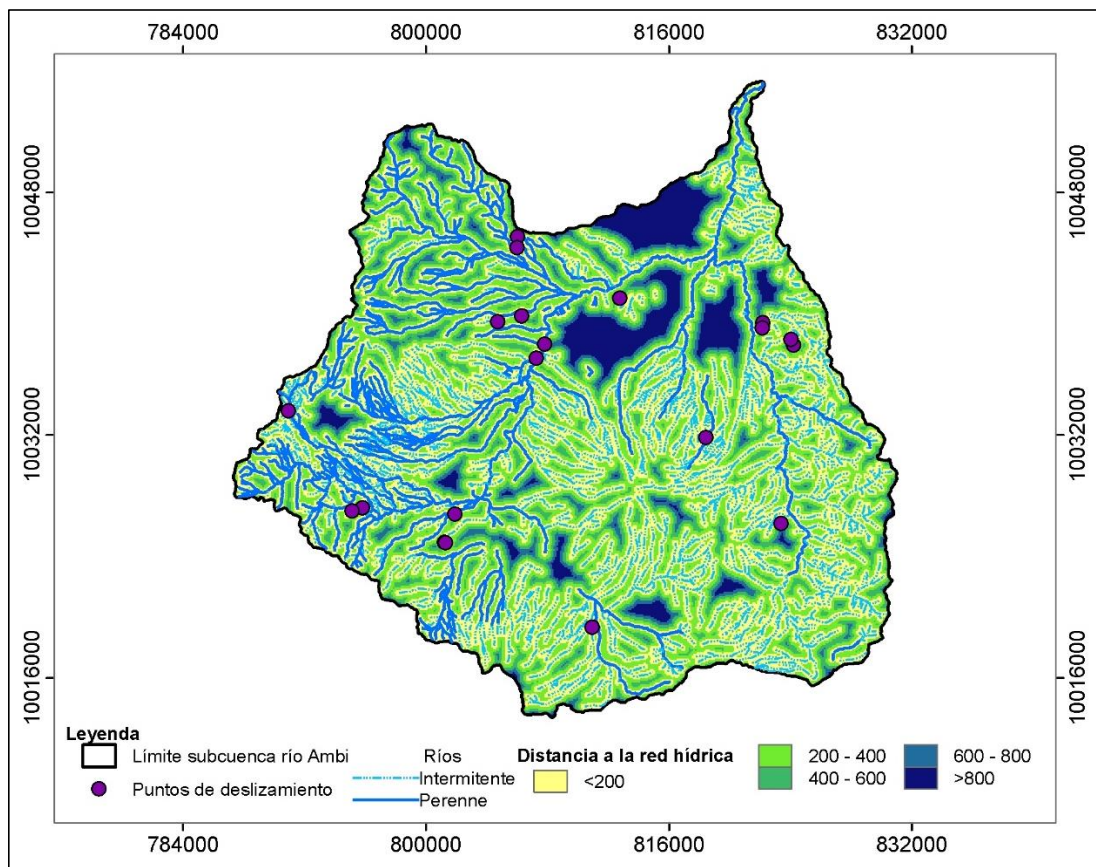


Figura 23. Distancia a la red hídrica de la subcuenca del río Ambi.

La subcuenca del río Ambi presentó una red de drenaje pronunciada por toda su área, por lo tanto, existe una gran susceptibilidad a deslizamientos mientras más contiguo se encuentre el punto de la red hídrica. Este caso se evidenció en las parroquias de

Cotacachi, Angochau, San José de Minas, San Miguel de Ibarra, San Pablo e Imantag que existe un registro de deslizamientos cercano a la red hídrica, por tal motivo se consideró de importancia el análisis establecido de susceptibilidad (Tabla 22).

Tabla 22. Área de distancia a la red hídrica.

Distancia a la red hídrica	Área (ha)	Porcentaje (%)
< 200m	63 088.22	56.09
200m - 400m	28 598.07	25.43
400m - 600m	10 880.35	9.67
600m - 800m	4 233.66	3.76
> 800m	5 679.63	5.05
Total	112 479.93	100

4.2.1.4 Rugosidad del suelo

Correspondiente a la rugosidad del suelo se determinó que la susceptibilidad a deslizamientos que se encuentra en un rango de 0.55 a 1 corresponde a una alta probabilidad a deslizamientos. Sin embargo, cabe recalcar que valores que van de 0.48 a 0.55 corresponden a susceptibilidad media y valores menores de 0.45 son considerados suelos lisos por lo que su susceptibilidad es baja. Este resultado refleja la relación directa de la rugosidad de la superficie con complejidad del terreno.

Las parroquias de Cotacachi, Atuntaqui, San Juan de Ilumán, Angochahua, La Esperanza, Imbaya, San José de Chaltura presentan suelos altamente rugosos. Cuando el suelo es altamente rugoso el agua tiende a escurrirse rápidamente desde pendientes suaves y regulares (Figura 24 y Tabla 23).

Tabla 23. Área de rugosidad del suelo en la subcuenca del río Ambi.

Rugosidad del suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
0.009-0.34	6 484.87	5.80
0.34-0.44	22 557.87	20.17
0.44-0.52	41 158.02	36.81
0.52-0.61	30 482.43	27.26
0.61-0.99	11 137.60	9.96
Total	111 820.79	100

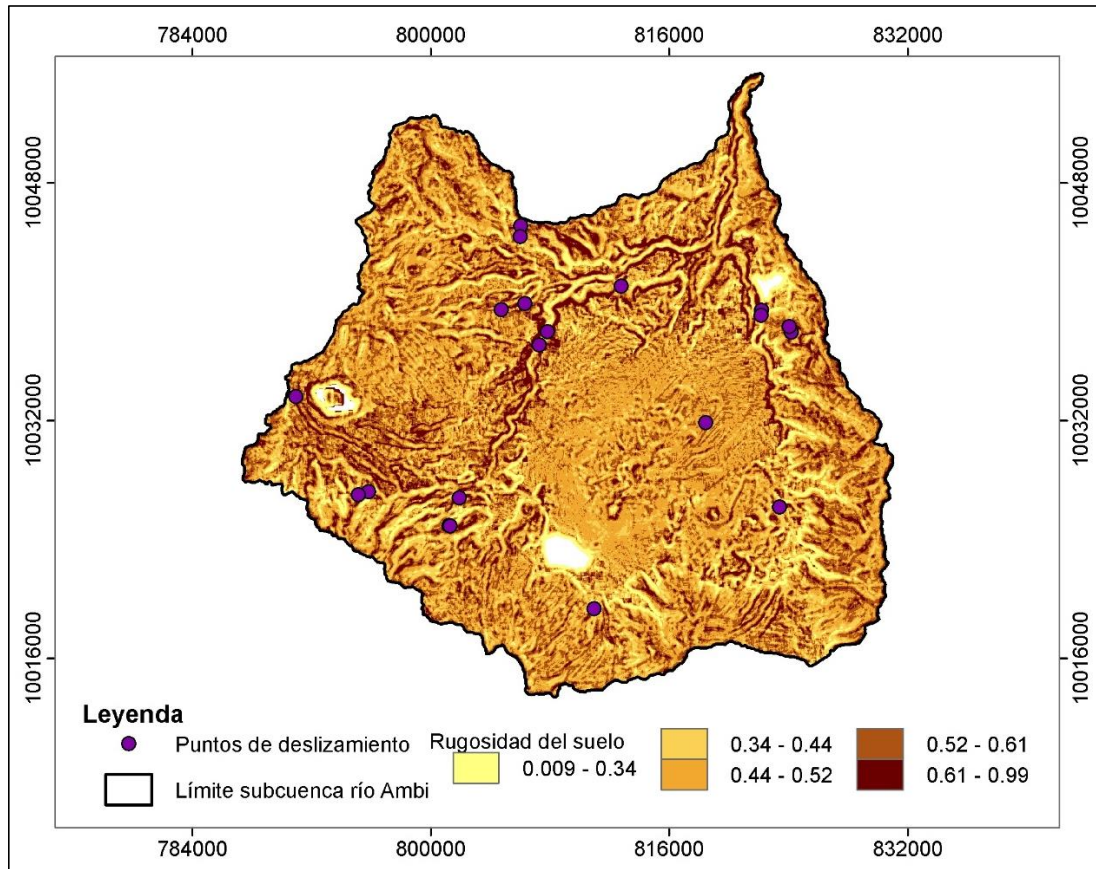


Figura 24. Rugosidad del suelo de la subcuenca del río Ambi.

4.2.1.5 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El NDVI estimó la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. En el mapa de NDVI se contempló que los valores entre -0.39 hasta 0.16 se encuentran con alta densidad de vegetación por lo que son menos propensos a deslizamientos. Correspondiente a la parroquia de San Antonio, Plaza Gutierrez, Cotacachi, Selva Alegre, San José de Quichinche, San Blas, Imantag se identificó que presentan alta densidad de vegetación. Sin embargo, los valores entre 0.62 y 0.99 presentan escasa densidad de vegetación y se encontró especialmente en zonas urbanas del Cantón Ibarra, Cantón Otavalo, Cantón Cotacachi, Cantón Urcuquí, Cantón Antonio Ante (Figura 25 y Tabla 24).

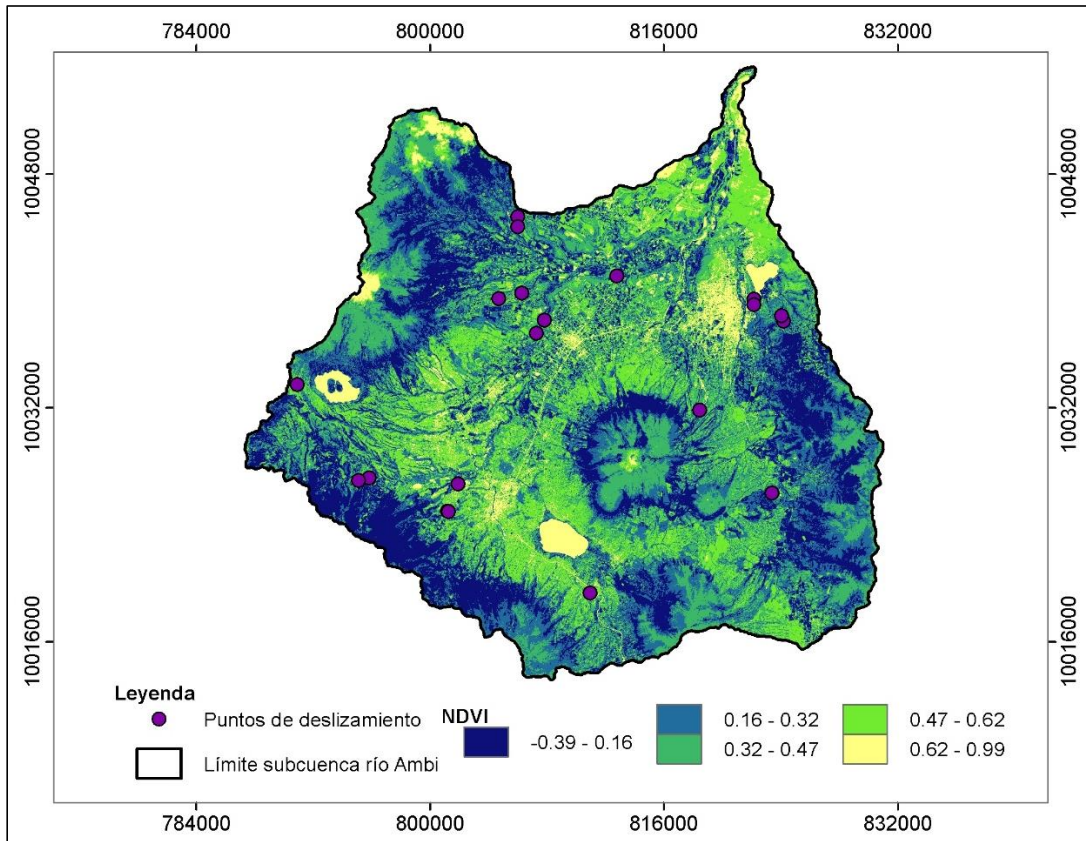


Figura 25. Índice de vegetación de diferencia normalizada de la subcuenca del río Ambi.

Tabla 24. Área del NDVI en la subcuenca del río Ambi.

NDVI	Área (ha)	Porcentaje (%)
-0.39-0.16	25 024.25	22.24
0.16-0.32	29 567.29	26.28
0.32-0.47	29 539.91	26.25
0.47-0.62	21 866.16	19.43
0.62-0.99	6 529.01	5.80
Total	112 526.62	100

4.2.1.6 Aspecto de la pendiente

En el aspecto de la pendiente o de orientación se consideró como punto de importancia en el inicio de un movimiento de pendiente, debido al espacio afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, limitado y definido por la consolidación de los suelos (Figura 26).

