

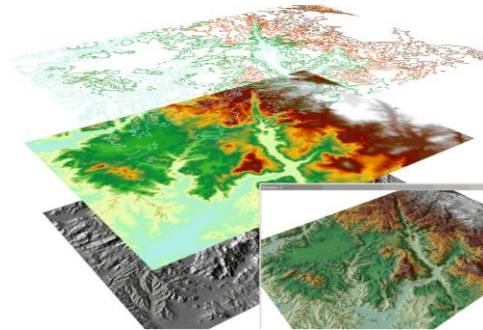


UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS
NATURALES RENOVABLES



CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y
CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

**EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
Y SU PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN
HÍDRICA EN ECUADOR CONTINENTAL**



TESIS DE GRADO PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE: **INGENIERA**
EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL
MEDIO AMBIENTE

AUTORA:

Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez

DIRECTOR:

Ing. Pablo Alvarez Figueroa, Mg. Sc.

Loja - Ecuador

2019



CERTIFICACIÓN

En calidad de Director de la tesis titulada **EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN HÍDRICA EN ECUADOR CONTINENTAL**, de autoría de la señorita **Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez**, egresada de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certifico que la investigación ha sido dirigida, revisada y desarrollada dentro del cronograma aprobado, por tal razón autorizo se continúe con los trámites correspondientes.

Loja, 22 de marzo del 2019

Atentamente,

Ing. Pablo Álvarez Figueroa, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

TRIBUNAL DE GRADO



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE LOJA**

Loja, 27 de junio del 2019

CERTIFICACIÓN

En calidad de tribunal calificador de la tesis titulada **EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN HÍDRICA EN ECUADOR CONTINENTAL**, de autoría de la Srta. egresada Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certifican que han incorporado todas las sugerencias efectuadas por sus miembros.

Por lo tanto, autorizamos a la señorita egresada, su publicación y difusión.

Atentamente,

Ing. Santiago Rafael García Matailo, Mg. Sc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Blgo. Xavier Alejandro Rojas Ruilova, Mg. Sc.

VOCAL DEL TRIBUNAL

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho, Mg. Sc.

VOCAL DEL TRIBUNAL



AUTORÍA

Yo, Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez, declaro ser autora de la presente tesis titulada **EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN HÍDRICA EN ECUADOR CONTINENTAL**, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

.....
Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez

C.I. 1900637826

Loja, 28 de junio de 2019



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA
PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y
PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez, declaro ser autora de la tesis titulada **EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN HÍDRICA EN ECUADOR CONTINENTAL**, como requisito para optar al grado de: Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional (RDI).

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los 28 días del mes de junio de dos mil diecinueve, firma la autora.

Firma:

Autora: Mariuxi Elizabeth Pineda Jiménez

Número de cédula: 1900637826 **Correo Electrónico:** marystan93@gmail.com

Dirección: La Argelia **Teléfono:** 0989553738

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Tesis: Ing. Pablo Alvarez Figueroa, Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. Santiago Rafael García Matailo, Mg. Sc.

Blgo. Xavier Alejandro Rojas Ruilova, Mg. Sc.

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho, Mg. Sc.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un profundo agradecimiento a mi director de tesis Ing. Pablo Alvarez Figueroa, Mg. Sc por su continuo apoyo, guía, paciencia y sugerencias que me ayudaron a afianzar y culminar la presente investigación. Básicamente, cada asistencia fue primordial en cada aspecto de la investigación.

Además, de mi director de tesis quisiera agradecer a la Universidad Nacional de Loja, en especial a la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, por enriquecerme de conocimientos teórico-prácticos, permitirme mejorar mis habilidades, conocer a personas fantásticas y madurar personalmente como profesionalmente.

Una inmensa gratitud a quienes conforman el Centro de Investigaciones Tropicales del Ambiente y la Biodiversidad (CITIAB), en especial al Ing. Juan Maita por el apoyo técnico y haberme atendido durante el desarrollo de la presente investigación. De igual manera, al Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA), particularmente al Ing. Fabián Sotomayor por las orientaciones e indicaciones brindadas.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por guiarme y brindarme las fuerzas necesarias para alcanzar mis objetivos. A mi familia por su amor, cariño y enseñanzas, que me ayudaron a forjarme como persona.

A la mejor madre del mundo “Alonza” por su inmenso sacrificio y apoyo. Ella es mi inspiración y razón de ser mejor cada día.

A mi segunda madre “Gloria” quién me enseñó que la vida es efímera, razón por la que se debe luchar, enfrentar y superar cualquier obstáculo.

A mi encantadora hermana “Michelle” por su paciencia y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi adorable hermano “Cristian”, quién me protegió y ayudó en cada situación.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Cambio de uso del suelo	4
2.2. Erosión del suelo.....	5
2.3. Erosión hídrica	6
2.4. Modelos para estimar la erosión	8
2.4.1. Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada (RUSLE)	8
2.4.1.1. Factor erosividad (R)	9
2.4.1.2. Factor erodabilidad (K).....	9
2.4.1.3. Factor de longitud y pendiente (LS)	9
2.4.1.4. Factor de cobertura (C)	10
2.4.1.5. Factor de prácticas de conservación (P).....	10
2.4.2. Proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP).....	10
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Área de estudio.....	12
3.2. <i>Análisis del cambio de cobertura y uso del suelo en el período 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.</i>	14
3.2.1. Procesamiento de la información	15
3.2.2. Determinación del cambio de uso del suelo.....	16
3.2.3. Modelación de los escenarios futuros del cambio de la cobertura vegetal nativa en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.	17
3.3. <i>Determinación de la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.</i>	20
3.3.1. Factor erosividad (R)	20
3.3.2. Factor erodabilidad (K).....	21
3.3.3. Factor de longitud y pendiente (LS)	22
3.3.4. Factor de cobertura (C)	23
4. RESULTADOS.....	24

4.1.	Analizar el cambio de cobertura y uso del suelo en el periodo 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.....	24
4.1.1.	Análisis del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el período 2000-2016 en Ecuador continental.....	24
4.1.2.	Modelación de escenarios de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.	31
4.2.	Determinar la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.....	40
4.2.1.	Factor erosividad (R)	40
4.2.2.	Factor erodabilidad (K).....	44
4.2.3.	Factor de longitud y pendiente (LS)	47
4.2.4.	Factor de cobertura (C)	49
4.2.5.	Estimación de la tasa de erosión o erosión hídrica de Ecuador continental.....	49
5.	DISCUSIÓN	54
5.1.	Analizar el cambio de cobertura y uso del suelo en el período 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.....	54
5.1.1.	Análisis del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el período 2000-2016 en Ecuador continental.....	54
5.1.2.	Modelación de escenarios de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.	56
5.2.	Determinar la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.....	57
6.	CONCLUSIONES.....	60
7.	RECOMENDACIONES.....	61
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pag.
Tabla 1. Clasificación de las clases de cobertura	16
Tabla 2. Superficies y porcentajes de la cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental en el período 2000-2016.....	25
Tabla 3. Valores de los cambios entre coberturas del período 2000-2016	27
Tabla 4. Valores del factor C para la cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental ..	49
Tabla 5. Erosión hídrica de Ecuador continental para el período 2000-2016-2030.....	51
Tabla 6. Promedios de la tasa de erosión por coberturas y uso del suelo en Ecuador continental	52

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Pag.
Cuadro 1. Clases de erosión hídrica	6
Cuadro 2. Leyenda de las clases de uso/coberturas establecidas según IPCC y MAE	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pag.
Figura 1. Mapa de ubicación de Ecuador continental	14
Figura 2. Módulo de Análisis de cambio de LCM.....	17
Figura 3. Red Neuronal de Perceptrones multicapas (MLP) aplicada al modelado del cambio de uso del suelo	18
Figura 4. Modelo Soft y Hard de la proyección espacial al 2030 del bosque nativo.....	19
Figura 5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental para los años 2000 y 2016.....	26
Figura 6. Pérdidas y ganancias de las coberturas en Ecuador continental durante el periodo 2000-2016.....	28
Figura 7. Coberturas y uso del suelo por provincias en el año 2000	30
Figura 8. Coberturas y uso del suelo por provincias en el año 2016	30
Figura 9. Probabilidades espaciales de cambios de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental: Bosque Nativo y páramo.....	32
Figura 10. Probabilidades espaciales de cambios de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental: Vegetación arbustiva y herbácea.....	32
Figura 11. Proyección espacial de Bosque Nativo al 2030 en Ecuador continental	33
Figura 12. Proyección espacial de Páramo al 2030 en Ecuador continental.....	34
Figura 13. Proyección espacial de Vegetación Arbustiva al 2030 en Ecuador continental	35
Figura 14. Proyección espacial de Vegetación Herbácea al 2030 en Ecuador continental.....	36
Figura 15. Sensibilidad de cambio del Bosque Nativo al 2030 por provincias	37
Figura 16. Sensibilidad de cambio del Páramo al 2030 por provincias	38
Figura 17. Sensibilidad de cambio de la Vegetación Arbustiva al 2030 por provincias	39

Figura 18. Sensibilidad de cambio de la Vegetación Herbácea al 2030 por provincias40

Figura 19. Mapa de precipitación media anual (2000-2016) de Ecuador continental42

Figura 20. Mapa de erosividad (factor R) de Ecuador continental43

Figura 21. Mapa de erodabilidad (factor K) de Ecuador continental.....45

Figura 22. a) Porcentaje de arena, b) Porcentaje de limo, c) Porcentaje de arcilla, d) Porcentaje de materia orgánica y e) Tasa de permeabilidad de Ecuador continental46

Figura 23. Mapa de longitud y pendiente (factor LS) de Ecuador continental48

Figura 24. Mapa de erosión de Ecuador continental del año 2000, 2016 y la proyección espacial de la erosión al 2030.....53

LISTA DE ACRÓNIMOS

CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
IGM	Instituto Geográfico Militar
IMF	Índice Modificado de Fournier
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
LCM	Land Change Modeler
MAE	Ministerio del Ambiente
MED	Modelo de Elevación Digital
RUSLE	Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SIGTierras	Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USLE	Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada

**EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU
PROYECCIÓN FUTURA EN LA EROSIÓN HÍDRICA EN
ECUADOR CONTINENTAL**

RESUMEN

En el presente estudio se analizó el cambio de cobertura y uso del suelo por un periodo de dieciséis años en Ecuador continental con base en los mapas de cobertura y uso de la tierra elaborados por el Ministerio del Ambiente (MAE) a escala 1:100 000. Para este proceso se empleó el panel de análisis de cambios del software Land Change Modeler (LCM) con el fin de determinar las ganancias, pérdidas y cambio neto de las distintas coberturas, además se elaboró un modelo integrado por variables determinantes de cambios para generar un escenario futuro de la cobertura vegetal nativa al 2030. Posteriormente, se estimó la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) constituida por el factor erosividad (R), erodabilidad (K), longitud y pendiente (LS) y cobertura (C). Los resultados reportan que la cobertura natural disminuyó 3.87% (14 992 685 ha) para el año 2016, destacándose con mayor pérdida la vegetación herbácea (52.16%). Esta disminución se debe a la expansión de tierras agrícolas y zonas antrópicas como se evidencia fundamentalmente en la provincia de Bolívar, El Oro, Esmeraldas y Morona Santiago. Los escenarios futuros prevén un impacto positivo de las estrategias de conservación en la cobertura vegetal nativa, a excepción de la vegetación herbácea señalando que es la más vulnerable a cambios. Con respecto a la erosión hídrica, se registró promedios altos especialmente para el año 2030 ($52 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en comparación con el año 2000 ($31 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y 2016 ($35 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Para el año 2000, el 72.33% de la superficie continental presentó una tasa de erosión $< 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ por la presencia de cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica que protegen el suelo y contrarrestan el poder erosivo de la precipitación como se observa en Sucumbíos, Orellana y Pastaza. Mientras que las tasas más altas de erosión ($100 - >200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) corresponden al 11.42% de la extensión total, observándose especialmente en Manabí, Bolívar, Loja y sureste del Oro por la escasa vegetación y desarrollo de actividades agrícolas en zonas de topografía irregular. Estas tasas se incrementarán en años posteriores.

Palabras clave: cambios de uso del suelo, modelación, erosión hídrica, RUSLE.

ABSTRACT

In the present study, the land use and land cover change was analyzed in Continental Ecuador for a period of sixteen years and based on the land use maps elaborated by the "Ministerio del Ambiente" (MAE) at scale 1:100 000. For this process, the change analysis tab of the Land Change Modeler (LCM) software was used to determine the gains, losses and net change of the different coverages; furthermore, a model integrated was developed by variables determinants of changes to generate a future scenario of native vegetation cover at 2030. Subsequently, the spatio-temporal variability of water erosion was estimated applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) which consists of rainfall erosivity factor (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS) and vegetation cover (C). The results report that natural vegetation cover decreased 3.87% (14 992 685 ha) for the year 2016, with greater loss of herbaceous vegetation (52.16%). This depletion is due to the expansion of agricultural land and anthropic areas, particularly in the province of Bolívar, El Oro, Esmeraldas and Morona Santiago. Future scenarios foresee a positive impact of conservation strategies on the native vegetation cover, with the exception of herbaceous vegetation making evident the most vulnerable to change. Regarding water erosion, high averages were recorded especially for the year 2030 ($52 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and compared to the year 2000 ($31 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and 2016 ($35 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). For the year 2000, 72.33% of the continental surface presented an erosion rate $< 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ due to the presence of vegetation cover and organic matter content that protect the soil and counteract the erosive power of precipitation as it was observed in Sucumbíos, Orellana and Pastaza. Meanwhile, the highest erosion rates ($100 - > 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) correspond to 11.42% of the total extension, especially in Manabí, Bolívar, Loja and the south east El Oro due to sparse vegetation and development of agricultural activities in areas of irregular topography. These rates will increase in later years.

Keywords: land use change, modelling, water erosion, RUSLE.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso finito y no renovable (Zhao *et al.*, 2013) de gran importancia ambiental, por ser la base donde se desarrolla la vida y brindar diversidad de bienes y servicios ecosistémicos. No obstante, en los últimos años el proceso de degradación del suelo se ha incrementado exorbitantemente a nivel mundial, siendo la erosión del suelo la principal causa y a la vez intensificada por la presión que el ser humano ejerce sobre el recurso (Gelagay y Minale, 2016). Las actividades agrícolas, forestales, mineras, entre otras influyen fuertemente en la pérdida del suelo especialmente al no ser aplicadas mediante técnicas sostenibles (Pizarro *et al.*, 2009). De esta manera, el suelo se encuentra vulnerable, expuesto a efectos destructivos por acción del agua y viento. FAO (2015a) estima que la erosión se lleva de 25 a 40 000 millones de toneladas de la capa arable del suelo cada año, generando afectaciones a la funcionalidad del suelo como alteraciones al rendimiento de los cultivos, capacidad de almacenamiento de carbono, nutrientes y agua.

Diversos estudios señalan que la erosión hídrica es la causa más importante de erosión de tierras que amenaza a los medios de vida de los agricultores y la integridad de los ecosistemas debido a la alta intensidad de la precipitación (Fenta *et al.*, 2017). Por tanto, la erosión hídrica no es una problemática ajena a Ecuador donde el 47% de los suelos a nivel nacional se encuentran bajo distintos grados de erosión (Morales *et al.*, 2010), el 25% concierne a la sierra mientras que un 15% a la región costa (Jaramillo, 2015). Existen zonas que son más susceptibles a la erosión como las Estribaciones de la Cordillera de los Andes la cual cuenta con pendientes escarpadas entre 50-70%, y por efecto de actividades antrópicas como la actividad agrícola han sido modificadas en su estado natural (Geo Ecuador, 2008), convirtiéndolas en zonas sensibles y vulnerables al estar expuestas a la precipitación. Por ejemplo, estudios realizados por Ochoa *et al.* (2016), concluyeron que el 56.1% del área de la cuenca Catamayo-Chira, ubicada en la Región Sur del Ecuador (RSE), se encuentra en un rango alto de riesgo de erosión por la presencia de áreas para agricultura. Es decir, la erosión hídrica es intensificada por la expansión agrícola (Ganasri y Ramesh, 2015) generando notables pérdidas del suelo.

Adicionalmente, la crisis económica y social va de la mano con el uso intensivo de los recursos naturales (Concha, 2006), lo que ha provocado un incremento del porcentaje del cambio de uso del suelo, y concomitantemente deterioro del entorno natural (Alvarez *et al.*, 2015). Este

deterioro se debe principalmente a los cambios en la cobertura forestal a causa de la deforestación y la transferencia de suelos para uso agropecuario como la agricultura seca y cultivos de regadío (Winckell *et al.*, 1997). De esta manera, las actividades agrícolas influyen fuertemente en la transformación de los ecosistemas naturales. En Ecuador, la cobertura forestal ha sido convertida en pastizales, tierras de uso agrícola y otros usos de carácter productivo para producir etanol y alimento para ganado (Ochoa *et al.*, 2016). Otra de las actividades que afectan a la pérdida de la biodiversidad y ecosistemas es la extracción de madera de especies con alto valor comercial que influye fuertemente en la pérdida de los ecosistemas como acontece en los Bosque Andinos Tropicales localizados en la RSE (Cuenca *et al.*, 2016) y en el Chochó ecuatoriano, especialmente en la provincia de Esmeraldas (Palacios y Jaramillo, 2016), puesto que los agricultores adquieren ingresos económicos con mayor rapidez (Castro *et al.*, 2013).

Por consiguiente, los efectos de las tierras agrícolas conllevan a la pérdida de la materia orgánica (MO) y nutrientes del suelo generando la degradación de este recurso. De tal manera, que la conservación del suelo y el manejo sostenible de la tierra son esenciales para revertir la tendencia de la degradación del suelo y garantizar la seguridad alimentaria y un futuro sostenible (FAO, 2015b). La cobertura vegetal es un factor clave para evitar la degradación y erosión de los suelos mediante su conservación o restauración (Zhou *et al.*, 2008; Alvarez *et al.*, 2017) debido que la presencia de vegetación reduce la escorrentía superficial, aumenta la infiltración, y mejora la estabilidad del suelo (Zhou *et al.*, 2008).

En este contexto, surge la necesidad de realizar la presente investigación para determinar el efecto de cambio de uso del suelo en Ecuador continental con el fin de conocer los cambios más trascendentales que ha existido en el sistema territorial, así como la comprensión de las variables que influyen en el proceso de erosión del suelo, puesto que la erosión hídrica y el manejo de la cobertura vegetal son factores muy dinámicos propiciados por la intervención del ser humano, por lo que es importante conocer su cambio a través de los años. La información generada sobre la erosión del suelo puede apoyar al desarrollo de políticas para lograr una planificación ambiental sostenible y un manejo adecuado de los recursos naturales (Fenta *et al.*, 2017).

Se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Determinar el efecto del cambio de cobertura y uso del suelo, su proyección futura e intensidad de precipitación en la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica mediante modelación en Ecuador continental.

Objetivos específicos

- Analizar el cambio de cobertura y uso del suelo en el período 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.
- Determinar la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cambio de uso del suelo

El suelo es la capa delgada que cubre la superficie de la tierra compuesto de minerales, agua, aire y MO. Este recurso se caracteriza por controlar los ciclos biológicos, hidrológicos y geoquímicos en el sistema Tierra y proveer de bienes y servicios a la sociedad humana (Ochoa *et al.*, 2016). No obstante, la actuación del hombre ha generado cambios significativos en la dinámica del uso del suelo obteniendo como resultado la conversión de la vegetación natural y pérdida del recurso.

Se entiende cambio de uso del suelo como el resultado de la combinación de factores que inciden directa e indirectamente en las decisiones de un propietario de una superficie de terreno sobre la utilización del mismo en función de su supervivencia (Lambin *et al.*, 2003). El ser humano utiliza este recurso natural para producir el 95% de sus alimentos y adquirir diversidad de bienes, por lo que es fundamental el desarrollo de estudios para conocer su variación a través del tiempo debido a que un inadecuado manejo del suelo y un aprovechamiento desmesurado del mismo conlleva a importantes problemas que enfrentan los suelos como su degradación, erosión y, por ende, la pérdida de fertilidad (Cure, 2012).

En las últimas décadas, Ecuador se ha convertido en uno de los países con mayor demanda de uso del suelo derivado del avance de la frontera agrícola, ganadería extensiva y el crecimiento desordenado de la urbanización sustituyendo el suelo agrícola en urbano, como es el caso de la provincia del Azuay (Pinos, 2016). De este modo, el hombre interviene en ecosistemas de vegetación natural como en los páramos andinos del Ecuador con pendientes escarpadas (> 50% de inclinación) (Lozano *et al.*, 2016), para la implementación de actividades agrícolas y ganaderas desarticulando la función social y ambiental del suelo (Pinos, 2016). A esto se suma las áreas pobladas, construcciones viales y la presencia de especies forestales como el pino (*Pinus patula*) afectando y reduciendo los bienes y servicios que brinda este ecosistema (Crespo *et al.*, 2014).

La actividad agrícola se desarrolla constantemente en el territorio ecuatoriano aplicada mediante prácticas ancestrales como la quema después de la cosecha y antes del desbroce, para incrementar la productividad de los cultivos (cultivo de papa, haba en zonas de páramo). Por ello, la fertilidad del suelo es afectada en el transcurso de los años, y a su vez obteniendo suelos desnudos sin vegetación propensos a deslizamientos, desprendimientos o hundimientos (De Alba *et al.*, 2011;

Pinos, 2016), tal es el caso de la provincia de Chimborazo (Lozano *et al.*, 2016). La extracción forestal es una actividad de alto rendimiento económico para los agricultores, por tal razón optan por dicha actividad, intensificando áreas sin licencia para aprovechamiento forestal e influyendo en la destrucción total de los bosques naturales como en el Chocó Ecuatoriano (provincia de Esmeraldas) (Palacios y Jaramillo, 2016), y los Bosques Andinos Tropicales (Cuenca *et al.*, 2016).

De esta manera, la dinámica del cambio de uso del suelo influye en la toma de decisiones y acciones sobre la conservación de la cobertura vegetal, por ello el 20% del territorio continental comprende áreas bajo protección, además de contar con programas de conservación como SocioBosque (Cuesta *et al.*, 2017) para evitar la disminución de la cobertura vegetal nativa, y preservar el patrimonio natural del Ecuador continental.

2.2. Erosión del suelo

La erosión del suelo es el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o rocosos desde cualquier parte de la superficie de la tierra, por acción de la fuerza de un fluido en movimiento puede ser generada tanto por el agua como por el viento (Suárez, 1998; Alatorre *et al.*, 2014). La erosión es un proceso de origen natural, no obstante, esta se califica como degradación cuando se presentan actividades antrópicas indebidas que lo aceleran, intensifican y magnifican, generando consecuencias ambientales, sociales, económicas y culturales (IDEAM y UDCA, 2015).

Por lo tanto, llega a ser el mayor fenómeno exógeno que provoca evolución de la superficie terrestre convirtiéndose en un grave problema ambiental a nivel mundial (Zhao *et al.*, 2013), generando fenómenos extremos como las inundaciones catastróficas, sequías y hambruna que amenazan la seguridad alimentaria y ambiental en todo el mundo (Lal, 2003). Así, el ser humano opta por abandonar tierras con un nivel bajo de fertilidad y productividad biológica por su reducción del perfil edáfico efectivo y el volumen del suelo explotable por la vegetación o cultivo (De Alba *et al.*, 2011). A nivel global, se estima que la tasa de pérdida de suelo es de 10 a 40 veces más rápida que la tasa de renovación del suelo afectando la calidad medioambiental (Pimentel, 2006).

