



Modelación del cambio en la cobertura y uso del suelo al 2030 en las unidades hidrológicas del Distrito Metropolitano de Quito

Chiquin Baños, Mayra Gissela

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de

Magíster en Sistemas de Gestión Ambiental

Msc. Sinda González, Izar

29 de septiembre 2021



CC:1756491278

Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis Chiquín Baños.docx (D113702888)
Submitted: 9/28/2021 9:27:00 PM
Submitted By: jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Significance: 3 %

Sources included in the report:

Tesis_CarlosReyes.docx (D107562455)
Monografia, Vaca Salcedo Lissette.docx (D46139463)
TT_AYALA_HERRERA.docx (D61973369)
PINEDA_JIMENEZ_MARIUXI_ELIZABETH_TESIS_1.docx (D53813023)
TESIS_GUERRERO_ARIANA.docx (D50718547)
Llvisaca_Gustavo_31032020.pdf (D67112066)
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00907915/document>
https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del-Agua_2016-2030.pdf
[http://biblioteca.unach.edu.ec/opac_css/index.php?lvi=notice_display&id=13420Siddhartho,](http://biblioteca.unach.edu.ec/opac_css/index.php?lvi=notice_display&id=13420Siddhartho)

Instances where selected sources appear:

19

IZAR SINDE
GONZALEZ

Firmado digitalmente
por IZAR SINDE
GONZALEZ
Fecha: 2021.09.29
07:39:08 -05'00'



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Modelación del cambio en la cobertura y uso del suelo al 2030 en las unidades hidrológicas del Distrito Metropolitano de Quito”** fue realizado por la Sra. **Chiquin Baños, Mayra Gissela** el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de septiembre de 2021

Sinde González, Izar

Director

C.C.:1756491278



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo **Chiquin Baños, Mayra Gissela**, con cédula de ciudadanía n°1720829280, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Modelación del cambio en la cobertura y uso del suelo al 2030 en las unidades hidrológicas del Distrito Metropolitano de Quito** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de septiembre del 2021

Chiquin Baños Mayra Gissela

C.C.: 1720829280



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Chiquin Baños, Mayra Gissela**, con cédula de ciudadanía n°1720829280 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Modelación del cambio en la cobertura y uso del suelo al 2030 en las unidades hidrológicas del Distrito Metropolitano de Quito** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 29 de septiembre del 2021

Chiquin Baños Mayra Gissela

C.C: 1720829280

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado especialmente para mis queridos padres, Eduardo y Sarita, quienes, desde el cielo, me cuidan y guían. Son el motor de mi vida. Me dan fuerza, inspiración y deseo de seguir cumpliendo mis sueños y de ser la mujer responsable, honesta y trabajadora que ellos esperan de mí.

A mi amado esposo Danilo, quien ha demostrado ser mi apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida. Le agradezco por estar a mi lado en los momentos más difíciles y por regalarme siempre su amor, dedicación y respeto.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiarme al camino correcto y permitirme culminar una más de mis aspiraciones y seguir creciendo profesionalmente.

Al Fondo para la Protección del Agua FONAG, por brindarme la oportunidad de trabajar en esta hermosa misión que es cuidar y proteger las fuentes de vida que se traducen en agua. Soy muy afortunada de formar parte de esta increíble institución.

Al Msc. Izar Sinde, porque gracias a su apoyo y guía por medio de su experiencia en el desarrollo del proyecto de titulación, me fue posible culminarlo.

Índice de contenidos

Aspectos generales	15
Introducción	15
Planteamiento del problema.....	16
Justificación e importancia	17
Descripción del área de estudio	20
Objetivos.....	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos.....	22
Hipótesis	22
Marco teórico.....	23
Marco legal	23
Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible	23
Agenda urbana de la ONU.....	23
Constitución de la República del Ecuador.....	24
Código orgánico ambiental	24
Marco epistemológico	25
Marco Conceptual.....	26
Cuenca Hidrográfica	26
Funciones de la cuenca.....	26
Degradación de las cuencas hidrográficas.....	28
El páramo y sus servicios ambientales hídricos.....	29
Nivel de intervención en el área de estudio.....	33
Cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS)	36
Modelos de simulación	37
Redes neuronales artificiales (RNA)	39
Autómatas celulares	40
Modelación con Dinámica EGO	42
Metodología	44
Selección y generación de información cartográfica.....	45
Selección de variables.....	46

Construcción del modelo en Dinámica EGO	49
Cálculo de las matrices de transición (paso 1)	50
Cálculo de rangos para categorizar variables continuas (paso 2).....	51
Modelo para el cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia (paso 3)	53
Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables (paso 4)	55
Construcción y ejecución del modelo de simulación (paso 5).....	56
Validación del modelo mediante una función exponencial de decaimiento (paso 6).....	59
Validación del modelo usando ventanas múltiples y función de decaimiento constante (paso 7).....	60
Ejecución de modelo y proyección (pasos 8, 9 y 10).....	61
Resultados y discusión.....	63
Tasas y transiciones de cambio	63
Variables explicativas espaciales de mayor relevancia	67
Transición de páramo a mosaico agropecuario	68
Transición de bosque nativo a mosaico agropecuario	70
Transición de mosaico agropecuario a zona urbana/infraestructura	74
Correlación entre variables	76
Simulación y validación del modelo.....	77
Proyección al año 2030.....	80
Afectaciones del cambio de uso de suelo en la disponibilidad de agua	84
Conclusiones.....	91
Recomendaciones.....	93
Lista de referencias	95

Índice de tablas

Tabla 1 Superficie en hectáreas (ha) de los ecosistemas y su nivel de intervención	35
Tabla 2 Clasificación de cobertura y uso de suelo en los Niveles I & II del Ministerio de Ambiente del Ecuador	45
Tabla 3 Reclasificación de mapas de cobertura y uso de la Tierra	46
Tabla 4 Variables usadas en el modelo	47
Tabla 5 Variables usadas en el modelo	63
Tabla 6 Matriz de transición simple 2008 -2016.....	63
Tabla 7 Matriz de transición múltiple 2008 -2016.....	64
Tabla 8 Porcentaje de cambio por transición.....	64
Tabla 9 Número de celdas de cambio por transición (2008-2016	65
Tabla 10 Estadístico de Cramer entre variables	76
Tabla 11 Porcentajes de error del mapa simulado de cobertura y uso de suelo del 2016 80	
Tabla 12 Análisis multitemporal de cobertura y uso de suelo (2008, 2016 y 2030	80
Tabla 13 Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo (2016-2030)	81
Tabla 14 Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo (2016-2030) por unidad hidrográfica	83
Tabla 15 Promedio multianual mensual de caudal simulado por HydroBID en las subcuencas del área de influencia EPMAPS-FONAG	84
Tabla 16 Resumen de Proyecciones de Población (habitantes) del DMQ	87
Tabla 17 Resultados de análisis de efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica.....	88
Tabla 18 Cálculo de la pérdida de caudal proyectado al 2030.....	90

Índice de figuras

Figura 1 Área de estudio	21
Figura 2 Curvas de retención de agua para los suelos comunes y para el andosol inalterado	32
Figura 3 Mapa de niveles de intervención sobre 3400 msnm del área de estudio	34
Figura 4 Espacio de un AC.....	41
Figura 5 Vecindad de un autómata celular	41
Figura 6 Diagrama metodológico.....	44
Figura 7 Variables seleccionadas para el análisis de CCUS.....	49
Figura 8 Diez pasos del modelo de simulación en Dinámica EGO	50
Figura 9 Modelo de cálculo de matrices de transición	51
Figura 10 Modelo de cálculo de los rangos de los pesos de evidencia.....	52
Figura 11 Función Determine Weights Of Evidence Ranges y parámetros para categorizar variables continuas	53
Figura 12 Modelo de cálculo de los coeficientes de los pesos de evidencia	54
Figura 12 Weights of evidence editor para la modificación de rangos y coeficientes	55
Figura 13 Modelo para el análisis de la correlación espacial de variables	56
Figura 14 Modelo de simulación.....	57
Figura 15 Definición de parámetros para la simulación	58
Figura 16 Comparación visual del mapa simulado con el observado.....	59
Figura 17 Modelo de validación mediante la función exponencial de decaimiento.....	60
Figura 18 Modelo de validación usando ventanas múltiples y función de decaimiento constante.....	61
Figura 19 Cobertura y uso de suelo 2008.....	66
Figura 20 Cobertura y uso de suelo 2016.....	66
Figura 21 Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de páramo a mosaico agropecuario	68
Figura 22 Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de bosque nativo a mosaico agropecuario	71
Figura 23 Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de mosaico agropecuario MA a zona urbana ZU	74
Figura 24 Mapa de similitud aplicando la función exponencial de decaimiento.....	78
Figura 25 Gráfico de validación con ventana múltiples del mapa simulado 2016.....	79
Figura 25 Dinámica de la variación de superficies (%) para los años 2008,2016 y 2030	81

Figura 26 Mapa de cobertura y uso de suelo 2030	82
Figura 27 Volumen de agua (l/s) otorgados por SENAGUA.....	85
Figura 28 Volumen de agua (l/s) por uso otorgados por SENAGUA.....	86
Cambio área de páramo ha (2016-2030).....	90

Resumen

Las dinámicas de cambio del uso de suelo son complejas y ocasionan transformaciones en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, especialmente del páramo, que es el principal ecosistema proveedor de agua del Distrito Metropolitano de Quito. Como solución a este problema, se plantea el modelamiento de cambio de uso de suelo al año 2030 en las unidades hidrográficas aportantes, que permite conocer los posibles escenarios de cambio que ayuden a establecer directrices para la toma de decisiones y una adecuada planificación territorial. Para esto, el estudio consideró los autómatas celulares como herramienta dinámica para la predicción de escenarios futuros de la mancha urbana y uso de suelo mediante el software DINÁMICA EGO y su modelo Land Use Cover Change. A fin de conocer los principales factores de cambio, se analizaron 12 variables (6 categóricas y 6 cuantitativas) con las que se realizó el proceso de calibración y simulación del modelo para el periodo 2008 -2016, el cual alcanzó una similitud con la realidad del 58% para la ventana de interés de una celda (1 ha) y 91% para una ventana de once celdas (11 ha). Además, del análisis multitemporal se identificó que para el año 2030, las zonas urbanas tendrían un crecimiento de 42,91% lo que genera una reducción del mosaico agropecuario en un 23,12%. Las zonas de páramo también se verían afectadas con una reducción del 1,14%, siendo Pita, San Pedro y Nororiente de Quito las unidades hidrográficas que presentan más pérdida de área con cambio a mosaico agropecuario. Finalmente, con base en estudios similares, se realizó un análisis de los posibles impactos en torno a la problemática de cantidad de agua que se puede ver afectada por la pérdida de vegetación natural en un ecosistema sensible como el páramo.