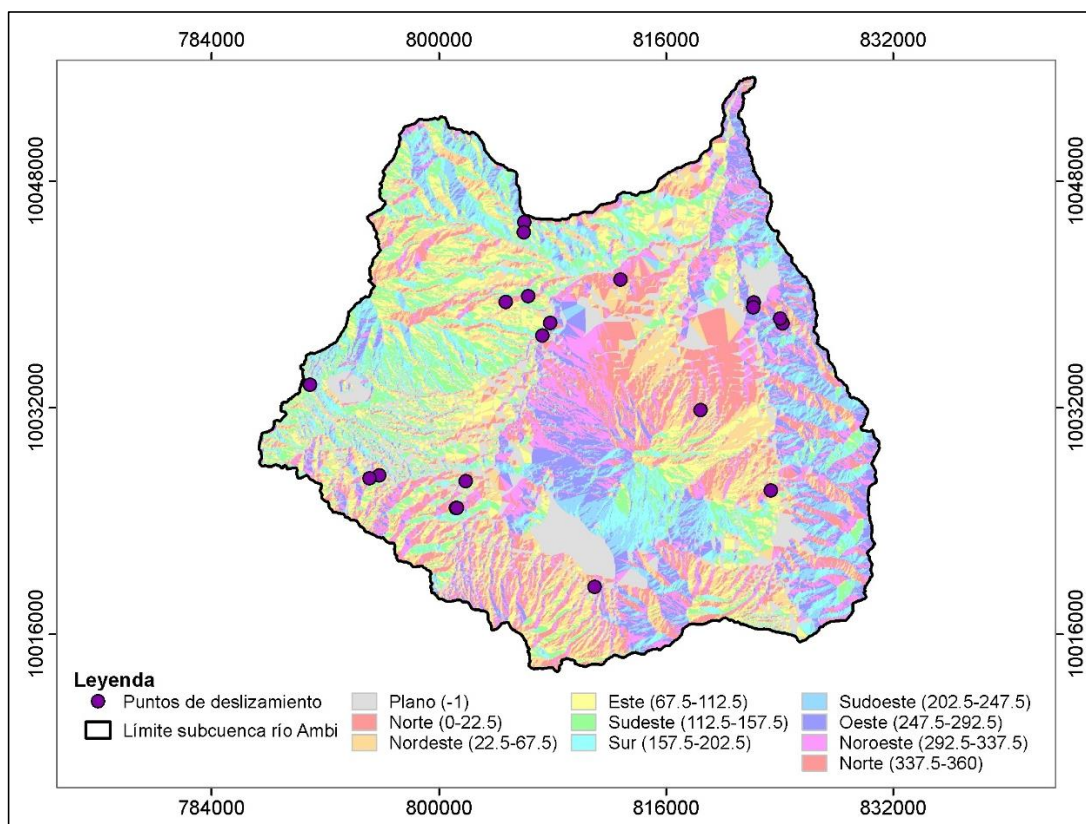


Figura 26. Aspecto de la pendiente de la subcuenca del río Ambi.

4.2.1.7 Curvatura

Para el mapa de curvatura se consideró tres categorías denominadas cóncavas, planas y convexas. Se analizó el mapa de curvatura y se identificó en el volcán Imbabura, volcán Cotacachi, San Blas, Gonzales Suarez, Mariano Acosta la presencia de formas cóncavas y convexas (Figura 27 y Tabla 25).

Tabla 25. Área de curvatura en la subcuenca del río Ambi.

Curvatura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cóncava	11 437.99	10.17
Plana	89 700.48	79.72
Convexa	11 383.16	10.12
Total	112 521.63	100

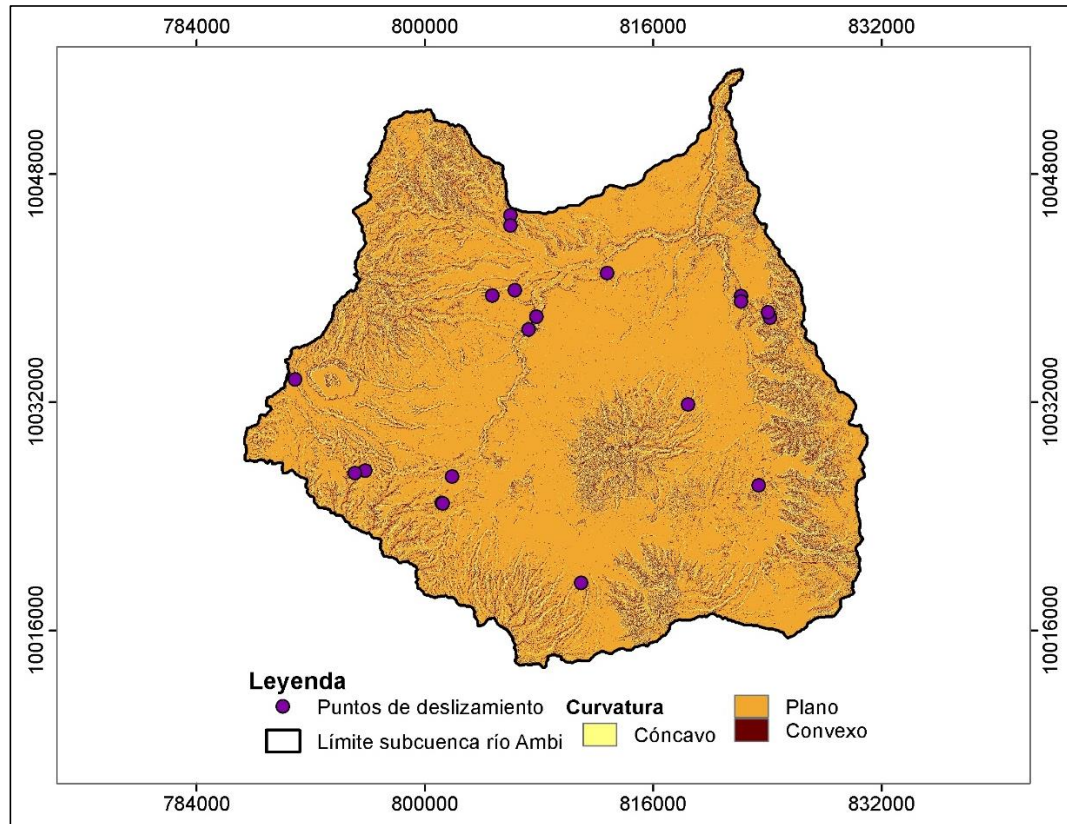


Figura 27. Curvatura de la subcuenca del río Ambi.

4.2.1.8 Elevación

Para el factor elevación se determinó que los deslizamientos ocurridos en la subcuenca del río Ambi se dieron cita entre 2 256m a 2 632m, esta es la elevación de ocurrencia de eventos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la elevación no es considerada como un factor predictor, pero a pequeña escala es importante en la dependencia implícita de caminos y desarrollo residencial (Figura 28 y Tabla 26).

Tabla 26. Área de elevación en el terreno de la subcuenca del río Ambi.

Elevación del terreno	Área (ha)	Porcentaje (%)
1 515m – 2 256m	13 297.96	11.82
2 256m – 2 632m	24 924.45	22.16
2 632m – 3 016m	30 139.89	26.80
3 016m – 3 482m	26 882.51	23.90
3 482m – 4 866m	17 228.68	15.32
Total	112 473.49	100

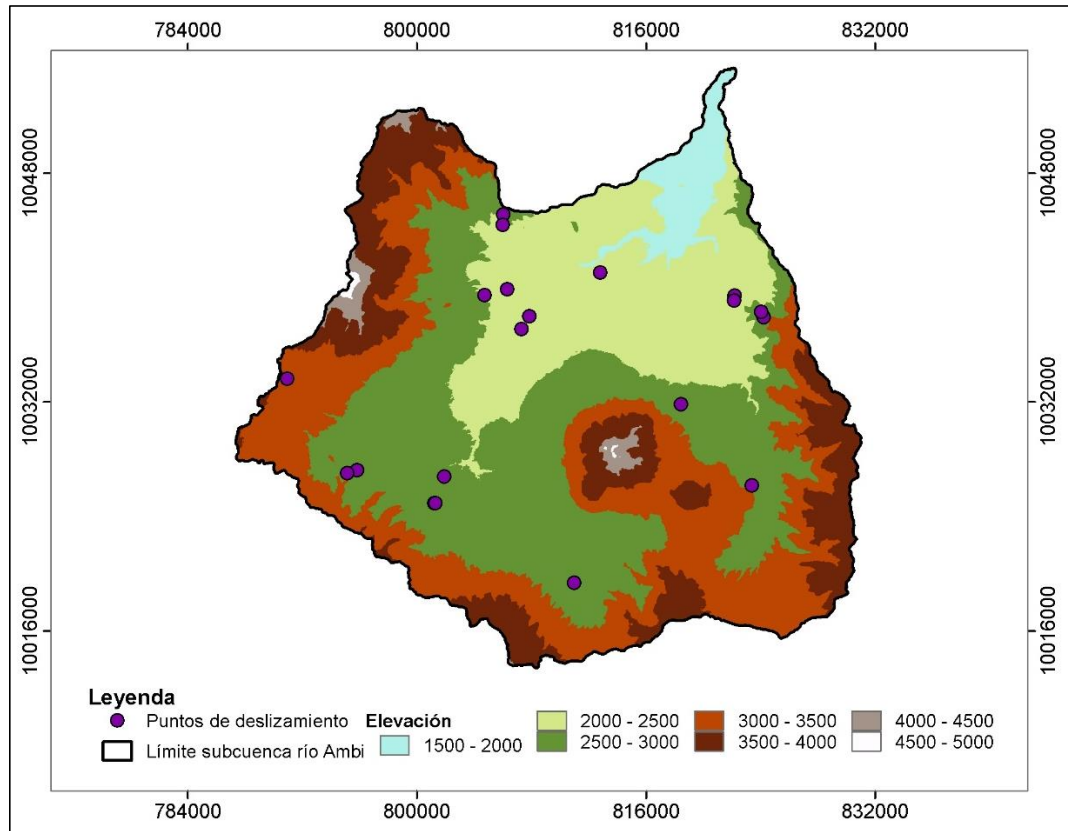


Figura 28. Elevación de la subcuenca del río Ambi.

4.2.1.9 Uso del suelo

Las parroquias de San Antonio, San Roque, La Esperanza, Atuntaqui, San Pablo, Urcuquí, San José de Chaltura se evidenciaron en gran magnitud con la presencia de cultivos siendo la cobertura más predominante en la subcuenca (Tabla 27 y Tabla 28).

Tabla 27. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 1996.

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	526.75	0.47
Bosque	15 450.60	13.73
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20
Cultivos	27 251.33	24.22
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03
Páramo	22 741.03	20.21
Pastos	13 384.45	11.89
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41
Zona Urbana	2 062.96	1.83
Total	112 529.3	100

Tabla 28. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 2017.

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	2 168.73	1.93
Bosque	10 797.90	9.60
Cuerpos de Agua	1 332.88	1.18
Cultivos	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	72.45	0.06
Páramo	17 195.45	15.28
Pastos	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	5 087.44	4.52
Zona Urbana	3 626.29	3.22
Total	112 529,3	100

4.2.1.10 Litología

Las formaciones rocosas muy duras denominadas lavas andesíticas es la formación más dominante en la subcuenca dificultando la erosión por procesos naturales (Figura 29 y Tabla 29).

Tabla 29. Área de la litología de la subcuenca del río Ambi.

Litología	Área (ha)	Porcentaje (%)
Andesitas	25 234.48	22.43
Bloques dacíticos matriz ceniza	1 418.72	1.26
Cenizas y Lapilli	6 359.97	5.65
Conglomerado volcánico	42.67	0.04
Conglomerados	30.30	0.03
Depósitos aluviales	4 083.35	3.63
Depósitos coluviales	1 246.00	1.11
Depósitos coluvio aluviales	1 932.26	1.72
Depósitos fluvio glaciares	825.92	0.73
Depósitos fluvio lacustres	2 413.06	2.14
Depósitos glaciares	950.74	0.84
Formación cangahua	10 322.46	9.17
Lavas andesíticas	31 079.37	27.62
Lavas basálticas	318.05	0.28
Lavas composición andesítica	9 511.36	8.45
No aplicable	7 048.99	6.26
Piroclastos	7 447.66	6.62
Toba volcánica	2 258.34	2.01
Total	112 523.7	100

Correspondiente a la litología, se determinó que las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Pablo, Otavalo, San Francisco de Natabuela, Imbaya, San José de Chaltura, San Juan de Ilumán presentaron lavas andesíticas.

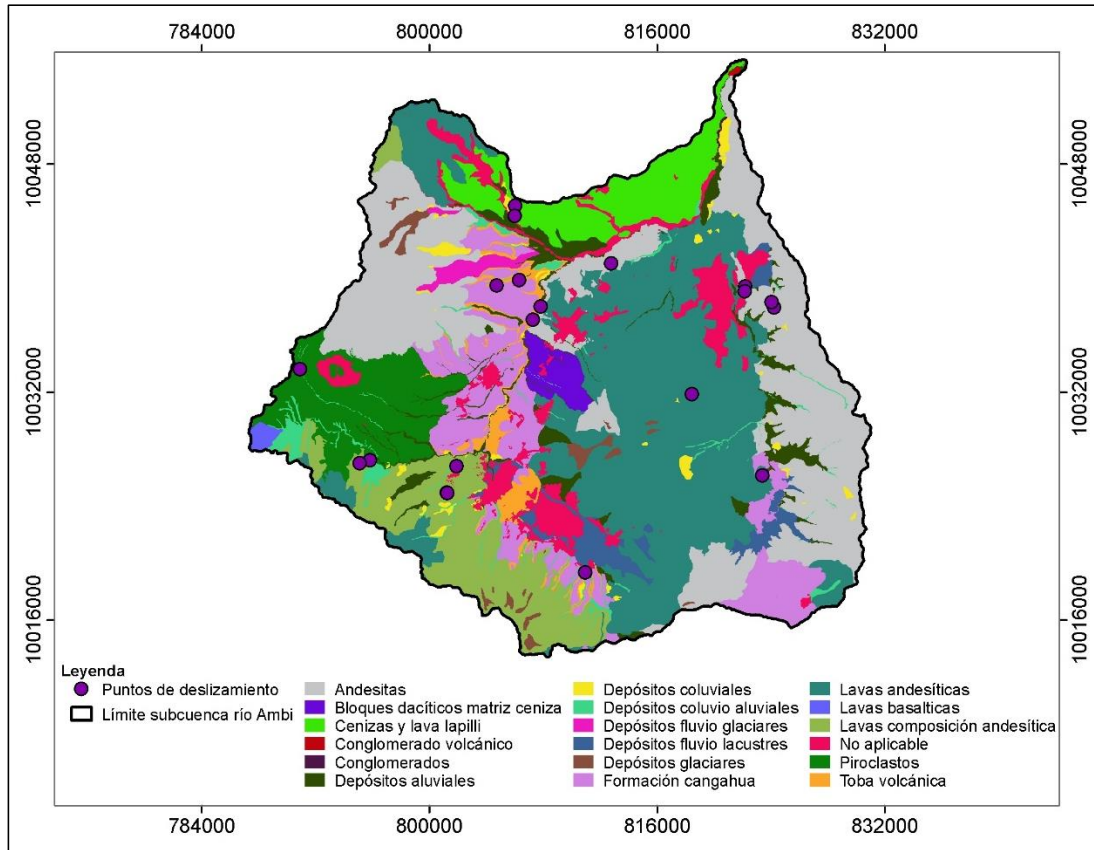


Figura 29. Litología de la subcuenca del río Ambi.