2.3. Erosión hídrica

La erosión hídrica es la agresividad de la precipitación para provocar erosión (Baffour *et al.*, 2012) debido a sus características físicas como la intensidad, duración y frecuencia (Núñez, 2001; Bagio *et al.*, 2017). Las gotas de lluvia impactan sobre la superficie de la tierra generando disgregación de la roca o suelo. El efecto de la lluvia se magnifica cuando se conjugan otras variables como la topografía, pendiente escarpada de los terrenos, la ausencia de cobertura vegetal y la condición textural, o el pobre desarrollo estructural de los suelos (De Alba *et al.*, 2011). De esta manera, la acción del agua es un agente erosivo de primera magnitud donde la fuerza gravitacional permite que las gotas de lluvia arrastren las partículas del suelo dando lugar a diversas formas de erosión hídrica (IDEAM y UDCA, 2015) como se observa en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clases de erosión hídrica

TIPO DE EROSIÓN	ACCIÓN	EFEECTO
Laminar	Remoción de delgadas capas de suelo de manera uniforme en terrenos de baja pendiente.	- Pérdida de porción de suelo con mayor cantidad de MO. - Disminución de la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo. Acumulación de sedimentos.
Surcos o regueros	El flujo concentrado del agua produce incisiones de 30 cm de profundidad y 3-5 cm de ancho en forma de U o V.	- El flujo se concentra a favor de las líneas de máxima pendiente del terreno. - Alto aporte de sedimentos.
Cárcavas o barrancos	Mayor impacto por producir zanjones de gran tamaño, fragmentando irreversiblemente la estructura del suelo.	- Incisiones mayores a 30cm de profundidad. - Su restauración es difícil y compleja.
Salpicadura	Fraccionamiento de los agregados por acción de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo.	- Genera compactación del suelo y esorrentía. - Reducción de la capacidad de infiltración.

Fuente: (Bienes, 2006; Bascuñán, 2010)

De esta manera, la erosión hídrica se ha convertido en la principal amenaza medioambiental que genera degradación del suelo a nivel mundial afectando fundamentalmente a los países en desarrollo (Fenta *et al.*, 2017). Existen varios modelos para estimar la erosión con diversos grados de complejidad (Ganasri y Ramesh, 2015), entre ellos se encuentran los modelos

empíricos que se caracterizan por ser los más empleados, como la RUSLE, la cuál ha sido utilizada en distintas investigaciones para determinar zonas susceptibles a la erosión hídrica e identificar áreas prioritarias para conservación del suelo y restauración del paisaje (Alvarez *et al.*, 2017).

No obstante, Ecuador carece de estudios relacionados con la erosión hídrica en comparación con otros países (Schoorl *et al.*, 2006), principalmente por la ausencia de información de alta resolución a escala nacional. Las condiciones climáticas, clases texturales del suelo, la topografía y el manejo de la cobertura son factores que influyen en la pérdida del suelo, sin embargo datos de precipitación son escasos en zonas de altas montañas (Región Andina) (Ochoa-Cueva *et al.*, 2013). Segarra (2014) menciona que el 7% del área continental corresponde a zonas muy sensibles a sufrir erosión las cuales dependen de los factores mencionados anteriormente. A continuación, se detalla algunas investigaciones desarrolladas sobre la erosión hídrica, fundamentalmente en la RSE.

El estudio de Ochoa *et al.* (2016) determinó que el mayor riesgo de erosión se encuentra en el centro y suroeste de la cuenca Catamayo-Chira, mientras que las áreas con presencia de cobertura vegetal conllevan un riesgo bajo de erosión. Otras investigaciones realizadas en la provincia de Loja detallan que es una provincia con tendencia a sufrir un alto riesgo de erosión debido al manejo de la cobertura, condiciones climáticas y el efecto de la topografía irregular podrían desencadenar un proceso de degradación como señala Alvarez *et al.* (2017) en su estudio donde determinaron que el 15.8% de la superficie del cantón Macará presenta una tasa muy alta de erosión ($> 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) a causa de la deforestación y el cambio de uso del suelo. La mayor parte de la superficie de los cantones Zapotillo y Pindal (61.73%) está sujeta a un rango ligero de erosión ($< 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) por la presencia de la cobertura bosque, y el 12.43% presenta altas pérdidas del suelo ($> 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) a causa del desarrollo de cultivos anuales y perennes los cuales poseen baja capacidad de contrarrestar el poder erosivo de la precipitación (Tamayo, 2016).

En la misma línea, se encuentran los cantones Catamayo y Gonzanamá donde el 40.78% de la superficie se caracteriza por estar en un rango moderado-alto de erosión ($50\text{-}200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) debido a que el suelo está destinado a fines agrícolas-ganaderos sin la aplicación de medidas de protección (Vega, 2016).

2.4. Modelos para estimar la erosión

En la actualidad existen diversos modelos de predicción de la erosión del suelo que ayudan a orientar la planificación y prácticas sostenibles sobre el recurso suelo (Yin *et al.*, 2015), los cuales van desde el análisis en campo hasta modelos físicos matemáticos que simulan cada uno de los factores que intervienen en la erosión (Alatorre *et al.*, 2014). Por lo general, los modelos más aplicados son modelos empíricos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith (1978), y su versión revisada RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada). Estos modelos tienen en común un factor de erosividad de la lluvia (R), que refleja la capacidad potencial de la precipitación para causar pérdida de suelo, y es uno de los más importantes factores básicos para la estimación de la erosión del suelo (Yin *et al.*, 2015).

2.4.1. Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada (RUSLE)

USLE ha sido el modelo de erosión empírico frecuentemente utilizado y admitido para valorar las pérdidas de suelo en diversos países (Vega-carreño y Febles, 2005). Sin embargo, posee algunas limitaciones como la interdependencia entre los factores. Este modelo fue diseñado para pequeñas pendientes (Alonso *et al.*, 2007), por ello, RUSLE (Ec.1) es una revisión de USLE propuesta por Renard *et al.* (1991) que mantiene la misma estructura para estimar la pérdida de suelo modificando la obtención de cada factor del modelo. Esta herramienta calcula la erosión laminar y en surcos generada por la precipitación y la escorrentía asociada, para un perfil de ladera (Giménez, 2008).

Para ello, toma en cuenta los factores que participan en la erosión como la precipitación, el suelo, la topografía, uso de suelo y las prácticas de conservación. Además, se caracteriza por ser un buen indicador para el desarrollo de planes de conservación para controlar la erosión bajo diferentes usos de suelo como en tierras de cultivo, pastizales y tierras de bosque perturbado (Adeola *et al.*, 2013). A continuación, se detallan los factores que integran la fórmula RUSLE propuesta por Renard *et al.* (1991) para estimar la pérdida de suelo:

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

- ✓ **E:** es la pérdida de suelo por unidad de superficie. Sus dimensiones son $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$
- ✓ **R:** es el factor erosividad de las precipitaciones ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

- ✓ **K:** es el factor erodabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)
- ✓ **LS:** es el factor de longitud y pendientes de la ladera respectivamente
- ✓ **C:** es el factor de cobertura
- ✓ **P:** es el factor de prácticas de conservación

Los factores LS, C y P son adimensionales.

2.4.1.1. Factor erosividad (R)

Refleja el efecto de la intensidad de la precipitación en la erosión del suelo, es decir, cuantifica el impacto de la gota de lluvia, así como la duración y velocidad de la escorrentía que se produce. De tal manera, que requiere información de varios años del período de interés para obtener una base confiable de datos con el fin de calcular R. Cabe destacar que R es el factor más importante para estimar la erosión del suelo, puesto que la pérdida de tierras agrícolas está relacionado tanto de la intensidad como la energía de la precipitación (Ganasri y Ramesh, 2015).

2.4.1.2. Factor erodabilidad (K)

Representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado (Ganasri y Ramesh, 2015), por ello depende de las propiedades intrínsecas del suelo como la textura, la estructura, contenido de materia orgánica y la permeabilidad, de tal manera que cada tipo de suelo se encuentra expuesto a diferentes tasas de erosión (Oñate, 2004; Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009). La textura del suelo es el factor principal que afecta a K, puesto que el contenido de partículas de alta cohesión como la arcilla permite que el suelo tenga valores bajos de K debido a su resistencia al desprendimiento de partículas. Mientras que suelos con presencia de limo y no cuenta con cobertura vegetal son más susceptibles a la erodabilidad (INETER, 2005).

2.4.1.3. Factor de longitud y pendiente (LS)

El factor LS comprende el efecto de la topografía sobre la erosión. Por un lado, la pendiente (S) refleja la influencia de la gradiente de la pendiente en la erosión, ya que el potencial de erosión incrementa con la pendiente mientras que la longitud (L) se define como la distancia horizontal entre el punto donde inicia el flujo de escorrentía hasta donde hay acumulación de los sedimentos (Oñate, 2004; Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009).

2.4.1.4. Factor de cobertura (C)

El factor de cobertura del suelo C se basa en las diferencias de comportamiento del suelo frente a la erosión en función de su cobertura (Ramírez-Ortiz *et al.*, 2009). Es decir, considera el efecto de la cobertura sobre la erosión según las características del ecosistema tales como especies, el estado del ecosistema en sincronización con los periodos de lluvias, materia orgánica, entre otros (Oñate, 2004).

2.4.1.5. Factor de prácticas de conservación (P)

El factor P se define como la proporción de pérdida de suelo bajo prácticas de conservación de suelos específicos, tendientes a disminuir esta pérdida. Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento, influyen directamente en la conservación o no del suelo (Oñate, 2004; Benavidez *et al.*, 2018).

2.4.2. Proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP)

Es un modelo de base física que realiza una síntesis de los elementos individuales que afectan la erosión, incluyendo las interacciones complejas entre varios factores y su variabilidad espacial y temporal (Alonso *et al.*, 2007). WEPP predice erosión laminar y en canalículos, así como la erosión de escurrimiento y carga y deposición de sedimentos. Primero, calcula la estimación diaria del estado del suelo y de la vegetación, en presencia de precipitación o riego, luego la infiltración y escurrimiento. Finalmente, evalúa la desagregación, transporte y deposición del sedimento (Jorge *et al.*, 2015).

WEPP se diferencia de los modelos empíricos, al simular la cantidad de sedimentos tanto *in situ* como *ex situ* de los cauces de agua. Por consiguiente, calcula la cantidad total de suelo disgregado por la precipitación y por el escurrimiento contrastándolo con la capacidad de transporte total de la lluvia y de la escorrentía. En consecuencia, existirá erosión si la capacidad de transporte supera la cantidad total de suelo, en otros casos se origina el proceso de deposición. En este modelo físico interviene las siguientes variables: el clima, las precipitaciones, la topografía, el suelo y el manejo de suelo agronómico (Jorge *et al.*, 2015).

Al aplicar este modelo se debe realizar una calibración de los parámetros sensibles del modelo: la conductividad hidráulica efectiva (K_b) (Ec. 2) (Ec. 3), la erodabilidad en los surcos (K_{ib}) (Ec. 5), erodabilidad entre surcos (K_{rb}) (Ec. 4), y el esfuerzo cortante crítico (TC_b) (Ec. 6) (Jorge

et al., 2015). Para su cálculo se emplea las siguientes ecuaciones establecidas por Alberts *et al.* (1995) teniendo en cuenta la textura, MO y la capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial:

En suelos con contenido de arcilla se aplican las siguientes fórmulas:

$$\text{Contenido de arcilla } \leq \text{ al } 40\%: K_b = -0.265 + 0.0086 (100 Ar)^{1.8} + (11.46 CIC)^{-0.75} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Contenido de arcilla } > \text{ al } 40\%.: K_b = 0.0066 \left[\frac{2.44}{Ac} \right] \quad (\text{Ec. 3})$$

En suelos con contenido de arena mayor o igual al 30% se aplican las siguientes fórmulas:

$$K_{rb} = 0.00197 + 0.030 Armf + 0.03863 e^{-184 MO} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000 Armf \quad (\text{Ec. 5})$$

$$TC_b = 2.67 + 6.5 Ac - 5.8 Armf \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

- ✓ **Ar:** es el contenido de arena en porcentaje
- ✓ **CIC:** es la capacidad de intercambio catiónico (meq/100g, siempre es mayor 1 meq/100g)
- ✓ **Ac:** es la fracción del contenido de arcilla
- ✓ **Armf:** es la fracción del contenido de arenas muy fina
- ✓ **MO:** es la fracción del contenido de materia orgánica del suelo

Al realizar la calibración de los parámetros sensibles, generalmente los valores se encuentran dentro de los siguientes rangos: K_{rb} es de 0.002 a 0.050 $s.m^{-1}$, K_{ib} entre 0.5×10^6 a 12×10^6 $Kg.s. m^{-4}$; TC_b es de 0.3 a 7.0 (Alberts *et al.*, 1995). La finalidad de la calibración de estos parámetros es reducir el sesgo de los datos a medir en relación al cambio de las variables respuesta, es decir, se debe ajustar el modelo para el área de estudio en función de las condiciones climáticas y del suelo. Así, este modelo de mayor precisión presenta diversas ventajas como la estimación de erosión por escorrentía o sedimentación a nivel de cuencas, pérdida de suelo, cantidad de sedimentos aportada en cauces los cuales afectan a la calidad del agua, entre otros efectos ambientales; lo que contribuye al diseño de alternativas sostenibles y de conservación en zonas susceptibles al fenómeno de la erosión (Laflen *et al.*, 2004; Jorge *et al.*, 2015).

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el territorio de Ecuador continental ubicado en la línea equinoccial que limita al norte con Colombia, al oeste con el Océano Pacífico, al este y sur con Perú (Figura 1). Ecuador continental cuenta con 23 provincias, 221 cantones, y 1 230 parroquias (urbanas y rurales) (IGM, 2017). A pesar de contar con una superficie territorial pequeña (25 341 500 ha) (Cuesta *et al.*, 2015), se caracteriza por poseer variedad de relieves, climas, ecosistemas y diversidad biológica considerado como uno de los países más biodiversos del mundo, cuya diversidad se encuentra distribuida entre sus regiones continentales denominadas: la Costa del Pacífico (24.6% del área), la Cordillera Andina (24.8%) y la Cuenca amazónica (47.8%) (MAE, 2010). Las características topográficas de cada región despliegan una variedad de climas, así cada región natural se caracteriza por lo siguiente:

- Región Costa o Litoral

Localizado al oeste de la Cordillera de los Andes ocupando un cuarto del territorio continental donde concurren las condiciones humedad del Chocó Colombiano y las muy áridas de la Costa peruana (MAE, 2010). Por ello, posee un clima tropical árido al suroeste, seco a húmedo en la parte central-sur y muy húmedo al norte en la zona del Chocó. La precipitación anual alcanza valores mayores a los 6000 mm por la influencia de la corriente cálida de El Niño en los meses de diciembre, abril y mayo mientras que en la parte sur occidente alrededor de 355 mm determinada por la corriente fría de Humboldt durante junio a noviembre. Cuenta con una temperatura media mensual de 27 °C con pequeñas variaciones estacionales. En esta región los cultivos más predominantes de exportación son el banano, así como el café, cacao, frutas, arroz, soya, entre otros, que permiten mantener un negocio internacional. Las provincias que corresponden a esta región son Esmeraldas, Manabí, Guayas, Los Ríos, Santa Elena y El Oro (IGM, 2017).

- Región Andina

Este callejón interandino está dominado por la Cordillera de los Andes donde se localizan la mayoría de los volcanes del país y cumbres nevadas de altura media de 4000 m, se distinguen dos cordilleras, la Occidental y la Real u Oriental. Se caracteriza por un clima templado semi-húmedo en la zona interandina, cálido y seco en los valles y frío en las altas montañas (páramos).

Posee una estación lluviosa o invierno entre los meses de octubre a mayo con una precipitación media anual de 1500 mm, no existen variaciones significativas estacionales pero la temperatura media anual puede variar de 12 a 18 °C. Sin embargo, en los páramos la temperatura máxima puede alcanzar los 20 °C mientras que las mínimas menores a 0 °C. La región Andina se caracteriza por representar el 60% de la diversidad de flora a nivel de país y está formado por Carchi, Imbabura, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay y Loja (MAE, 2010; IGM, 2017).

- **Región Amazónica**

Se ubica al este de la Cordillera de los Andes con una extensión aproximada de 12 000 000 ha ubicada a una altura por debajo de los 1300 msnm. Sus formaciones montañosas determinan la presencia de la tercera cordillera instaurada por Napo Galeras al norte, Cutucú al centro y la Cordillera del Cóndor al sur. Se caracteriza por un clima tropical muy húmedo en toda la región, debido a la densidad de bosques que retienen gran cantidad de humedad donde la precipitación anual varía en un rango de 2000 - 5000 mm con una temperatura respectivamente homogénea de 24°C de promedio anual. En consecuencia, existe gran riqueza vegetal en base a especies arbóreas alrededor de un 50% en la Amazonía, más que en el noroccidente del país (MAE, 2010). Esta región comprende las provincias de Sucumbíos, Orellana, Napo, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe.

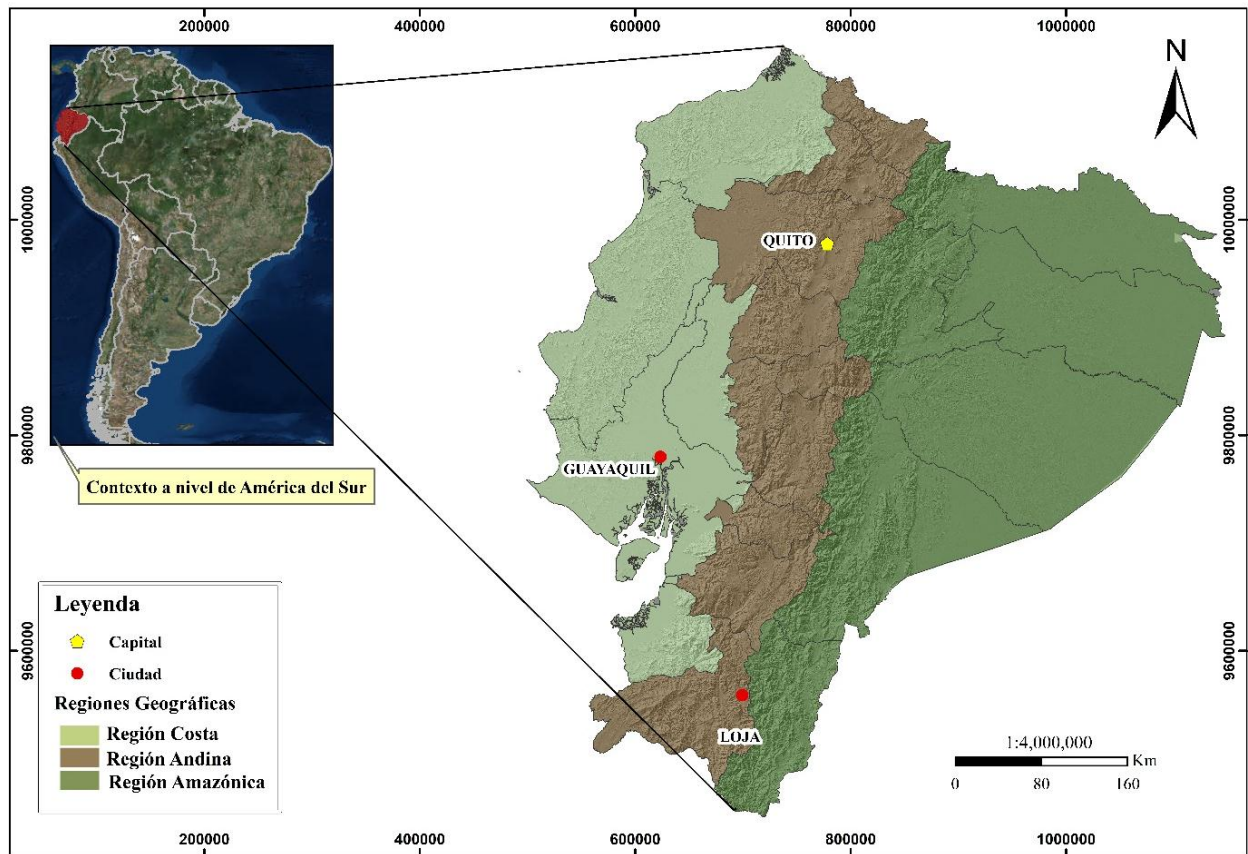


Figura 1. Mapa de ubicación de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

3.2. *Análisis del cambio de cobertura y uso del suelo en el período 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.*

Para el análisis del cambio de uso del suelo, se utilizó como base los mapas de cobertura y uso de la tierra, elaborados por el Ministerio del Ambiente (MAE) a escala 1:100 000 y disponibles en el mapa interactivo ambiental de la página web: mapainteractivo.ambiente.gob.ec. Para ello, se realizó dos procedimientos, primero se analizó el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo entre dos escenarios, correspondientes al tiempo 1 (t1) año 2000 y el tiempo 2 (t2) para el 2016. Posteriormente, se modeló los escenarios futuros al 2030 de la cubierta vegetal nativa de Ecuador continental para determinar las probabilidades de cambio, empleando el Modelador de Cambios en el Terreno (LCM), un software dentro de TerrSet. LCM es un sistema integrado de aplicaciones para el monitoreo y modelado geoespacial (Ronald, 2015) que permite interpretar los efectos cambiantes de las distintas coberturas en la zona de estudio.

3.2.1. Procesamiento de la información

El procesamiento de información se refiere a la obtención final del mapa de cobertura para el periodo de estudio, en lo que respecta a la modificación de la leyenda debido a que los mapas de cobertura elaborados por el MAE siguen los lineamientos establecidos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y el MAE sobre las clases de uso/cobertura organizadas en dos niveles jerárquicos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Leyenda de las clases de uso/coberturas establecidas según IPCC y MAE

NIVEL I	NIVEL II
Bosque	Bosque Nativo
	Plantación Forestal
Tierra Agropecuaria	Cultivo Anual
	Cultivo Permanente
	Cultivo Semipermanente
	Pastizal
	Mosaico Agropecuario
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva
	Vegetación Herbácea
	Páramo
Cuerpo de Agua	Natural
	Artificial
Zona Antrópica	Área Poblada
	Infraestructura
Otras tierras	Glaciar
	Área sin cobertura vegetal
Sin información	Sin información

Fuente: (MAE y CONDESAN, 2011)

Por consiguiente, se realizó un análisis de las leyendas temáticas basándose en el Anexo 3. Leyenda temática de tipos de uso y cobertura del suelo del MAE y CONDESAN (2011) para definir las clases de cobertura y obtener leyendas idénticas en los dos mapas (Tabla 1). Este proceso se realizó empleando ArcGIS 10.3.

Tabla 1. *Clasificación de las clases de cobertura*

ID	COBERTURA
1	Bosque nativo
2	Cuerpos de agua
3	Otras tierras
4	Páramo
5	Plantación forestal
6	Tierras agropecuarias
7	Vegetación arbustiva
8	Vegetación herbácea
9	Zona antrópica

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Determinación del cambio de uso del suelo

Una vez modificada las clases de cobertura de los mapas del t1 y t2, se procedió a utilizar el módulo LCM para Sustento Ecológico orientado al constante problema de conversión acelerada del terreno y a las necesidades analíticas bien específicas de la conservación de la biodiversidad (Eastman, 2006). El proceso para la evaluación y predicción de los cambios de las coberturas constó de tres paneles: Análisis de Cambios, Potenciales de Transición y Predicción de Cambios.

- Análisis de Cambios

Para analizar el cambio de uso de suelo, el panel de análisis de cambios de LCM proporcionó una evaluación estadística del cambio cuantitativo mediante la representación de ganancias y pérdidas experimentadas por las distintas clases de usos y coberturas entre el t1 y t2. A su vez, presenta una segunda opción referente al cambio neto (Dij), el cual indica el resultado de las áreas de las coberturas, añadiendo las ganancias y luego restando las pérdidas. Por último, señala las transiciones determinadas a partir de la identificación y descripción de los cambios. Se utilizó la unidad de hectáreas para determinar la superficie de todas las coberturas (Figura 2).