PALABRAS CLAVES:

- **DINÁMICA EGO**
- **CAMBIO DE USO DE SUELO**
- **CUENCA HIDROGRÁFICA**

Abstract

The dynamics of land use change are complex and cause unexpected transformations in the structure and functionality of ecosystems, especially in the paramo, which is the main water supply ecosystem for the Metropolitan District of Quito. As a solution to this problem, the modeling of land use change by 2030 in the contributing hydrographic units is proposed, which allows knowing the possible change scenarios that help to establish guidelines for decision-making and adequate territorial planning. For this, the study considered cellular automata as a dynamic tool for predicting future scenarios of urban sprawl and land use using the DYNAMIC EGO software and its Land Use Cover Change model. In order to know which are the main factors of change, 12 variables were analyzed (6 categorical and 6 quantitative) with which the process of calibration and simulation of the model was carried out for the period 2008 -2016, which reached a similarity with the reality of 58% for the window of interest of one cell (1 ha) and 91% for a window of eleven cells (11 ha). In addition, the multitemporal analysis identified that by 2030, urban areas would have a growth of 42.91%, which generates a reduction of the agricultural mosaic by 23.12%. The paramo areas would also be affected with a reduction of 1.14%, with Pita, San Pedro and Nororiente de Quito being the hydrographic units that show the most loss of area with a change to agricultural mosaic. Finally, based on similar studies, an analysis was carried out of the possible impacts around the problem of the amount of water that can be affected by the loss of natural vegetation in a sensitive ecosystem such as the paramo.

KEYWORDS:

- **EGO DINAMIC**
- **SOIL LAND CHANCE**
- **WATERSHED**

CAPÍTULO I

1. Aspectos generales

1.1 Introducción

En el Ecuador, el 85% de las fuentes de agua que se usan como agua potable, sistemas de energía hidroeléctrica y para irrigación agrícola, se originan en el páramo (Orozco, 2009).

Los ecosistemas altoandinos como el bosque de ceja andina (2800 – 3500 msnm) y el páramo (3500 – 4000 msnm) (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2006), tienen una larga historia de uso. La actual configuración del paisaje refleja estrategias de respuesta a los procesos históricos que han modificado el acceso a la tierra productiva en la región interandina (Peralvo, Postigo, & Lopez, 2012).

En general, las dinámicas del cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) en los páramos y bosques andinos muestran externalidades similares a las observadas en otros biomas. Por un lado, el uso de la tierra genera varios beneficios fundamentales para la población de la región, desde la producción de alimentos para las poblaciones rurales y urbanas, hasta la generación de bienes y servicios ecosistémicos, de los cuales dependen los pobladores locales y habitantes de grandes ciudades. Por otro lado, las actividades antrópicas generan externalidades negativas a través de la conversión y degradación de ecosistemas, causando pérdida de biodiversidad y comprometiendo la capacidad de los mismos de mantener los flujos de beneficios ecosistémicos en el largo plazo (Peralvo, Bastidas, 2014).

Esta realidad crea grandes presiones sobre los remanentes de ecosistemas nativos. Por ejemplo, la tasa de deforestación en Ecuador es de aproximadamente 1700

ha/año en bosques y de 200 ha/año en páramos (Ercole et al., 2015). Estas amenazas antrópicas se ven agravadas a mediano o largo plazo por el cambio climático.

El presente trabajo de tesis constituye la generación de escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) con base en autómatas celulares en las unidades hídricas aportantes de agua para el DMQ al año 2030. El estudio consideró los autómatas celulares como herramienta dinámica para la predicción de escenarios futuros de la mancha urbana y uso de suelo mediante el software DINÁMICA EGO y su modelo Land Use Cover Change. Además, se realiza un análisis de los posibles impactos que generarían estos cambios en torno a la problemática de la calidad y cantidad de agua en un ecosistema sensible como son los páramos que proveen de agua a la ciudad de Quito.

1.2 Planteamiento del problema

Para lograr satisfacer las necesidades de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) y de ciertas parroquias rurales, la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS) ha venido construyendo sistemas de abastecimiento a través de trasvases desde las cuencas altas orientales (sistemas Papallacta – Bellavista y La Mica) y de las cuencas altas occidentales (sistemas Atacazo – LLoa – El Placer y otros), que forman parte del sistema Pita-Puengasí y constituyen la red principal de agua potable para el DMQ.

Las cuencas abastecedoras de agua para Quito están ubicadas mayoritariamente en zonas de páramo sobre los 3400 msnm. Debido a las circunstancias climáticas especiales, los suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, así como su topografía formada por la acción de los glaciales, la hidrología superficial del páramo tiene características extraordinarias (Buytaert et al., 2006). Sin embargo, esta función podría verse afectada por el gran

crecimiento poblacional junto con la desordenada expansión del suelo urbano y expansión de la frontera agrícola.

El control del uso de suelo dentro de las cuencas hidrográficas que abastecen las reservas de agua del DMQ ha sido insuficiente y, por lo mismo, ha facilitado el desarrollo de actividades como pastoreo intensivo de ganado en áreas de aporte hídrico; la deforestación y fragmentación de hábitats; la ampliación de la frontera agrícola y prácticas agrícolas inadecuadas como agricultura en pendientes, en zonas de protección natural y en páramos; los incendios forestales en pajonales, bosque nativos y plantaciones; la sobreexplotación de diferentes productos provenientes del bosque y la pesca con instrumentos no convencionales que contaminan las fuentes y redes hidrológicas y que ponen en riesgo el futuro abastecimiento de agua en el DMQ (Minas, 2006).

Adicionalmente, tanto la EPMAPS como el Fondo para la protección del Agua de Quito (FONAG) no cuentan con información reciente validada que permita conocer las dinámicas, el cambio de la cobertura vegetal de los páramos y su uso de suelo, ni la forma en que estos cambios podrían afectar la cantidad y calidad de agua destinada para consumo humano en el DMQ, a fin de aportar a la toma de decisiones como plantear zonas críticas de intervención con procesos de restauración, planificación, trabajo comunitario, declaración de áreas protegidas, entre otras estrategias de prevención.

1.3 Justificación e importancia

En el ámbito de la conservación de los recursos naturales, se considera al suelo como un componente básico de los ecosistemas terrestres. De esta manera, el uso del suelo y el cambio en su cobertura van a seguir siendo factores determinantes del cambio del paisaje, de la composición y de su estado de degradación. Desde esta

perspectiva, algunos autores destacan que los cambios en el uso del suelo y la cobertura, principalmente debido a acciones antrópicas en una cuenca, tienen un efecto sobre las variables inherentes al balance hídrico, como la tasa de infiltración del suelo, la evapotranspiración, la escorrentía superficial y el agua (Arzac, Chacón-Moreno, Llambí, & Dulhoste, 2011).

Quito es una ciudad rodeada de montañas con diversidad de ecosistemas, uno de los más extensos en la zona. A su vez, uno de los más frágiles es el páramo, el cual es un ecosistema fundamental para el almacenamiento de carbono atmosférico, un corredor biológico para diversas especies de flora y fauna, así como zonas de alta riqueza cultural y étnica; pero de todos los servicios ambientales que brinda este ecosistema, uno de los más importantes es el de captación y regulación hídrica.

En el DMQ, los ecosistemas nativos ocupan el 60% del territorio, comprenden 256.408 hectáreas (has) y están distribuidos en un rango altitudinal de entre 500 y 4950 msnm. Según el último mapa de cobertura vegetal/uso de suelo del DMQ (Secretaría de Seguridad, 2015), los herbazales húmedos (páramos) representaban en el 2011 el 10,80% de territorio y el 2015 el 10,59 %, con una superficie de 44.890 has. Mientras que los cultivos y pastos en el 2011 ocupaban el 20,64% y el 18,95% en el 2015. Esto indica que, en las últimas décadas, existen notables cambios en la cobertura y uso de suelo, generado principalmente por un crecimiento urbano acelerado.

Los ciudadanos quiteños dependen en un 80% del agua que viene de los páramos, mismos que se ven amenazados por varios factores antrópicos. Con la finalidad de mitigar estos efectos y desarrollar proyectos enfocados a la gestión adecuada de las cuencas en el año 2000, nace el Fondo para la Protección del Agua para Quito (FONAG). Esta institución tiene un ámbito de trabajo de 684.762,7 has. Sin embargo, con la finalidad de conservar y proteger fuentes de agua, se enfoca en zonas que se encuentran sobre la cota de los 3400 msnm, y en corresponsabilidad con la

EPMAPS, gestiona cerca de 350.000 mil hectáreas correspondientes a zonas de páramos y bosques, humedales y áreas que actualmente se usan para actividades agropecuarias y turismo, las cuales son cruciales para el mantenimiento a largo plazo de la provisión de agua para la capital. El FONAG trabaja combinando mecanismos financieros con estructuras de gestión que buscan involucrar a todos los actores relacionados con el agua de una cuenca (FONAG, 2017).

Para el FONAG y la EPMAPS es importante contar con información validada y herramientas técnicas, como, por ejemplo, proyecciones de la expansión urbana de la ciudad, que permitan la toma de decisiones y la aplicación de medidas que propicien la recuperación o mejor manejo de las áreas de recarga hídrica y fuentes de agua para Quito.

En las últimas décadas, se ha reconocido la necesidad de entender los factores que se asocian a los procesos de Cambio de Cubierta y Uso del Suelo (CCUS), con un especial énfasis en la pérdida de cobertura vegetal nativa, debido a las implicaciones ambientales como el calentamiento global, la pérdida de biodiversidad, la degradación de suelos, el bienestar humano y los cambios en la hidrología de cuencas (Osorio, Guerra, & Maass, 2015). Las investigaciones se han concentrado en mejorar los sistemas de monitoreo de estos cambios, estudiar los procesos de cambio y desarrollar modelos para explorar escenarios futuros. Los procesos de CCUS no solo involucran aspectos biofísicos (condiciones ambientales que propician un cambio de uso), también incluyen aspectos socioeconómicos.

Los modelos de cambio de uso del suelo son herramientas de apoyo para desentrañar el complejo conjunto de factores socioeconómicos y biofísicos, las fuerzas que influyen en la velocidad y el patrón espacial de uso de la tierra y cambio para la estimación de los impactos de cambios en el uso del suelo (Verburg & Veldkamp, 2008).

El modelamiento de cambio en la cobertura/uso de suelo (CCUS) ha ido ganando terreno en las últimas décadas, con lo cual han surgido diversas herramientas de modelamiento espacial que han facilitado procesos y han apoyado el análisis de los cambios multitemporales, así como la generación de escenarios futuros de cambio (Espinoza, 2017). Una de las herramientas que facilita estos procesos es Dinámica EGO, un software gratuito desarrollado en Brasil, que cuenta con amplias ventajas en la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición, así como en la simulación de escenarios a futuro para monitorear las trayectorias de los cambios.

El desarrollo de esta investigación contribuye como herramienta de apoyo para la planificación en la gestión de las cuencas fuentes de agua del DMQ que se lleva a cabo por parte del Fondo para la Protección del Agua (FONAG).