4.2.2 Análisis de asociación espacial mediante la función de creencia evidencial

La función de creencia evidencial ponderó la relación espacial entre la ocurrencia de deslizamientos de tierra y 10 factores espaciales (ángulo de pendiente, distancia a la falla geológica, distancia a la red hídrica, rugosidad del suelo, índice de vegetación diferenciada normalizada, aspecto de la pendiente, curvatura, litología, elevación y uso del suelo de los años 1996 y 2017 (Tabla 29). Se describió claramente los resultados de asociación extraídos del método de función de creencia evidencial y los pesos preparados para construir los modelos de frecuencia bivariada modificada y pairwise.

Para el ángulo de pendiente se determinó que las ocurrencias de deslizamientos son del 10% en pendientes de 12 a 25% de inclinación, cabe recalcar que estos deslizamientos se registran en vías de comunicación, el 40% de ocurrencia para pendientes de 25 a 50% de inclinación, el 45% de ocurrencia para pendientes de 50 a 70% de inclinación y en un 5% en pendientes mayores del 70% de inclinación. Para elevación se estableció que el 30% de ocurrencia de deslizamiento se presentó en elevaciones de 2 000 m a 2 500 m, el 65% de ocurrencia en elevaciones de 2 500 m a 3 000 m, se señaló los registros de mayor ponderación (Tabla 29).

La curvatura de la pendiente presentó 60% de ocurrencia en la cara convexa de la pendiente, el 20% en la forma plana y el 20% de ocurrencia en la forma cóncava. Por otro lado, la rugosidad determinó un 5% de ocurrencia de deslizamiento en suelos que van de 0.009 a 0.34 considerados poco rugosos, el 55% de ocurrencia en suelos de 0.44 a 0.52 denominados rugosos, se consideraron los pesos de mayor ponderación. Por otra parte, para el índice de vegetación diferenciada normalizada se estableció el 60% que significó valores de 0.16 a 0.32 considerado de baja densidad de vegetación y el 20% que representó valores de 0.32 a 0.47 considerado de densidad media de vegetación (Tabla 29).

Para el uso del suelo del año 1996, se determinó que los cultivos presentaron el 20% de ocurrencia de deslizamientos y la vegetación arbustiva presentó el 55%. Además, para el uso del suelo del año 2017, los cultivos presentaron el 60% de ocurrencia a deslizamiento, se consideró que la subcuenca contiene a los principales cantones de la provincia de Imbabura. Los pastos presentaron el 30% de ocurrencia de deslizamientos para la subcuenca del río Ambi. De igual manera, para la distancia a la falla geológica se determinó que a distancias de 2 000 m a 3 000 m significó el 30% de ocurrencia y para distancias de 1 000m a 2 000m representó el 30%.

La ocurrencia en relación al aspecto de la pendiente se determinó que, para Nordeste (22.5-67.5) presentó el 30% de ocurrencia a deslizamiento y el 15% para Oeste (247.5-

292.5) y Noroeste (292.5-337.5). De la misma forma para la red hídrica se estableció qué, el 55% de ocurrencia de deslizamiento se presentó en distancias menores de 200 m y el 30% se presentó en distancias de 200 m a 400 m. Para litología se determinó el 30% en andesitas y el 25% de ocurrencia para lavas de composición andesítica (Tabla 30).

Tabla 30. Coeficiente de función de creencia evidencial para factores espaciales, ponderación de clase y calificaciones de predictores (RF) basados en grados de asociaciones espaciales.

Predictores de deslizamiento	Clases	Ocurrencia	Frecuencia de deslizamiento (%)	Área de clase	Área de clase %	R	RF
Ángulo de pendiente	0 - 5%	0	0	444 979	38.00	0	0
	5 - 12%	0	0	300 220	25.64	0	0
	12 - 25%	1 800	10	224 010	19.13	0.52	0.03
	25 - 50%	7 200	40	137 165	11.71	3.41	0.17
	50 - 70%	8 100	45	55 795	4.77	9.44	0.47
	>70%	900	5	8 755	0.75	6.69	0.33
Elevación	1 500 m – 2 000 m	0	0	42 642	3.63	0	0
	2 000 m – 2 500 m	5 400	30	255 381	21.72	1.38	0.40
	2 500 m – 3 000 m	11 700	65	403 767	34.34	1.89	0.55
	3 000 m – 3 500 m	900	5	297 771	25.32	0.20	0.06
	3 500 m – 4 000 m	0	0	159 787	13.59	0	0
	4 000 m – 4 500 m	0	0	14 945	1.27	0	0
	4 500 m – 5 000m	0	0	1 579	0.13	0	0
Curvatura	Convexa	10 800	60	132 017	11.23	5.34	0.72
	Plano	3 600	20	911 926	77.55	0.26	0.03
	Cóncavo	3 600	20	131 929	11.22	1.78	0.24
Rugosidad	0.009 – 0.34	900	5	68 870	5.89	0.85	0.20
	0.34 – 0.44	5 400	30	237 090	20.29	1.48	0.35
	0.44 – 0.52	9 900	55	426 248	36.48	1.51	0.36
	0.52 – 0.61	1 800	10	318 058	27.22	0.37	0.09
	0.61 – 0.99	0	0	118 307	10.12	0	0

NDVI							
	-0.39 – 0.16	900	5	2 507 565	22.28	0.22	0.06
	0.16 – 0.32	10 800	60	2 951 910	26.23	2.29	0.57
	0.32 – 0.47	3 600	20	2 956 731	26.28	0.76	0.19
	0.47 – 0.62	2 700	15	2 177 780	19.35	0.78	0.19
	0.62 – 0.99	0	0	659 018	5.86	0	0
Uso del suelo 1996							
	Área sin vegetación	0	0	24 106	1.93	0	0
	Zona urbana	0	0	190 994	15.28	0	0
	Bosque	2 700	15	56 588	4.53	3.31	0.23
	Cultivos	3 600	20	40 322	3.22	6.20	0.44
	Pastos	900	5	632 635	50.60	0.10	0.01
	Vegetación arbustiva	9 900	55	169 978	13.59	4.05	0.29
	Cuerpos de agua	0	0	14 794	1.18	0	0
	Infraestructura agrícola	0	0	810	0.06	0	0
	Páramo	900	5	120 076	9.60	0.52	0.04
Uso del suelo 2017							
	Área sin vegetación	0	0	24 106	1.93	0	0
	Zona urbana	900	5	40 322	3.22	1.55	0.28
	Bosque	900	5	120 076	9.60	0.52	0.10
	Cultivos	10 800	60	632 635	50.60	1.19	0.22
	Pastos	5 400	30	169 978	13.59	2.21	0.40
	Vegetación arbustiva	0	0	56 588	4.53	0	0
	Cuerpos de agua	0	0	14 794	1.18	0	0
	Infraestructura agrícola	0	0	810	0.06	0	0
	Páramo	0	0	190 994	15.28	0	0
Distancia a la falla geológica							
	>4000m	1 800	10	282 597	22.60	0.44	0.09
	3000m - 4000m	3 600	20	193 360	15.47	1.29	0.25
	2000m - 3000m	5 400	30	244 761	19.58	1.53	0.30
	1000m - 2000m	5 400	30	265 800	21.26	1.41	0.27
	<1000	1 800	10	263 789	21.10	0.47	0.09
Aspecto de la pendiente							
	Plano (-1)	900	5	1 658 374	14.74	0.34	0.03
	Norte (0-22.5)	1 800	10	723 034	6.43	1.56	0.16
	Nordeste (22.5-67.5)	5 400	30	1 497 363	13.31	2.25	0.23

	Este (67.5-112.5)	1 800	10	1 355 743	12.05	0.83	0.09
	Sudeste (112.5-157.5)	900	5	1 175 042	10.44	0.48	0.05
	Sur (157.5-202.5)	0	0	909 008	8.08	0	0
	Sudoeste (202.5-247.5)	1 800	10	907 976	8.07	1.24	0.13
	Oeste (247.5-292.5)	2 700	15	1 004 668	8.93	1.68	0.17
	Noroeste (292.5-337.5)	2 700	15	1 281 780	11.39	1.32	0.14
	Norte (337.5-360)	0	0	740 016	6.58	0	0
<hr/>							
Distancia							
a la red	<200m	9 900	55	62 867	55.86	0.98	0.27
hídrica	200m - 400m	5 400	30	28 689	25.49	1.18	0.32
	400m - 600m	2 700	15	11 000	9.77	1.53	0.42
	600m - 800m	0	0	4 285	3.81	0	0
	>800m	0	0	5 693	5.06	0	0
<hr/>							
Litología							
	Andesitas	5 400	30	280 290	22.42	1.34	0.08
	Bloques dacíticos -matriz ceniza	0	0	15 723	1.26	0	0
	Cenizas y la pilli	1 800	10	70 671	5.65	1.77	0.10
	Conglomerados volcánicos	0	0	478	0.04	0	0
	Conglomerados	0	0	333	0.03	0	0
	Depósitos Aluviales	0	0	45 558	3.64	0	0
	Depósitos coluviales	900	5	13 884	1.11	4.50	0.26
	Depósitos coluvio aluviales	0	0	21 678	1.73	0	0
	Depósitos fluvio glaciares	0	0	9 175	0.73	0	0
	Depósitos fluvio – lacustres	0	0	26 825	2.15	0	0
	Depósitos glaciares	0	0	10 570	0.85	0	0
	Formación cangahua	900	5	114 593	9.17	0.55	0.03
	Lavas andesíticas	1 800	10	345 240	27.61	0.36	0.02
	Lavas basálticas	0	0	3 527	0.28	0	0
	Lavas composición andesítica	4 500	25	105 602	8.45	2.96	0.17
	No aplicable	0	0	78 394	6.27	0	0
	Piroclastos	900	5	82 672	6.61	0.76	0.04
	Toba volcánica	1 800	10	25 094	2.01	4.98	0.29

4.2.3 Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 1996

Se registró veinte puntos de deslizamientos entre rotacionales y flujos de derrubios en el área de estudio, se corroboró y validó la información de las zonas de susceptibilidad obtenidas a partir de la aplicación del modelo Radio frecuencia. Se establecieron cinco

categorías de susceptibilidad: susceptibilidad muy baja y baja, susceptibilidad media, susceptibilidad alta y susceptibilidad muy alta.

La zona susceptible muy alta a deslizamiento tiene 5 911.6 ha de área. Esta categoría se evidenció en las parroquias de San Blas, Imantag, Plaza Gutierrez, Angochahua y San Miguel de Ibarra. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser $>70\%$, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo y pastizales (Figura 30 y Tabla 31).

La zona susceptible alta a deslizamiento presentó un área de 16 447.5 ha dentro del área de estudio representando el 14.79%. Se extiende por las parroquias de San José de Quichinche, San Pablo, Cotacachi y Otavalo. Las pendientes entre el rango de 50-70% mantienen la susceptibilidad debido a su inclinación en el terreno (Figura 30 y Tabla 31).

La zona susceptible media a deslizamientos representa 34 470.7 ha de la zona de estudio equivalente a 30.99%, las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Roque, San Juan de Ilumán, presentan pendientes de 25% a 50% manteniendo la susceptibilidad media. La litología favoreció a la subcuenca debido a que presenta rocas muy duras como andesitas y lavas andesíticas (Figura 30 y Tabla 31).

La zona susceptible baja corresponde a 31 389.9 ha de la zona de estudio y representó 28.22%. En las parroquias de Urcuquí, Imbaya y Quiroga se pudo determinar que la cobertura bosque juega un papel fundamental en los deslizamientos debido a su protección al suelo (Figura 30 y Tabla 31).

La zona susceptible muy baja representó 23 002.7 ha de la zona de estudio y significó el 20.68%. En las parroquias de Olmedo Pecillo se evidenció una susceptibilidad muy baja, por la presencia de cobertura vegetal tanto de Bosque y páramo que son las clases que se presentan con mayor abundancia en estas categorías (Figura 30 y Tabla 31).