Cabe destacar que los dos últimos paneles se emplearon para realizar la modelación de los escenarios futuros que se detallan en el siguiente apartado.

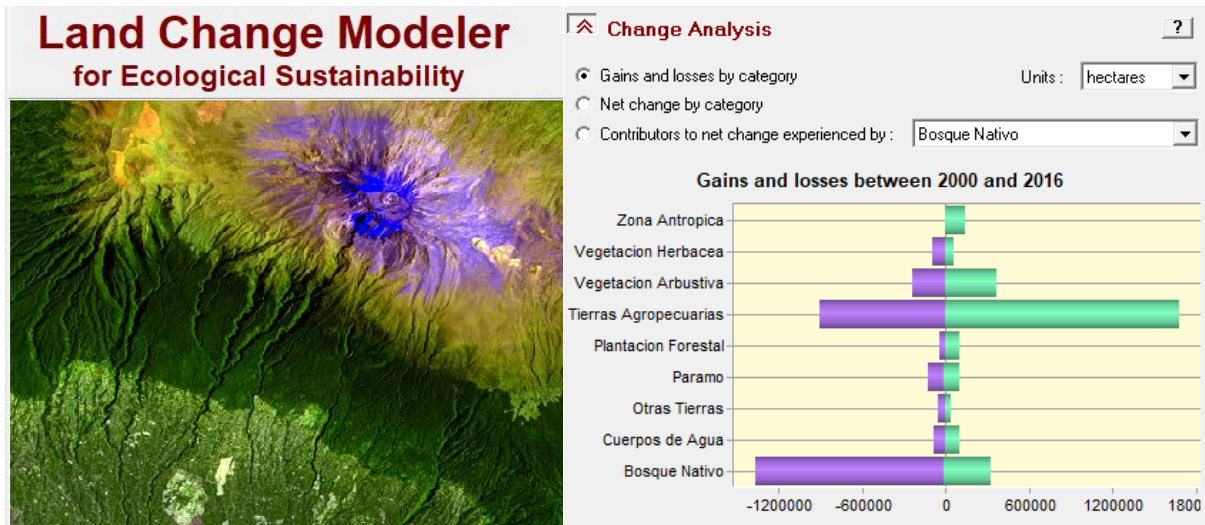


Figura 2. Módulo de Análisis de cambio de LCM

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se empleó la metodología de Pontius *et al.* (2004) y Tochiuitl *et al.* (2016) para determinar el cambio total (DT) resultado de la suma de las pérdidas (L_{ij}) y ganancias (G_{ij}) (Ec.7), así como el intercambio (I) que es el cambio de forma o posición de categorías que indica la cantidad de superficie que se ha intercambiado entre categorías, determinado por la diferencia entre el cambio total y el cambio neto (Ec.8).

$$DT_{ij} = G_{ij} + L_{ij} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$I_{ij} = DT_{ij} - D_{ij} \quad (\text{Ec. 8})$$

3.2.3. Modelación de los escenarios futuros del cambio de la cobertura vegetal nativa en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.

La modelación de los escenarios futuros al 2030, se realizó en base a los mapas de cobertura y uso de la tierra del t1 y t2. Se consideró esta fecha debido al Informe de Evaluación del IPCC sobre el cambio climático donde establece que el año 2030 se evidenciará consecuencias y riesgos relevantes tanto para las especies vegetales como al ser humano a causa del incremento de la temperatura alcanzando 1.5 °C a nivel global (IPCC, 2018).

- Potenciales de transición

La proyección de la cobertura vegetal nativa de Ecuador continental comprende al bosque nativo, páramo, vegetación arbustiva y herbácea. En este panel se seleccionó dos transiciones de la cobertura vegetal a tierras agropecuarias y zonas antrópicas agrupándolas en un sub-modelo, y

asignando el nombre respectivo, en base a la cobertura vegetal que se esté analizando. Posteriormente, se definió las variables determinantes impulsoras de cambio (*drivers*), las cuales asumen la distribución espacial de los factores biofísicos, socioeconómicos y características hidrológicas. En este caso, se utilizó quince variables: deforestación, Modelo de Elevación Digital (DEM), aspectos, densidad poblacional por Km², minería, Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE), poblados, ríos, lugares con licencia para aprovechamiento forestal, pendiente, tierras agrícolas, cascos urbanos, vías, incendios forestales y zonas antrópicas. Las variables se pueden agregar al modelo, ya sea como componentes estáticos debido a que son inmutables a través del tiempo. Por el contrario, dinámicas que son controladores dependientes del tiempo (Kumar, 2012).

Las transiciones fueron modeladas a través de la red neuronal de perceptrones multicapas (MLP) el cual es un algoritmo de entrenamiento supervisado constituido en tres tipos de capas (capa de entrada, oculta y de salida) (Figura 3). La información que ingresa en la capa de entrada pasa a través de la red mediante *feed forward* (alimentación hacia adelante) (Gibson *et al.*, 2018) donde los nodos son determinados a partir de los datos de entrada y pasan por las capas ocultas que son conjuntos de nodos de cálculo, para consecutivamente emitir la información hacia la capa de salida mediante la red (Hewitt y Díaz, 2013).

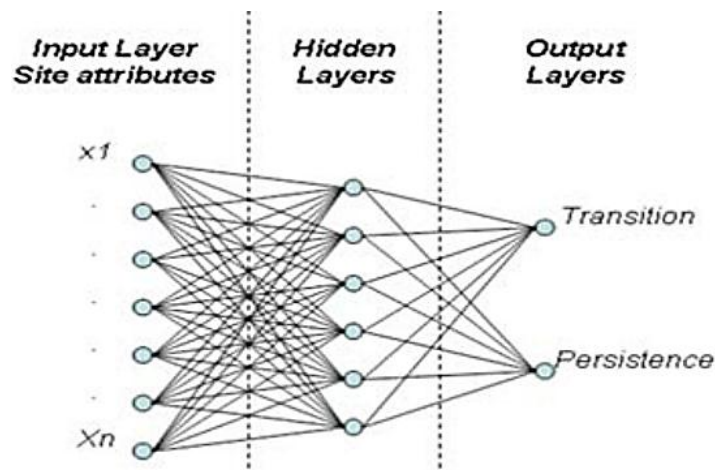


Figura 3. Red Neuronal de Perceptrones multicapas (MLP) aplicada al modelado del cambio de uso del suelo

Fuente: (Frieht *et al.*, 2015).

Una vez generado el sub-modelo, se procedió a crear mapas de potencial de transición con un grado aceptable de precisión para ejecutar el modelo real (Mishra, *et al.*, 2014). De tal manera,

que se realizó sesenta corridas del sub-modelo para cada cubierta vegetal, con el fin de determinar las variables con mayor potencial de influencia en la probabilidad de cambios y mejorar la precisión, puesto que alrededor del 80% es aceptable (Eastman, 2006).

- **Predicción de cambios**

Los escenarios futuros se modelaron por medio del análisis de Markov Chain (Cadena de Markov) que permite predecir cuánto terreno se espera que realice transición a partir de la última fecha (t2) a la fecha de predicción (2030) basándose en una proyección de los potenciales de transición en el futuro (Mishra *et al.*, 2014). Se obtiene dos modelos básicos de cambios: un modelo de predicción dura (Hard) basado en un solo modelo para la asignación multi-objetiva de terrenos (MOLA) (Gibson *et al.*, 2018) ocupando las mismas categorías del t1-t2, y un modelo de predicción blanda denominada soft que indica una evaluación exhaustiva del potencial de cambio, es decir, un mapeo continuo presentando el grado en que las áreas tienen las condiciones adecuadas para precipitar al cambio, por ello es el más apto para analizar la probabilidad de cambio (Eastman, 2006) (Figura 4).

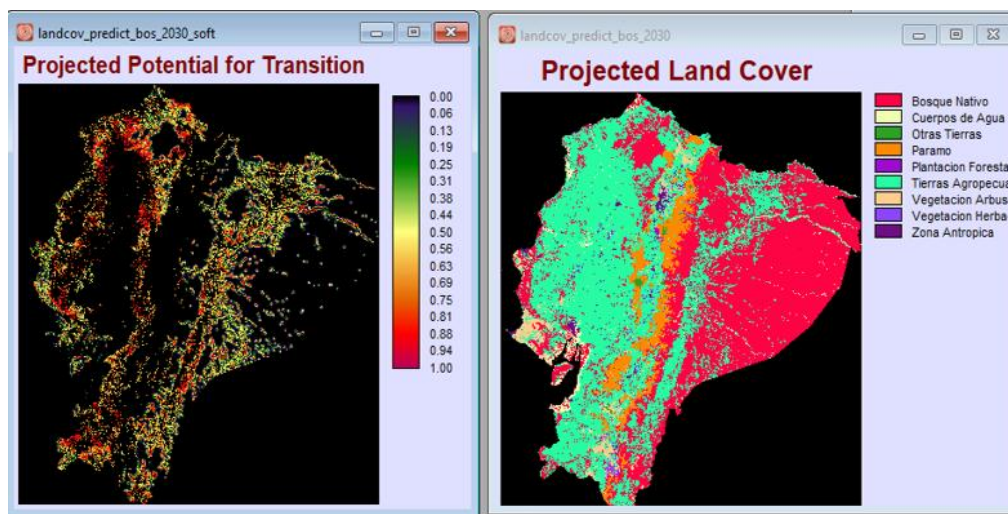


Figura 4. Modelo Soft y Hard de la proyección espacial al 2030 del bosque nativo

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó la validación del modelo soft mediante la aplicación de la herramienta Validar y ROC (Característica Operativa Relativa) de TerrSet 18.2, donde validar emplea el índice Kappa, el cual discrimina tanto los errores de cantidad (Kquantity) como de ubicación (Klocation) entre dos mapas cualitativos. Por lo tanto, depende de ambos para determinar

la validación de la simulación donde valores cercanos a 1 corresponden a una clasificación perfecta (Pontius, 2000). Mientras que ROC estima las ocurrencias verdaderas comparando un mapa actual de cambio con el mapa modelado del cambio de uso del suelo, donde valores cercanos a 0.80 es considerado un valor aceptable (Eastman, 2006; Zare *et al.*, 2017).

3.3. *Determinación de la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.*

Para estimar la erosión hídrica o pérdida del suelo en Ecuador continental se empleó la RUSLE (Ec.1) propuesta por Renard *et al.* (1991) e integrada por los siguientes factores:

3.3.1. Factor erosividad (R)

La precipitación es uno de los agentes más relevantes al momento de estimar la erosión del suelo debido a su alta intensidad y volumen para disgregar las partículas del suelo. La erosión hídrica (factor R) hace referencia tanto a la fuerza de la precipitación como a la escorrentía generada, para su cálculo requiere multiplicar la energía cinética por la intensidad máxima de precipitación obtenida de varios años en intervalos cortos de tiempo (30 minutos) de cada tormenta (Fenta *et al.*, 2017).

No obstante, no se cuenta con información de alta resolución (< 60 minutos) a nivel de Ecuador continental, por tal motivo se utilizó la base de datos de precipitación del programa CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) disponible al público desde 2014, creada y administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y University of California, Santa Bárbara (UCSB). La información climática contiene una resolución temporal en días, pentadas, meses, décadas y años; con una resolución de 0.05°. Para el presente estudio se utilizó información de precipitación con resolución temporal mensual y anual para el periodo 2000-2016.

Mediante el software ArcGIS 10.3, se empleó la herramienta *Fill* del software ArcGIS 10.3 para evitar vacíos de información en cada raster. Posteriormente, se aplicó el Índice Modificado de Fournier (IMF) formulado por Arnoldus (1980) con datos de precipitación mensual y anual (Ec. 9), a través de *Raster Calculator*, puesto que el IMF es muy efectivo al momento de

calcular R como lo señalan Vrieling *et al.* (2010) y Fenta *et al.* (2017) en sus estudios realizados sobre estimación de erosividad hídrica.

$$IMF = \sum_{j=1}^{i=12} \frac{p_i^2}{P} \quad (\text{Ec. 9})$$

Dónde:

- ✓ **IMF:** Índice Modificado de Fournier (mm)
- ✓ **p_i:** precipitación media mensual (mm)
- ✓ **P:** precipitación total anual (mm)

La aplicación del IMF requiere emplear la ecuación 10 para obtener el valor del factor R, tal como indica Angulo y Beguería (2009) en su estudio. Finalmente, se extrajo la información correspondiente al área de estudio mediante la herramienta *Extract by mask*.

$$R = 21.56 IMF^{0.927} \quad (\text{Ec. 10})$$

3.3.2. Factor erodabilidad (K)

Para determinar el factor K (susceptibilidad del suelo a ser erosionado), se recopiló información secundaria referente a las fichas de perfiles del suelo de la página web del Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTierras) y del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), en formato pdf. Posteriormente, se construyó una base de datos en Microsoft Excel con las propiedades del suelo concernientes a materia orgánica, fracciones texturales (% arena, % limo, % arcilla) y estructura del suelo.

En lo referente a la tasa de permeabilidad, se intersectó el mapa de geopedología de SIGTierras con los datos del suelo determinados anteriormente, mediante la herramienta *Intersect* del software ArcGIS 10.3. Sin embargo, algunos datos del suelo no contaban con la tasa de permeabilidad, por lo tanto, para obtener la respectiva ecuación y estimar permeabilidad en los datos faltantes, se realizó un análisis de regresión lineal, entre el contenido de arena y permeabilidad, variables que presentaron la mayor correlación (0.4). Asimismo, se obtuvo la ecuación para determinar arena muy fina en función del contenido de arena.

Con los resultados obtenidos se aplicó la ecuación 11 y 12, desarrolladas por Renard *et al.* (1997). Posteriormente, se realizó una interpolación con la herramienta *IDW* (Distancia Inversa

Ponderada) que determina los valores de celda a partir de una combinación ponderada lineal de un conjunto de puntos de muestra, para obtener el mapa de erodabilidad, materia orgánica, contenido de arena, limo, arcilla y la tasa de permeabilidad.

$$K = 0.277 * 10^{-6} M^{1.14} (12 - MO) + 0.0043 (s - 2) + 0.0033 (p - 3) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$M = (\% \text{ Limo} + \% \text{ arena muy fina}) * (100 - \% \text{ Arcilla}) \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde:

- ✓ **K:** Tasa de erodabilidad ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- ✓ **M:** Índice de textura (producto de las fracciones de las partículas primarias del suelo)
- ✓ **MO:** Materia orgánica (%)
- ✓ **s:** tipo de estructura del suelo
- ✓ **p:** Tipo de permeabilidad

3.3.3. Factor de longitud y pendiente (LS)

El factor LS se determinó empleando el Modelo de Elevación Digital (MDE) basada en información raster de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de 60 x 60m. Antes de utilizar el MDE, se aplicó la herramienta *Fill* del software ArcGIS 10.3 para el relleno y evitar vacíos de información. Seguidamente, se elaboró un mapa de pendientes para la zona de estudio con la herramienta *Slope* en grados.

Una vez procesada la información se aplicó las fórmulas propuestas por Desmet y Govers (1996) para determinar el factor L (Ec. 15). Para ello, es necesario calcular previamente el factor F y M como indica la ecuación 13 y 14.

$$F = \frac{\text{Sin}\beta/0.0896}{3(\text{Sin}\beta)^{0.8}+0.56} \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

- ✓ **β:** Ángulo de la pendiente a nivel de pixel (rad, multiplicar grados por 0.01745)

Mientras que el factor M se determinó con la fórmula que se detalla, a continuación:

$$\text{Factor M} = \frac{\text{Factor F}}{(1+\text{Factor F})} \quad (\text{Ec. 14})$$

Adquiridos el factor F y M, se calculó la dirección y acumulación del flujo con las herramientas *Flow Direction* y *Flow Accumulation* del software ArcGIS 10.3, con el fin de obtener el Factor L (Ec. 15).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^2)^{m+1}-A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad (\text{Ec.15})$$

Dónde

- ✓ $A_{(i,j)}$: Acumulación del flujo a nivel del pixel
- ✓ D : Tamaño del pixel (m)
- ✓ x : Factor de correlación de forma ($x=1$ para sistemas pixelados)

Posteriormente, el cálculo del factor S se obtuvo a partir de la fórmula desarrollada por McCool *et al.* (1987) (Ec. 16). Los resultados obtenidos tanto del factor L como S, permitieron obtener el factor LS.

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad (\text{Ec.16})$$

Dónde:

- ✓ β : Ángulo de la pendiente a nivel de pixel (rad, multiplicar grados por 0.01745)

3.3.4. Factor de cobertura (C)

El primer objetivo abarca todo lo referente al análisis de cambio de cobertura y uso del suelo, por tal motivo este apartado se basa exclusivamente en la asignación de la ponderación, señalado por López *et al.* (1998) y Panagos *et al.* (2015), para cada cobertura identificada en Ecuador continental, en función de sus características. Se realizó para las coberturas del año 2000, 2016 y 2030. Posteriormente, con la herramienta *Polygon to raster* del software ArcGIS 10.3 se convirtió de formato vector a raster para obtener los valores de C establecidos.

4. RESULTADOS

4.1. Analizar el cambio de cobertura y uso del suelo en el periodo 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.

4.1.1. Análisis del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el período 2000-2016 en Ecuador continental.

El área de estudio cubre todo el territorio de Ecuador continental con 25 341 500 ha. Para el año 2000, la cobertura vegetal natural fue de 15 956 810 ha que representa el 64.09% del área de Ecuador continental, mientras que para el año 2016 disminuyó 3.87%, ocupando una superficie de 14 992 685 ha, lo cual representa el 60.22% de la superficie total del país. Durante el período analizado, la cobertura que presenta mayor pérdida es la vegetación herbácea, que en datos porcentuales significa 52.16% (43 303 ha) y en menores porcentajes se encuentra la cobertura de bosque nativo con un 8.15% (1 029 544 ha) y páramo 1.33% (20 137 ha) debido a que estas categorías se encuentran bajo zonas de conservación. Paralelo a esta disminución existen indicadores positivos de aumento en la superficie ocupada por vegetación arbustiva del 16.85% (128 626 ha).

En la tabla 2, se observa que la superficie total de las coberturas analizadas para el año 2000 es de 24 898 069 ha mientras que para el año 2016 es 24 898 221 ha obteniendo un aumento de la superficie total de 161 ha, correspondiente a cuerpos de agua (natural y artificial), plantación forestal, tierras agropecuarias (cultivo anual, permanente, semipermanente, pastizal, mosaico agropecuario), vegetación arbustiva y zonas antrópicas (áreas pobladas e infraestructura). Por otro lado, la reducción en el resto de estratos es evidente como bosque nativo, otras tierras (glaciares y áreas sin cobertura vegetal), páramo y vegetación herbácea (Figura 5).

El estrato plantación forestal y tierras agropecuarias para el periodo 2016 ocuparon una superficie de 123 720 y 8 933 864 ha, registrando incrementos de 43.25 y 8.67% respectivamente. A causa de que el ser humano destina el suelo para diversos fines (agrícolas, forestales, etc.), se evidencia que la vegetación herbácea es la categoría que mayor cambio presenta con 83 035 ha para el año 2016 con una reducción de 52.16%, en comparación con el resto de coberturas vegetales naturales.

Por otro lado, la categoría de zonas antrópicas (áreas pobladas e infraestructura) presenta un aumento significativo correspondiente a 54.41% (253 067 ha) debido al crecimiento demográfico de los últimos años en Ecuador continental.

Tabla 2. Superficies y porcentajes de la cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental en el período 2000-2016

Coberturas	Año 2000		Año 2016		Cambio Neto	
	ha	%	ha	%	ha	%
Bosque Nativo (BN)	13 660 354	54.87	12 631 198	50.73	-1 029 544	-8.15
Cuerpos de Agua (CA)	475 697	1.91	494 763	1.99	19 023	3.85
Otras Tierras (OT)	120 654	0.48	100 121	0.40	-20 527	-20.55
Páramo (PR)	1 535 575	6.17	1 515 272	6.09	-20 137	-1.33
Plantación Forestal (PF)	70 150	0.28	123 720	0.50	53 505	43.25
Tierras Agropecuarias (TA)	8 159 363	32.77	8 933 864	35.88	774 659	8.67
Vegetación Arbustiva (VA)	634 573	2.55	763 180	3.07	128 626	16.85
Vegetación Herbácea (VH)	126 308	0.51	83 035	0.33	-43 303	-52.16
Zona Antrópica (ZA)	115 386	0.46	253 067	1.02	137 699	54.41
TOTAL	24 898 060	100	24 898 221	100		

Fuente: Elaboración propia

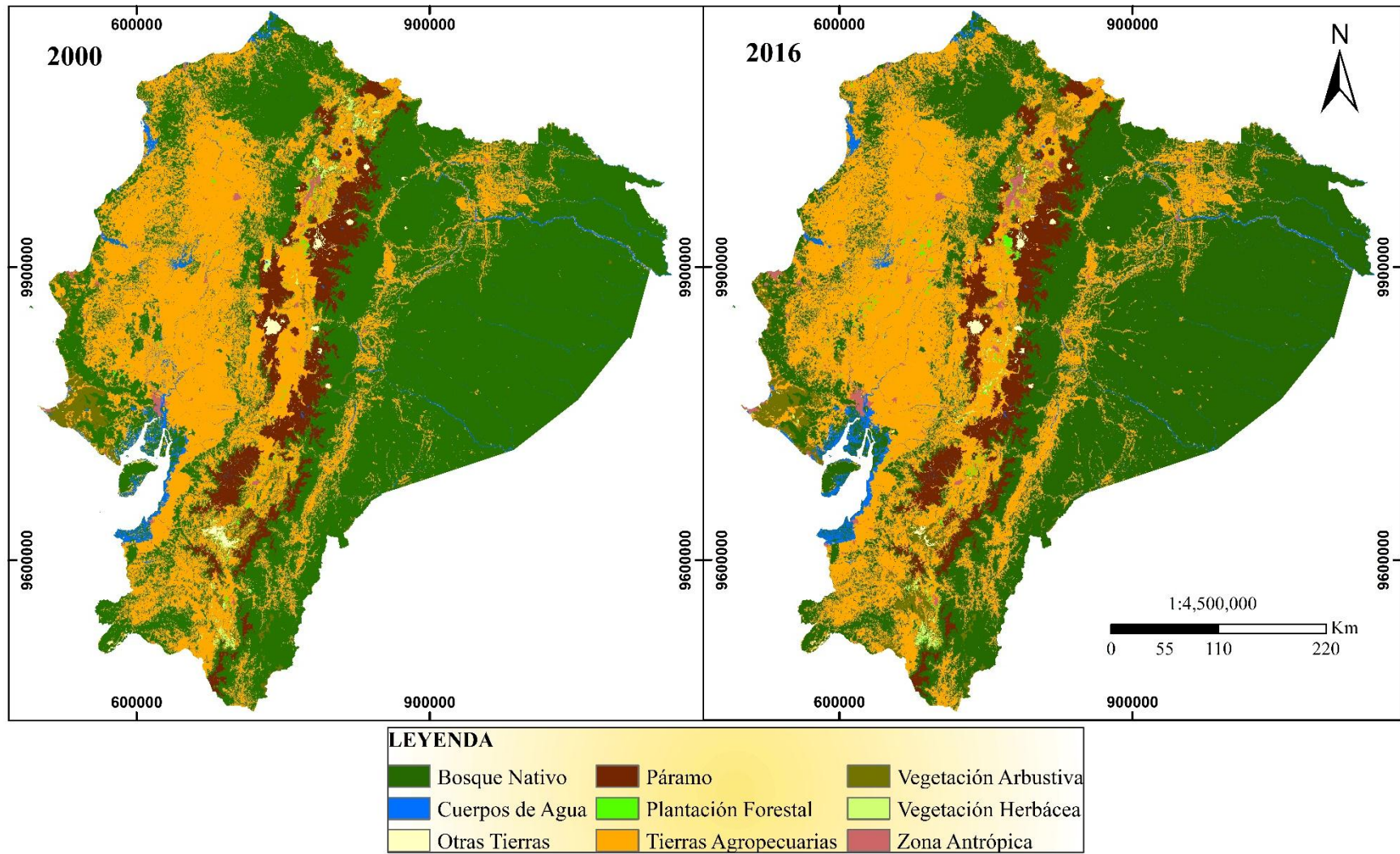


Figura 5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental para los años 2000 y 2016

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis del cambio total, neto e intercambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el período 2000-2016 en Ecuador continental.**

En Ecuador continental se produjeron transformaciones relevantes de la cubierta vegetal dando lugar a ganancias y pérdidas que van desde la reducción de bosque nativo, páramo y vegetación herbácea de 1 370 268, 127 826 y 97 499 ha respectivamente para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas, hasta la recuperación o regeneración natural de los ecosistemas, como se evidencia en la vegetación arbustiva ganando 365 855 ha (Tabla 3).