1.4 Descripción del área de estudio

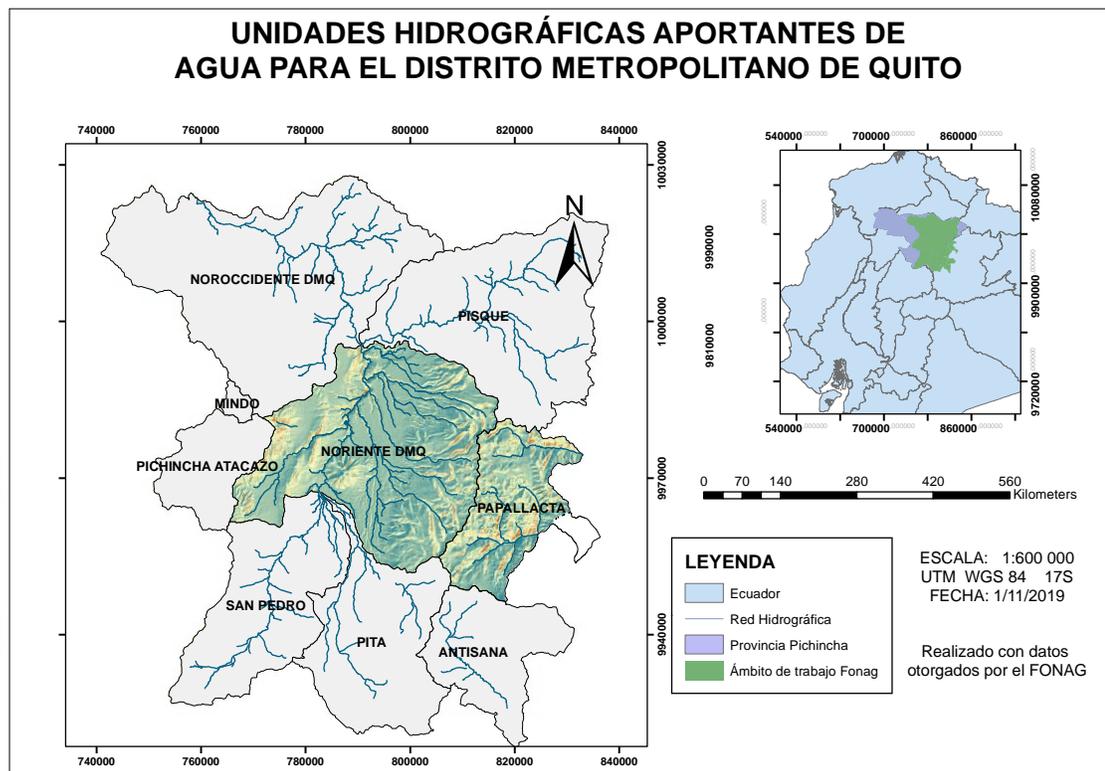
El área de estudio incluye nueve unidades hidrográficas que corresponden al ámbito de trabajo del FONAG (como se muestra en la figura 1), localizadas en las provincias de Pichincha y Napo, específicamente, en la cuenca alta del río Guayllabamba, y son abastecedoras de agua para el Distrito Metropolitano de Quito DMQ.

La zona de estudio ubicada en la sierra y oriente ecuatoriano, altitudinalmente se encuentra desde los 500 m en el noroccidente, hasta aproximadamente los 4.100 m en la cordillera oriental y 4.800 m de altitud en la cordillera occidental desplegándose sobre un contexto geográfico muy irregular con variedad de ecosistemas y pisos climáticos, que genera una gran diversidad de flora, fauna y recursos naturales. Tiene una extensión de 6.884 Km², donde se localiza más del 50% del Distrito Metropolitano de Quito DMQ, que corresponde al centro poblado de mayor tamaño y densidad en el área de estudio.

Políticamente, el DMQ está dividido en 32 parroquias urbanas, donde predomina la economía basada en el comercio, industria y servicios; y 33 parroquias rurales, donde destacan la agricultura, agroindustria y ganadería. Las parroquias del DMQ están agrupadas en 8 administraciones zonales con una circunscripción territorial de 4.235,2 km² y con una población de 2.735.987 habitantes, que representa el 16,07% de la población nacional y la convierte en la ciudad más densamente poblada del país (Minas, 2006).

Figura 1

Área de estudio



1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Generar un escenario tendencial de la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo para el año 2030 aplicando el software de modelación ambiental DINAMICA EGO en las unidades hidrográficas aportantes de agua para el Distrito Metropolitano de Quito.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar los patrones espaciales de usos y coberturas de suelo en el periodo 2008-2016 de la zona de estudio mediante el cálculo de matrices y tasas de transición.
- Determinar la influencia de las variables categóricas y estáticas en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición en el área de estudio mediante el método geoestadístico de pesos de evidencia en la calibración del modelo Land Use Cover Change.
- Validar la simulación del modelo mediante la comparación de similitud de patrones espaciales al año 2016.
- Estimar posibles afectaciones en los ecosistemas de páramo mediante la proyección de la dinámica y los patrones espaciales de cambio de cobertura y uso de suelo al futuro hasta el año 2030.

1.6 Hipótesis

H0: Los procesos de restauración vegetal y acuerdos de conservación con comunidades que realiza el FONAG afectan de forma significativa al modelo de predicción de CCUS al 2030.

H1: Los procesos de restauración vegetal y acuerdos de conservación con comunidades que realiza el FONAG no afectan de forma significativa al modelo de predicción de CCUS al 2030.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Marco legal

El presente estudio toma como referencia el marco legal que rige en cuanto al crecimiento urbano, preservación de los recursos naturales y el derecho al acceso al agua.

2.1.1 *Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible*

La Asamblea de las Naciones Unidas, conformada por 194 países y aprobada en septiembre del 2015, está compuesta por 17 objetivos que buscan resolver problemas económicos y ambientales que actualmente son evidentes a nivel mundial. Esta agenda pretende lograr que las ciudades y los asentamientos sean seguros y sostenibles evitando los problemas que existen como la presión sobre la tierra, los recursos, escasez de vivienda y falta de acceso a los servicios básicos (ONU, 2019).

2.1.2 *Agenda urbana de la ONU*

La Nueva Agenda Urbana se aprobó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III) celebrada en Quito, Ecuador, el 20 de octubre de 2016.

El objetivo principal de esta agenda es reforzar el compromiso mundial de la urbanización sostenible y centrarse en la implementación de una nueva agenda urbana, con el fin de mantener ciudades inclusivas y urbanizaciones sostenibles y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible mundiales (Rodríguez & Sugranyes, 2017).

En el Ecuador las principales leyes y normas que hacen referencia a la protección, conservación de los recursos naturales y regula el ambiente geográfico en todo el territorio, se detallan a continuación:

2.1.3 Constitución de la República del Ecuador

La Constitución Del Ecuador (2008), en su Sección segunda, Ambiente sano art. 14, indica: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*”. Por lo tanto, el Estado debe garantizar la sostenibilidad de tal manera que los derechos de los ecuatorianos no se vean afectados por actividades y procesos que generen impactos ambientales adversos, como la pérdida de vegetación natural por expresión agrícola y urbana. En el art. 276 se declara que uno de los objetivos del régimen de desarrollo será recuperar y conservar la naturaleza, así como mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural.

Es decir, que es de interés público garantizar la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico, para lo cual regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, así como el equilibrio de los ecosistemas, en especial, en las fuentes y zonas de recarga de agua.

2.1.4 Código orgánico ambiental

Actualmente, es la norma ambiental más importante del país, ya que tiene por objeto regular temas como cambio climático, áreas protegidas, vida silvestre, patrimonio forestal, calidad ambiental, residuos, incentivos ambientales, zona marino-costera, manglares, acceso a recursos genéticos, bioseguridad, biocomercio, etc. Dentro de este código, el art 1 indica “que se regularán los derechos, deberes y garantías ambientales contenidos en la Constitución, así como los instrumentos que fortalecen su ejercicio, los que deberán asegurar la sostenibilidad, conservación, protección y restauración del

ambiente, sin perjuicio de lo que establezcan otras leyes sobre la materia que garanticen los mismos fines” (MAE, 2018).

2.2 Marco epistemológico

Existen diversas investigaciones que han utilizado Dinámica EGO con la finalidad de proveer análisis históricos de los CCUS y generar escenarios futuros de deforestación y degradación, principalmente de bosques a diferentes niveles.

En este contexto, Padilla, Pérez, Cruz, Huilcamaigua, & Astudillo (2015) escribieron el artículo “Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal” con el objetivo de realizar el modelamiento espacial de la cobertura vegetal y uso del suelo en el sector comprendido entre la compañía agrícola Payamino y la población Callanayacu, ubicadas en la provincia de Orellana, con lo cual generaron dos escenarios prospectivos: el primero, que para el año 2011, el 91,39% del bosque primario habría desaparecido; y el segundo, que para el año 2020 desaparecería el 95,49%, quedando únicamente el 4,51% de la totalidad del área de bosques primarios, con tendencia a desaparecer por completo de continuar con las mismas condiciones actuales.

De igual forma, Espinoza (2016), en su investigación “Identificación de ecosistemas de bosque amenazados en el Distrito de Padre Abad, utilizando modelos espaciales para el periodo 2001-2016 y simulaciones para el año 2030” buscó identificar el ecosistema más amenazado por la deforestación utilizando Dinámica EGO. Obtuvo matrices de transición anuales (2001 – 2016), incluyendo también variables ecológicas y/o sociales: distancia a centros poblados, vías, ríos, ANP, tipo de suelos, erosión, DEM. Determinó que la inclusión de estas variables en el modelo es necesaria para identificar cuál de ellas influye más sobre los cambios.

Por otro lado, Osorio, Guerra, & Maass (2015) en su estudio “Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero” analizaron los cambios de cubierta y uso del suelo durante los periodos 1986-2000 y 2000-2011 con base en la interpretación de imágenes de satélite. Determinaron que en el periodo 1986-2000 se presentó una pérdida del 16% de la cubierta vegetal y en el periodo 2000-2011 se observó una pérdida del 22%. Además, concluyó que el incremento de los pastizales inducidos fue la principal causa de la pérdida de las cubiertas forestales y que a altitud, la distancia a carreteras, la distancia a localidades y la pendiente del terreno fueron indicadores importantes para explicar la deforestación en los tres tipos de bosque y los dos periodos analizados.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se considera como una unidad espacial que funciona como un sistema complejo, dinámico y abierto. En este espacio geográfico se ubican los recursos naturales (suelo, agua y vegetación) y el ser humano que en ella realiza todas sus actividades sociales y económicas (Feoli Boraschi, 2009). Por tanto, el enfoque de cuenca nos da la posibilidad de comprender y evaluar aquellos factores que tienen la capacidad de transformar el uso de suelo y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua y otros recursos (Cotler H., A. Priego, & C. Rodríguez, 2004), razón por la que se considera que “las cuencas hídricas constituyen un marco adecuado para el análisis de los procesos ambientales generados como resultado de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos suelo, agua y vegetación.