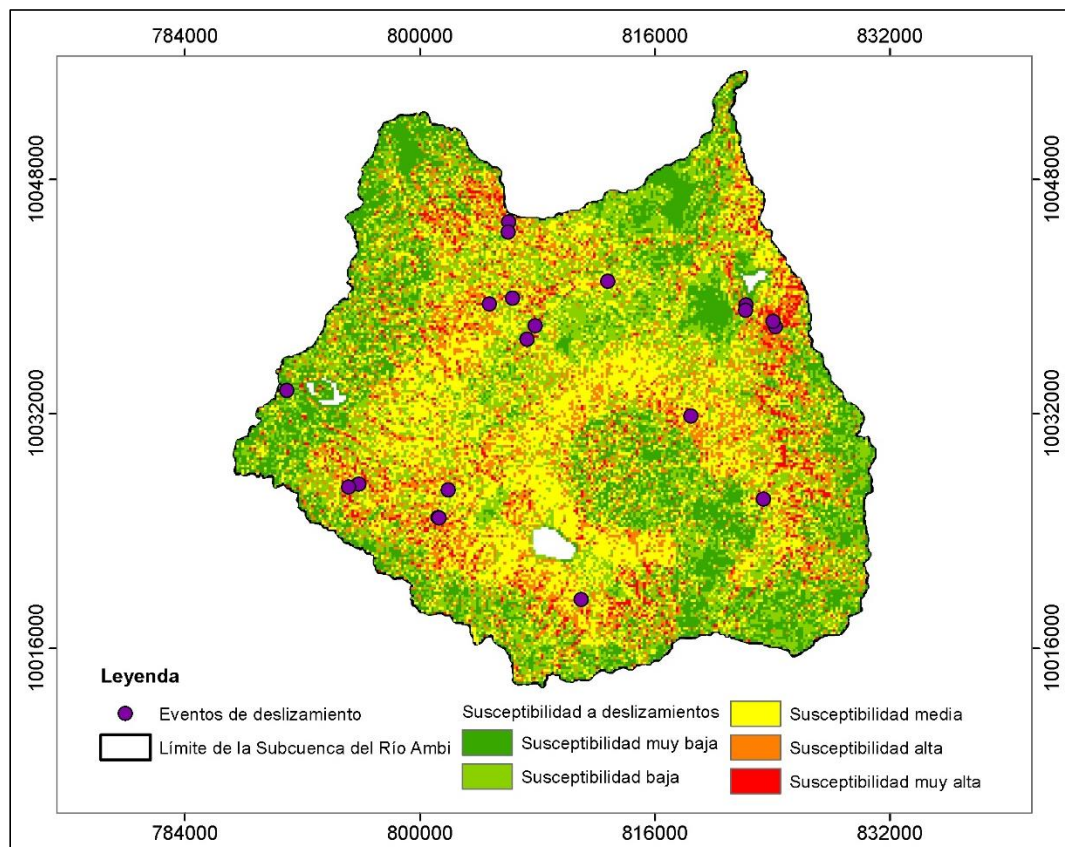


Figura 30. Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 1996.

Tabla 31. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 1996.

Categoría	Área (ha)	Porcentaje (%)	Color simbolización
Susceptibilidad muy baja	23 002.7	20.68	Verde oscuro
Susceptibilidad baja	31 389.9	28.22	Verde claro
Susceptibilidad media	34 470.7	30.99	Amarillo
Susceptibilidad alta	16 447.5	14.79	Anaranjado
Susceptibilidad muy Alta	5 911.6	5.32	Rojo
Total	111 222.40	100	

4.2.4 Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 2017

Se evidenciaron cincuenta y cuatro puntos de deslizamientos entre rotacionales y flujos de derrubios en el área de estudio, se corroboró y validó la información de las zonas de susceptibilidad obtenidas a partir de la aplicación del modelo Radio frecuencia. Se establecieron cinco categorías de susceptibilidad: susceptibilidad muy baja, susceptibilidad baja, susceptibilidad media, susceptibilidad alta y susceptibilidad muy alta.

La zona susceptible muy alta a deslizamiento tiene 6 243.76 ha de superficie del área de estudio. Esta categoría está distribuida en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua y San Miguel de Ibarra. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser >70%, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo y pastizales. Los factores con un menor índice de susceptibilidad fueron la geología que está conformada en su mayor parte por andesitas (Figura 31 y Tabla 32).

La zona susceptible alta a deslizamiento tiene un área de 18 856.56 ha dentro del área de estudio. Se extiende por las parroquias de San José de Quichinche, Gonzales Suárez Cotacachi, Otavalo y San Pablo. La distancia a la red hídrica de igual manera es fundamental en la susceptibilidad alta, mientras más cerca a la red se encuentre la susceptibilidad es mayor, cabe recalcar que los registros de deslizamientos en su mayoría se han presentado cerca de la red hídrica (Figura 31 y Tabla 31). Además, la distancia a la falla geológica es importante en rangos de 1 000 m a 2 000 m se mantiene una susceptibilidad alta debido a que mientras más cerca de la falla la probabilidad es mayor a un deslizamiento (Figura 31 y Tabla 32).

La zona susceptible media a deslizamientos representa 34 738.51 ha de la zona de estudio, las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Roque, San Francisco de Natabuela y San Juan de Ilumán, presentan pendientes de 25% a 50% manteniendo la susceptibilidad media. La cobertura vegetal jugó un papel importante en la susceptibilidad media debido a la protección que este brinda al suelo, correspondientemente la subcuenca del río Ambi presentó una gran extensión de cultivos el cual ha reemplazado diferentes coberturas con el transcurso del tiempo (Figura 31 y Tabla 32).

La zona susceptible baja corresponde a 29 851.32 ha de la zona de estudio. En las parroquias de Urcuquí, Imbaya y Quiroga la curvatura es importante y se determinó la presencia de formas cóncavas y planas (Figura 31 y Tabla 32).

La zona susceptible muy baja representó 21 629.98 ha la zona de estudio. En la parroquia de Olmedo Pecillo se evidenció que la susceptibilidad es muy baja ya que presenta pendientes que van de 0 a 5% y de 5 a 12 %, de igual manera se encontró curvaturas planas (Figura 31 y Tabla 32).

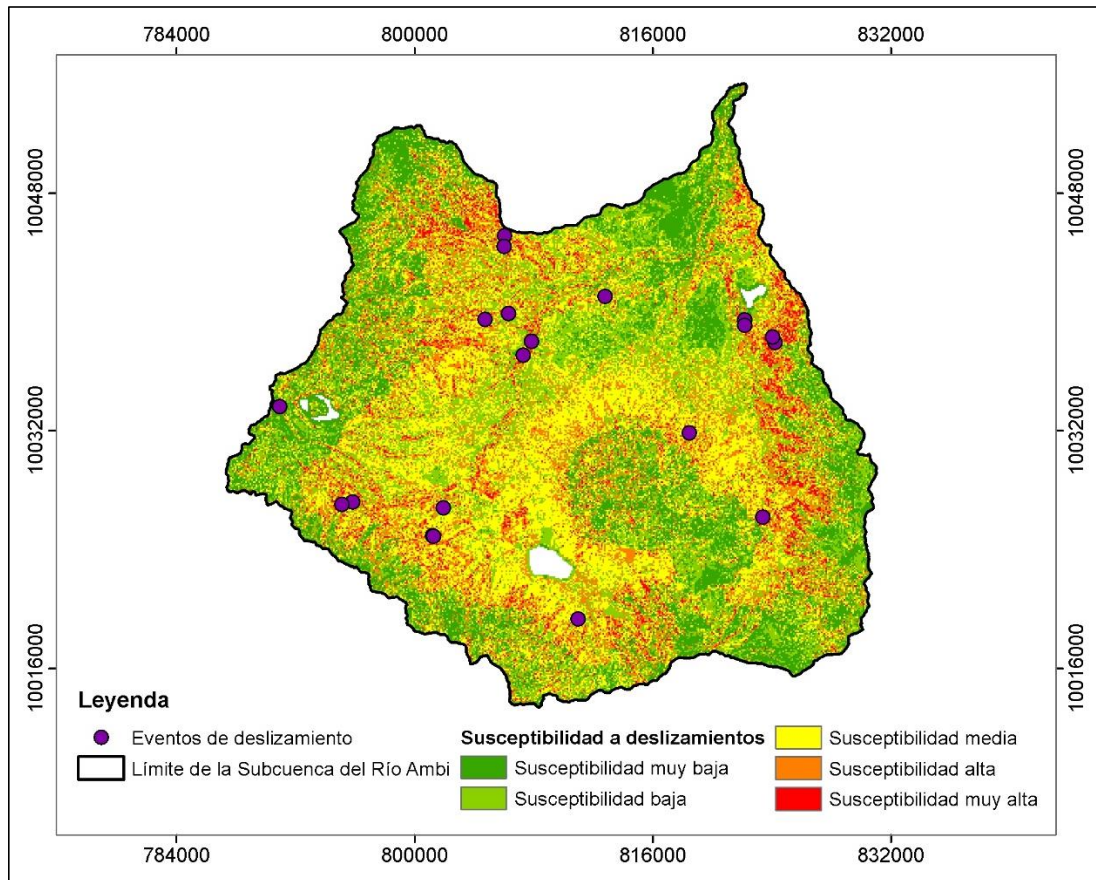


Figura 31. Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 2017.

Tabla 32. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 2017.

Categoría	Área (ha)	Porcentaje	Color simbolización
Susceptibilidad muy baja	21 629.98	19.43	Verde oscuro
Susceptibilidad baja	29 851.32	26.82	Verde claro
Susceptibilidad media	34 738.51	31.21	Amarillo
Susceptibilidad alta	18 856.56	16.94	Anaranjado
Susceptibilidad muy Alta	6 243.76	5.61	Rojo
Total	111 320.13	100	

Resultados similares se pudo determinar en el estudio de función de creencia evidencial estadística bivariada de conjunto con jerarquía analítica establecida en el conocimiento y regresión logística estadística multivariada para mapeo de susceptibilidad a deslizamientos. El factor de creencia evidencial ponderó la relación espacial entre la eventualidad de deslizamientos de tierra y factores espaciales (ángulo de pendiente, aspecto de pendiente, curvatura, elevación, rugosidad de la superficie, distancia desde el drenaje, TWI, SPI, espesor del suelo, drenaje del suelo, textura del suelo, tipo de madera, edad de la madera, bosque densidad y diámetro de madera). Cabe recalcar que los modelos de credibilidad como los enfoques estadísticos bivariados son favorables debido a la capacidad de lograr precisión lógica junto a las variables determinadas aplicando la técnica de conjunto para reducir el ruido y dichas limitaciones. Se consideró 10 variables en conjunto para la determinación de la susceptibilidad con categoría de confiabilidad.

Para el aspecto de la pendiente, el suroeste, el sureste y el oeste contienen casi el 48% de los registros de falla de la pendiente. La curvatura de la pendiente tuvo tres caras (cóncava, plana y convexa). La cara cóncava contuvo la mayor cantidad de ocurrencia de deslizamientos con 52%, mientras que la cara convexa contiene 39% de ocurrencia de deslizamientos.

Se evidenció, que las pendientes convexas son sólidas porque facilitan la dispersión igual de la escorrentía por la pendiente. El valor de rugosidad de la superficie muestra una alta susceptibilidad con casi el 89% de la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Este resultado refleja la relación directa de la rugosidad de la superficie con la complejidad del terreno (Althuwaynee, Pradhan, Park y Lee, 2014).

Por otra parte, se estableció resultados diferentes basados en el estudio de metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Los resultados basados en el crecimiento histórico de la ciudad a partir de 1892 (Gobierno de Chiapas, 1992), año en que se

registra el primer plano urbano de la ciudad, indican que de 1892 a 2010 la ciudad ha crecido en superficie 100 veces y 70 en cantidad de habitantes. Para el caso de estudio de la ladera sur en Tuxtla Gutiérrez, se presentaron cinco niveles de amenaza en la zona, que abarcan los siguientes porcentajes: muy baja 5%, baja 27.1%, media 39.3%, alta 15.3% y muy alta 13.3%, siendo esta última la que se distribuye en su mayor parte en los depósitos de talud, alrededor de la Mesa de Copoya, lo que confirma su situación de máximo peligro. El crecimiento demográfico continúa paulatinamente y la presión hacia los recursos cada vez es mayor con el fin de satisfacer las necesidades de los humanos.

Para Tuxtla Gutiérrez se calcula una población expuesta de aproximadamente 62 500 habitantes (11.6% del total) (537 102 habitantes en el área urbana) que residen tanto en la parte sur de la ciudad como en 30 localidades rurales asentadas en los flancos de la mesa de Copoya; se estiman poco más de 28 000 viviendas expuestas agrupadas en 850 manzanas (Paz, González, Gómez y Velasco, 2017).

4.2.5 Área bajo la curva (AUC)

Con la información obtenida se realizó la validación del modelo cartográfico de susceptibilidad para los años 1996 y 2017. Se obtuvo un valor de 0,70 en el área bajo la curva, se consideró el modelo aceptable para el año 1996 con el uso de suelo del respectivo año, mientras que, para el año 2017 se obtuvo un valor de 0.53 en el área bajo la curva permitiendo la validación del modelo (Figura 32 y Figura 33).

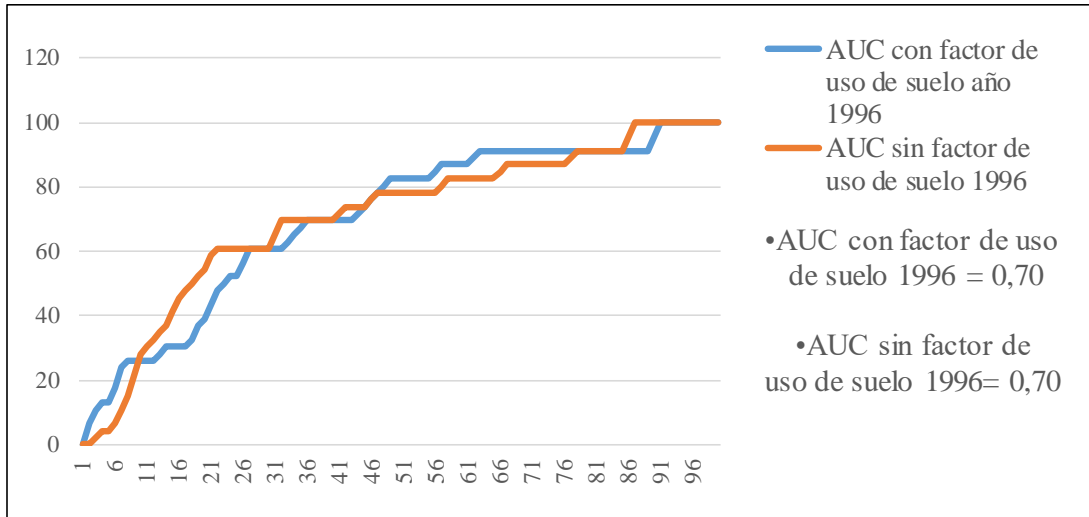


Figura 32. Área bajo la curva (AUC) factor de uso de suelo de la subcuenca del río Ambi año 1996.