Tierras agropecuarias es la categoría ha obtenido mayor superficie (1 682 473 ha), seguido de zonas antrópicas (137 782 ha), cuerpos de agua (101 835 ha) y plantación forestal (98 456 ha). Mientras que la cobertura de otras tierras (glaciares y áreas sin cobertura vegetal) es la que menor cambio presenta (95 401 ha) en el período de estudio.

Tabla 3. *Valores de los cambios entre coberturas del período 2000-2016*

Coberturas	Pérdidas	Ganancias	Cambio total	Intercambio	Cambio neto
	ha				
Bosque Nativo	1 370 268	340 724	1 710 992	681 448	1 029 544
Cuerpos de Agua	82 812	101 835	184 647	165 624	19 023
Otras Tierras	57 964	37 437	95 401	74 874	20 527
Páramo	127 826	107 689	235 515	215 378	20 137
Plantación Forestal	44 951	98 456	143 407	89 902	53 505
Tierras Agropecuarias	907 814	1 682 473	2 590 287	1 815 628	774 659
Vegetación Arbustiva	237 229	365 855	603 084	474 458	128 626
Vegetación Herbácea	97 499	54 196	151 695	108 392	43 303
Zona Antrópica	83	137 782	137 865	166	137 699

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el cambio total, neto e intercambios permitieron realizar una exploración más particular entre las coberturas y detectar las transiciones más significativas. Para ilustrar el cambio total, se puede apreciar que el bosque nativo es la categoría que mayor cambio neto presenta (1 029 544 ha) con un alto valor de intercambio (681 448 ha) destinado a tierras agropecuarias. No obstante, la vegetación arbustiva, páramo y vegetación herbácea a pesar de que su cambio neto es poco expresado en hectáreas, son la cubierta vegetal natural que posee una importante dinámica de

intercambio (474 458, 215 378 y 108 392 ha). Similar particularidad se evidencia con cuerpos de aguas, otras tierras, plantación forestal y tierras agropecuarias.

La extensión de zonas antrópicas (áreas pobladas e infraestructura) incrementó 54.41% (137 782 ha) convirtiéndose en una de las coberturas con mayor superficie, y a la vez abarcando el menor valor de intercambio (166 ha) en los dieciséis años.

En la figura 6, se visualiza los resultados descritos anteriormente sobre las transiciones y cambios significativos entre las diversas coberturas, donde los más relevantes son básicamente en tierras agropecuarias, vegetación arbustiva, bosque nativo y zonas antrópicas.

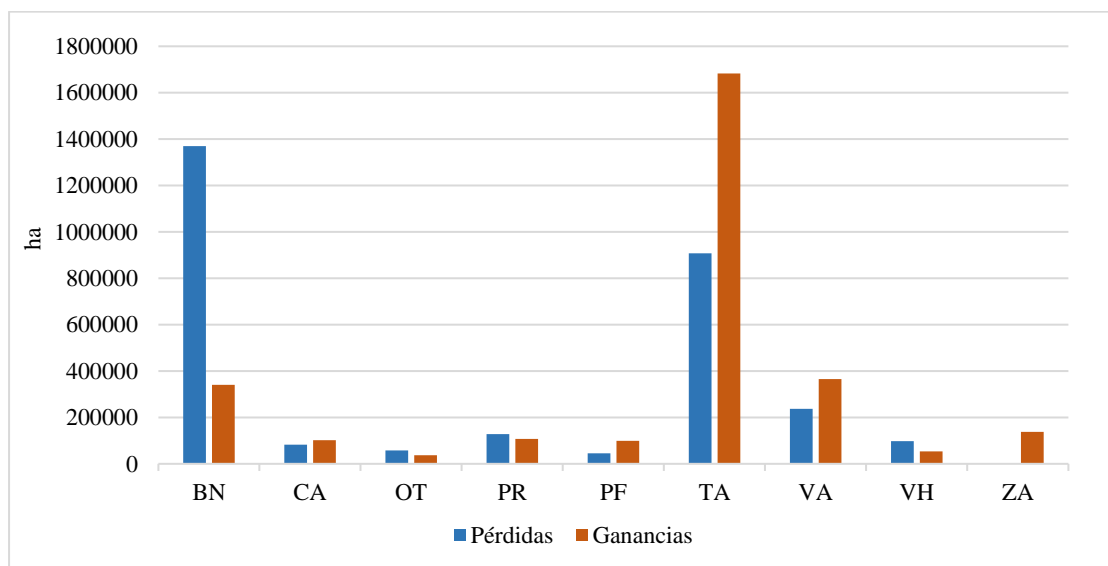


Figura 6. Pérdidas y ganancias de las coberturas en Ecuador continental durante el periodo 2000-2016¹

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo por provincia**

De igual manera que se realizó un análisis sobre el cambio entre las coberturas y usos del suelo a nivel de país, se analizó las categorías que han ejercido mayor presión o han sufrido modificaciones relevantes en cada provincia durante el periodo 2000-2016. De tal manera que en la figura 7 y 8 se aprecia que la categoría de bosque nativo y tierras agropecuarias son las que mayor superficie abarcan en el año 2000-2016 con respecto al resto de coberturas. A pesar de que las tierras agropecuarias se han incrementado en los últimos años, es evidente que Ecuador se

¹ BN: Bosque Nativo, CA: Cuerpos de Agua, OT: Otras Tierras, PR: Páramo, PF: Plantación Forestal, TA: Tierras Agropecuarias, VA: Vegetación Arbustiva, VH: Vegetación Herbácea, ZA: Zona Antrópica.

caracteriza por ser un país megadiverso donde predomina y prevalece la vegetación, lo que significa que es importante proteger, preservar y conservar estas áreas con alta susceptibilidad de cambio a otros usos del suelo.

Para ilustrar los cambios más significativos presentes en las figuras 7 y 8, se puede tomar como ejemplo la provincia de Bolívar, El Oro, Esmeraldas y Morona Santiago. Para el año 2000, la cobertura de bosque nativo de Bolívar contaba con 20.61% (81 323 ha) de superficie, sin embargo, para el 2016 ha disminuido en 46 241 ha, seguido de páramo con 9.38% (37 018 ha). Mientras que para el remanente de vegetación arbustiva se registra una sucesión natural de 2 148 a 2 720 ha, por el contrario, una reducción de la extensión de la vegetación herbácea de 218 a 142 ha para el año 2016 respectivamente. Durante los 16 años se ha incrementado las actividades agrícolas pasando de 66.93% (264 029 ha) para el año 2000 a 76.37% (301 269 ha) en 2016. Asimismo, un cambio notable se observa en zonas antrópicas donde la superficie de 0.13% (510 ha) en el año 2000 pasa a 0.37% (1 475 ha) para el 2016.

Similar particularidad se evidencia en la provincia de El Oro, Esmeraldas y Morona Santiago donde la reducción del bosque nativo se ha acrecentado por el aumento de actividades agrícolas ocupando una superficie de 21.35% (122 645 ha), 50.74% (815 859 ha) y 73.01% (1 754 367 ha) en 2016. En lo referente al resto de categorías como cuerpos de aguas, la provincia de El Oro ocupa el 7.63% (43 826 ha) en 2016, en comparación con el año inicial de 6.06% (34 829 ha), mientras que la provincia de Esmeraldas y Morona Santiago reflejan una disminución de la misma.

Por otro lado, en la provincia de Morona Santiago se registra que la cobertura de páramo aumentó su área de 4.89% (117 546 ha) en 2000 a 5.26% (126 413 ha) en 2016, y en Esmeraldas un 0.01% (126 ha) mientras que para El Oro y Bolívar disminuye. La categoría de zonas antrópicas en las provincias mencionadas anteriormente destaca una ampliación de su extensión ocupando una superficie de 1.73% (9 916 ha) para El Oro; 0.49% (7 862 ha) en Esmeraldas y 0.17% (4 071 ha) en Morona Santiago para el año 2016.

En la misma línea se encuentra la provincia de Manabí donde la superficie de tierras agropecuarias incrementó el 68.17% (1 291 626 ha) para el 2016. La cobertura de bosque experimenta una reducción pasando de 27.97% (529 910 ha) a 24.84% (470 722 ha). Así como, la superficie de vegetación arbustiva y zonas antrópicas incrementándose el 3.29 y 1.56% para el año 2016.

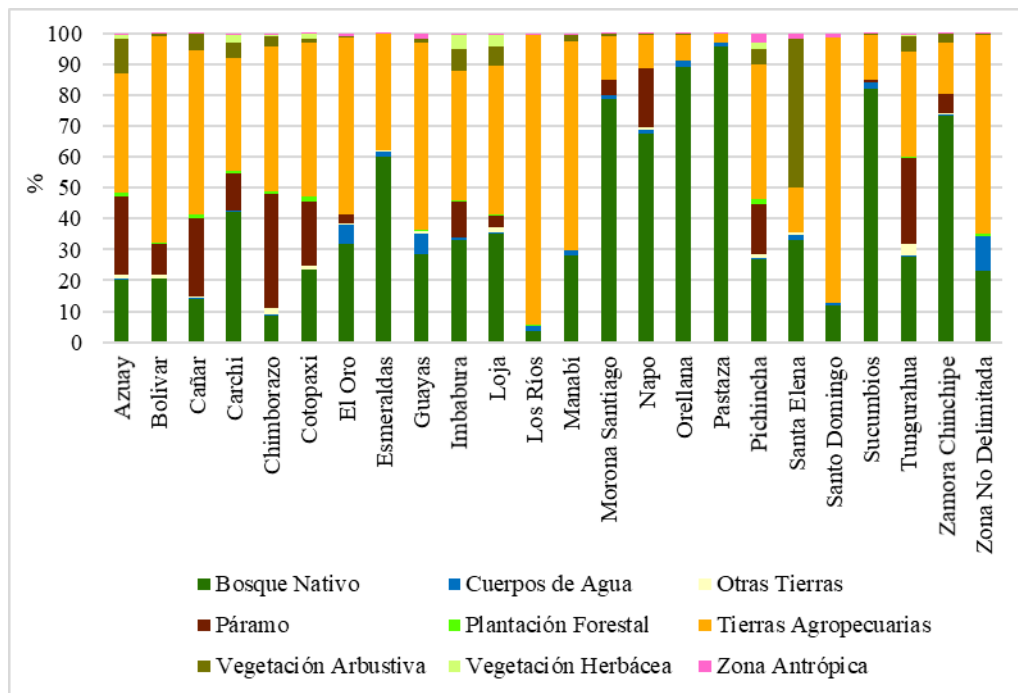


Figura 7. Coberturas y uso del suelo por provincias en el año 2000

Fuente: Elaboración propia

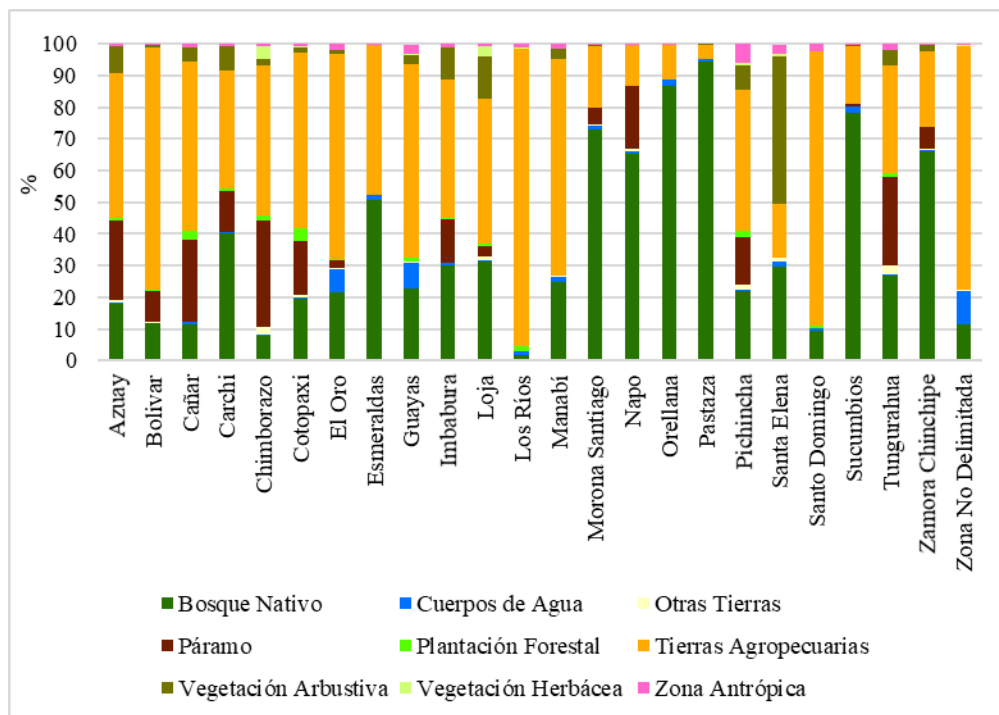


Figura 8. Coberturas y uso del suelo por provincias en el año 2016

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Modelación de escenarios de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.

De acuerdo a los escenarios de sensibilidad de cambio realizados para la cobertura vegetal nativa al 2030, la modelación obtenida tiene un coeficiente Kappa de 0.8695 para bosque nativo, 0.9947 para páramo, 0.9886 para vegetación arbustiva y 0.9981 para vegetación herbácea, lo que significa que son modelos con un alto índice de precisión y exactitud. Además, se corroboró los escenarios futuros con la herramienta ROC para determinar el nivel de precisión, obteniendo valores mayores a 0.9954 en cada modelación.

- Análisis general de los escenarios de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal nativa.

LCM permitió evaluar probabilidades muy significativas de cambios en cada cobertura, como se ilustra en la figura 9 y 10 donde se evidencia que la mayor superficie de Bosque Nativo al 2030 está sujeto a muy baja probabilidad de cambio que en datos porcentuales significa el 57.76% (7 285 010 ha) en Ecuador continental mientras que en menor porcentaje se encuentra una probabilidad alta de transición correspondiente al 14.15% (1 784 449 ha), media con 13.12% (1 654 566 ha) y baja con 8.15% (1 028 543 ha). Cabe destacar que 860 411 ha comprenden una probabilidad muy alta de sensibilidad de cambio representando el 6.82% respectivamente (Figura 11).

Además, al observar la figura 9 se puede afirmar que para el 2030, las probabilidades de sensibilidad de cambio se establecen de manera escalonada para la cobertura de páramo, donde se destaca que la mayor transformación se registra en una probabilidad muy baja al 2030, representado por el 53.81% (815 422 ha), de igual manera que transcurrió en Bosque Nativo. Por el contrario, el 3.80% (57 632 ha) está expuesto a cambios muy altos de probabilidad, mientras que los demás difieren en porcentajes de cambios menores, pero no dejan de ser importantes (Figura 12).

La probabilidad de cambios presentes en la vegetación arbustiva, se distribuyen en transiciones significativas donde el 29.78 y 28.84% adquieren la mayor cantidad de superficie de cambio con 227 278 y 220 055 ha. Inversamente, el resto de superficie de vegetación arbustiva está predecible a cambios en valores porcentuales similares. De tal manera que la probabilidad media corresponde a 16.38% (125 027 ha), muy alta a 13.98% (106 719 ha) y baja a 11.01% (84 025 ha) en Ecuador continental (Figura 13).

En contraste con las coberturas anteriores, vegetación herbácea es la cubierta vegetal con mayor susceptibilidad de cambio, es decir, el 71.52% (59 345 ha) corresponden a una probabilidad alta de cambio, seguido de una probabilidad media del 16.42% que conlleva a un cambio de superficie de 13 628 ha. No obstante, la probabilidad muy alta presenta un cambio de 5.50% (4 560 ha), baja un 4.14% (3 433 ha) y muy baja un 2.42% (2 012 ha) (Figura 14).

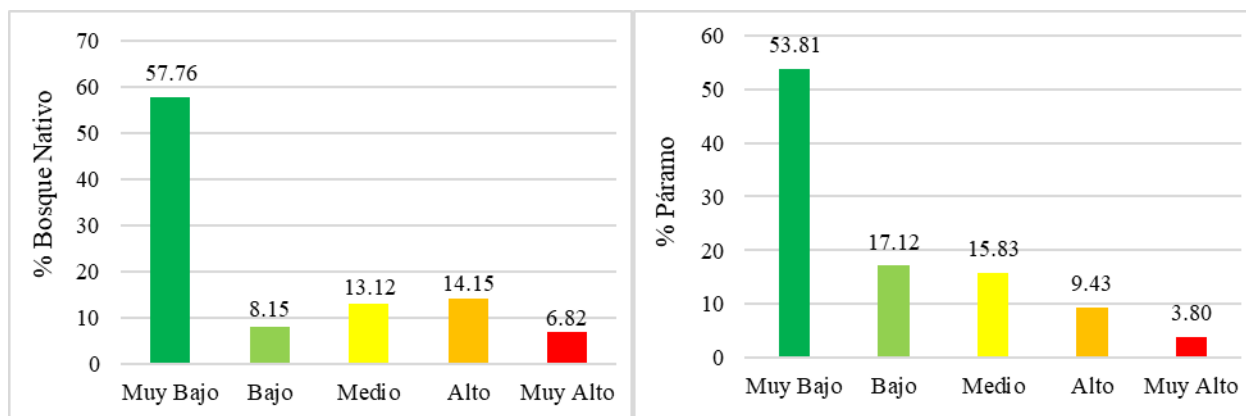


Figura 9. Probabilidades espaciales de cambios de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental: Bosque Nativo y páramo.

Fuente: Elaboración propia

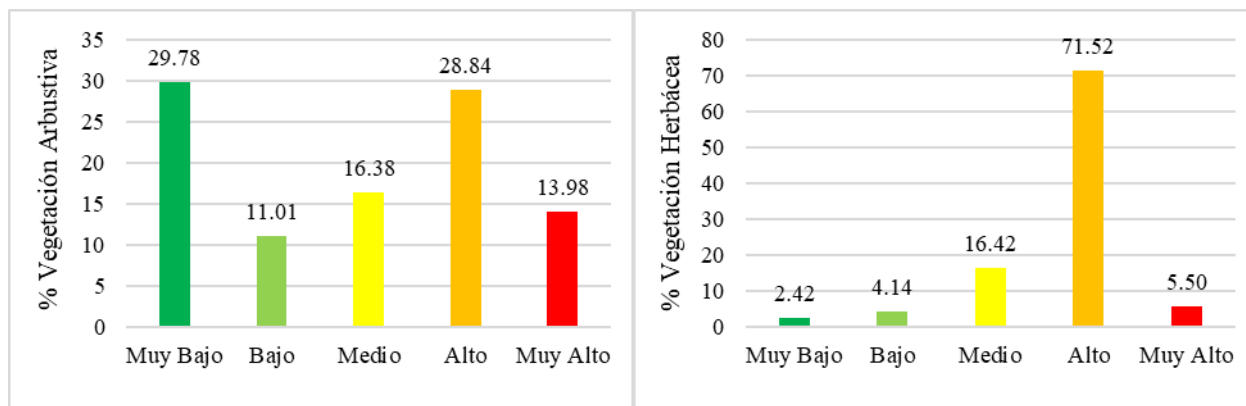


Figura 10. Probabilidades espaciales de cambios de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental: Vegetación arbustiva y herbácea

Fuente: Elaboración propia

Lo descrito anteriormente se ratifica en las figuras 11, 12, 13 y 14 las cuales representan los escenarios futuros al 2030 para cada tipo de cobertura vegetal nativa en Ecuador continental.