2.3.2. Funciones de la cuenca

Las cuencas hidrográficas brindan numerosos servicios a la sociedad, la vida y los medios de subsistencia de gran parte de la población rural y urbana que dependen

directamente de los recursos naturales de las cuencas. El abastecimiento mundial de agua dulce para usos en el hogar, agrícola e industrial dependen de los caudales que se producen y se regulan en las cuencas. Gracias a su forma cóncava, captan más de los 110 000 km³ de lluvia que caen a la tierra anualmente y almacenan la mayor parte de las reservas de agua dulce renovable en las aguas subterráneas y la humedad del suelo (FAO, 2014).

Las vegetaciones naturales —como árboles, arbustos y hierbas— protegen el suelo del impacto de la lluvia y proporcionan más sedimentos orgánicos y fértiles al suelo. Además, la acción física y química de la vegetación presente en las vertientes garantiza la absorción, filtración y liberación, con lo que se regula la fuerza y rapidez del caudal de la escorrentía y, de esta forma, se previenen las inundaciones y la sequía en las zonas cercanas de río abajo. Cuando el agua recorre el suelo rocoso o se almacena en depósitos subterráneos, se mejoran las propiedades químicas del agua, ya que se enriquece con las sales minerales, esenciales para todos los seres vivos. La escorrentía superficial lleva aguas abajo minerales y sedimentos orgánicos que fertilizan las tierras bajas (Aguirre, 2007).

Desde hace cientos de años, la sociedad aprendió a controlar y usar las corrientes de agua de la cuenca para alimentar los sistemas de irrigación, los sistemas de captación para consumo humano y, actualmente, incluso se usa para generar energía eléctrica, convirtiéndose así en una fuente importante de energía limpia. Los bosques de las cuencas son una fuente importante de madera y leña, además de tener un gran valor recreativo y paisajístico natural y cultural (Cotler et al., 2004).

2.3.3. Degradación de las cuencas hidrográficas

La forma y la velocidad con la que se aprovechan los recursos dentro de la cuenca no siempre es la adecuada. Es por ello que los recursos disminuyen pasando a un proceso de degradación dentro de la misma (Oriosto, 2017).

En el Ecuador se evidencia claramente el deterioro múltiple y acelerado de los recursos naturales —entre ellos, la vegetación, el suelo y el agua—, debido a actividades antrópicas como la deforestación o el cambio de uso de suelo, sin considerar en ningún momento su aptitud. El desarrollo de sistemas productivos agropecuarios no sostenibles ni adecuados a las condiciones locales producen degradación en los recursos agua y suelo (Aguirre, 2007) y acarrea entre otras las siguientes consecuencias:

- Pérdida de la diversidad biológica por la acelerada reducción de las superficies forestales del país.
- Aproximadamente, el 70 % del territorio nacional presenta diferentes grados de erosión y alteraciones hidrológicas, como crecidas e inundaciones, secamiento de manantiales y abatimiento de acuíferos durante la temporada seca y hasta cambios climatológicos.
- Degradación de la calidad del agua por diversos tipos de contaminación (urbana, industrial, agrícola).
- Erosión del suelo: alrededor del 48% del territorio nacional tiene erosión severa o está totalmente erosionado. Cabe indicar que esta tendencia es creciente.
- Pérdida paulatina del potencial productivo agropecuario y forestal de la tierra.

A nivel nacional y, en general, en Latinoamérica, el manejo de cuencas ha estado dirigido a enfrentar los problemas de suministro de agua para diferentes actividades como la generación de energía eléctrica, la alimentación de acueductos y el

riego de cultivos de exportación; pero de forma frecuente, se le ha dado poca importancia al manejo integrado de cuencas debido a la diversidad de condiciones ambientales, aspectos que han implicado la realización de una multiplicidad de estudios con enfoques individualizados para cada cuenca. Así, hay cuencas en las que la demanda de agua excede la capacidad de oferta, mientras que hay otras que cuentan con un franco exceso de agua (inundaciones) y otras son afectadas por intensos procesos erosivos (Aguirre, 2007).

Dentro de este panorama, en el país no se ha emprendido una gestión integrada de las cuencas. Como máximo, se ha llegado a una deficiente administración de los recursos hídricos y, en algunos casos, al desarrollo de proyectos con fines de planificación del uso del suelo y conservación de las fuentes de captación del recurso hídrico, proyectos —en muchos casos— con enfoques sectoriales, especialmente en proyectos relacionados a los aprovechamientos hidráulicos.

2.3.4. *El páramo y sus servicios ambientales hídricos*

El páramo se caracteriza por presentar un clima de alta montaña, donde la temperatura y radiación solar son casi constantes a lo largo del año, pero que, al mismo tiempo, es común que la temperatura durante el día tenga variaciones de más de 20°C. Esto depende principalmente de dos aspectos: el gradiente altitudinal y la humedad del aire que son determinados por el clima local (Crespo et al., 2009).

La precipitación es altamente variable, va desde 700 mm hasta los 3.000 mm y con algunas excepciones en áreas limitadas, donde llueve sobre los 6.000 mm al año (Rangel, 2000). Las variaciones en la dirección y la velocidad del viento controladas por las pendientes pronunciadas y la topografía accidentada e irregular son determinantes en la variabilidad de lluvia en escalas espaciales pequeñas. A una escala más grande, el patrón de precipitación está influenciado por las cuencas del Pacífico y del Amazonas.

Los suelos más comunes en el páramo son los andisoles, entisoles, inceptisoles e histosoles, según la clasificación de la Soil Taxonomy, y en su mayoría, son suelos de origen volcánico (Hammen, Thomas van der. Cleef, 2008). Dependiendo de la ubicación en el paisaje, el grosor del suelo va desde unos pocos centímetros hasta varios metros, pero a pesar de la geología y topografía complejas, los suelos del páramo son bastante homogéneos. Dos factores principales determinan el tipo de suelo y sus propiedades: a) el clima y b) la existencia de una capa homogénea de cenizas de erupciones volcánicas del cuaternario (Sauer, 1957).

El clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de la materia orgánica en el suelo que, además, es reforzada por la formación de complejos organometálicos fuertemente resistentes a la destrucción microbiana (Winckell, Zebrowski, & Delaune, 1997). En cuanto a su ciclo hidrológico, el páramo es bien conocido por su gran excedente de agua y su flujo base sostenido, con lo cual alimenta a los ríos que descienden a las regiones costeras y a la cuenca del Amazonas. La producción de agua, la extrema capacidad de regulación de agua por parte del páramo y su capacidad de retención son importantes servicios ambientales de este ecosistema que se describen a continuación.

- **Producción de agua**

La producción de agua promedio del páramo colombiano se estima en aproximadamente 1.400 mm, lo que equivale a $66.5 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$ (Hincapié, Castillo, & Argüello, 2002). En Ecuador no se conocen estimaciones globales y, además, son escasos los estudios de caso. Buytaert et al. (2006) analizaron series de escorrentía de pequeñas cuencas de páramo del sur del Ecuador. Su producción de agua está entre 600 y $1.000 \text{ mm año}^{-1}$, lo que representa aproximadamente $2/3$ de la lluvia anual.

La precipitación elevada y uniforme a lo largo del año son características clave que permiten la alta producción de agua en el páramo. Sin embargo, los eventos de

lluvia típicamente de una frecuencia alta y de intensidad baja, combinado con fuertes vientos y la topografía muy accidentada, resulta en una alta variabilidad espacial y en grandes errores en el registro de la precipitación (Buytaert et al., 2006). Adicionalmente, la precipitación debido a la niebla, al rocío y a la intercepción por la vegetación, puede agregar una cantidad desconocida de agua al sistema hidrológico, sobre todo, donde hay la presencia de parches arbustivos de especies como *Polylepis* sp. (Muñoz Guerrero & Gómez Zotano, 2017).

El bajo consumo de agua natural es una segunda razón para la sostenida producción de agua del páramo. Esto debido a que la vegetación herbácea se caracteriza por especies xerofíticas que tienen baja evaporación. Sin embargo, los esfuerzos por cuantificar la evapotranspiración actual de las hierbas del páramo son escasos. Rangos de valores encontrados en la literatura van de 0.8 mm día⁻¹ a aproximadamente 1.5 mm día⁻¹ (Hofstede, 2014), pero estos valores son propensos a la incertidumbre.

Entonces, de acuerdo con lo mencionado, se puede concluir que la vegetación natural del páramo (especies herbáceas y arbustivas) juega un papel importante en el ciclo del agua. Este rol se extiende más allá del consumo de agua, en virtud de que las observaciones sugieren que la intercepción y la regulación del microclima también pueden ser importantes. La severa falta de datos sobre las características hidrológicas de la vegetación del páramo es, por consiguiente, un tema importante de investigación futura.

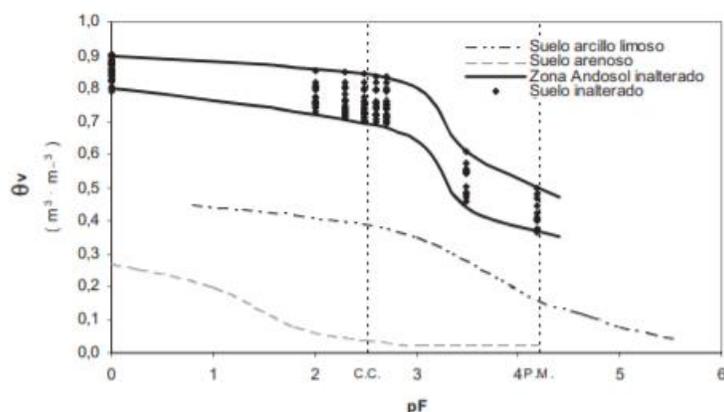
- **Retención de agua**

La retención de agua extremadamente alta (80-90% en saturación) de los suelos de páramo es atribuida, principalmente, a la baja densidad aparente y estructura abierta y porosa (Crespo et al., 2009). Esto se puede entender mejor cuando se comparan las curvas de retención de humedad de los Andosoles con las correspondientes a los

suelos “comunes”. Estos son todos aquellos suelos que están concentrados en el rango comprendido entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos (ver figura 2).

Figura 2

Curvas de retención de agua para los suelos comunes y para el andosol inalterado



Nota. pF = 0 saturación, CC = capacidad de campo, P.M = punto de marchitez. Fuente: Iñiguez, 2003.

- **Regulación del agua**

Existen pocos esfuerzos por cuantificar la capacidad de regulación hidrológica global del páramo en Ecuador, pero a pesar de la relativa escasez de datos, generalmente, se reconoce que los ríos de páramo proveen un flujo base sostenido a lo largo del año (Luteyn, 1992). Como se mencionó anteriormente, el mayor crédito de la alta capacidad de regulación de agua se atribuye a los suelos debido a su estructura ligera y porosa que le permite funcionar a manera de esponja, la cual libera el agua de manera lenta y regular.