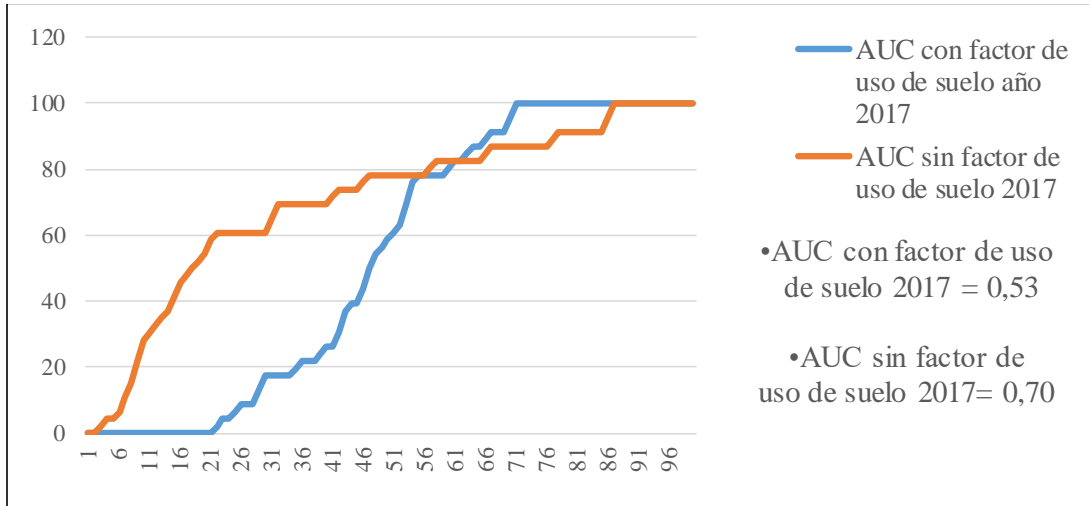


Figura 33. Área bajo la curva (AUC) factor de uso de suelo de la subcuenca del río Ambi año 2017.

4.2.6 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para el cambio de uso de suelo y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Se realizó el análisis estadístico mediante la regresión geográfica ponderada, para lo cual se necesitó clasificar la subcuenca del río Ambi en 10 microcuencas principales llamadas: Drenajes Menores, río Machángara, río Jatunyacu, río Chorlavi, río Tahuando, río Alambi, río Blanco, río Pichaví, río Yanayacu y quebrada Yanayacu. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada cobertura vegetal para los años 1996 y 2017 por cada microcuenca (Tabla 33).

Tabla 33. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.

Período	Coberturas	R2 Ajustado	Correlación
1996 - 2017	Bosque VS Susceptibilidad	0,291217	Débil
1996 - 2017	Cultivos VS Susceptibilidad	0,057505	Nula
1996 - 2017	Páramo VS Susceptibilidad	0,537463	Fuerte
1996 - 2017	Pastos VS Susceptibilidad	0,357717	Débil
1996 - 2017	Vegetación Arbustiva VS Susceptibilidad	-0,033522	Nula

Para el período 1996 – 2017 se obtuvo la relación geográfica ponderada entre los cambios de uso de suelo y la susceptibilidad a deslizamientos. Correspondiente a la cobertura bosque se determinó un R2 ajustado de 0.29 que indica una correlación espacial débil positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos, mientras que, los cultivos presentan una correlación nula mediante un R2 ajustado 0.05 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 34).

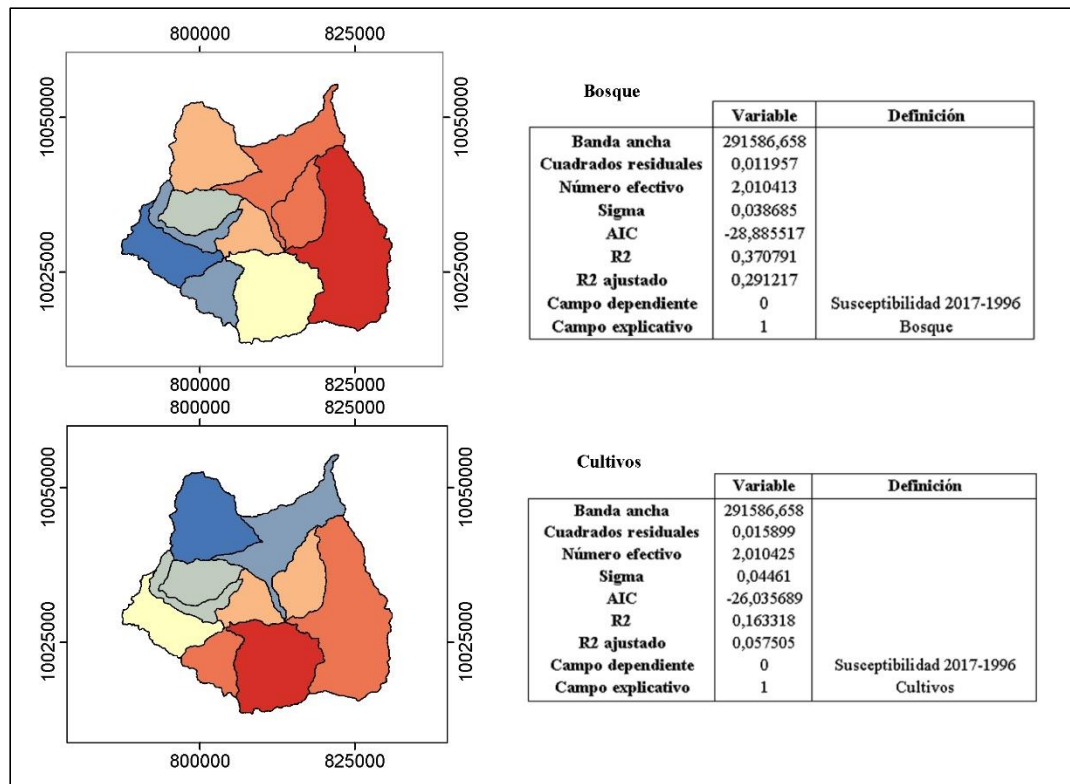


Figura 34. Correlación geográfica ponderada de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Correspondiente a la cobertura páramo se determinó una correlación espacial fuerte positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado 0.53, y se interpreta, a mayor presencia de páramo mayor susceptibilidad a deslizamiento. Por otra parte, los pastos presentan una correlación débil con un R2 ajustado de 0.35 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que existe asociación espacial entre las variables baja (Figura 35).

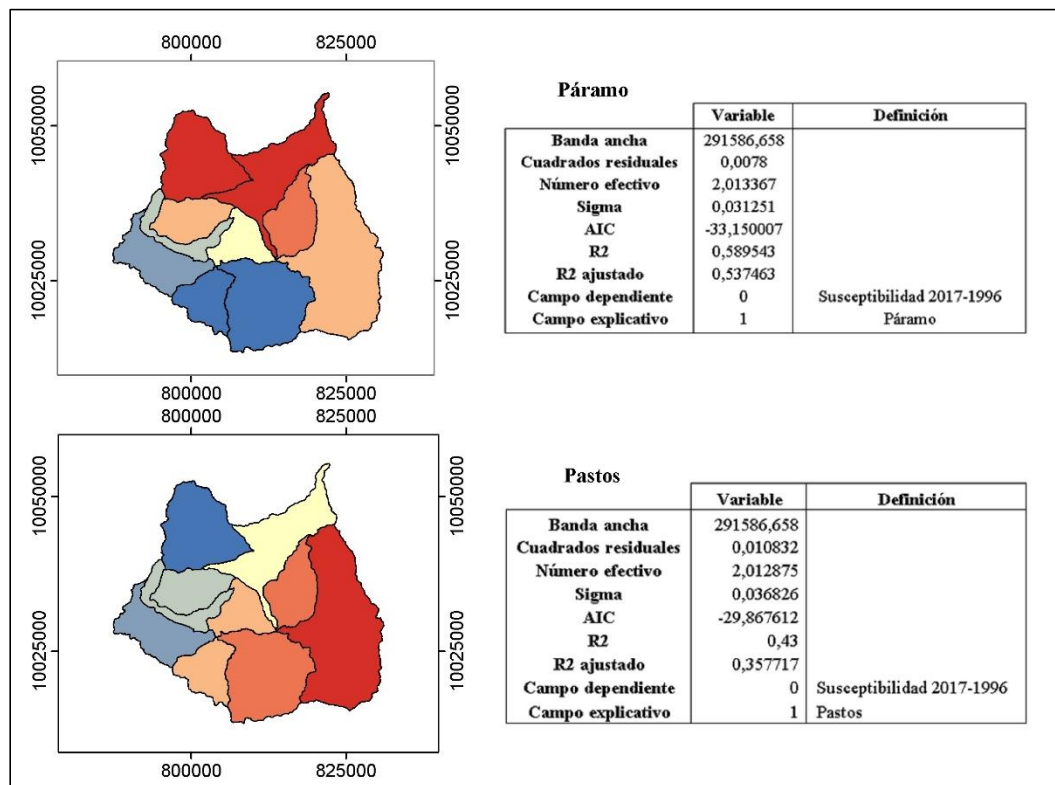


Figura 35. Correlación geográfica ponderada de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

Correspondiente a la cobertura vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa mediante un R2 ajustado de -0.03 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 36).

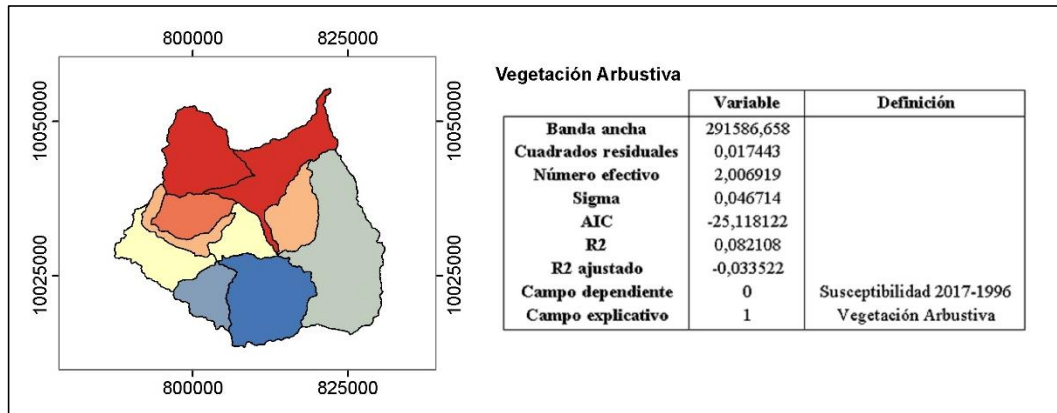


Figura 36. Correlación geográfica ponderada de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

4.3. Efectos de deslizamientos en la conectividad y cambios del paisaje

Para la determinación de los efectos de deslizamiento que se registraron previamente en la subcuenca en la conectividad del paisaje, se realizó el cálculo de métricas de paisaje de las categorías de área y borde y agregación para los años de 1996 y 2007 mediante el mapa de uso de suelo de los respectivos períodos.

4.3.1 Análisis de la conectividad y cambios del paisaje en la subcuenca del río Ambi

Se realizó el análisis respectivo de las métricas de paisaje para las microcuencas principales que conforman el río Ambi los cuales son: drenajes Menores, río Machángara, río Jatunyacu, río Chorlaví, río Tahuando, río Alambi, río Blanco, río Pichaví, río Yanayacu y quebrada Yanayacu. Se determinó el número de parches (NP) y el área media del parche (AMN) para los períodos de 1996 y 2017.

4.3.1.1 Análisis del número de parches (NP) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017

Se determinó las métricas de agregación para las microcuencas que conforman el río Ambi para los años 1996 y 2017, mediante el indicador de número de parches. Los drenajes menores presentaron en la cobertura cultivos 439 parches en el año 1996 y disminuyeron a 103 parches en el año 2017. Por otra parte, los pastos en el año 1996

presentaron 224 parches y en el año 2017 aumentaron a 243. La vegetación arbustiva en el año 1996 se registraron 126 parches y para el año 2017 aumentaron a 211 parches.

El río Machángara presentó en la cobertura cultivos 183 parches en el año 1996 y disminuyeron en 61 parches para el año 2017, de igual manera, la vegetación arbustiva registró 149 parches para el año 1996 y para el año 2017 se presentó una disminución en 65 parches. Por otro lado, los pastos aumentaron de 58 parches en el año 1996 a 76 parches en el año 2017.

El río Jatunyacu presentó para el año 1996 en la cobertura de cultivos 223 parches y para el año 2017 disminuyó en 97 parches. De igual manera, la vegetación arbustiva presentó 367 parches en el año 1996 y para el 2017 disminuyó 116 parches. Sin embargo, los pastos presentaron 156 parches en el 1996 y aumentó en el año 2017 a 270 parches.

El río Chorlaví en la cobertura cultivos presentó 147 parches en el año 1996 y disminuyó a 56 parches en el año 2017. Correspondiente a la cobertura de vegetación arbustiva se registró 147 parches en el año 1996 y 51 parches en el año 2017. Por otro lado, los pastos aumentaron de 59 parches a 122 parches entre el año 1996 y 2017. De igual manera la cobertura páramo aumento de 7 a 22 parches entre el año 1996 y 2017

EL río Tahuando en la cobertura de cultivos presenta 505 parches en el año 1996 y para el año 2017 disminuyó en 244 parches. La vegetación arbustiva disminuyó de 437 parches a 275 parches entre los años 1996 y 2017. Sin embargo, los pastos aumentaron sus parches de 205 en el año 1996 a 442 parches en el año 2017. De igual manera la cobertura páramo presentó 171 parches en el año 1996 y aumentaron a 263 parches en el año 2017.