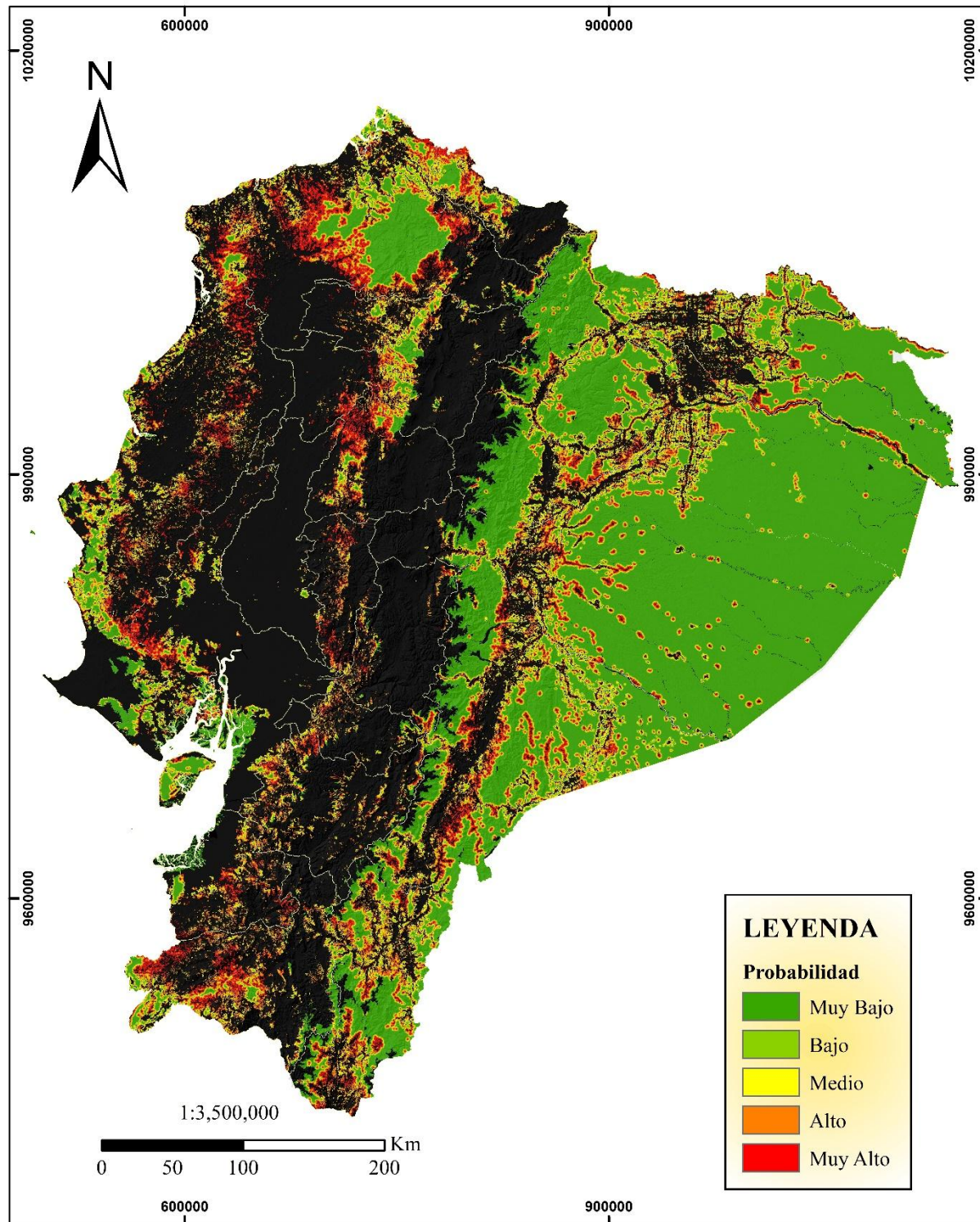


Figura 11. Proyección espacial de Bosque Nativo al 2030 en Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

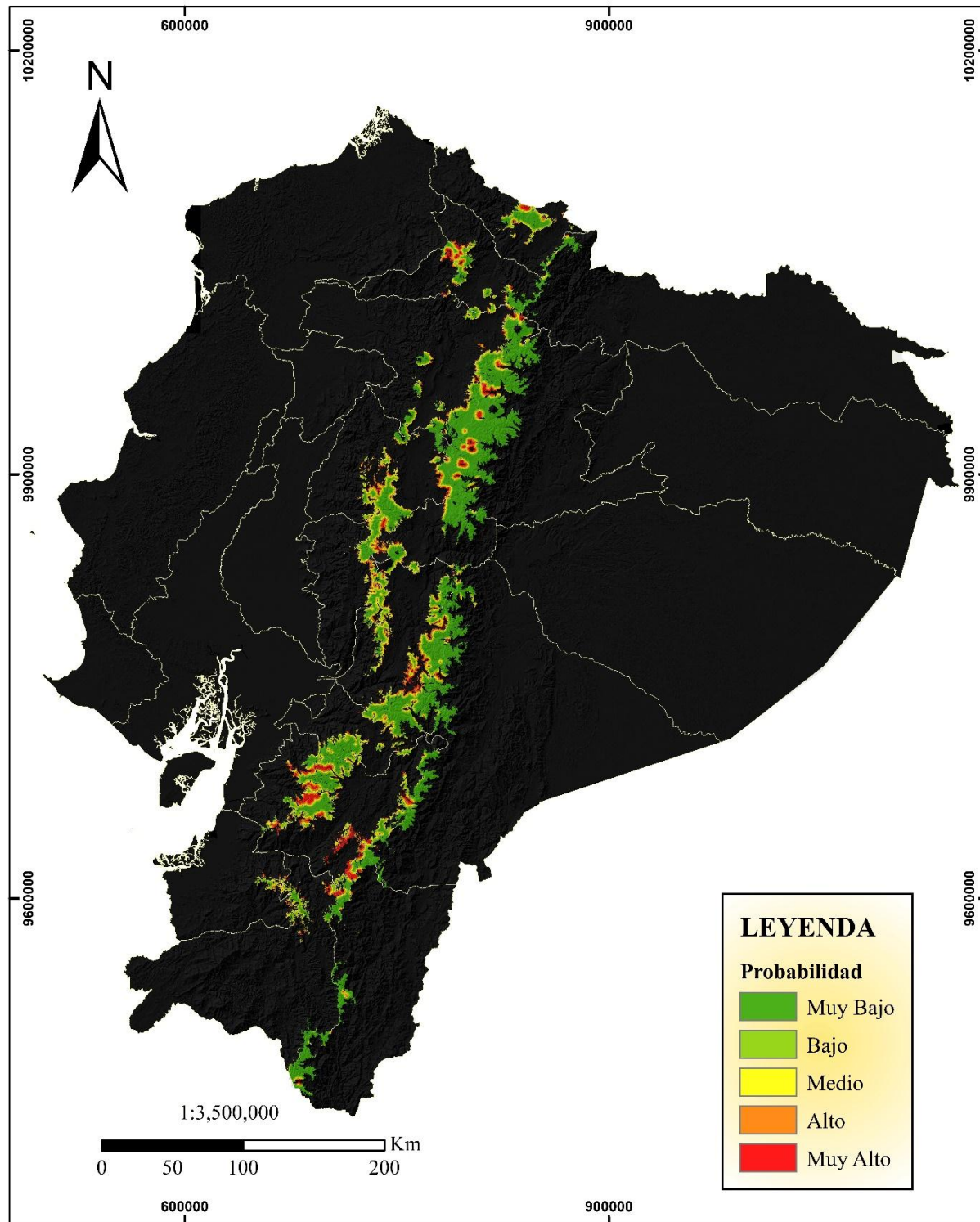


Figura 12. Proyección espacial de Páramo al 2030 en Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

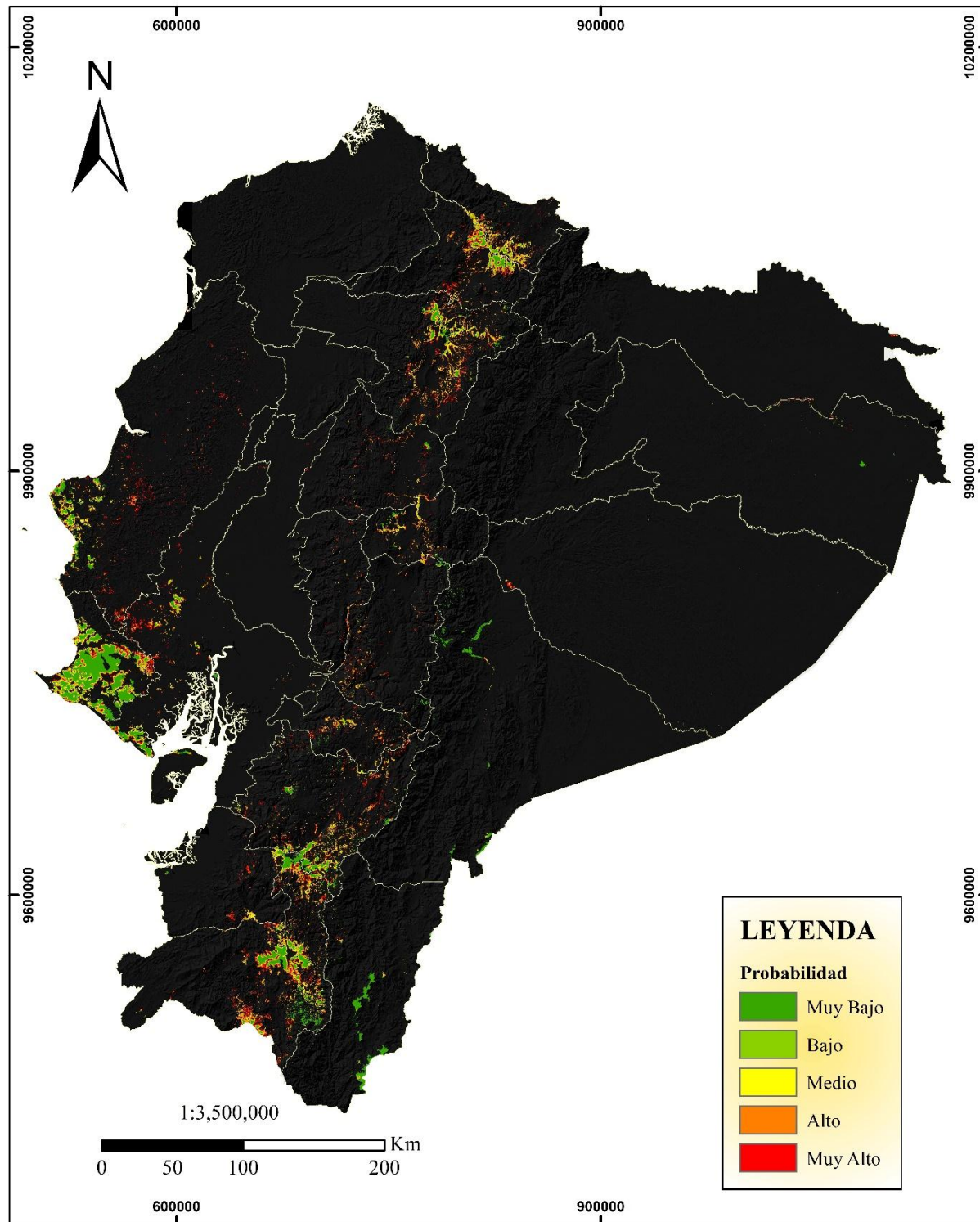


Figura 13. Proyección espacial de Vegetación Arbustiva al 2030 en Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

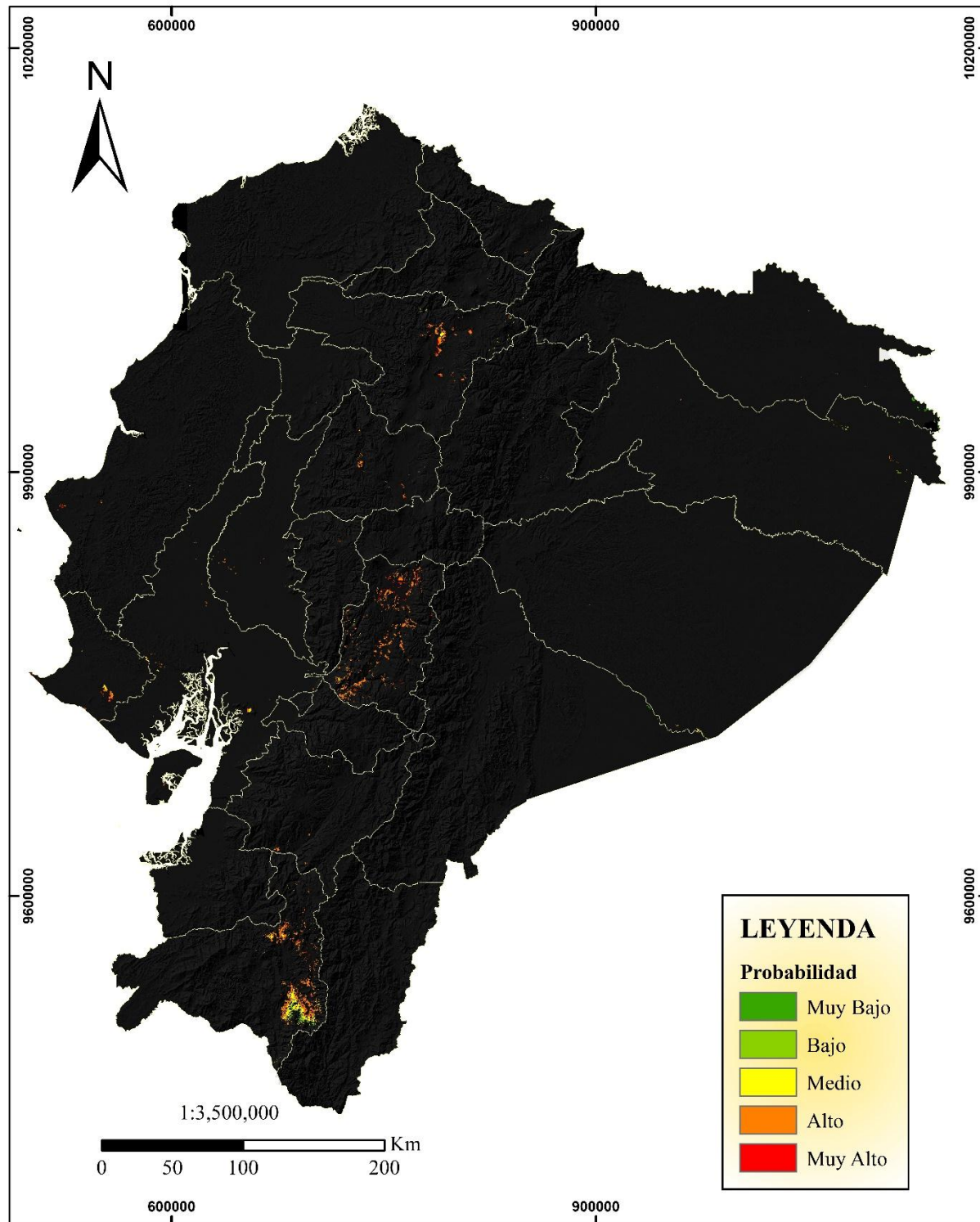


Figura 14. Proyección espacial de Vegetación Herbácea al 2030 en Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de los escenarios futuros de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal por provincias.**

Para el análisis de la sensibilidad de cambios de las coberturas entre provincias, se tomó en cuenta los cambios más preponderantes. La figura 15 indica que en el 2030 existirán transiciones notables de Bosque Nativo en cada provincia, esencialmente en Santo Domingo, Cotopaxi y Los Ríos, las cuales registran probabilidades muy altas de dinamismo del 36.04% (11 711 ha), 35.34% (42 327 ha) y 30.90% (3 542 ha). Paralelamente, se encuentra la conversión de esta cobertura en la provincia de Bolívar, Cañar y Azuay donde los porcentajes representan niveles altos de cambio, ya sea para el desarrollo de actividades antrópicas u otros, las cuales corresponden al 57.99% (26 823 ha), 47.37% (17 306 ha) y 45.91% (68 019 ha) respectivamente. Pastaza, Orellana y Tungurahua son algunas provincias donde se registran cambios poco acentuados.

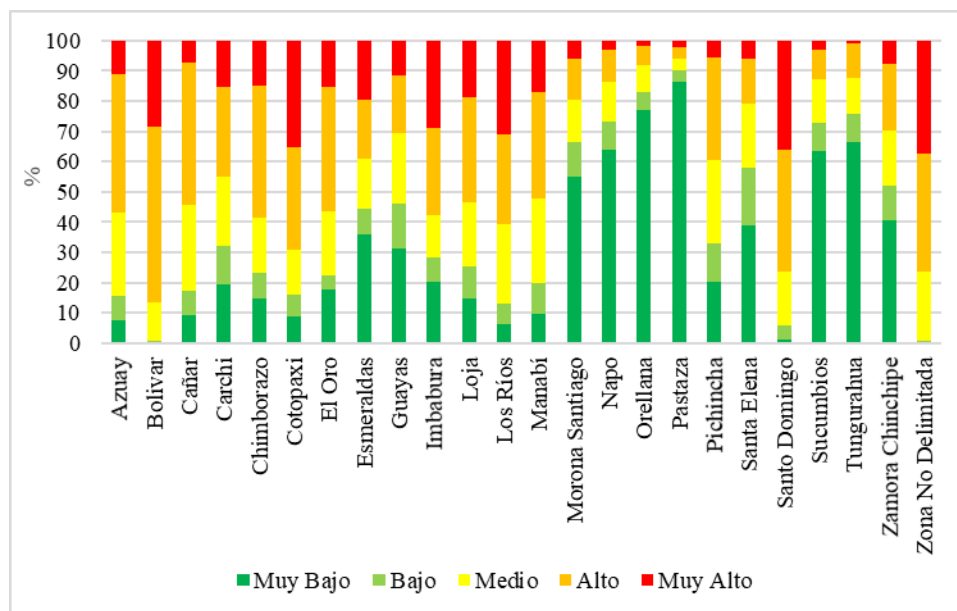


Figura 15. Sensibilidad de cambio del Bosque Nativo al 2030 por provincias

Fuente: Elaboración propia

En el caso de páramo, se observa que los porcentajes de sensibilidad de cambio son menores con respecto al Bosque Nativo (Figura 16), donde Azuay es la provincia que está sujeta a una probabilidad muy alta de modificación, correspondiente al 12.18% (25 382 ha). En datos porcentuales menores se encuentra la provincia de Imbabura 8.98% (5 570 ha), seguido de Loja 4.32% (1 639 ha) y Zamora Chinchipe 3.62% (2 646 ha). Asimismo, se observa cambios significativos en El Oro de 18.19% (2 849 ha), Azuay 15.23% (31 740 ha) y Cotopaxi 15.05% (15

569 ha) con altas probabilidades de conversión. Por otro lado, es notable que gran parte de la cobertura de páramo está bajo conservación y protección, de tal manera que para el 2030 conlleva pérdidas paulatinas, es decir, la mayor parte de cobertura se destacada por estar susceptible a cambios muy bajos como en Morona Santiago, Sucumbíos, Napo, entre otras. Las provincias donde no se observa ninguna probabilidad de cambio se debe a la ausencia de páramo en estas jurisdicciones.

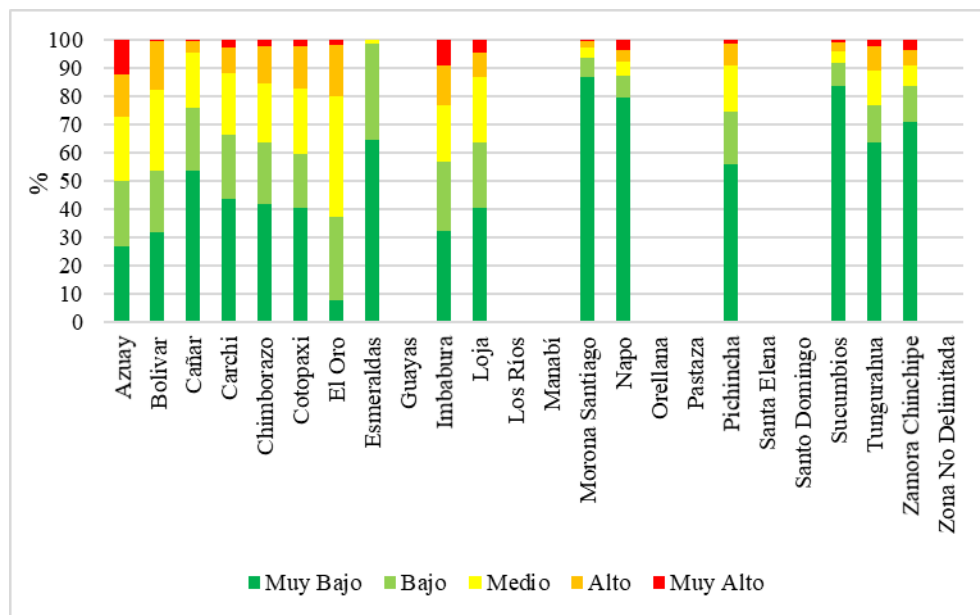


Figura 16. Sensibilidad de cambio del Páramo al 2030 por provincias

Fuente: Elaboración propia

Vegetación arbustiva se diferencia de las coberturas anteriores, puesto que las probabilidades muy altas de cambio prevalecen frente al resto en todas las provincias, a excepción de Esmeraldas. Un caso distintivo es Santo Domingo donde se ilustra que al 2030, su superficie total de vegetación arbustiva (2 ha) abarcará una modificación integral (Figura 17). Otros ejemplares incuestionables de transiciones muy altas, se aprecian en la provincia de Los Ríos 81.10% (297 ha), Bolívar 48.90% (1 332 ha) y Pastaza 47.22% (793 ha).

En comparación con el resto de provincias, es evidente un cambio alto fundamentalmente en Tungurahua 50.45% (8 574 ha), Cañar 49.89% (7 457 ha) y Carchi 47.11% (13 790 ha). Sin embargo, la superficie de cobertura arbustiva en Esmeraldas, Morona Santiago, Napo y Zamora Chinchipe responden únicamente a sensibilidades muy bajas de cambio.

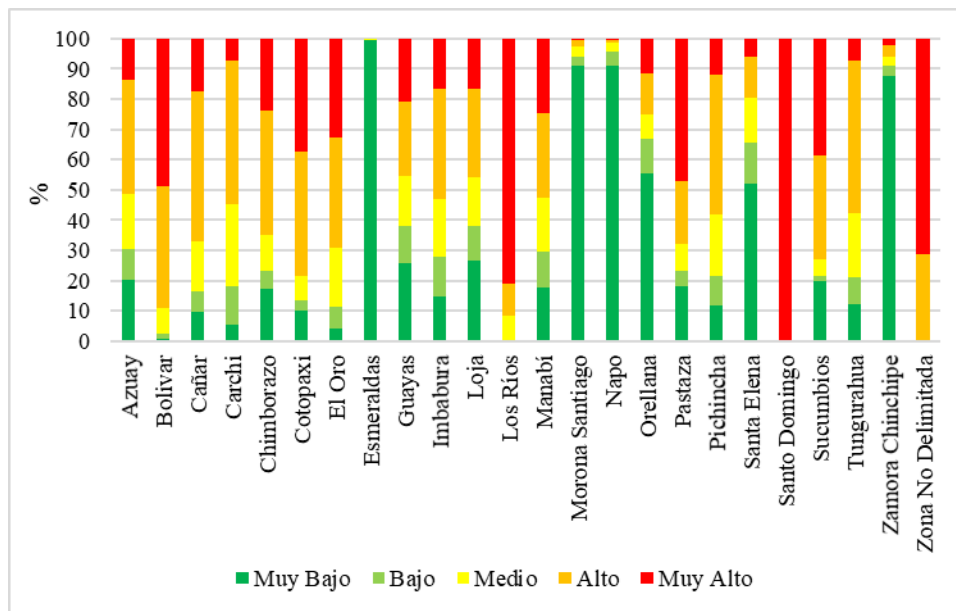


Figura 17. Sensibilidad de cambio de la Vegetación Arbustiva al 2030 por provincias

Fuente: Elaboración propia

Analizando la sensibilidad de cambio en la cobertura herbácea, se evidencia que la mayoría de las provincias están prominentes a probabilidades de cambios entre altos y muy altos. En este contexto, se observa que existe una notable transformación de la superficie total de vegetación herbácea en Bolívar (141 ha), el Oro (3 ha) y Santo Domingo (11 ha). En la provincia de Cañar se pronostica un nivel muy alto de cambio del 80.76% (1 ha), en el mismo nivel se encuentra Manabí, Santa Elena y Pichincha. El resto de provincias cuenta con cambios netamente marcados como se indica en la figura 18.

En otra perspectiva, Sucumbíos y Morona Santiago son las provincias con transiciones muy bajas de 78.8% (1 397 ha) y 72.76% (149 ha) abarcando mayor parte de superficie. Un caso particular es la exclusión de sensibilidad de cambio en Esmeraldas debido a que no predomina este tipo de cobertura.

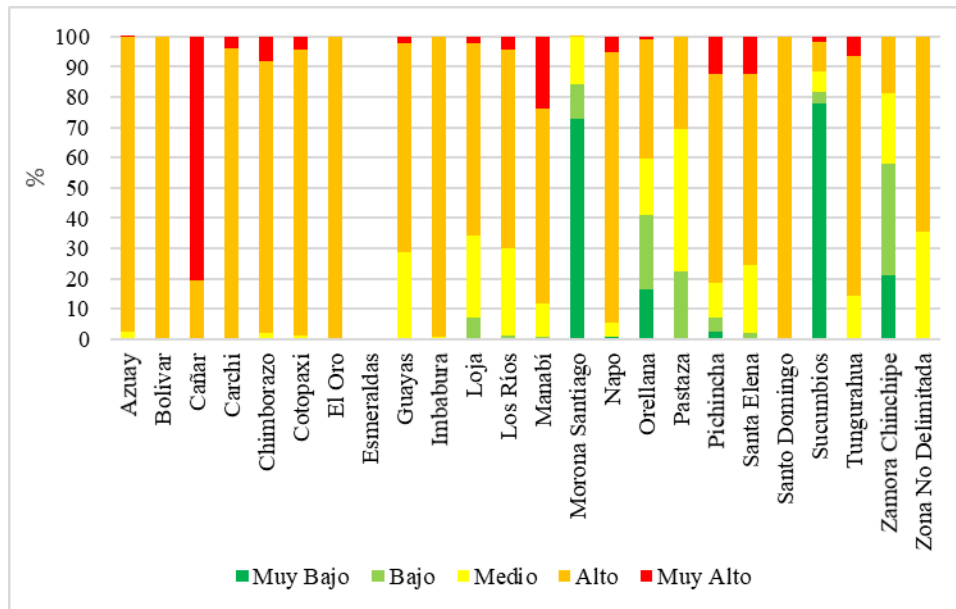


Figura 18. Sensibilidad de cambio de la Vegetación Herbácea al 2030 por provincias

Fuente: Elaboración propia

4.2. Determinar la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.

La tasa de erosión de Ecuador continental se estimó mediante el cálculo del factor de erosividad, erodabilidad, longitud y pendiente, y cobertura para el año 2000 y 2016, así como la proyección al 2030. A continuación, se detalla los resultados obtenidos en cada factor.