Otro aspecto importante responsable de la capacidad de regulación es la topografía, debido a que después del levantamiento de los Andes del Mioceno al Pleistoceno, la topografía del páramo fue mucho más moldeada por la actividad glacial, dándole al páramo su topografía típica accidentada que va desde los valles escabrosos y escarpados a las llanuras casi planas (Kehrer & Kaaden, 1979). El paisaje irregular es

hogar de abundantes concavidades y depresiones locales donde se han desarrollado pantanos y lagos. Estos lagos pueden agregarse a la capacidad de almacenamiento de agua y de amortiguación del ecosistema. Aunque los conceptos para cuantificar la capacidad de la regulación de lagos son bien conocidos, no se conocen estudios realizados para el páramo. Esto probablemente es debido a la falta de datos topográficos detallados para la mayoría de los páramos donde muchas lagunas pequeñas y depresiones locales están desconectadas de la red de drenaje. Ellas colectan el flujo proveniente de las laderas y permiten la infiltración y recarga de los reservorios de agua subterránea profunda (Price & Waddington, 2000).

2.3.5. Nivel de intervención en el área de estudio

Los impactos antrópicos, tanto históricos como contemporáneos, han modificado el paisaje natural de muchas regiones del Ecuador, provocando un mosaico de ecosistemas que son todavía el refugio de importantes comunidades de flora y fauna. Esta realidad también ha afectado al DMQ y se la puede evidenciar con la fragmentación, disminución de poblaciones y extinción de especies (Mosquera & Baile, 2017).

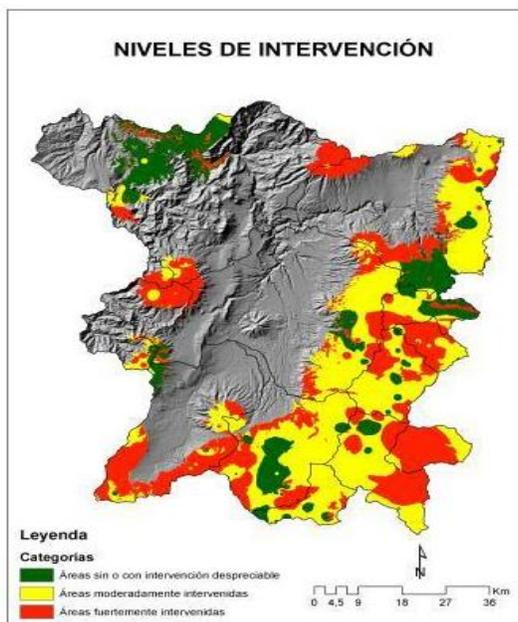
Como parte de su gestión para generar información que le sirva de herramienta para la toma de decisiones en el 2017, el FONAG elaboró cartografía temática a escala 1:25.000 de la composición florística y de los estados de intervención en la cobertura vegetal natural existente sobre los 3400 msnm. Para ello, fueron mapeados 14 ecosistemas altoandinos dentro del área de estudio. Junto a estas coberturas vegetales fueron identificadas seis coberturas naturales y seis usos del suelo relacionados con la intervención antrópica.

El resultado de este análisis se traduce en un mapa (figura 3) que es resultado de una reclasificación en 3 niveles de intervención (alto, moderado y bajo) en el área de

trabajo e indica que más del 81% del área de estudio (sobre 3400 msnm) se encuentra afectada por un cierto grado de intervención (media, alta).

Figura 3

Mapa de niveles de intervención sobre 3400 msnm del área de estudio



Nota. FONAG, 2017.

Además, se identificó que al dividir los ecosistemas por nivel de intervención, el 31% de los ecosistemas del área de estudio presentan un estado altamente intervenido: los de moderada intervención conllevan el 50% y los ecosistemas con un nivel de intervención bajo suponen el 19% del área de estudio (tabla 1).

Tabla 1

Superficie en hectáreas (ha) de los ecosistemas y su nivel de intervención

Ecosistemas	Alta	Moderada	Baja o nula
Arbustal siempreverde montano	2803,26	5279,96	1108,15
Arbustal siempreverde y herbazal del páramo	11537,39	8398,05	5184,96
Bosque siempreverde del páramo	1463,44	235,01	1015,21
Boque siempre verde montano alto de la cordillera occidental de los andes	2394,64	1559,95	860,21
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Oriental de los Andes.	12029,59	13959,51	2244,09
Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental de los Andes	1629,55	1620,10	14724,59
Bosque siempreverde montano de Cordillera Occidental de los Andes	264,26	479,83	3764,94
Bosque siempreverde montano de Cordillera Oriental de los Andes	230,04	173,83	
Herbazal del Páramo	34874,94	66667,87	16620,69
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	1074,36	9507,29	1086,72
Herbazal húmedo subnival del Páramo			
Herbazal húmedo subnival del páramo	4309,61	4420,38	909,67
Herbazal inundable del Páramo	7884,94	19262,36	2674,36
Herbazal ultrahúmedo subnival del Páramo	647,48	38,82	
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	25,18	48,57	13,36
Superficie total de los ecosistemas	81168,69	133801,54	50206,96

Nota. Tabla recuperada de FONAG, 2017.

El estudio también indicó que los ecosistemas mayormente intervenidos están representados por los bosques siempreverdes montano bajo y montano de la Cordillera Occidental de los andes, cuyo nivel de representación en el área de estudio es muy

limitado. Esto se debe a que el área de estudio está centrada sobre los 3400 msnm y tiene mayor representatividad de especies de altura hacia la cordillera oriental, evidenciando un vacío de conservación de dichos ecosistemas para el área de estudio del FONAG.

El ecosistema mejor conservado es aquel cuya distribución geográfica lo hace muy inaccesible y está representado por el Herbazal húmedo subnival del Páramo, ubicado de forma general al pie de los macizos volcánicos.

Además, la Secretaría de Ambiente del DMQ (Distrito Metropolitano de Quito) ha determinado 1.700 ha/año, como la tasa de deforestación anual con la que este territorio contribuye a la disminución de los ecosistemas naturales del Ecuador. Con base en ello, es importante analizar las principales causas de la deforestación directas y subyacentes que han provocado la fragmentación de los ecosistemas naturales y el cambio de uso de suelo. El fin es diseñar estrategias que permitan detener la pérdida de los recursos forestales y crear acciones de recuperación de estos ecosistemas.

2.3.6. Cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS)

Aunque a veces se usan los términos “uso del suelo” y “cobertura del suelo” indistintamente, cada uno tiene un significado diferente. La cobertura del suelo es la capa biofísica (materia orgánica, vegetación, necromasa, hielo, agua, etc.) que está cubriendo la superficie de la tierra, mientras que el uso de la tierra se refiere a la forma en que los humanos explotan la cobertura del suelo para satisfacer necesidad (urbanizaciones, agricultura, áreas recreativas, ganadería, etc.) (Siddhartho, 2013). De acuerdo con Farfán (2015), en la dinámica de cambio de cubierta/uso del suelo (CCUS) los elementos condicionantes o variables no actúan en forma aislada; es decir, todo funciona como un sistema dependiente y sinérgico. Por tanto, si existe la disminución de cubierta vegetal, esto indica una perturbación en el ecosistema.

La condición global actual del cambio ambiental masivo y los problemas de sostenibilidad aclaran la necesidad de la investigación en la detección de CCUS en diferentes partes del mundo, aunque estos cambios implican aspectos tanto naturales (por ejemplo, clima, inundaciones, terremotos, etc.) como causas antropogénicas, por ejemplo, el aumento acelerado de la población.

En la actualidad, las áreas vírgenes no alteradas cubren menos del 50% del paisaje de la tierra y la cobertura forestal es solo del 30% (Oumer, 2009).

De esta manera, el estudio de la dinámica CCUS y su modelación a futuro han surgido de observar cómo y de qué forma los procesos antrópicos a nivel local y regional de la superficie terrestre impactan en el ambiente a nivel de la cubierta vegetal. Estos estudios van más allá de conocer el pasado a través de la implementación de nuevas tecnologías para su estudio y evaluación. Hoy día, la modelación de distintas variables permite inferir el comportamiento que la dinámica CCUS tendría en un lapso de tiempo a partir de las tendencias actuales de los usos que presenta (Oriosto, 2017).

2.3.7. Modelos de simulación

El modelamiento de uso del suelo, en la actualidad, juega un papel esencial para la gestión de recursos y procesos en la toma de decisiones. Los modelos de uso del suelo son herramientas prácticas para analizar las causas y consecuencias del CCUS y crear una mejor comprensión del sistema de uso de la tierra en un área (Verburg, Kok, Pontius, & Veldkamp, 2008). La modelación de los CCUS toma en cuenta determinadas características del paisaje, ya sea a escala local o regional, para simular los cambios en la disposición del paisaje. Sin embargo, los acercamientos basados en el análisis de información a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota deben integrar aportaciones de otras disciplinas como aspectos sociales, económicos y culturales que no se expresan de manera espacialmente

explícita (Ramírez, 2011). Llevar a cabo este proceso involucra tener en cuenta una visión que permita realizar un análisis espacial de las condiciones y acciones que se llevan a cabo dentro de la zona de estudio, haciendo una evaluación de las relaciones que tienen las variables en la transformación de la cubierta vegetal. En términos concretos, Hernandez & Cand (2009) proponen que un modelo de este tipo se conforma por una variable de respuesta (zonas potenciales a sufrir cambios a futuro), los generadores del proceso o variables independientes que determinan los frentes de explotación como la frontera agropecuaria, urbanización, quemas, tala controlada, así como la intensidad de estos frentes, y el componente aleatorio o de incertidumbre que acompaña a cualquier modelo de CCUS.

Bajo esta perspectiva, realizar una simulación implica identificar elementos y variables que tienen relación con los cambios de uso del suelo. Además, es necesario “considerar las cubiertas como un conjunto de estados discretos en donde los cambios son definidos como transiciones que ocurren en una malla o matriz de celdas” (Ramírez, 2011). La simulación de escenarios de deforestación tiene consigo un conocimiento del pasado y un entendimiento del presente, lo que hace posible estimar el comportamiento a las áreas con potencial de sufrir cambios tanto cualitativos como cuantitativos en la cubierta vegetal. Esto es posible si tomamos en cuenta que la deforestación es un fenómeno complejo que depende de “factores relacionados con las actividades humanas y de la aptitud del territorio, como pueden ser la altitud, pendiente, distancia a las vías de comunicación y el tipo de vegetación forestal” (Jean-françois Mas et al., 2015).

Investigadores de todo el mundo han estado ideando y utilizando una amplia variedad de modelos de uso del suelo, diversos en sus formulaciones, objetivos y capacidades. Para el caso de simulación de CCUS, se pueden encontrar modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA), en agentes, técnicas de regresión,

técnicas de evaluación multicriterio (EMC), lógica difusa, autómatas celulares, entre otros (Cano & Rojas, 2016).

2.3.8. Redes neuronales artificiales (RNA)

Las RNA son un instrumento de cálculo y procesamiento automático inspirado en el funcionamiento del cerebro humano, organizado en un conjunto de unidades de procesamiento llamados nodos que están interconectados de manera jerárquica. Estos nodos se activan a causa de un interruptor binario que se conoce como función de activación. Si el nodo se activa, transmite información a la cadena de procesos (Díaz P. & Hewitt, 2013).

Land Change Model es una herramienta utilizada para la evaluación y la predicción de cambios en el uso del suelo que está integrada dentro del software IDRISI, donde para el cálculo de probabilidad de cambio y la definición de patrones de localización del uso de suelo puede emplear un algoritmo basado en RNA (Jean-françois Mas et al., 2015).