El río Alambi presentó en cultivos 213 parches en el año 1996 y disminuyó a 82 parches en el año 2017. Por otro lado, la cobertura bosque presentó un aumento de parches de

87 a 112 en los años 1996 y 2017, de igual manera los pastos presentaron 114 parches en el año 1996 y aumentaron a 238 en el año 2017.

El río Blanco presentó en cultivos 400 parches en el año 1996 y 100 parches en el año 2017. La vegetación arbustiva registró 261 parches que disminuyeron a 190 parches entre los años 1996 y 2017. Correspondiente a la cobertura pastos se registró un aumento de 169 parches a 234 entre los años 1996 y 2017.

El río Pichaví presentó en la cobertura cultivos 67 parches y disminuyó a 29 parches entre los años 1996 y 2017. Además, la vegetación arbustiva presentó 71 parches en el año 1996 y disminuyó a 39 parches en el 2017. Sin embargo, los pastos aumentaron de 56 parches a 98 parches entre los años 1996 y 2017.

El río Yanayacu presentó en la cobertura cultivos 162 parches en el año 1996 y disminuyó a 56 parches para el año 2017, de igual manera, la vegetación arbustiva presentó 122 parches en el año 1996 y disminuyó a 78 parches para el 2017. Por otro lado, los pastos aumentaron los parches de 96 en el año 1996 a 102 parches en el año 2017.

La quebrada Yanayacu presentó en la cobertura cultivos 178 parches en el año 1996 y disminuyó en el año 2017 a 24 parches. También la vegetación arbustiva de 59 parches en el año 1996 disminuyó a 30 parches para el 2017. De igual manera, los pastos disminuyeron de 123 parches en el año 1996 a 120 parches en el año 2017.

Se concluyó que la variación del número de parches se debe a diversos procesos simultáneos como el incremento de la frontera agrícola, crecimiento poblacional o actividades antrópicas (Tabla 34).

Tabla 34. Métrica de agregación mediante el indicador de número de parches (NP) para los paisajes de la subcuenca del río Ambi.

Métricas de agregación				
		Año 1996	Año 2017	
	Coberturas	NP	NP	Variación
Drenajes Menores	VA	126	211	Aumenta
	CTVS	439	103	Disminuye
	BQ	72	44	Disminuye
	PTS	224	243	Aumenta
	PM	3	4	Aumenta
Río Machángara	VA	149	65	Disminuye
	CTVS	183	61	Disminuye
	BQ	67	65	Disminuye
	PTS	58	76	Aumenta
	PM	8	16	Aumenta
Río Jatunyacu	VA	367	116	Disminuye
	CTVS	223	97	Disminuye
	BQ	105	126	Aumenta
	PTS	156	270	Aumenta
	PM	66	98	Aumenta
Río Chorlaví	VA	147	51	Disminuye
	CTVS	147	56	Disminuye
	BQ	44	48	Aumenta
	PTS	59	122	Aumenta
	PM	7	22	Aumenta
Río Tahuando	VA	437	275	Disminuye
	CTVS	505	244	Disminuye
	BQ	181	192	Aumenta
	PTS	205	442	Aumenta
	PM	171	263	Aumenta
Río Alambi	VA	182	175	Disminuye
	CTVS	213	82	Disminuye
	BQ	87	112	Aumenta
	PTS	114	238	Aumenta
	PM	26	75	Aumenta
Río Blanco	VA	261	190	Disminuye
	CTVS	400	100	Disminuye
	BQ	112	109	Disminuye
	PTS	169	234	Aumenta
	PM	11	1	Disminuye
Río Pichavi	VA	71	39	Disminuye
	CTVS	67	29	Disminuye
	BQ	19	15	Disminuye
	PTS	56	98	Aumenta
	PM	5	8	Aumenta
Río Yanayacu	VA	122	78	Disminuye
	CTVS	162	56	Disminuye
	BQ	46	42	Disminuye
	PTS	96	102	Aumenta
	PM	5	4	Disminuye
Quebrada Yanayacu	VA	59	30	Disminuye
	CTVS	178	24	Disminuye
	BQ	51	45	Disminuye
	PTS	123	120	Disminuye
	PM	7	7	Mantiene

4.3.1.2 Análisis de área media del parche (AMN) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017.

Se determinó las métricas de agregación para las microcuencas que conforman el río Ambi para los años 1996 y 2017, mediante el indicador de área media del parche (AMN).

Los drenajes menores presentaron en la cobertura cultivos un área media del parche de 9.27 m en el año 1996 y aumentó a 85.64 m en el 2017. Además, la cobertura pasto presento un área media de parche de 6.07 y aumentó a 10.76 m. Sin embargo, en la cobertura de páramo se registró para el año 1996 un área media del parche de 71.76 m y disminuyó para el año 2017 a 48.6 m. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 presentó un área media del parche de 63 m y disminuyo a 4.07 m en el año 2017.

El río Machángara registró en la cobertura cultivos un área media del parche de 7 m en el año de 1996 y aumentó en el año 2017 a 46.46. También, los pastos aumentaron de 5.99 m en el año 1996 a 10.14 en el año 2017. Por otro lado, la cobertura bosque registró un área media del parche de 32 m en el año 1996 y disminuyó a 26.35 m para el año 2017. La cobertura páramo, registro para el año 1996 un área media del parche de 67.90 m y disminuyó para el año 2017 a 29.09 m.

El río Jatunyacu para el año 1996 en la cobertura cultivos registró un área media del parche de 22 m y aumentó a 91.03 m en el año 2017. Sin embargo, la cobertura de páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 59.77 m y disminuyó a 32.37 m para el año 2017. De igual manera, la cobertura de bosque registró en el año 1996 un área media del parche de 25.47 m y disminuyó a 11.80 m en el año 2017.

El río Chorlaví presentó en la cobertura de cultivos un área media del parche de 20 m en el año 1996 y aumentó en el año 2017 a 85.43 m. Por otra parte, el páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 139.26 m y disminuyó en el año 2017 a

31.08 m. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 registró un área media del parche de 17.72 m y disminuyó en el año 2017 a 4.30 m

El río Tahuando registró en el año 1996 en la cobertura de cultivos un área media del parche de 11 m y aumentó en el año 2017 a 50.54 m. Sin embargo, en la cobertura de páramo se registró un área media del parche de 44.04 m en el año 1996 y el 2017 disminuyó a 21.99 m. También, los pastos en el año 1996 registraron un área media del parche 17.68 m y disminuyó a 7.05 m en el año 2017.

El río Alambi presentó en el año de 1996 en la cobertura de cultivos un área media de parche de 8 m y aumentó a 63.25 m en el año 2017. Por otra parte, en la cobertura páramo se registró un área media del parche de 247.56 m y disminuyó a 65.58 m en el año 2017, también, la cobertura pasto presentó en el año 1996 un área media del parche 14.19 m y disminuyó a 7.27 m en el año 2017. De igual manera, la cobertura bosque en el año 1996 presentó 21.52 m de área media del parche y disminuyó a 10 m en el año 2017.

El río Blanco presentó en la cobertura cultivos un área media del parche de 4 m en el año 1996 y aumentó a 50.84 m en el año 2017. Sin embargo, la cobertura páramo en el año 1996 registró un área media del parche de 34.36 m y disminuyó en el año 2017 a 16.56 m. Además, los pastos en el año 1996, el área media del parche disminuyó de 13.39 m a 6.60 m en el año 2017.

El río Pichaví registró en el año 1996 en la cobertura de cultivos un área media del parche de 18 m y aumentó a 62.69 m en el año 2017. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 presentó un área media del parche de 12.32 m y aumentó a 15.16 m en el año 2017. Por otra parte, la cobertura páramo registro en el año 1996 un área media del parche de 211.39 m y disminuyó en el 2017 a 83.62 m. También, la cobertura pastos presentó 9.21 m de área media del parche y disminuyó a 4.93 m en el 2017 (Tabla 35).

Tabla 35. Métrica de agregación mediante el indicador de área media del parche (AMN) para los paisajes de la subcuenca del río Ambi.

Métricas de agregación				
		Año 1996	Año 2017	
	Coberturas	AMN	AMN	Variación
Drenajes Menores	VA	63	4.07	Disminuye
	CTVS	9.27	85.64	Aumenta
	BQ	5.32	5.95	Aumenta
	PTS	6.07	10.76	Aumenta
	PM	71.76	48.6	Disminuye
Río Machángara	VA	11.53	1.75	Disminuye
	CTVS	7.00	46.46	Aumenta
	BQ	32	26.35	Disminuye
	PTS	5.99	10.14	Aumenta
	PM	67.90	29.09	Disminuye
Río Jatunyacu	VA	6.74	1.62	Disminuye
	CTVS	22	91.03	Aumenta
	BQ	25.47	11.80	Disminuye
	PTS	13.02	8.02	Disminuye
	PM	59.77	32.37	Disminuye
Río Chorlaví	VA	17.72	4.30	Disminuye
	CTVS	20	85.43	Aumenta
	BQ	14.23	10.57	Disminuye
	PTS	4.71	5.77	Aumenta
	PM	139.26	31.08	Disminuye
Río Tahuando	VA	9.99	2.31	Disminuye
	CTVS	11	50.54	Aumenta
	BQ	27.75	20.07	Disminuye
	PTS	17.68	7.05	Disminuye
	PM	44.04	21.99	Disminuye
Río Alambi	VA	11.57	4.07	Disminuye
	CTVS	8	63.25	Aumenta
	BQ	21.52	10	Disminuye
	PTS	14.19	7.27	Disminuye
	PM	247.56	65.58	Disminuye
Río Blanco	VA	11.93	4.72	Disminuye
	CTVS	4	50.84	Aumenta
	BQ	14.24	11.36	Disminuye
	PTS	13.39	6.60	Disminuye
	PM	34.36	16.56	Disminuye
Río Pichaví	VA	12.32	15.16	Aumenta
	CTVS	18	62.69	Aumenta
	BQ	4.18	4	Disminuye
	PTS	9.21	4.93	Disminuye
	PM	211.39	83.62	Disminuye
Río Yanayacu	VA	16.13	10.39	Disminuye
	CTVS	14	63.05	Aumenta
	BQ	12.52	4.65	Disminuye
	PTS	6.91	13.45	Aumenta
	PM	237.04	192.53	Disminuye
Quebrada Yanayacu	VA	42.80	1.83	Disminuye
	CTVS	8	155.94	Aumenta
	BQ	9.73	8.51	Disminuye
	PTS	5.41	6.39	Aumenta
	PM	67.95	58.97	Disminuye

En el río Yanayacu la cobertura de cultivos presentó un área media del parche de 14 m en el año 1996 y aumentó a 63.05 para el año 2017. De igual forma, la cobertura pasto presentó en el año 1996 un área media de parche de 6.91 m y aumentó a 13.45 m en el 2017. Sin embargo, la cobertura de páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 237.04 y disminuyó a 192.53 m en el año 2017.

En la quebrada Yanayacu se registró en la cobertura de cultivos en el año de 1996 el área media del parche con un valor de 8 m y aumentó a 155.94 m para el 2017. Por otra parte, la vegetación arbustiva presentó en año de 1996 un área media del parche de 42.80 m y disminuyó a 1.83 m. Además, la cobertura páramo presentó en el año de 1996 un área media del parche de 67.95 m y disminuyó en el año 2017 a 58.97 m

Por lo tanto, se concluyó que mientras el número de parches aumenta y el área del parche es mayor, existe una gran susceptibilidad a fragmentación en los diferentes paisajes.

4.3.2 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de número de parches y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Se realizó el análisis estadístico mediante la regresión geográfica ponderada entre la métrica de número de parches pertenecientes a la categoría de superficie, área, densidad y variabilidad. Se utilizó 10 microcuencas del río Ambi llamadas: Drenajes Menores, río Machángara, río Jatunyacu, río Chorlavi, río Tahuando, río Alambi, río Blanco, río Pichaví, río Yanayacu y quebrada Yanayacu. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada cobertura vegetal para los años 1996 y 2017 por cada microcuenca.

Para el período 1996 – 2017 se calculó la relación geográfica ponderada entre el número de parches y la susceptibilidad a deslizamientos. Perteneciente al número de parches de la cobertura bosque se determinó un R² ajustado de 0.38 que indica una correlación espacial débil positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos,

mientras que, los cultivos presentan una correlación nula mediante un R2 -0.11 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Tabla 36 y Figura 37).

Tabla 36. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.