4.2.1. Factor erosividad (R)

El mapa de erosividad de precipitación de Ecuador continental (Figura 20) da una vista de la energía erosiva de la lluvia, registrando valores de R entre 512 a 6435 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, con una media 3539 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ y una alta desviación estándar de 1319 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ por la variabilidad de las precipitaciones en la zona de estudio.

La región Costa y Amazónica registran los niveles más altos de erosividad, especialmente la provincia de Esmeraldas, Los Ríos, Santo Domingo, Pastaza y Orellana con valores que fluctúan desde 3463 a 6435 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, lo que indica que son áreas muy propensas al proceso de erosión por precipitación, puesto que la media de precipitación anual corresponde a 2162 mm en

16 años (Figura 19). Esta situación es más evidente en el mes de diciembre a abril correspondiente al período lluvioso.

A pesar de que la zona litoral registra valores altos del factor R, algunas provincias presentan una disminución del índice de erosividad ($< 2138 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$) debido a su cercanía al Océano Pacífico, donde la cantidad de precipitación anual registrada es menor (131-690 mm), principalmente en el mes de mayo-octubre.

El fenómeno de erosividad disminuye notablemente en la región Andina, tal es el caso de la provincia del Azuay, Cañar, Chimborazo, Imbabura y Tungurahua con niveles inferiores a $2789 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con una precipitación anual $< 1192 \text{ mm}$. Sin embargo, algunos sectores presentan un elevado índice de erosividad, mayor a $4000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ como en Carchi, oeste de Bolívar y Loja. Cabe destacar que en la RSE (Loja, Zamora Chinchipe y El Oro) se evidencia gran variabilidad de la precipitación anual (131-2495 mm), encontrándose valores de erosividad desde $1100 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo zonas muy susceptibles a sufrir erosión.

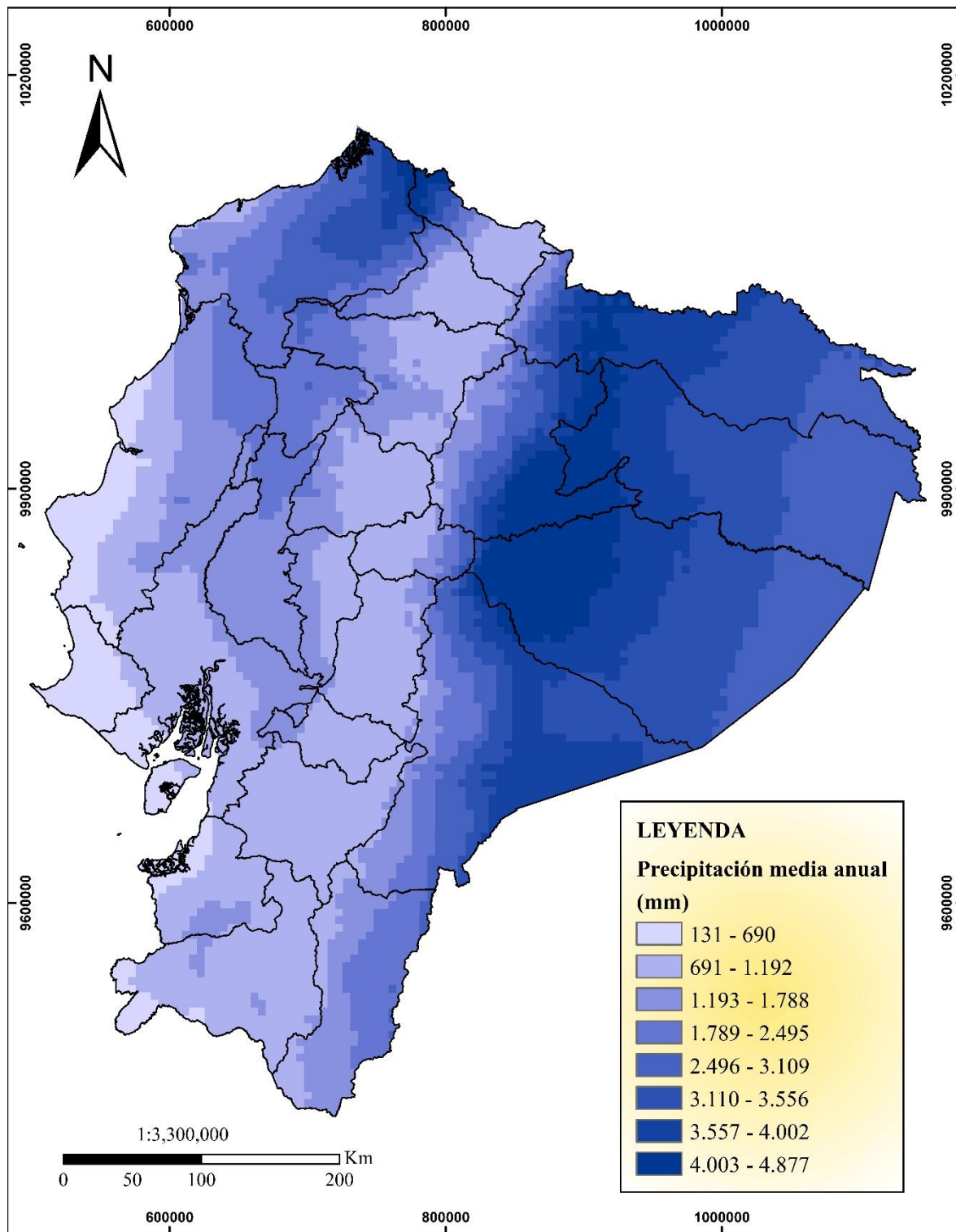


Figura 19. Mapa de precipitación media anual (2000-2016) de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

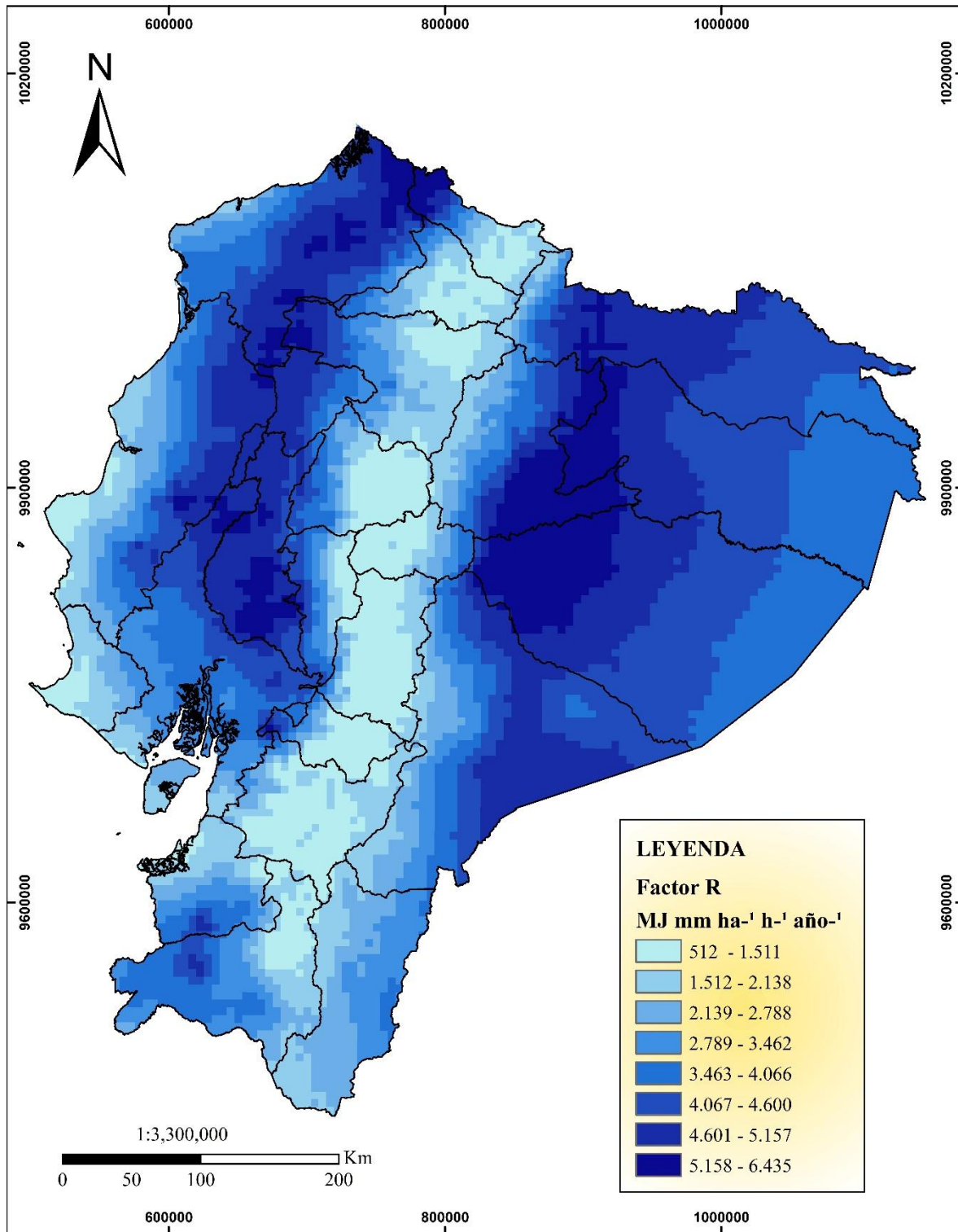


Figura 20. Mapa de erosividad (factor R) de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Factor erodabilidad (K)

La figura 21 ilustra los valores de susceptibilidad del suelo a ser erosionado en relación a las propiedades intrínsecas del suelo. Los valores estimados del factor K oscilan entre 0 y 0.0961 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, con una media del 0.0254 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ y desviación estándar del 0.0087 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹. La MO posee un impacto importante en el índice de erodabilidad del suelo, puesto que las provincias con altas concentraciones de MO (> 12%) presentan los valores del factor K más bajos (< 0.0290 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹), encontrándose la provincia de Zamora Chinchipe, Azuay, Cañar, noroeste de Morona Santiago, Pastaza, este de Tungurahua, Napo y Carchi; además, de tener una tasa de drenaje entre 1.5 y mayor a 3 cm h⁻¹ (Figura 22).

Los valores altos de K se encuentran distribuidos en la región litoral, principalmente en la provincia de Manabí, Santa Elena, Guayas, El Oro con rangos de 0.0242 a 0.0961 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ por el alto contenido de limo (35 - > 45%), niveles bajos de arcilla (< 24%), así como de MO (0-6%) y una tasa de permeabilidad menor a 1.5 cm h⁻¹.

Por otra parte, se observa que en la zona límite de Santa Elena, Guayas y El Oro existen porcentajes significativos de arena desde 43 a > 61%, por lo que son considerados suelos con texturas gruesas y se caracterizan por ser fácilmente erodables, ya sea por el impacto de las gotas de lluvia o el flujo del agua en superficie.

En la misma línea, se encuentra Chimborazo, oeste de Tungurahua y Cotopaxi al contar con valores de K superiores a 0.0340 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹.

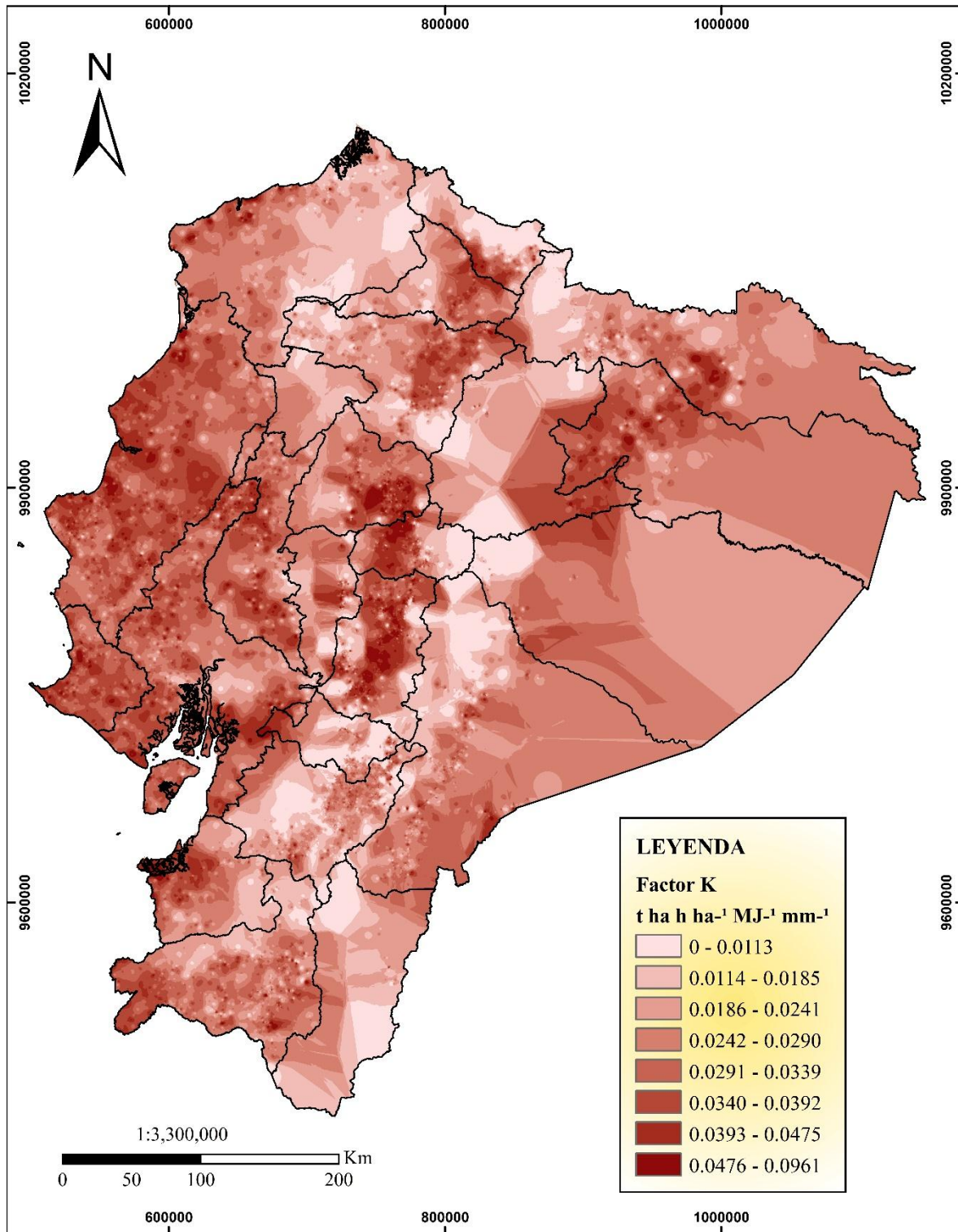


Figura 21. Mapa de erodabilidad (factor K) de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

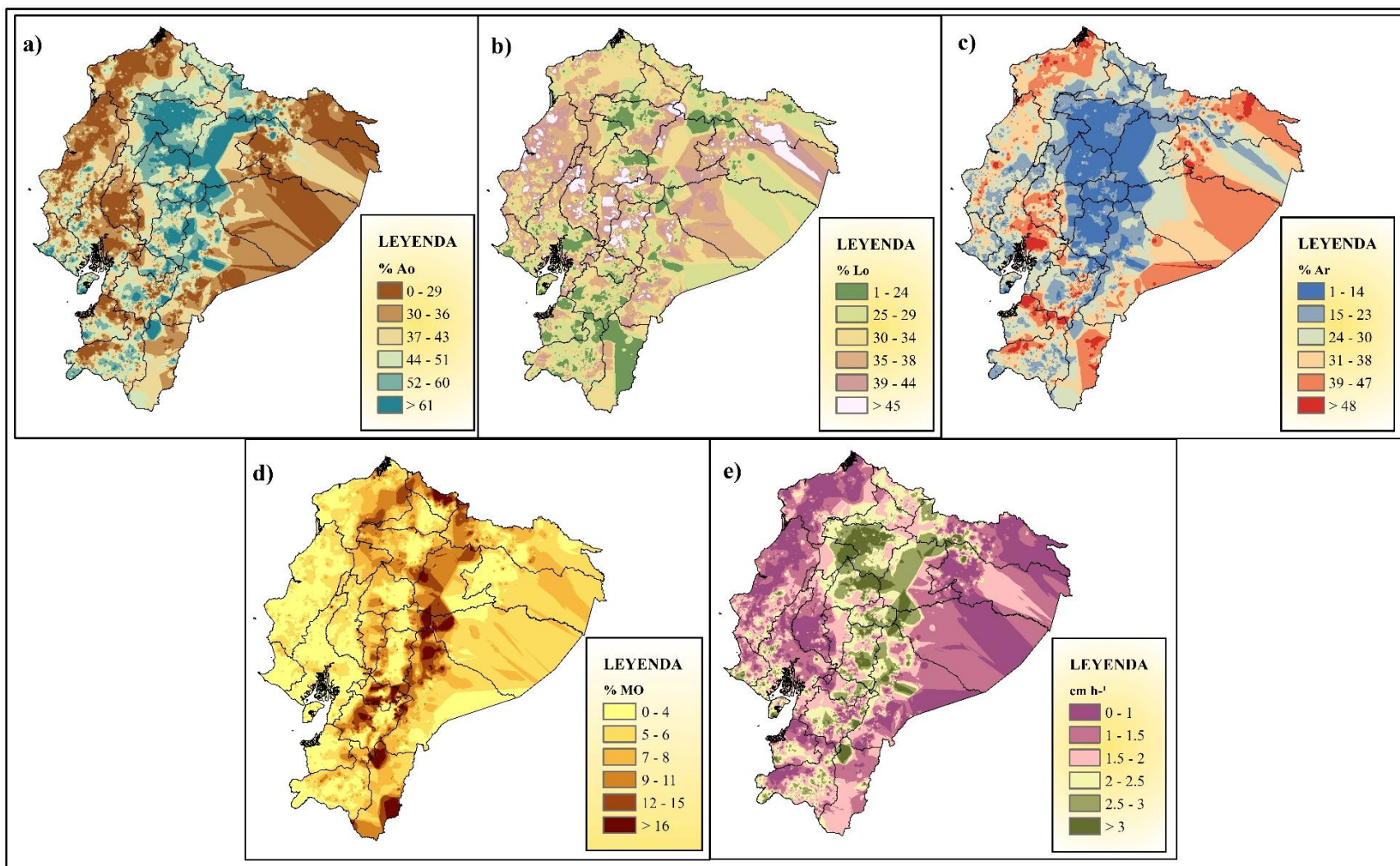


Figura 22. a) Porcentaje de arena, b) Porcentaje de limo, c) Porcentaje de arcilla, d) Porcentaje de materia orgánica y e) Tasa de permeabilidad de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Factor de longitud y pendiente (LS)

El factor LS representa el efecto de la topografía en la erosión del suelo, como se evidencia en la figura 23. Para el conjunto de Ecuador continental el valor medio del factor LS es de 5.28 (adimensional). Los valores mayores fluctúan entre 5 y > 50 abarcando casi en su totalidad la región Andina (Azuay, Cañar, Chimborazo, Cotopaxi, entre otras), tal como se esperaba debido a la presencia de las Etribaciones de la Cordillera de los Andes, la cual cuenta con pendientes mayores de 50 grados de inclinación. De tal manera que las zonas escarpadas y de altas pendientes tienen mayor tendencia a ser erosionadas. Asimismo, se observa en la provincia de Manabí, Esmeraldas y este del Oro las cuales alcanzan altos niveles del factor LS (10-25).

Los valores menores del factor LS (0.03-10) se encuentran en Sucumbíos, Orellana y Pastaza con grados de inclinación desde 0 hasta 28 respectivamente, puesto que no presentan una topografía compleja y en su mayoría presenta altitudes menores a los 1100 msnm.

En comparación, con el resto de provincias, los Ríos y Guayas son zonas de poco relieve que responden a índices de LS inferiores a 5 y se distribuyen en la mayor parte de su superficie con grados de inclinación de pendiente entre 0-23, y con una altitud menor a 1000 msnm.

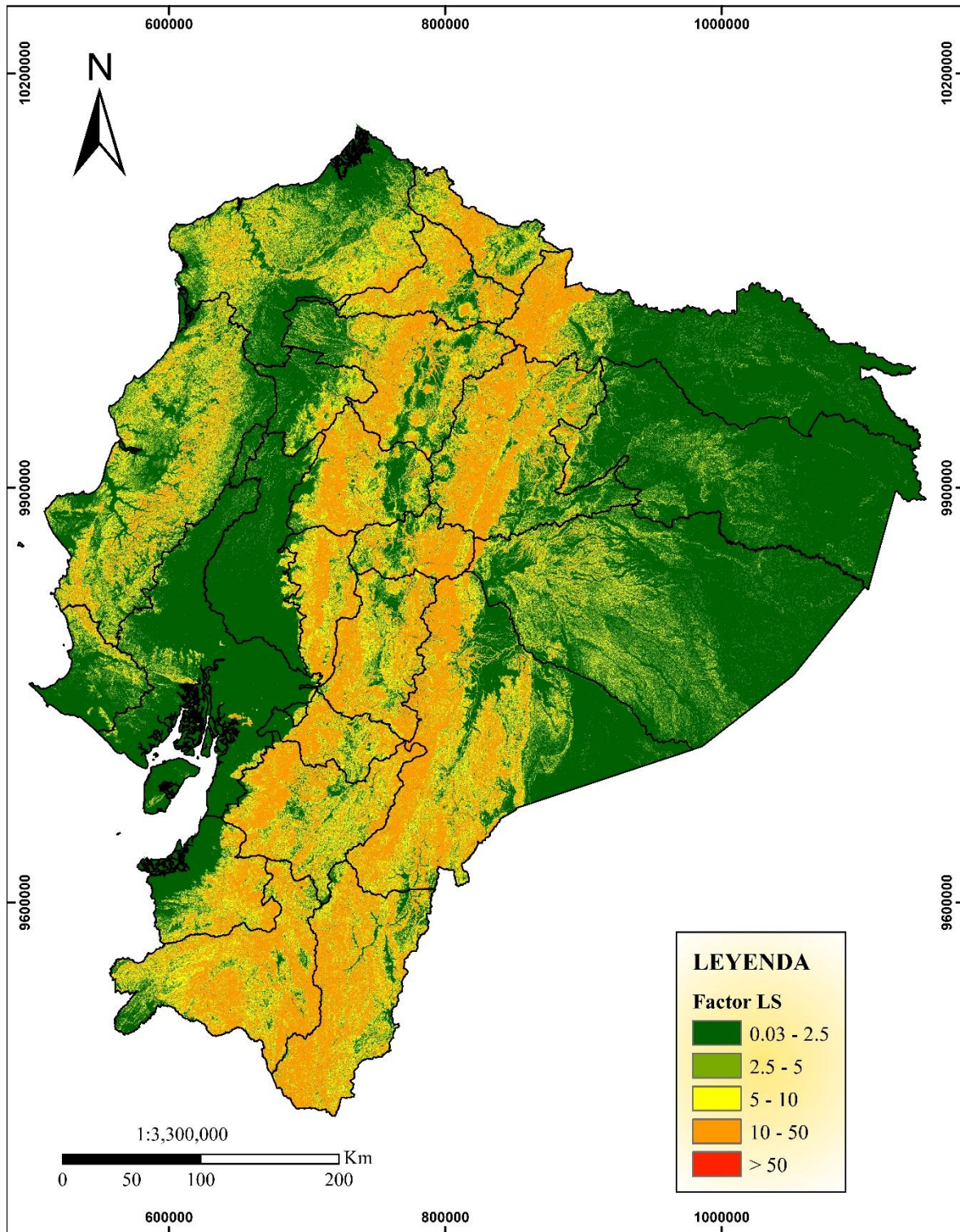


Figura 23. Mapa de longitud y pendiente (factor LS) de Ecuador continental

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Factor de cobertura (C)

El factor de cobertura (C) desempeña un papel relevante en determinar el nivel de erosión del suelo, puesto que indica el grado de protección de la vegetación en el suelo. En la tabla 4, se observa la ponderación asignada a cada una de las coberturas y uso del suelo identificadas en Ecuador continental, que van desde 0 a 0.50, donde valores cercanos a 1 indican alto nivel de desprendimiento del suelo por ausencia de la vegetación.