Este tipo de modelo fue aplicado por Muñoz Guerrero & Gómez Zotano (2017) en la simulación prospectiva del paisaje en los páramos de Galeras, Paja Blanca y Chiles en Colombia, que le permitió realizar una propuesta metodológica para la gestión de estas áreas acorde a las características actuales del paisaje, su comportamiento histórico y sus tendencias futuras.

Henríquez, Azócar, & Romero (2006) monitorearon y modelaron el crecimiento urbano en dos ciudades medianas de Chile a través de LCM entre 1978 y 1998. Este modelo ha sido usado también para el modelamiento de riesgo de incendios, erosión, deforestación en bosques tropicales entre otros.

2.3.9. Autómatas celulares

Una de las técnicas de modelamiento espacial es la de autómatas celulares. Esta se originó en el año de 1940 gracias a los investigadores John Von Neumann y Stanislaw Ulam, quienes estaban interesados en buscar una teoría general de autómatas para el procesamiento de información que fuera aplicable tanto en sistemas biológicos como en aparatos tecnológicos, ofreciendo de esta forma, un marco teórico para el estudio de problemas provenientes de sistemas con comportamientos complejos y descritos por reglas sencillas (Romero, 2003).

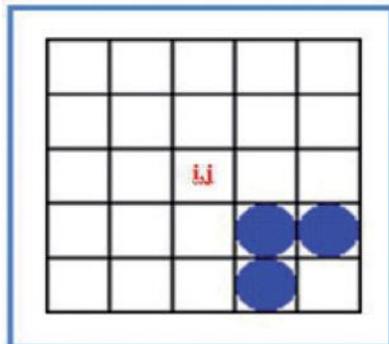
Por lo tanto, el estudio de un autómatas celular representa un modelo matemático de un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos:

- Modelo matemático, porque permite expresar los fenómenos de la vida real en forma matemática; es decir, hacer aproximaciones de la realidad física y predicciones para generar escenarios futuros.
- Sistema dinámico, porque es un sistema complejo que presenta cambio o evolución de su estado en un tiempo.
- Pasos discretos. Se dice discreto si el tiempo se mide en pequeños lapsos; entonces, denota los pasos discretos del tiempo. Es decir, que el AC se caracteriza por sus propiedades discretas en el espacio, tiempo y valores de estado.

Como se muestra en la figura 4, el espacio de un AC es un arreglo uniforme de celdas o células, donde cada una de ellas puede contener algunos bits de información, ocupa la posición (i,j) en el espacio y el tiempo transcurre en pasos discretos, teniendo en cuenta que sus leyes son uniformes y locales.

Figura 4

Espacio de un AC

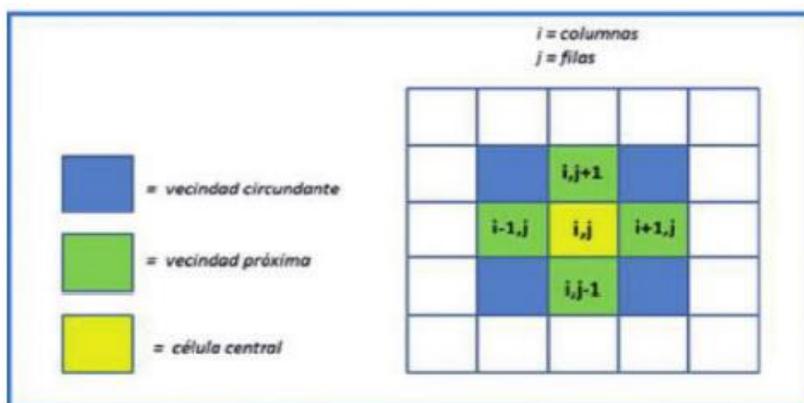


Nota. Imagen recuperada de Padilla, 2015.

Según Aguilera Benavente, (2006) los autómatas celulares son sistemas espaciales dinámicos muy simples capaces de demostrar comportamientos complejos en los que el estado de cada celda (o píxel) va a depender de los estados previos de las celdas vecinas (figura 5). Es decir, la vecindad de un AC comprende un conjunto finito de celdas que recolecta la información de esta y de las celdas a su alrededor. Cabe mencionar que las operaciones se realizan en la célula central.

Figura 5

Vecindad de un autómata celular



Nota. Imagen recuperada de Padilla, Pérez, Cruz y Astudillo, 2015.

2.3.10. Modelación con Dinámica EGO

Dinamica EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) es una potente herramienta gratuita de modelación que en español se traduce Entorno para Objetos de Geoprocesamiento. Fue desarrollada en Brasil en la Universidad Federal de Minas Gerais (Soares-Filho, Rodrigues, Costa, & Schlesinger, 2010) y algunas de sus ventajas son la gratuidad para su uso, su flexibilidad, el cómputo de tasas de transición, el reconocimiento de promotores de cambio y la formulación de escenarios prospectivos (Monteiro Junior, Silva, De Amorim Reis, & Mesquita Souza Santos, 2019).

Mas & Sandoval (2011) destacan que, desde un punto de vista técnico, Dinámica EGO posee una herramienta para optimizar la transformación de variables continuas en categóricas. Además, señalan que los pesos de evidencia que representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición de cobertura y uso de suelo se calculan de manera independiente para cada variable, lo que permite elaborar funciones muy complejas de manera sencilla.

Los insumos necesarios para la aplicación de Dinámica EGO son básicamente dos o más mapas de fechas distintas correspondientes a la cobertura y uso del suelo, así como también de variables o factores cartografiados que incidan de cierta forma en el cambio en el paisaje.

Las variables son elegidas con base en criterios basados en referencias bibliográficas, opiniones de expertos e información disponible. Para algunos estudios, las variables biofísicas presentan mayor disponibilidad de acceso que las variables socioeconómicas, debido a la dificultad de representar espacialmente algunas de estas últimas (Espinoza, 2017). El número de variables que se incluyan en el modelo depende de cada investigador. No existe un límite, pero es aconsejable no sobrepasar la cantidad de 20 variables porque el procesamiento se vuelve muy pesado (Macedo, De Almeida, Dos Santos, & Rudorff, 2013).

En Dinámica EGO no solo se pueden realizar análisis multitemporales de CCUS, sino también, trabajar con análisis multicriterio aplicado a la evaluación de impacto ambiental, monitoreo de emisiones de carbono, planeamiento urbano, emisiones de carbono, entre otros. Incluso, se pueden desarrollar modelos de proyección econométricos capaces de predecir las tasas de deforestación con base en el contexto socioeconómico (Rodrigues, Soares-Filho, & Costa, 2007).

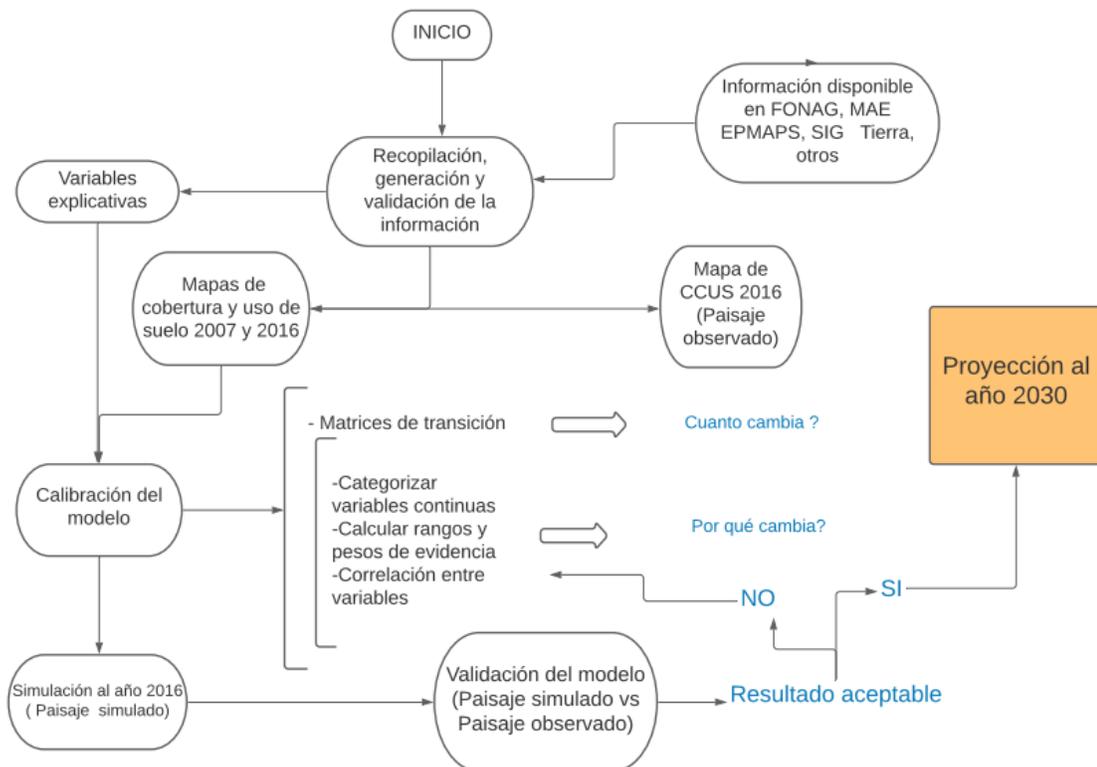
CAPÍTULO III

3. Metodología

Para la realización del presente estudio se estableció una cadena de pasos como se muestra en la figura 6, la cual está basada en la metodología de modelamiento con Dinámica EGO que inicia con la recopilación y generación de información cartográfica con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Posteriormente, estos insumos son llevados a los diferentes modelos del programa para la generación de escenarios de cambios de uso de suelo.

Figura 6

Diagrama metodológico



3.1 Selección y generación de información cartográfica

La cartografía base para el presente estudio corresponde a los mapas de cobertura y uso del suelo CCUS generados por el Ministerio de Ambiente del Ecuador para los años 2008 y 2016 a escala 1:100.000 a nivel de todo el Ecuador.

Los mapas fueron generados en formatos shapefile (.shp) con dos niveles de clasificación, pero para la presente investigación se usó la clasificación *NIVEL II* (tabla 2) debido a que las categorías en el *NIVEL I* colocan en un solo grupo los bosques nativos y exóticos (plantación forestal), lo que no permite realizar un análisis de la pérdida o regeneración de bosques nativos que son objeto de estudio en la presente investigación.

Tabla 2

Clasificación de cobertura y uso de suelo en los Niveles I & II del Ministerio de Ambiente del Ecuador

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

Nota. Tabla recuperada de MAE, 2016.

La preparación de la información cartográfica incluye la generación de información ráster homologada; es decir, cada variable y mapa plasmado en un ráster debe contar con el mismo número de filas, columnas, píxeles y sistemas de proyección. Por lo tanto, fue necesario preparar previamente la base de datos que se utiliza y, para ello, se usaron los softwares IDRISI y ArcGis 10.4.