Período	Coberturas	R2 Ajustado	Correlación
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura bosque VS Susceptibilidad	0.382025	Débil
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura cultivos VS Susceptibilidad	-0.11773	Nula
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura páramo VS Susceptibilidad	0.222505	Nula
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura pastos VS Susceptibilidad	0.332305	Débil
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura vegetación Arbustiva VS Susceptibilidad	-0.081333	Nula

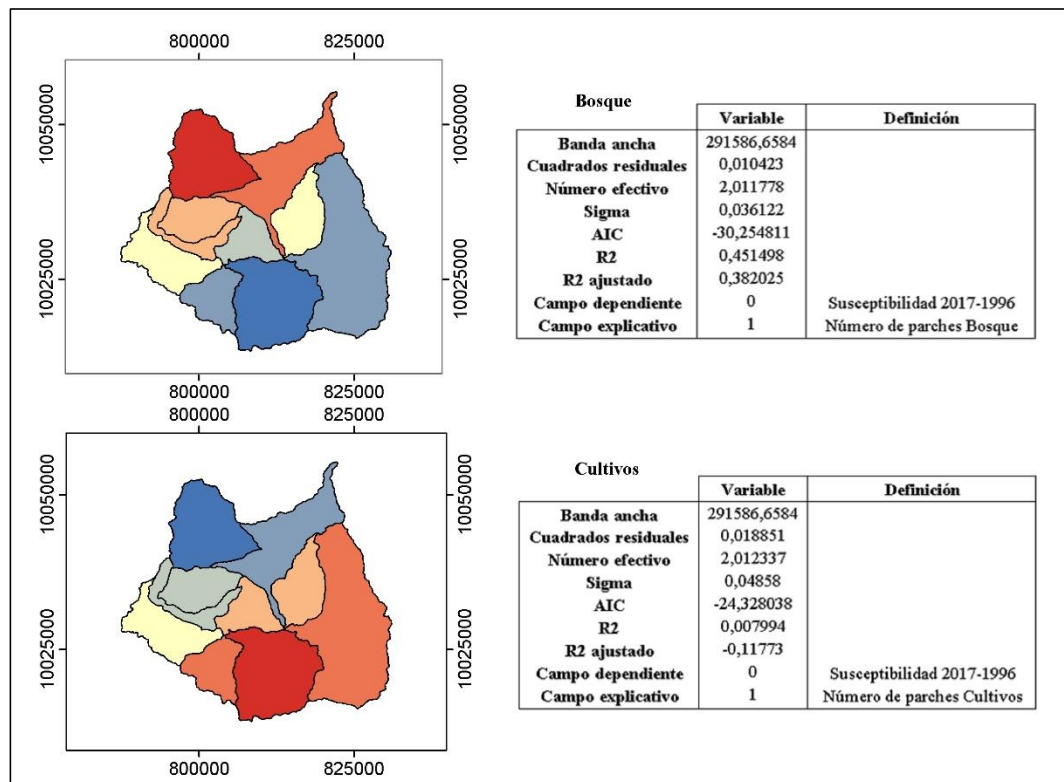


Figura 37. Correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Correspondiente al número de parches de la cobertura páramo se determinó una correlación espacial nula con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado 0.22, la cual no existe correlación significativa. Por otra parte, los pastos presentan una correlación débil con un R2 ajustado de 0.33 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que existe asociación espacial baja entre las variables (Figura 38).

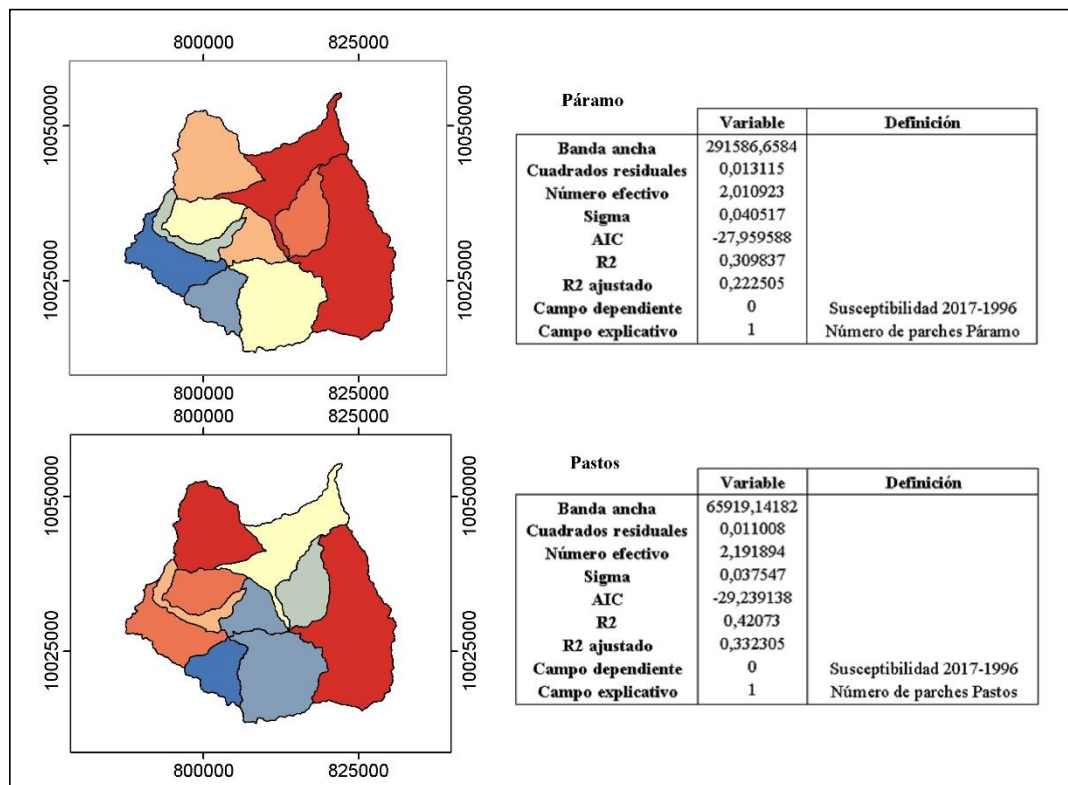


Figura 38. Correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

Mediante el número de parches de la vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa con la variable de susceptibilidad mediante un R2 ajustado de -0.08 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 39).

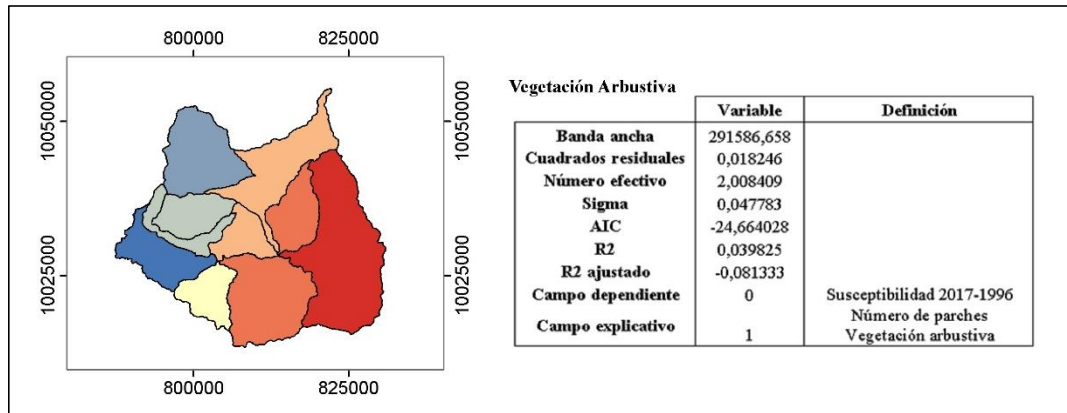


Figura 39. Correlación geográfica ponderada del número de parches de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

4.3.3 Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de área media del parche y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Para el período 1996 – 2017 se calculó la relación geográfica ponderada entre el área media del parche y la susceptibilidad a deslizamientos. Mediante el área media del parche de la vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa con la variable de susceptibilidad mediante un R2 ajustado de 0.06 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 40).

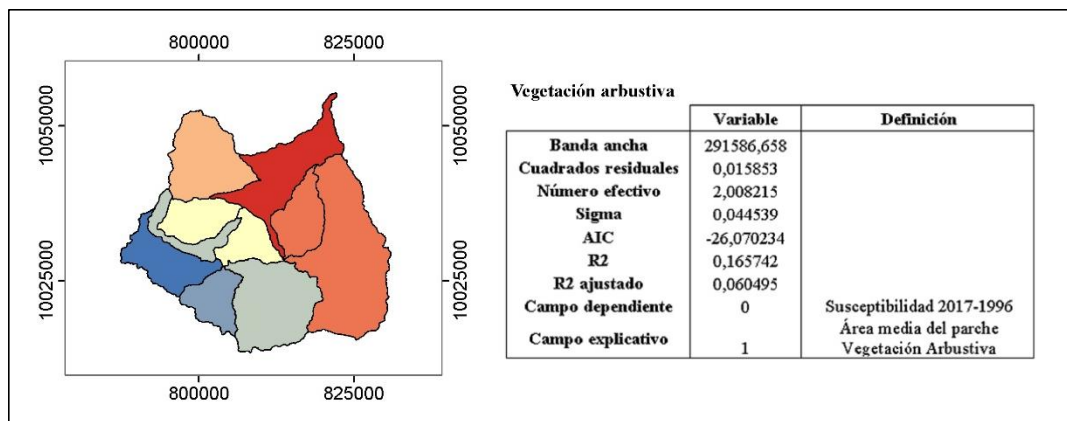


Figura 40. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

Pertenciente al área media del parche de la cobertura bosque se determinó un R2 ajustado de 0.18 que indica una correlación espacial nula positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos, mientras que, los cultivos presentan una correlación nula mediante un R2 -0.09 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 41).

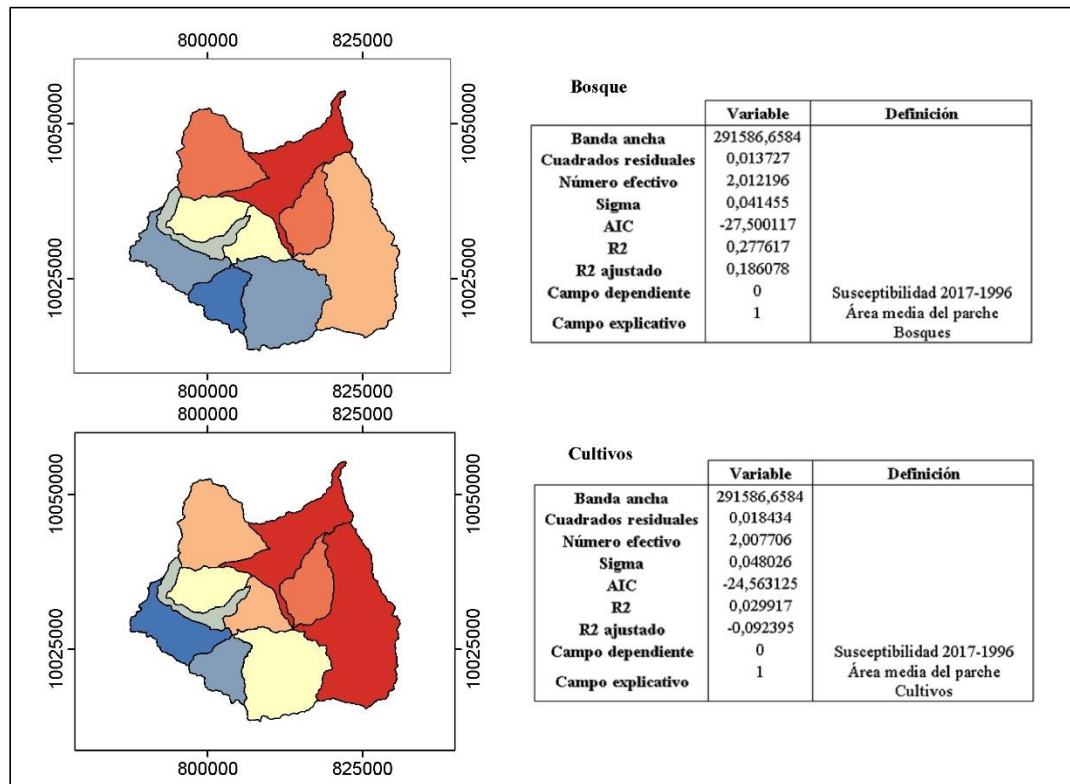


Figura 41. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Correspondiente al área media del parche de la cobertura páramo se determinó una correlación espacial nula con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado -0.01, la cual no existe correlación significativa. Por otra parte, los pastos presentan una correlación moderada positiva con un R2 ajustado de 0.60 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que a mayor sea el área del parche en la cobertura pastos mayor será la susceptibilidad a deslizamientos (Figura 42).

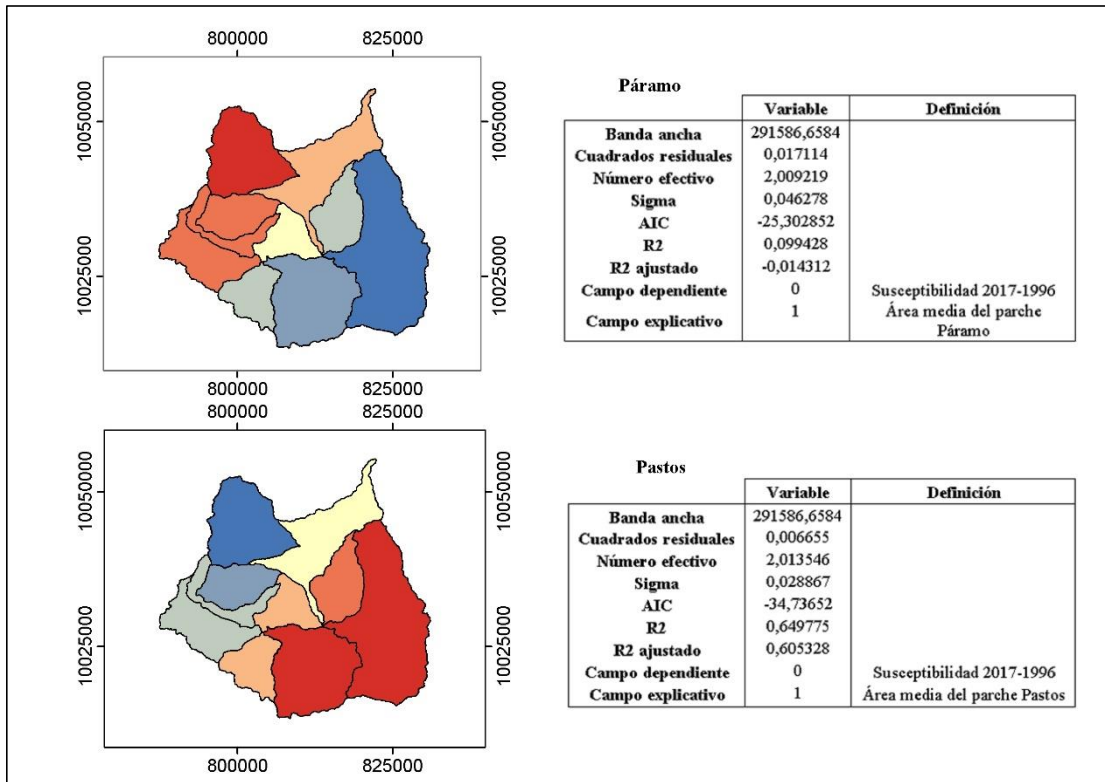


Figura 42. Correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo al cambio de uso de suelo la técnica de clasificación supervisada fue la más concreta en los últimos 20 años; por ende, las cuantificaciones de la superficie en cambios de uso de suelo fueron más aproximados a la realidad del uso de suelo y cobertura vegetal para todo el periodo de análisis.