El valor más bajo (0) corresponde a cuerpos de aguas mientras que el mayor a otras tierras (0.50). En el resto de categorías se distingue una alta variación en la ponderación dependiendo de sus características, manejo y conservación. Cabe mencionar que en el ítem de resultados del primer objetivo se detalla un análisis exhaustivo en base a la superficie, ganancias, pérdidas, intercambios, etc., de cada cobertura y uso del suelo, por tal razón en este apartado se especifica únicamente los valores asignados para el factor C.

Tabla 4. *Valores del factor C para la cobertura vegetal y uso del suelo de Ecuador continental*

Coberturas	Factor C
Bosque Nativo	0.001
Cuerpos de Agua	0
Otras Tierras	0.50
Páramo	0.01
Plantación Forestal	0.003
Tierras Agropecuarias	0.30
Vegetación Arbustiva	0.05
Vegetación Herbácea	0.05
Zona Antrópica	0.02

Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Estimación de la tasa de erosión o erosión hídrica de Ecuador continental

Durante el período analizado (2000-2016-2030), la tasa de erosión ha cambiado constantemente para el conjunto de Ecuador continental debido a la complejidad topográfica, condiciones climáticas, manejo de la cobertura vegetal y uso del suelo, así como de las propiedades fisicoquímicas del suelo. En la tabla 5, se observa que los niveles de erosión ($> 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) van

incrementándose en el transcurso de los años, por ende, abarcando mayor superficie mientras que el nivel de erosión correspondiente a $0-10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se reduce notablemente en el área de estudio.

Las tasas de erosión varían en el año analizado. En promedio las tasas de erosión fueron de 31, 35 y $52 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el año 2000, 2016 y 2030 respectivamente. El rango inferior de erosión ($0-10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) ocupa la mayor extensión del territorio continental, comprendiendo el 72.33% (18 010 941 ha) en el 2000, 68.95% (17 170 522 ha) para el año 2016 y el 59.66% (14 856 407 ha) para el año 2030. En este nivel predomina la región Amazónica (Figura 24), especialmente la provincia de Sucumbíos, Orellana y Pastaza a causa de la baja influencia del factor topográfico y la presencia de coberturas naturales como bosque nativo y vegetación arbustiva. Mientras que en menor medida se sitúa Morona Santiago y Zamora Chinchipe. La cobertura vegetal posee un efecto amortiguador al reducir la fuerza erosiva de la precipitación generando bajos rangos de erosión.

Para el año 2016, los valores de erosión ($10-100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) ocuparon una extensión de 4 550 633 ha, aproximadamente 18.27% del territorio, en comparación con el año 2000 del 16.25%, ubicándose mayormente en la región Andina (provincia de Pichincha, Cotopaxi, Chimborazo, Cañar, Azuay, entre otros) y Litoral (provincia de Los Ríos, Guayas y Santa Elena), donde se evidencia expansión de tierras agropecuarias (pastizal, cultivo anual, permanente, etc.), áreas sin cobertura vegetal, además de una compleja topografía con pendientes muy escarpadas (> 50 grados de inclinación). Es importante implementar medidas para contrarrestar la pérdida del suelo especialmente por prácticas agrícolas, puesto que para el 2030 las tasas de erosión abarcarán el 21.44% de la superficie continental.

En comparación con los rangos superiores de erosión ($100 - >200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), el nivel $>200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ prevalece debido a que es el rango que registra mayor aumento de la superficie, fundamentalmente para el 2030, ocupando 2 446 542 ha, es decir, 9.83% del área de Ecuador continental. La provincia de Manabí, Bolívar, sureste del Oro y Loja son las que presentan mayor pérdida del suelo ($>100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) durante el período analizado, esto se debe principalmente por la combinación de las condiciones topográficas, alto contenido de limo ($> 35\%$), predominan valores bajos de materia orgánica ($< 7\%$), mayor cantidad de precipitación, pero sobre todo por el desarrollo de actividades agrícolas (mosaico agropecuario, cultivo semipermanente, pastizales, entre otros), dando como resultado la pérdida de la cobertura vegetal natural, y dejando zonas vulnerables, expuestas al poder erosivo de la precipitación.

Tabla 5. Erosión hídrica de Ecuador continental para el período 2000-2016-2030

Pérdida del suelo (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Tasa de erosión del año 2000		Tasa de erosión del año 2016		Tasa de erosión para el año 2030	
	ha	%	ha	%	ha	%
0 - 10	18 010 941	72.33	17 170 522	68.95	14 856 407	59.66
10 - 20	1 125 365	4.52	1 203 140	4.83	1 333 363	5.35
20 - 50	1 642 472	6.60	1 873 640	7.52	2 157 333	8.66
50 - 100	1 278 856	5.14	1 473 853	5.92	1 847 616	7.42
100 - 150	843 549	3.39	948 994	3.81	1 279 287	5.14
150 - 200	618 994	2.49	690 540	2.77	979 495	3.93
> 200	1 381 369	5.55	1 542 186	6.19	2 446 542	9.83

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de la tasa de erosión por cobertura y uso del suelo de Ecuador continental.**

En la tabla 6 se puede observar los promedios de erosión para cada cobertura y uso del suelo de Ecuador continental, no obstante, se excluye las coberturas que no son propensas a la erosión del suelo como cuerpos de agua, otras tierras y zonas antrópicas. En el periodo de estudio, los promedios de erosión se incrementan notablemente para la categoría de tierras agropecuarias con 89.22, 91.81 y 114.01 t ha⁻¹ año⁻¹ para el año 2000, 2016 y 2030 respectivamente. Para el año 2016 se evidencia un aumento de la tasa anual de pérdida del suelo tanto para la vegetación arbustiva (30.14 t ha⁻¹ año⁻¹) como herbácea (41.20 t ha⁻¹ año⁻¹). Mientras que los promedios de erosión para bosque nativo (0.40 t ha⁻¹ año⁻¹) y páramo (2.75 t ha⁻¹ año⁻¹) son poco notorios. Para el estrato plantación forestal, el promedio de la pérdida del suelo incrementa 0.18 t ha⁻¹ año⁻¹ del 2000 al 2016. Así como en el 2030 con un promedio de 0.89 t ha⁻¹ año⁻¹.

En lo que respecta a los promedios de la tasa de erosión para el año 2030, se evidenció un cambio significativo en la categoría de tierras agropecuarias con 114.07 t ha⁻¹ año⁻¹. En la cobertura vegetal nativa de Ecuador continental, el páramo incrementó su promedio (3.10 t ha⁻¹ año⁻¹) mientras que el resto de categorías registran reducciones en su respectivo promedio.

Tabla 6. Promedios de la tasa de erosión por coberturas y uso del suelo en Ecuador continental

Coberturas	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Desviación estándar
	t ha ⁻¹ año ⁻¹			
Pérdida del suelo en el año 2000				
Bosque Nativo	0.40	0	15.99	0.50
Páramo	2.87	0	400	11.77
Plantación Forestal	0.46	0	400	2.71
Tierras Agropecuarias	89.22	0	400	107.93
Vegetación Arbustiva	24.15	0	400	47.87
Vegetación Herbácea	36.99	0	400	55.18
Pérdida del suelo en el año 2016				
Bosque Nativo	0.40	0	15.99	0.51
Páramo	2.75	0	400	10.09
Plantación Forestal	0.64	0	400	6.99
Tierras Agropecuarias	91.81	0	400	108.32
Vegetación Arbustiva	30.14	0	400	53.43
Vegetación Herbácea	41.20	0	400	54.24
Pérdida del suelo en el año 2030				
Bosque Nativo	0.37	0	15.99	0.50
Páramo	3.10	0	40.13	3.05
Plantación Forestal	0.89	0	12.31	0.93
Tierras Agropecuarias	114.07	0	400	116.98
Vegetación Arbustiva	18.44	0.002	272.52	19.55
Vegetación Herbácea	30.81	0.009	339.93	22.58

Fuente: Elaboración propia

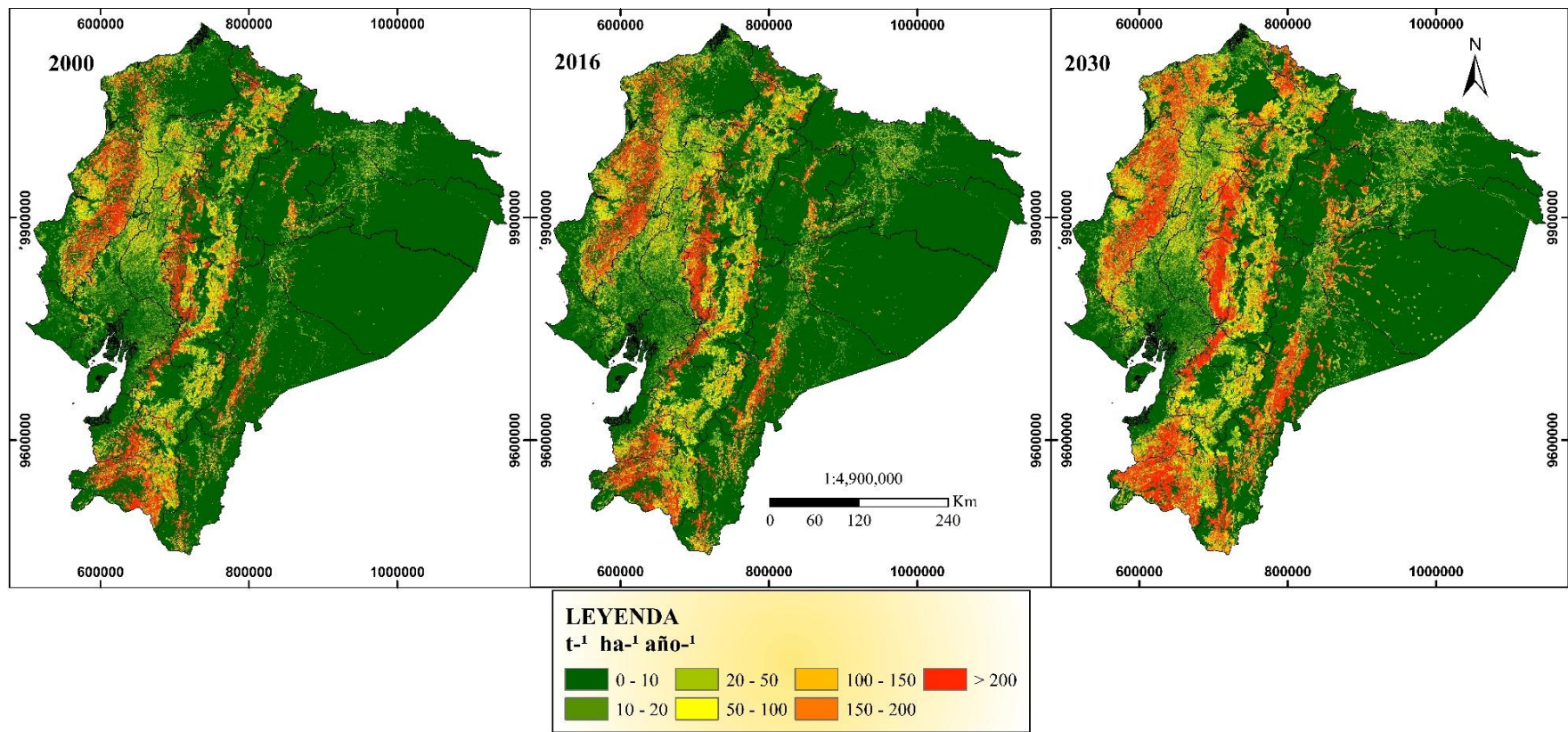


Figura 24. Mapa de erosión de Ecuador continental del año 2000, 2016 y la proyección espacial de la erosión al 2030

Fuente: Elaboración propia

5. DISCUSIÓN

5.1. Analizar el cambio de cobertura y uso del suelo en el período 2000-2016 y su proyección futura para el año 2030 en Ecuador continental.

5.1.1. Análisis del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el período 2000-2016 en Ecuador continental.

Aunque Ecuador continental posee una extensión de superficie pequeña, concentra en su territorio diversidad de ecosistemas con especies de flora de alto nivel de endemismo (Cuesta *et al.*, 2015), que han sufrido relevantes transiciones a causa del cambio de uso del suelo (Manchego *et al.*, 2017). Por tanto, es importante estudiar y conocer los patrones de cambio de uso del suelo determinados por variables biofísicas, socioeconómicas y espaciales (Pinos, 2016).

La dinámica del cambio de uso del suelo de Ecuador continental, se debe fundamentalmente por el crecimiento desordenado de la población y avance de la frontera agrícola, registrando la mayor ganancia en superficie de 137 782 y 1 682 473 ha, y a la vez desencadena alteraciones en la estructura y funcionalidad del suelo (Pinos, 2016). Puesto que, ejercen mayor presión en la cobertura natural reduciendo 3.87% (14 992 685 ha) de superficie para el año 2016. La vegetación herbácea es la cobertura con mayor pérdida de superficie del 52.16% (43 303 ha) en el lapso de 16 años, debido a que no recibe el cuidado especial o es utilizada con fines de pastoreo esporádico (IGM, 2017).

En la misma línea, se encuentra bosque nativo con un descenso de 8.15% (12 631 198 ha) de su cobertura en el año 2016, fundamentalmente en la provincia de Esmeraldas donde se registra expansión agrícola a expensas del bosque reduciendo aproximadamente el 10% de la superficie boscosa. Otro componente que probablemente influye en el descenso de la superficie de bosque es la deforestación, primordialmente en el noroeste de la Amazonía y de las regiones costeras (Tapia-Armijos *et al.*, 2015) como es el caso de Morona Santiago y Los Ríos con una extensión de bosque de 73.01 y 1.59% en relación con el año 2000. Además, la extracción de madera de especies con alto valor comercial (Curatola Fernández *et al.*, 2015) se lleva a cabo en el Chocó Ecuatoriano (Palacios y Jaramillo, 2016) y en los Bosques Andinos Tropicales ubicados en la RSE (Cuenca *et al.*, 2016), los cuales se encuentran seriamente amenazados, puesto que el aprovechamiento forestal se realiza sin medida, y en muchos casos ilegalmente.

El estrato páramo se extiende a lo largo de las Etribaciones de la Cordillera de los Andes en fuertes gradientes altitudinales, se caracteriza por ser un ecosistema altoandino de carácter estratégico por la oferta de servicios ambientales (Crespo *et al.*, 2014), entre los que se destaca: almacenamiento de carbono, ciclaje de nutrientes, biodiversidad y regulación hídrica (Cuervo Barahona *et al.*, 2016). No obstante, se ha registrado una reducción de 1.33% (1 515 272 ha) para el año 2016, a causa de densos asentamientos humanos, concentración de la agricultura en el valle interandino (pendientes > 50%), pastoreo con camélidos andinos (*Lama pacos*), quemas anuales localizadas, construcciones viales, minería y forestación con pino (*Pinus patula*) (Crespo *et al.*, 2014), probablemente es la causa del aumento en la extensión de plantaciones forestales de 53 505 ha en la presente investigación. La provincia de Chimborazo y Cotopaxi indican que un aprovechamiento excesivo de los recursos provenientes del páramo genera transformaciones significativas en la extensión, y a su vez en los servicios que ofrece (Lozano *et al.*, 2016), puesto que en estas provincias la agricultura y ganadería son la forma de subsistencia de los habitantes, por tanto la extensión del páramo se redujo en 33.59% (218 369 ha) y 16.92% (103 393 ha) para el 2016. Estos efectos transforman al páramo en un ecosistema vulnerable y de gran importancia ambiental (Daza *et al.*, 2014), puesto que su rendimiento hídrico beneficia a más de 3 000 000 habitantes a nivel nacional (Buytaert *et al.*, 2006).

Es importante mencionar que existen instituciones privadas cuyo objetivo es desarrollar proyectos enfocados al manejo sostenible y conservación de páramos andinos, como Ecopar (UICN, 2016), razón por ser la cobertura con menor cambio en el período de estudio, en comparación con el resto de remanentes de vegetación. Ecuador cuenta con un sistema nacional de áreas protegidas denominado Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE) conformado por 48 unidades que cubren casi el 20% del país (4.3 000 000 ha). Además, el MAE estableció un programa nacional de incentivos de pagos para la conservación de la biodiversidad denominado SocioBosque (Cuesta *et al.*, 2017). Estas estrategias de conservación conllevan numerosos beneficios como la regeneración de la vegetación, tal es el caso de la vegetación arbustiva registrando un incremento del 16.85%.

Tierras agropecuarias y zona antrópica se caracterizan por obtener la mayor ganancia en superficie, por ello es importante mencionar que Ecuador se caracteriza por ser un país naturalmente agrícola y en los últimos años agroexportador de varios productos como el banano,

café, cacao, flores, aceite de palma, petróleo, camarón, consumidos tanto en el mercado interno como externo (Ochoa *et al.*, 2016; IGM, 2017) donde Los Ríos, Santo Domingo, Bolívar y Manabí son las principales provincias dedicadas al cultivo de estos productos, por ende la actividad agricultura ocupa el 94.18, 86.66, 76.37 y 68.17% de su extensión total. Durante el periodo 2000-2008, la superficie urbana e infraestructura se aceleró sustituyendo la superficie agropecuaria a nivel nacional (Castro *et al.*, 2013; MAE,2016). En el presente estudio, se determinó un aumento considerable de la zona antrópica de 54.41% (137 699 ha). Un caso específico es el cantón Cuenca donde áreas rurales se convirtieron en zonas urbanas (Pinos, 2016), ocupando 6 532 ha en el 2016.

Por otro lado, INEC (2010) especifica en su último censo que la población ecuatoriana a nivel de Ecuador continental en 2001-2010 creció de 12 463 115 a 14 284 106 habitantes. Y según proyecciones del INEC, la población nacional para el año 2016 fue de 16 498 558 habitantes (INEC, 2013) lo que explica el crecimiento de infraestructura y áreas pobladas.

5.1.2. Modelación de escenarios de sensibilidad de cambio de la cobertura vegetal nativa al 2030 en Ecuador continental en base a Land Change Modeler (LCM) de TerrSet.

El módulo LCM del software TerrSet representa eficazmente la magnitud, localización y la extensión del cambio de cobertura y uso del suelo analizado (Roy *et al.*, 2014). Los escenarios generados indican que las áreas protegidas, esto es, bosque, páramo y vegetación arbustiva se mantendrán. Esto se debe principalmente a la inaccesibilidad por la compleja topografía, falta de infraestructura vial y condiciones ambientales (Curatola Fernández *et al.*, 2015). Sin embargo, una parte de su extensión estará sujeta a probabilidades de cambios muy altas de 6.82% (860 411 ha), 3.80% (57 632 ha) y 13.98% (106 719 ha) respectivamente. La vegetación herbácea es la cobertura más vulnerable a modificaciones debido a que gran parte de su extensión se encuentra sujeta a una probabilidad de cambio alta (71.52%) y media (16.42%), por efecto de la presencia de tierras agropecuarias y las zonas urbanas.

La modelación espacial permitió observar un impacto significativo de las estrategias de conservación en las zonas con presencia de cobertura vegetal natural, especialmente la categoría de páramo cuya probabilidad de cambio es muy baja. No obstante, alrededor del 30% de la vegetación nativa total cambiará significativamente por actividades antrópicas. Por ello, es fundamental fortalecer las estrategias de conservación como la priorización de nuevas áreas de conservación, a través de su incorporación en el PANE, para incrementar la conectividad entre las

reservas y regiones, puesto que solamente el 20% de la superficie de Ecuador continental pertenece al PANE (Cuesta *et al.*, 2017), y se deja de lado remanentes de vegetación que albergan gran cantidad de biodiversidad faunística y florística. De tal manera, que se incrementaría la conservación para la vegetación herbácea debido que más del 50% de su extensión cambiará notablemente en el 2030.

Es importante mencionar que la simulación se realizó para un período de tiempo corto (5-15 años) para conseguir una mejor predicción (Roy *et al.*, 2014), y obtener resultados referentes a probabilidades muy cercanas a la realidad, sin embargo estas probabilidades podrían elevarse de acuerdo a la dinámica de las actividades antrópicas que presente Ecuador continental en el transcurso del tiempo de 14 años.

5.2. Determinar la variabilidad espacio-temporal de la erosión hídrica en función del cambio de uso del suelo e intensidad de precipitación mediante modelación en Ecuador continental.

En la presente investigación mediante la RUSLE se determinó que Ecuador continental tiene rangos significativos de erosión desde 0-10 t ha⁻¹ año⁻¹ catalogados como erosión ligera, según la clasificación de erosión por UNESCO *et al.* (1980). Esta clasificación abarcó el 68.95% de la extensión total en 2016, principalmente por la presencia de remanentes de vegetación cubriendo la superficie amazónica casi en su totalidad. En esta zona se concentran los valores más altos de R (3463-6435 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) a causa de la velocidad y dirección de los vientos del este, responsables del transporte de la humedad procedente de la Cuenca Amazónica (Fries *et al.*, 2017). Sin embargo, la topografía escarpada de la Cordillera de los Andes actúa como barrera y obstaculiza dicho transporte (Fries *et al.*, 2014) hacia la región Andina generando valores bajos de R (< 2789 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹). En esta línea, se suma la influencia de factores geográficos y meteorológicos (Eguiguren *et al.*, 2015) como la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la interacción océano pacífico-atmósfera y la posición geográfica generando: una estación lluviosa durante el mes de diciembre-abril y una seca durante mayo-octubre en el Litoral y Andina mientras que en la Amazonía presenta lluvias de alta intensidad (Maldonado, 2002). A pesar de que la Amazonía cuenta con precipitaciones elevadas, se caracteriza por su alto porcentaje de vegetación la cual intercepta la cantidad de la precipitación y disminuye su fuerza erosiva (Alvarez *et al.*,

2017) incluso en pendientes muy pronunciadas (Ochoa *et al.*, 2016). Esto a su vez influye en los valores bajos del factor K, puesto que la cubierta vegetal protege al suelo de la erodabilidad.