El siguiente paso es la reclasificación de los mapas de uso de suelo, que permite identificar las clases en un mapa de cobertura mediante números. Para el presente estudio se definieron 5 clases como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Reclasificación de mapas de cobertura y uso de la Tierra

OLD VALUES	NEW VALUES
Páramo	1
Bosque Nativo	2
Mosaico Agropecuario	
Pastizal	
Cultivo Anual	
Cultivo Permanente	3
Cultivo Semipermanente	
Plantación forestal	
Infraestructura	
Área poblada	4
Glaciar	
Área sin cobertura vegetal	5
Natural	

Nota. Tabla recuperada de MAE, 2015.

3.1.1 Selección de variables

El ajuste de los modelos a la realidad depende, en gran medida, de la capacidad de las variables para explicar los cambios producidos a través del tiempo. Las variables pueden ser clasificadas como aptitud (variables biofísicas) y socioeconómicas (relacionadas a las actividades antrópicas sobre el territorio). Para este estudio se

seleccionaron once variables que se muestran en la tabla 4 y figura 7, donde se indica si las variables son estáticas o dinámicas y también si son de tipo categórico o continuo. La selección de estas variables se basó en la revisión bibliográfica de estudios sobre modelación de la dinámica de CCUS y deforestación, y es puesta a prueba en el proceso de calibración del modelo. Para cada una de estas variables se preparó un mapa representativo en formato de imagen ráster con una resolución de 100 metros de píxel.

Tabla 4

Variables usadas en el modelo

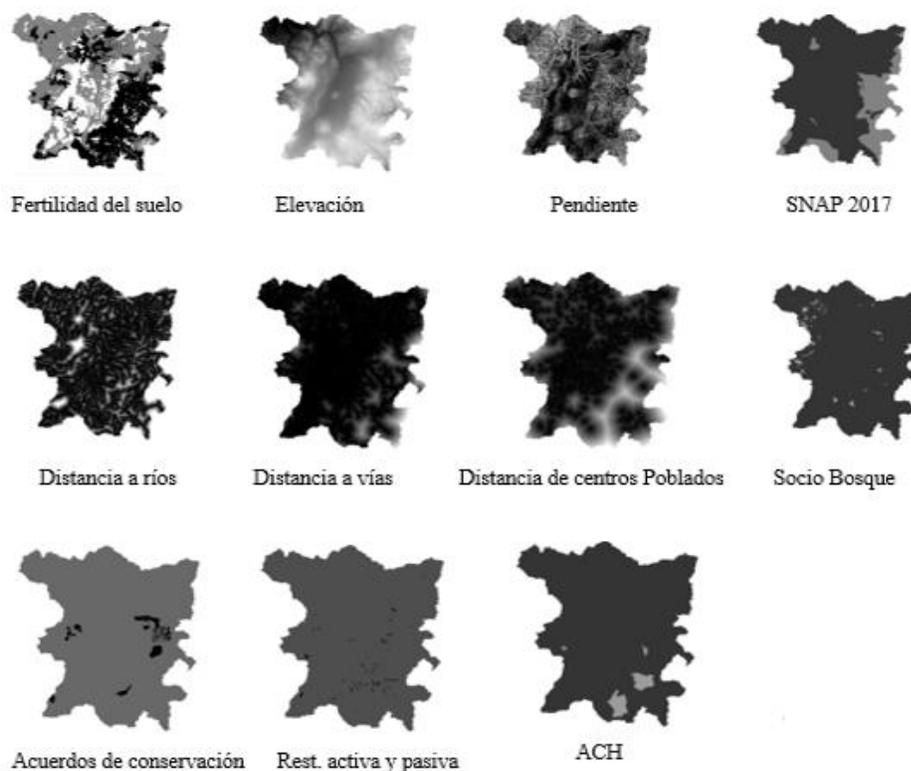
Clasificación	Variable	Tipo	Descripción
Aptitud	Altura	Estática/Continua	Interpolación de las curvas de nivel (200 m). Fuente: IGM
	Pendiente	Estática/Continua	Pendiente en grados obtenido en base al modelo digital de elevación. Fuente: FONAG
	Distancia a ríos	Estática/Continua	Distancia euclidiana a vías. Fuente: IGM
	Fertilidad del suelo	Estática/Categórica	Clasificación de fertilidad del suelo. Fuente: SIGTIERRAS
Socioeconómicas	Distancia a centros poblados	Estática/Continua	Distancia euclidiana a vías. Fuente: IGM
	Distancia a vías	Estática/Continua	Distancia euclidiana a vías. Fuente: IGM
	Socio bosque	Estática/Categórica	Polígonos de áreas en conservación con propietarios privados y comunidades. Fuente: MAE
	Áreas de conservación hídrica	Estática/Categórica	Polígonos de áreas que fueron adquiridas por EPMAPS y FONAG para conservación estricta. Fuente: FONAG

Clasificación	Variable	Tipo	Descripción
Socioeconómicas	Acuerdos de conservación	Estática/Categórica	Polígonos de áreas en las que el FONAG firma acuerdos con comunidades para conservación. Fuente: FONAG
	Áreas de restauración activa y pasiva	Estática/Categórica	Polígonos de áreas en las que el FONAG ha implementado actividades de restauración. Fuente: FONAG
	Áreas Protegidas SNAP	Estática/Categórica	Polígonos de áreas declaradas en protección por el estado ecuatoriano. Fuente: MAE

Contar con insumos (mapas de variables) definidos y homologados permite generar un archivo que contiene su futura inclusión en el modelo. Este archivo se denomina cubo ráster o “cubo de mapas” y es una serie de mapas estáticos, denominados de esta forma debido a que sus atributos no cambian a lo largo de las iteraciones del modelo (Soares-Filho et al., 2009). Una vez definido el cubo ráster, se puede trabajar en el software Dinamica EGO y seguir los diez pasos necesarios para completar el modelo.

Figura 7

VARIABLES SELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS DE CCUS

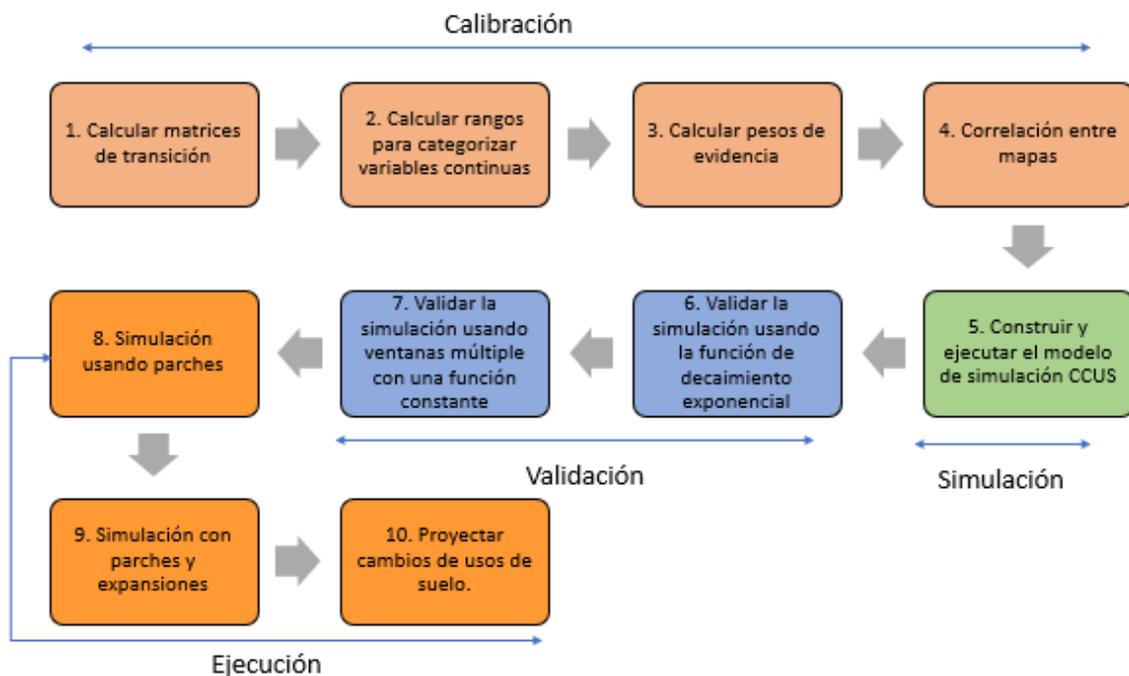


3.2 Construcción del modelo en Dinámica EGO

Como se mencionó anteriormente, el modelamiento de CCUS en Dinámica EGO se desarrolla a través de una secuencia de diez pasos consecutivos (figura 8), en la que los pasos del 1 al 4 corresponden a la calibración del modelo, el 5 es la simulación, los pasos 6 y 7 consisten en la validación del modelo y los pasos del 8 al 10 corresponden a la ejecución del modelo y proyección.

Figura 8

Diez pasos del modelo de simulación en Dinámica EGO



3.3 Cálculo de las matrices de transición (paso 1)

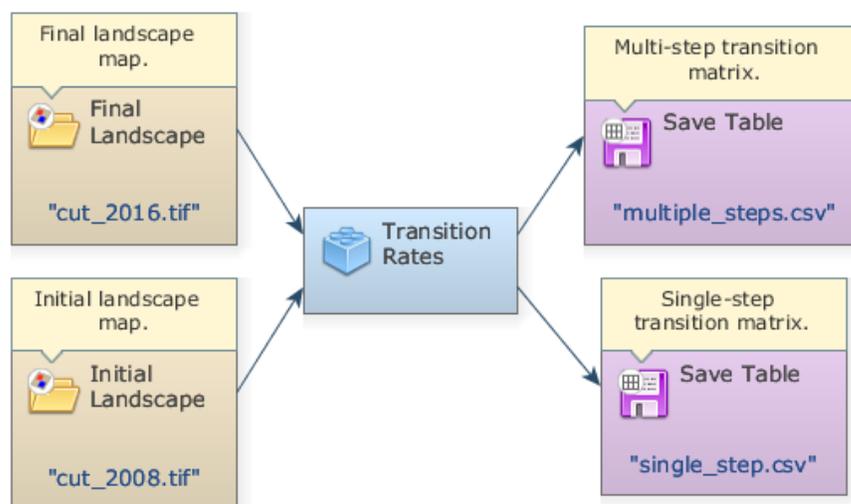
Las matrices de transición indican el porcentaje de cambio ocurrido desde una tipología de uso de suelo a otra, mostrando cada una de las transiciones identificadas en el periodo específico. Este cambio se expresa en la forma de una matriz con tasas globales de transición. Las matrices de cambio con las que trabaja Dinámica EGO pueden ser simples o múltiples. Las matrices de cambio simples están referidas a tasas de transición para un determinado período de tiempo completo, mientras que las matrices de cambio múltiples se refieren a tasas anuales de cambio.

Para realizar el modelo del cálculo de las matrices de transición (figura 9), se requirieron como insumo los mapas categóricos de cobertura y uso de suelo CUT de los años 2008 (inicial) y 2016 (final) que ingresan a la función *Determinate Transition Matrix*,

donde se especificó el número de años que transcurrieron entre los mapas inicial y final (8 años). El resultado del modelo se conecta a dos tablas donde se almacenan las matrices de transición simple y múltiple.