El 29.20% del área de estudio correspondiente al año 2017 presenta una susceptibilidad media a deslizamientos y representó 32 487.21 ha, el 27.08% representa la susceptibilidad alta y se extiende a lo largo de la zona especialmente en las parroquias de Imantag y San Blas, y el 13.53% corresponde a susceptibilidad muy alta presente en las faldas del volcán Imbabura y Cotacachi estudio en base a la aplicación del método bivariado. Se validó este modelo de predicción mediante el área bajo la curva (AUC) lo cual lo determina como un modelo admisible. Además, las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos coinciden con los puntos de los eventos registrados en campo.

La mayor incidencia en la disminución de cobertura bosque, vegetación arbustiva y páramo fue el constante aumento de las extensiones de cultivos hacia estas zonas, debido a las actividades agrícolas, ganaderas. El incremento demográfico y las extensas épocas secas que han incidido en un aumento de erosión del suelo, así como una mínima regeneración natural.

En el modelado de deslizamientos de tierra, tanto los modelos de probabilidad como los enfoques estadísticos bivariados son favorables debido a la capacidad de lograr precisión lógica, pero existen algunas limitaciones debido a los supuestos estadísticos cuando se aplican individualmente. Por lo tanto, la investigación actual propone una técnica de conjunto, que podría reducir dicha limitación al extender la capacidad

5.2 Recomendaciones

Analizar la vulnerabilidad a elementos fundamentales tales como: viviendas, instituciones públicas (centros de salud, escuelas, entre otros) con el propósito de conocer la realidad de los demás elementos físicos del área de estudio, disminuyendo las afectaciones a los que dichos elementos están expuestos.

Con base a los resultados del presente estudio, forjar investigaciones para conocer la proyección de cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal a periodos futuros de 20 y 30 años, tanto para la subcuenca del río Ambi, cómo para la cuenca del río Mira el cual abarca la subcuenca.

La metodología empleada, a partir de la combinación de técnicas en Teledetección, SIG y análisis estadístico, ha demostrado su potencial para estudios en los que se involucren los cambios de usos de suelo, ya que no sólo permite lograr imágenes categorizadas de las coberturas, sino que permite cuantificar los cambios y observar su dinámica a diferentes niveles de complemento, para con ello ganar en entendimiento sobre las diferentes coberturas que se están interrelacionando.

REFERENCIAS

- Aceves, J.F., Legorreta, G., Lugo, J., Umaña, J. y Legorreta, H.A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones geográficas*, (91), 43-55.
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G. y Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista chilena de historia natural*, 82(3), 361-374.
- Aguilera, F., Valenzuela, L.M. y Botequilha, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 226-238.
- Aguirre, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual Redesma*, 5(1), 9-20.
- Aizen, M.A., Garibaldi, L.A. y Dondo, M. (2009). Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), 45-54.
- Akgun, A., Dag, S. y Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6), 1127-1143.
- Althuwaynee, O.F., Pradhan, B., Park, H.J. y Lee, J.H. (2014). A novel ensemble decision tree-based Chi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID)

and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11(6), 1063-1078.

Amorim, S., Corominas, J., Baeza, C., Portilla, M. y Angulo, C. (2009). *Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el pirineo catalán. Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Barcelona, España: CIMNE.

Armenteras, D. y Vargas, O. (2016). Patrones del paisaje y escenarios de restauración: acercando escalas. *Acta biológica colombiana*, 21(1), 229-239.

Arnáez, J., Ortigosa, L., Flaño, P.R. y Martínez, T.L. (2012). Distribución espacial del viñedo en la Comunidad Autónoma de La Rioja: influencia de la topografía y de las formas del relieve. *Revista de Geografía*, (16), 11-34.

Arregui, M.O. (2014). El crecimiento espacial urbano. *ArtyHum: Revista Digital de Artes y Humanidades*, (6), 96-105.

Ayram, C., Andrés, C., Mendoza, M.E. y López, E. (2014). Análisis del cambio en la conectividad estructural del paisaje (1975-2008) de la cuenca del lago Cuitzeo, Michoacán, México. *Revista de Geografía Norte Grande*, (59), 7-23.

Beier, P., Majka, D.R. y Spencer, W.D. (2008). Forks in the road: choices in procedures for designing wildland linkages. *Conservation Biology*, 22(4), 836-851.

Benavente, F.A. y Botequilha, A. (2012). Selección de métricas de paisaje mediante análisis de componentes principales para la descripción de los cambios de uso y cobertura del suelo del Algarve, Portugal. *GeoFocus. Revista*

Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (12), 93-121.

Bohórquez, L. (2013). *Criterios para la evaluación de amenazas por deslizamientos e inundaciones*. Distrito Central, Honduras: Gonzalo Funes y Juan José Ferrando

Cabrera, M.M.R., Dáger, M.R., Rojas, R.M. y García, H. (2010). Estudio exploratorio de las propiedades físicas de suelos y su relación con los deslizamientos superficiales: Cuenca del río Maracay, estado Aragua-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(2), 225-247.

Calvo, A. y Ortiz, E. (2012). Fragmentación de la cobertura forestal en Costa Rica durante los períodos 1997–2000 y 2000-2005. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), 10.

Camargo, C., Vidal, R. y Andrades, J. (2014). Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’, estado Táchira-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(1), 85-99.

Carmona, M.R., Aravena, J.C., Bustamante, M.A., Celis, J.L., Charrier, A., Díaz, I.A. y Hernandez, C. (2010). Estación Biológica Senda Darwin: Investigación ecológica de largo plazo en la interfase ciencia-sociedad. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(1), 113-142.

Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L. y Guallichico, D. (2015). Análisis multivariado de las aguas de la Subcuenca del Río Ambi en época de estiaje y su relación con la calidad desde el punto de vista agrícola. *In Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10 (1), 123-129.

- Castro, I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 34(2), 3-16.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio [en línea]. SI: Editorial Ariel. ISBN: 978-84-344-3498-1.
- Cotler, H., Cram, S., Trinidad, S.M. y Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(88), 6-18.
- Cristeche, E. y Penna, J.A. (2008). Métodos de valoración económica de los servicios ambientales. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales*, 3, 1-55.
- Evangelista, V., López, J., Caballero, J. y Martínez, M.A. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla. *Investigaciones geográficas*, (72), 23-38.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey, J.M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47.
- Forman, R.T. (2014). Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions (1995). Washington, Estados Unidos: Forster O. Ndubisi
- Fuentes, Y.H. y Mendieta, A.B. (2015). Agua y abastecimiento: gestión de cuerpos de agua en la ciudad de San Luis Potosí (México), 1831-1887. *Revista de Historia Regional y Local*, 7(14), 60-97.

- García, D. (2011). Efectos biológicos de la fragmentación de hábitats: nuevas aproximaciones para resolver un viejo problema. *Revista Ecosistemas*, 20, 2-3.
- Giné, D.S. (2014). Unidades de paisaje naturales y unidades de paisaje artificiales. Comparación mediante SIG y métricas de paisaje. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (14), 23-54.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Antonio Ante. (2012). Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Antonio Ante 2012-2030. *Antonio Ante en progreso*. 66-67
- Godoy, J.A. (2009). La genética, los marcadores moleculares y la conservación de especies. *Revista Ecosistemas*, 18(1).
- Gómez, F.A.M., Pérez, E.H. y Sarmiento, J.D.O. (2014). Susceptibilidad a la erosión hídrica de suelos en la zona Andina del departamento del Cauca Colombia. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 1, 26.
- González, N., Ochoa, S., Pozo, C., Gordon, B., Rangel, L.J., Arriaga, S.L. y Kampichler, C. (2011). Indicadores ecológicos de hábitat y biodiversidad en un paisaje neotropical: perspectiva multitaxonómica. *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1433-1451.
- González, M., Villarreal, D. y Castro, M.G. (2012). Evaluación de la efectividad de la Reserva Parque Luro como herramienta de conservación del Caldenal pampeano: cambios en la cobertura vegetal a nivel de paisaje entre 1960 y 2004. *Ecología austral*, 22(1), 11-21.

- Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J. (2008). Ecología del Paisaje. Un marco para el estudio integrado de la dinámica territorial y su incidencia en la vida silvestre. *Estudios geográficos*, 69(265), 519-543.
- Gutiérrez, O., Cámara, R., Senciales, J.M. y García, L.V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 88–126.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M. y Valigi, D. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229.
- INAMHI. (2010). Datos históricos, anuarios meteorológicos 1964-2010. Quito: INAMHI
- Jorgenson, A.K. (2008). Structural integration and the trees: an analysis of deforestation in less-developed countries, 1990–2005. *The Sociological Quarterly*, 49(3), 503-527.
- Jost, L. y González, J. (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta zoológica lilloana*, 56, 3-14.
- Kent, M. (2009). Biogeography and landscape ecology: the way forward gradients and graph theory. *Progress in Physical Geography*, 33(3), 424-436.
- Leal, C.O. (2011). Estado del arte en las conceptualizaciones del paisaje y el paisaje urbano. Una revisión bibliográfica. *GeoGraphos: Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, 2(7), 1-17.

- López, W. (2014). Análisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2), 39-45.
- López, V.H. y Plata, W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones geográficas*, (68), 85-101.
- Luna, R., Castaño, A. y Raz, A. (2011). La biodiversidad en México: su conservación y las colecciones biológicas. *Ciencias*, 101(101).
- Marchesini, V.A., Sobrino, J.A., Hidalgo, M.V. y Di Bella, C.M. (2009). La eliminación selectiva de vegetación arbustiva en un bosque seco de Argentina y su efecto sobre la dinámica de agua. *Revista de Teledetección*, 31(1), 93-102.
- Marulanda, M.C., Cardona, O.D. y Barbat, A.H. (2010). Revealing the socioeconomic impact of small disasters in Colombia using the DesInventar database. *Disasters*, 34(2), 552-570.
- McGarigal, K. (2015). *FRAGSTATS help*. Amherst, USA: University of Massachusetts
- Mujica, S. y Pacheco, H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 37(80), 215-244.
- Olea, L., Verdasco, M.P. y Paredes, J. (2011). Características y producción de los pastos de las dehesas del SO de la Península Ibérica. *Pastos*, 2021, 131-156.

- Paz, J.A., González, R., Gómez, M. y Velasco, J.A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, 92, 11-24.
- Perucca, L.P. y Esper, M.Y. (2008). La avalancha de rocas Las Majaditas Caracterización geométrica y posible relación con eventos paleosísmicos. Precordillera de San Juan, Argentina. *Revista Española de la Sociedad Geológica de España*, 21, 1-2.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., Célleri, R. y Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Rocha, W.P., Delgado, M.G. y Sendra, J.B. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990–2000). *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 13, 281-309.
- Rodríguez, A. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Román, A.Q. y Feoli, S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 17-45.

- Ruiz, D., Moreno, H.A., Gutiérrez, M.E. y Zapata, P.A. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the total environment*, 398(1-3), 122-132.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E. y Lainas, S. (2013). Landslide susceptibility zonation in Greece. *Natural Hazards*, 65(1), 523-543.
- San Vicente, M.G. y Valencia, P.J.L. (2012). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos. Revista de Geografía*, (16), 35-54.
- Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Hadmoko, D.S., Kasama, K. y Setiawan, M.A. (2016). Rockfall susceptibility zoning based on back analysis of rockfall deposit inventory in Gunung Kelir, Java. *Landslides*, 13(4), 805-819.
- Sánchez, J.L. (2014). *Instalaciones e infraestructuras para la actividad agraria*. Madrid, España: Josep Lluís.
- Schramski, J.R., Gattie, D.K. y Brown, J.H. (2015). Human domination of the biosphere: Rapid discharge of the earth-space battery foretells the future of humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(31), 9511-9517.
- Singh, R.G., Botha, G.A., Richards, N.P. y McCarthy, T.S. (2008). Holocene landslides in KwaZulu-Natal, South Africa. *South African Journal of Geology*, 111(1), 39-52.
- Skokanová, H. y Eremiášová, R. (2013). Landscape functionality in protected and unprotected areas: Case studies from the Czech Republic. *Ecological informatics*, 14, 71-74.

- Song, K., Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Jin, C., Li, F. y Liu, H. (2008). Land use change in Sanjiang Plain and its driving forces analysis since 1954. *Acta Geographica Sinica-Chinese Edition*-, 63(1), 93.
- Tiscornia, G., Achkar, M. y Brazeiro, A. (2014). Efectos de la intensificación agrícola sobre la estructura y diversidad del paisaje en la región sojera de Uruguay. *Ecología austral*, 24(2), 212-219.
- Torres, D.J. (2016). Formación docente en desarrollo sostenible para la preservación de la biodiversidad. *Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 21-31.
- Valdés, A. (2011). Modelos de paisaje y análisis de fragmentación: de la biogeografía de islas a la aproximación de paisaje continuo. *Revista ecosistemas*, 20, 2-3.
- Vargas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia: FAO
- Velásquez, F., Calderón, J., Urdánigo, L. y Cárdenas, F. (2016). Cambio de uso de suelo en el azolvamiento del embalse “La Esperanza” Manabí-Ecuador. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 19(37).
- Villacorta, S.P., Fidel, L. y Zavala, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista Geológica Argentina*, 3(69), 393-399.
- Viloria, J.A., Viloria, A., Pineda, M.C. y Valera, A. (2016). Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. *Geomorphology*, 253, 199-207.

Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138.