El siguiente rango de erosión ($10-100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se clasifica como moderada-alta (UNESCO *et al.*, 1980), como consecuencia de la intensificación agrícola y responsable de la rápida conversión de la cobertura vegetal natural dejando al suelo desprovisto de vegetación (Ganasri y Ramesh, 2015). Este escenario está mayormente distribuido en la zona Andina y Costa, donde el manejo de la cobertura influye en la magnitud de la pérdida del suelo (Panagos *et al.*, 2015). Cabe resaltar que el desarrollo de actividades antrópicas en zonas de altas pendientes incrementa la pérdida del suelo a causa del déficit de MO (Ochoa *et al.*, 2016) conduciendo a una exposición directa tanto de la precipitación como la escorrentía quién arrastra los nutrientes presentes en el suelo, como se observa en la región Andina. Asimismo, se evidencia en la región litoral altas tasas de erosión por su clima tropical seco-húmedo (IGM, 2017) en conjunto con suelos de escasa MO. Esta situación se verifica en el estudio de Ochoa *et al.* (2016) sobre el riesgo de pérdida del suelo en la cuenca Catamayo-Chira ubicada en la RSE. En esta investigación determinaron que la erodabilidad es el principal factor que influye en lugares con clima tropical seco-húmedo de escasa vegetación, por tal razón la mayor superficie de la cuenca está expuesta a una erosión alta, así como se indagó en la presente investigación obteniendo una tasa de erosión $> 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Además, se ratifica en las investigaciones realizadas por Tamayo (2016) y Ramos (2016) en la provincia de Loja.

Los rangos altos de erosión ($100 - >200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se deben principalmente a las características físico-químicas que presenta el suelo en conjunto con el contenido de MO (Zilio *et al.*, 2018). En este caso, la condición textural del suelo da lugar a valores altos de erodabilidad ($> 0.0291 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) principalmente por el mayor porcentaje de arena muy fina y limo ($> 35\%$), el cual erosiona rápidamente por su tamaño muy fino y ser poco resistente a la escorrentía (Djuwansah y Mulyono, 2017), además de formar una costra y producir altas tasas de escorrentía (INETER, 2005). Por otro lado, la presencia de arcilla en el suelo contrarresta la erodabilidad debido a la fuerte cohesión que existe entre sus partículas finas (Panagos *et al.*, 2014; Abua *et al.*, 2016) mientras que suelos con contenidos importantes de arena generan valores bajos de k pero pueden ser transportados por escorrentías de alta velocidad. Estos efectos pueden incrementarse si se desarrollan en zonas de pendientes pronunciadas.

Aunque las fracciones texturales influyen en la erodabilidad del suelo, la MO es determinante en la resistencia que puede ofrecer el suelo a la erosión, tal como menciona Panagos *et al.*, (2014) en su estudio sobre erodabilidad del suelo en Europa. La presencia de MO mejora la estabilidad de los agregados, la infiltración, transporte de nutrientes, entre otras funciones, por ello desempeña un rol importante al proteger el suelo incluso en zonas de pendientes escarpadas con altas precipitaciones (Ostovari *et al.*, 2016; Kravchenko y Guerrero, 2017). Este contexto se observa en el ecosistema páramo y bosque nativo donde predominan suelos con gran contenido de MO (> 12%) generando valores de cero del factor K, se ubican en la provincia de Zamora Chinchipe, Azuay, Cañar, noroeste de Morona Santiago, entre otras. De tal manera, se determinó que tanto la MO como la vegetación natural actúan como factores de protección de suelo evitando el riesgo de exposición a fenómenos climáticos extremos.

Estas propiedades tanto de bosque nativo como páramo permiten que los promedios de tasa de erosión sean inferiores a $2.87 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el periodo 2000-2016. Sin embargo, el cambio de uso del suelo en el páramo para desarrollar prácticas agrícolas (Crespo *et al.*, 2014) deja al suelo desprovisto de vegetación y propenso a la erosión hídrica, probablemente sea el motivo del incremento de su promedio de $0.35 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el 2030. En comparación con el resto de coberturas, la vegetación arbustiva y herbácea presentan los promedios más altos de erosión al estar mayormente expuestas a transiciones, como la vegetación herbácea la cual es empleada para pastoreo esporádico (IGM, 2017). Esta disminución de la cobertura vegetal nativa de Ecuador continental se debe a la expansión de tierras agropecuarias (Tapia-Armijos *et al.*, 2015) la cual presenta un promedio alto de erosión ($> 89.22 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) por la presencia de pastizales, cultivos de banano, café, cacao, caña de azúcar, arroz, papa, frutas cítricas en la provincia de Manabí, Guayas, El Oro, Loja, entre otros (INEC, 2016).

Es importante mencionar que la provincia de Manabí, Cotopaxi, Bolívar, sureste del Oro y Loja se encuentran en grados críticos de erosión ($> 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), las cuales requieren de la ejecución de medidas correctivas orientadas al manejo sostenible del suelo debido a que las tasas de erosión se incrementarán al 2030 y, en situaciones extremas se conduciría a un proceso de desertificación como indica Segarra (2014) que a nivel nacional el 22.9% del territorio continental presenta susceptibilidad a la desertificación, especialmente Loja y Manabí señaladas como las más afectadas con porcentajes del 70 y 75% respectivamente (SENPLADES, 2014).

6. CONCLUSIONES

- La cobertura vegetal natural de Ecuador continental disminuyó 3.87%, destacándose con mayor pérdida la vegetación herbácea y bosque nativo por la expansión de tierras agrícolas y zonas antrópicas.
- La provincia de Bolívar, El Oro, Esmeraldas y Morona Santiago son las que registran dinámicas importantes de cambios entre las coberturas donde bosque nativo y tierras agropecuarias son las coberturas de mayor extensión, incluso a nivel nacional.
- Para el 2030 se prevé un impacto positivo de las estrategias de conservación en la cobertura vegetal nativa, puesto que la mayor superficie está sujeta a una probabilidad muy baja de cambio, a excepción de la vegetación herbácea por ser la más vulnerable a cambios tanto en el análisis de cambio como en la proyección futura.
- Las tasas de erosión calculadas varían en función del tipo de cobertura, condiciones climatológicas y del año analizado. El 2030 presenta el promedio más alto de erosión en comparación con el año 2000-2016.
- La región Costa y Andina son las más propensas a sufrir un alto grado de erosión ($> 100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) debido a las condiciones climáticas y el desarrollo de actividades agrícolas en zonas de topografía irregular. Mientras que la alta densidad de vegetación de la región Amazónica contrarresta el efecto de la erosión.
- Manabí, Bolívar, sureste del Oro y Loja son las provincias con mayor tendencia a erosión hídrica, por ello es indispensable la aplicación de técnicas sostenibles para el manejo adecuado de la cobertura y conservación del suelo. En caso contrario se conduciría a un proceso de desertificación.

7. RECOMENDACIONES

- Ampliar estudios sobre erosión hídrica a nivel de Ecuador continental mediante la aplicación de modelos físicos caracterizados por su precisión y exactitud.
- Actualizar la información base de Ecuador continental referente a coberturas naturales y uso del suelo, deforestación, vías, minería, zonas antrópicas, puesto que son variables que presentan cambios significativos en el transcurso del tiempo.
- Las entidades gubernamentales, ecologistas y gestores ambientales deben utilizar la presente investigación como apoyo para el fortalecimiento de las políticas y estrategias orientadas a la protección y conservación del suelo como de la cobertura vegetal nativa.
- Continuar con el estudio de cambio de la cobertura vegetal especialmente en las provincias que reportan altos niveles de erosión hídrica con el fin de obtener información a más detalle y contrarrestar la pérdida del suelo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abua, M., Akpabio, O., Udosen, C., Bassey, B., y Edide, J. (2016). Soil Erodibility Status In Etekwo River Basin In Akwa Ibom, State, Nigeria. *International Journal of Innovative Environmental Studies Research*, 4(4), 1–9.
- Adeola, F. O., Ubom, O., y Adeyemi, O. (2013). Estimating Soil Loss from Soil Erosion-Induced Land Degradation in Uyo Metropolis , Nigeria Using Remote Sensing Techniques and GIS, 12, 120–137.
- Alatorre, L. C., García, A. K., Rodríguez, A. J., Erives, V., y González, E. (2014). Estimación de la erosión potencial en la Cuenca de la Laguna Bustillos, Chihuahua, México. *Geoecología, Cambio Ambiental y Paisaje*, 249–258.
- Alberts, E., Earing, M., Weltz, M., Risse, L., Pierson, F., Zhang, X., ... Simanton, J. (1995). *Soil component. In: Water Erosion Prediction. Project: Hillslope and watershed model documentation* (Department), 1-5.
- Alonso, G., Ruiz, M., Schiettecatte, W., Diaz, J., y Almoza, Y. (2007). Riesgo de Erosión Hídrica en la Cuenca Hidrográfica La Güira , Río Cuyaguaje , Cuba, 11(1), 110–123.
- Alvarez, P., Moreno, G., Palacios, L., y Quinde, J. (2017). Distribución espacial de erosión hídrica en el cantón Macará , provincia de Loja , utilizando el modelo RUSLE y SIG, 129-143.
- Alvarez, P., Veliz, F., Muñoz, J., y Aguirre, N. (2015). Análisis multi-temporal del cambio de uso de suelo en el cantón Zapotillo , provincia de Loja . Multi-temporal analysis of land use change in canton Zapotillo , province of Loja . *Bosques Latitud Cero*, (5), 1-14.
- Angulo, M., y Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records : A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1–2), 111–121.
- Arnoldus, H. M. . (1980). *An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation*. (M. de Boodt y D. Gabriels, Eds.), *Assessment of Erosion* (John Wiley). New York, 127-132.
- Baffour, N. K., Atakora, E. T., Ofori, E., & Antwi, B. O. (2012). Estimation of soil erodibility and rainfall erosivity for the biemso basin, Ghana. *Journal of Environmental Hydrology*, 20(8), 1–9.
- Bagio, B., Bertol, I., Wolschick, N. H., Schneiders, D., y do Nascimento, M. (2017). Water erosion in different slope lengths on bare soil. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 41, 1–15.
- Bascuñán, S. (2010). *Relación entre la erosión producida por un Flujo Superficial En Suelos Finos Y*

Algunas propiedades de estos. (tesis de pregrado) Universidad de Chile.

- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., y Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R/USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (2), 1–34.
- Bienes, R. (2006). La erosión hídrica : Imporancia y clases . Parámetros climáticos condicionantes de la erosión (intensidad , torrencialidad , aridez , déficit hídrico , tamaño de gota), (6), 1-19.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421.
- Castro, L. ., Calvas, B., Hildebrandt, P., y Knoke, T. (2013). Avoiding the loss of shade coffee plantations: how to derive conservation payments for risk-averse land-users. *Agroforestry Systems*, 87(2), 331–347.
- Castro, M., Sierra, O., Calva, J., Camacho, F., López, F., y Lozano, P. (2013). *Zonas de Procesos Homogéneos de Deforestación del Ecuador: Factores promotores y tendencias al 2020*. (Programa GESOREN-GIZ & Ministerio del Ambiente, Eds.). Quito, Ecuador, 36.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bievre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. In F. Cuesta, J. Sevink, L. Llambí, B. De Bièvre, & J. Posner (Eds.), *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (287–304).
- Cuenca, P., Arriagada, R., y Echeverri, C. (2016). How much deforestation do protected areas avoid in tropical Andean landscapes? *Environmental Science & Policy*, 56, 56–66.
- Cuervo Barahona, E., Cely Reyes, G. E., y Moreno Pérez, D. F. (2016). Determinación de las fracciones de carbono orgánico en el suelo del páramo La Cortadera , Boyacá. *Ingenio Magno*, 7(2), 139–149.
- Cuesta, F., Peralvo, M., Baquero, F., Bustamante, M., Merino-Viteri, A., Muriell, P., ... Torres, O. (2015). Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad en el Ecuador continental, 14.
- Cuesta, F., Peralvo, M., Merino-Viteri, A., Bustamante, M., Baquero, F., Freile, J. F., ... Torres-Carvajal, O. (2017). Priority areas for biodiversity conservation in mainland Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 93–106.
- Curatola Fernández, G., Obermeier, W. A., Gerique, A., López Sandoval, F., Lehnert, L. W., Thies, B., y

- Bendix, J. (2015). Land Cover Change in the Andes of Southern Ecuador-Patterns and Drivers. *Remote Sensing*, 7, 2509–2542.
- Cure, L. (2012). “Determinación de la influencia del cambio de uso de suelo en la calidad ambiental de la cuenca de río Déleg. (tesis pregrado)” Universidad Politécnica Salesiana. SEDE Cuenca.
- Daza, M. C., Hernández, F., y Triana, A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 67(20), 7189–7200.
- De Alba, S., Alcázar, M., Cermeño, F., y Barbero, F. (2011). Erosión Y Manejo Del Suelo. Importancia Del Laboreo Ante Los Procesos Erosivos Naturales Y Antrópicos. *Agric. Ecológica*, 7, 13–34.
- Desmet, P., y Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 427–433.
- Djuwansah, M. R., y Mulyono, dan A. (2017). ASSESSMENT MODEL FOR DETERMINING SOIL ERODIBILITY FACTOR IN LOMBOK ISLAND. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 27(2), 133–143.
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes: Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, 239.
- Eguiguren, P., Maita, J. A., Aguirre, N., y Samaniego, N. (2015). Clima de la Región Sur el Ecuador : historia y tendencias. In N. Aguirre, L. T. ;Ojeda, P. ;Eguiguren, & Z. Aguirre-Mendoza (Eds.), *Cambio climático y Biodiversidad: Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador*, 43-55.
- FAO. (2015a). El suelo es un recurso no renovable, 2. Retrieved from fao.org/soils-2015
- FAO. (2015b). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Retrieved September 20, 2018, from <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., Haregeweyn, N., Kawai, T., Sultan, D., ... BELAY, A. S. (2017). Spatial distribution and temporal trends of rainfall and erosivity in the Eastern Africa region, 1-15.
- Friehat, T., Mulugeya, G., y Gala, T. S. (2015). Modeling Urban Sprawls in Northeastern Illinois. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 3(5), 133–141.
- Fries, A., Mendoza, K., Oñate, F., Gonzalez, V., Pucha, F., y Rollenbeck, R. (2017). Temporal and spatial analysis of precipitation patterns in an Andean region of southern Ecuador using LAWR weather radar., 1-13

- Fries, A., Rollenbeck, R., Bayer, F., Gonzalez, V., Oñate-Valdivieso, F., Peters, T., y Bendix, J. (2014). Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 126(1–2), 13–29.
- Ganasri, B. P., y Ramesh, H. (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953–961.
- Gelagay, H. S., y Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 126–136.
- GEO Ecuador. (2008). GEO Ecuador 2008. Informe sobre el estado del medio ambiente., 192.
- Gibson, L., Zahn, M., Palmer, A., y Mantel, S. (2018). Future land cover change scenarios in South African grasslands e implications of altered biophysical drivers on land management. *Heliyon*, 4.
- Giménez, M. (2008). *Metología de calculo del factor topografico, LS, integrado en los modelos topograficos integrado en los modelos RUSLE Y USPED. Aplicación al Arroyo del lugar,Guadalajara España.* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- Hewitt, R. J., y Díaz, J. (2013). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales . Comparando dos aplicaciones de software ., (6), 1-8.
- IDEAM, y UDCA. (2015). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia.* Bogotá D.C., Colombia: Institutol de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 32.
- IGM. (2017). *Atlas Rural del Ecuador.* (Instituto Geográfico Militar, Ed.) (Primera Ed). Quito, 9-160.
- INEC. (2010). *VII CENSO de Población y VI de Vivienda una historia para ver y sentir,1-10 .*
- INEC. (2013). *Compendio Estadístico, 1-17.*
- INEC. (2016). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. ESPAC. 2016, 1-22.*
- INETER. (2005). Erosión hídrica. Mapas Amenazas, 1-20.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.,.* (A. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, M. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R.

- Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, y T. W. (eds.). Tignor, Eds.). In Press, 1-20.
- Jaramillo, J. (2015). Estudio Del Riesgo Por Erosión Hídrica Del Suelo Utilizando El Modelo U.S.L.E, Mediante Herramientas S.I.G, Aplicado En La Subcuenca Río Portoviejo, Provincia De Manabí, 143.
- Jorge, G., Terra, J., Sawchik, J., y Pérez, M. (2015). Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol Subéutrico y un Brunosol Éutrico en el Uruguay WEPP Soil Erosion Model Adjustment for an Abruptic Argiudoll and a Vertic Argiudoll in Uruguay, (6), 1-24.
- Kravchenko, R., y Guerrero, D. (2017). Comparative analysis of the eroded soils on the slopes of the Calderon region, Ecuador. *Bulletin of Science and Practice*, (3), 148–152.
- Laflen, J. M., Flanagan, D. C., y Engel, B. A. (2004). Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP .pdf. *Journal Of The American Water Resources Association*, 40, 289–297.
- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437–450.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., y Lepers, E. (2003). DYNAMICS OF LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE IN TROPICAL REGIONS. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241.
- López, T. D. M., Aide, M., y Scatena, F. (1998). The Effect of Land Use on Soil Erosion in the Guadiana Watershed in Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, 34(3), 298–307.
- Lozano, P., Armas, A., y Machado, V. (2016). Estrategias para la conservación del ecosistema páramo en Pulinguí San Pablo y Chorrera Mirador , Ecuador. *Enfoque UTE*, 0, 55–70.
- MAE. (2010). *Cuarto informe nacional para el convenio sobre la diversidad biológica*. Quito. 25-61.
- MAE. (2016). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2015-2030* (Ministerio). Quito, Ecuador, 105-270.
- MAE, y CONDESAN. (2011). Anexo 3. Leyenda Temática De Tipos De Uso Y Cobertura Del Suelo. Ficha De Control Y Registro De Cambios, 1–7.
- Maldonado, N. (2002). Clima y vegetación de la Región Sur del Ecuador. In Z. Aguirre, J. Madsen, E. Cotton, & H. Balslev (Eds.), *Botánica Austroecuadoriana: Estudios sobre los recursos vegetales en las provincias de El Oro, Loja y Zamora- Chinchipe*. (ABYA AYALA). Quito, Ecuador, 1-28.
- Manchego, C. E., Hildebrandt, P., Cueva, J., Espinosa, C., Stimm, B., & Gunter, S. (2017). Climate change versus deforestation : Implications for tree species distribution in the dry forests of southern Ecuador. *PLOS ONE*, 12, 1–19.

- McCool, D., Brown, L., Foster, G., Mutchler, C., & Meyer, L. (1987). Revised Slope Steepness Factor For The Universal Soil Loss Equation. *Transactions Of The Asae*, 30(5), 1387–1396.
- Mishra, V., Rai, P., & Mohan, K. (2014). Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing : A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, 64(1), 111–127.
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J., & Boll, J. (2013). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk By Land-cover Change in the Andes of Southern Ecuador. *Land Degradation & Development Development*, 26(6), 565–573.
- Ochoa, P. A., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J. I., Ruíz-sinoga, J. D., & Cerdà, A. (2016). Effects of climate , land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140, 31–42.
- Oñate, F. (2004). Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y proteccion de proyectos hidráulicos. *Revista Electrónica de La REDLACH*, 1(1), 27–32.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., & Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385–395.
- Palacios, W., & Jaramillo, N. (2016). Árboles amenazados del Chocó ecuatoriano. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 8, 51–60.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50.
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe : A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479–480, 189–200.
- Parveen, R., & Kumar, U. (2012). Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System*, 04(06), 588–596.
- Pimentel, D. (2006). Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119–137.
- Pinos, N. (2016). Prospective land use and vegetation cover on land management - Case canton Cuenca. *Estoa*, 5(9), 7–19.

- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R., & Balocchi, F. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*, 14-30.
- Pontius, R. (2000). Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8), 1011–1016.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268.
- Ramírez-Ortiz, F. A., Hincapié-Gómez, E., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009). Erodabilidad De Los Suelos De La Zona Central Cafetera Del Departamento De Caldas. *Cenicafé*, 60(1), 58–71.
- Ramos, A. (2016). “*Determinación de zonas susceptibles a erosión hídrica en los cantones de Macará y Celica de la provincia de Loja, utilizando sistemas de información geográfica y teledetección.*” (tesis pregrado). Universidad Nacional de Loja.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., & Porter, J. (1991). Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30–33.
- Ronald, J. (2015). *TerrSet Manual* (CLARKS LAB), 204-217.
- Roy, H. G., Fox, D. M., & Emsellem, K. (2014). Predicting Land Cover Change in a Mediterranean Catchment at Different Time Scales. In B. et al Murgante (Ed.), *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014. Lecture Notes in Computer Science* (ICCSA). Springer, 315-330.
- Schoorl, J., Claessens, L., Lopez, M., De Koning, G., & Veldkamp, A. (2006). Geomorphological analysis and scenario modelling in the Noboa-Pajan area, Manabi province, Ecuador. *Zeitschrift Für Geomorphologie Supplementband*, 145, 105–118.
- Segarra, P. (2014). *Sinergías entre degradación de la tierra y cambio climático en los paisajes agrarios del Ecuador: Proyecto Mecanismo Mundial Ecuador “Integrado financiamiento del cambio climático en estrategias de inversión de Manejo Sostenible de la Tierra.”* (MAE, CNULD, & ECOPAR, Eds.), 1-8.
- SENPLADES. (2014). Dictamen de prioridad proyecto “Gestión Integrada para la lucha contra la desertificación de la tierra y la adaptación al cambio climático”. DIZE-SZ6A, 169.
- Tamayo, M. (2016). *Determinación de zonas susceptibles a erosión hídrica en los cantones de Zapotillo y Pindal de la provincia de Loja, utilizando sistemas de información geográfica y teledetección.* (tesis pregrado). Universidad Nacional de Loja.

- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & de la Cruz, M. (2015). Deforestation and Forest Fragmentation in South Ecuador since the 1970s – Losing a Hotspot of Biodiversity. *PLOS ONE*, *10*(9), 1–18.
- Tochihuitl, A., Villarreal, L. A., Valverde, B., Gutiérrez, E. A., & Tlapa, M. T. (2016). Análisis de los cambios y la persistencia en los usos del suelo de 1958 a 2010 en el municipio de Cuautlancingo, Puebla, México. *Ambiente y Desarrollo*, *20*(39), 35–54.
- UICN. (2016). *Informe de la UICN para la República del Ecuador 2015 – 2016*.
- UNESCO, PNUMA, & FAO. (1980). *Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. (FAO, Ed.). Roma, Italia.
- Vega-carreño, & Febles, J. M. (2005). La investigación de suelos erosionados: Métodos e índices de diagnóstico, (8), 1-20.
- Vega, J. (2016). *Determinación de zonas susceptibles a erosión hídrica en los cantones de Catamyo y Gonzanamá de la provincia de Loja, utilizando sistemas de información geográfica (SIG) y Teledetección..* (tesis pregrado). Universidad Nacional de Loja.
- Vrieling, A., Sterk, G., & de Jong, S. M. (2010). Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of Hydrology*, *395*(3–4), 235–241.
- Winckell, A., Marocco, R., Winter, T., Huttel, C., Pourrut, P., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1997). *Los Paisajes Naturales del Ecuador. Volumen I- Las condiciones generales dei media natural. Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas* (Vol. Tomo IV), 1-186.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *PREDICTING RAINFALL EROSION LOSSES. A guide to conservation planning*. (Agriculture). United States Department of Agriculture, Washington DC, USA, 1-537.
- Yin, S., Xie, Y., Liu, B., & Nearing, M. A. (2015). Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(10), 4113–4126.
- Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed , Iran. *Land Use Policy*, *67*(June), 558–572.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., & Gao, P. (2013). Soil erosion, conservation , and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China, (9), 1-13.

Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319–325.

Zilio, J., Aimar, S., Kruger, H., & Frolla, F. (2018). Estabilidad de agregados del suelo. In A. Quiroga, R. Fernández, & C. Álvarez (Eds.), *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos* (1ra. ed. I). Anguil, La Pampa, 73-82.