Figura 9

Modelo de cálculo de matrices de transición



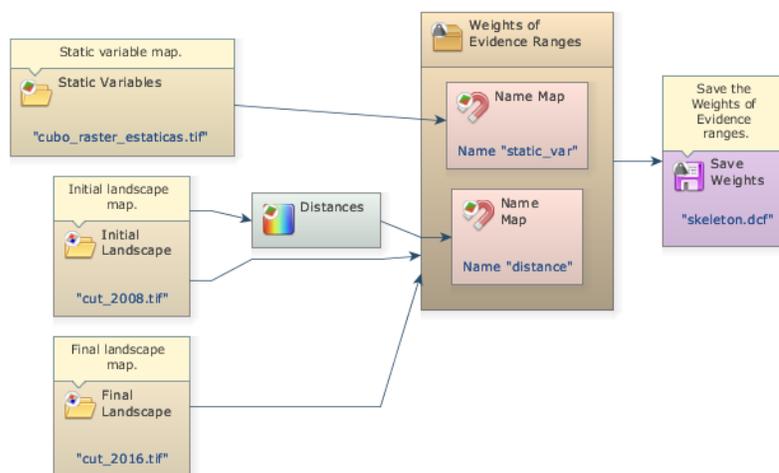
3.4 Cálculo de rangos para categorizar variables continuas (paso 2)

Dinámica EGO trabaja con el método geoestadístico de los pesos de evidencia, con el fin de obtener un mapa de probabilidades de transición, el cual muestra las áreas donde el cambio es más propenso a ocurrir y, luego, los pesos de las variables que poseen mayor influencia en los cambios (Soares-Filho et al., 2009). Entonces, dado que el método de pesos de evidencia solo es aplicable a variables categóricas, es necesario categorizar aquellas variables continuas; es decir, aquellas que tienen datos cuantitativos como mapas de distancias, altitud y pendiente. Para esto se genera el modelo (figura 10) que requiere los mapas de uso inicial y final, así como un cubo ráster compuesto por los mapas de las variables estáticas previamente homogenizados con respecto al número de columnas y filas.

Dinámica EGO puede también incorporar coberturas dinámicas en la simulación, llamadas así porque sus atributos varían a lo largo de las iteraciones del modelo. Para este modelo se incluirá la variable “distancia a zonas agropecuarias” (distancia a las áreas ya deforestadas) como una cobertura dinámica. Para este propósito, el modelo emplea la función Calc Distance Map que genera un mapa de distancias a las celdas que en este caso pertenecen a la clase “3” la que representa zonas agropecuarias. De esta forma, el modelo toma en cuenta la proximidad de las áreas previamente deforestadas para determinar la probabilidad de deforestación.

Figura 10

Modelo de cálculo de los rangos de los pesos de evidencia

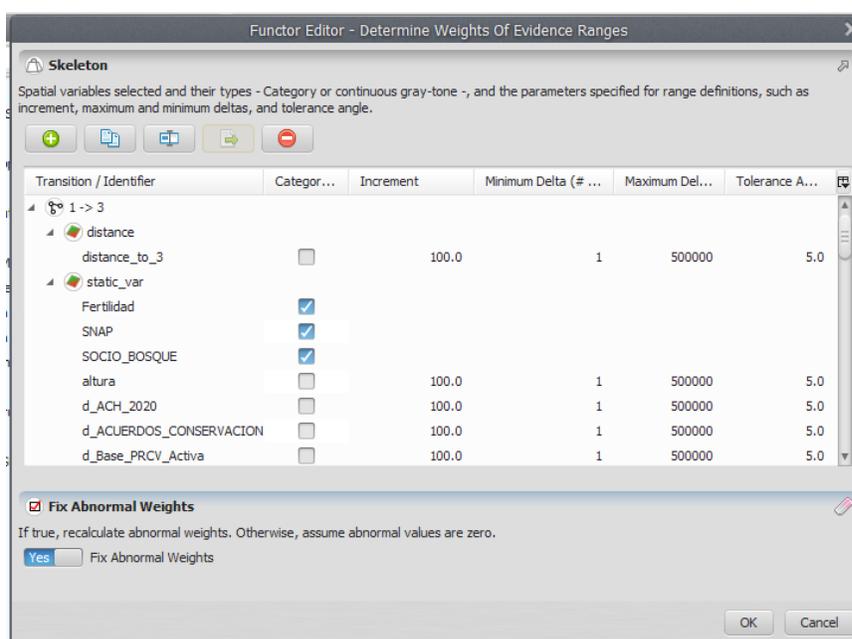


Todos estos insumos se conectan a la función *Determine Weights Of Evidence Ranges* (figura 11) donde se indican las variables que son categóricas (fertilidad de suelo, SNAP, socio bosque, etc.). El resto de las variables se categorizan donde los parámetros son el incremento (la unidad mínima del mapa con la que se construirán los buffers, los deltas mínimo y máximo que representan los intervalos y el ángulo de tolerancia, el cual mide el ángulo de desviación de una línea recta). Los valores utilizados fueron los sugeridos por Soares-Filho, Rodriguez & Acosta (2009): un *mindx* de 1 celda, *maxdx* de 500000 celdas, un ángulo de tolerancia de 5° y el incremento

correspondiente al tamaño de la celda de los mapas de las variables (100 m). El resultado de este modelo son rangos para categorizar las variables continuas y obtener de esta forma los pesos de evidencia. El modelo selecciona el número de intervalos y el tamaño de sus buffers, buscando conservar la estructura original de los datos de la variable continua.

Figura 11

Función Determine Weights Of Evidence Ranges y parámetros para categorizar variables continuas

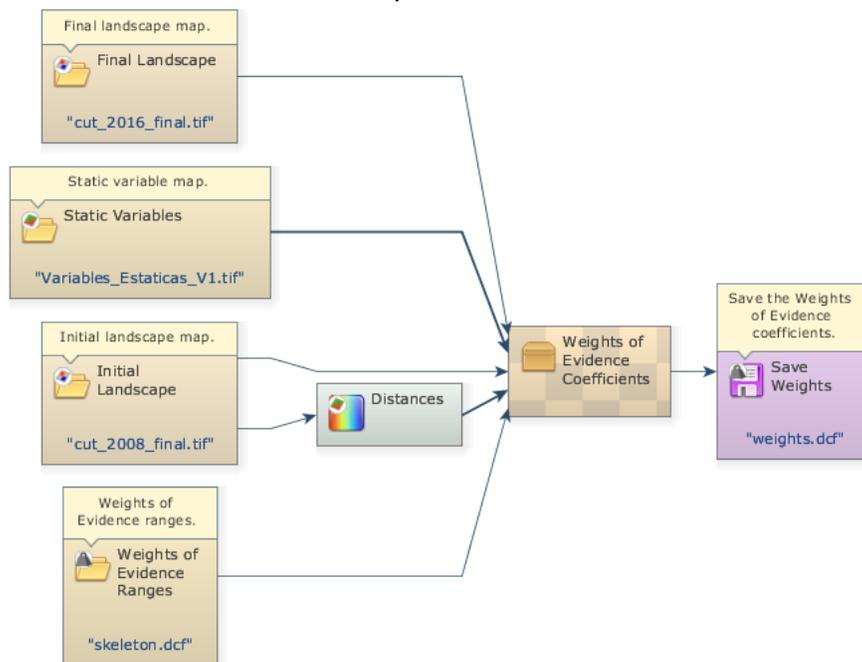


3.5 Modelo para el cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia (paso 3)

Los insumos del modelo para el cálculo de los coeficientes de los pesos de evidencia son los rangos obtenidos del modelo anterior, los mapas inicial (2008) y final (2016), y el cubo ráster de las variables estáticas (figura 12).

Figura 12

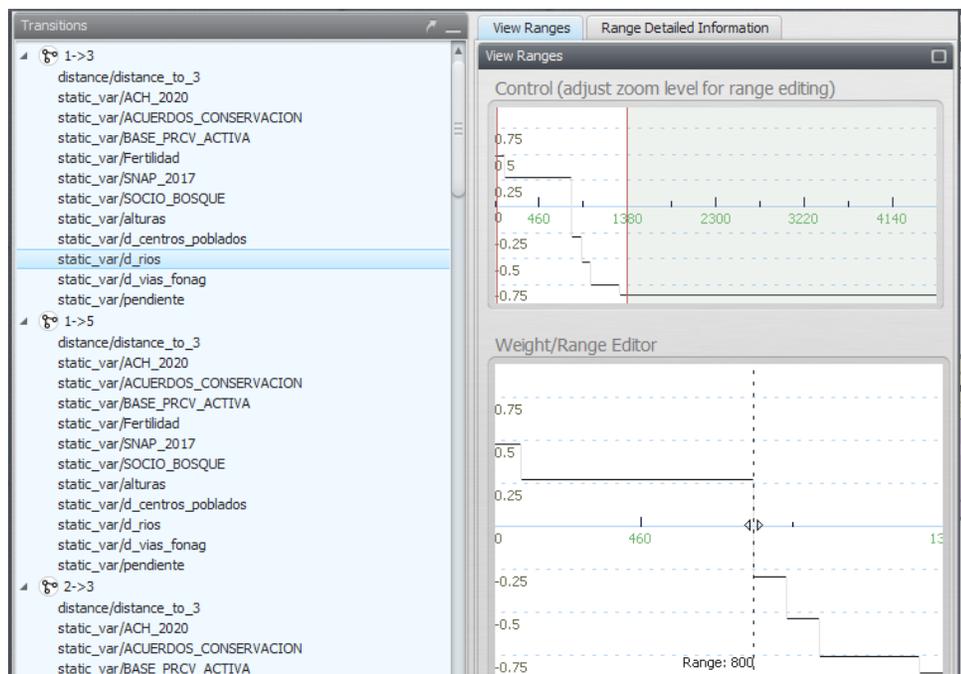
Modelo de cálculo de los coeficientes de los pesos de evidencia



La figura 13 muestra los pesos de evidencia obtenidos en la variable distancia a ríos de la transición 1 a 3 (páramo a mosaico agropecuario), donde el primer rango (0 – 800) tiene un peso de evidencia positivo, lo que muestra que las zonas ubicadas a distancias entre 0 y 800 metros de los ríos favorecen esta transición de CCUS. Las distancias superiores a 800 metros obtuvieron pesos de evidencia negativos, lo que indica que inhiben este cambio, mientras que los valores cercanos a cero no tienen ningún efecto. De esta forma, se analizaron todas la transiciones y variables y en la pestaña *Ranges Detailed Information* se eliminaron los rangos que se consideraron innecesarios. Esta función también permite modificar los coeficientes de cambio si se considera necesario en base a la experiencia del profesional que realiza el análisis. En el presente estudio no se realizaron cambios.

Figura 12

Weights of evidence editor para la modificación de rangos y coeficientes



3.6 Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables (paso 4)

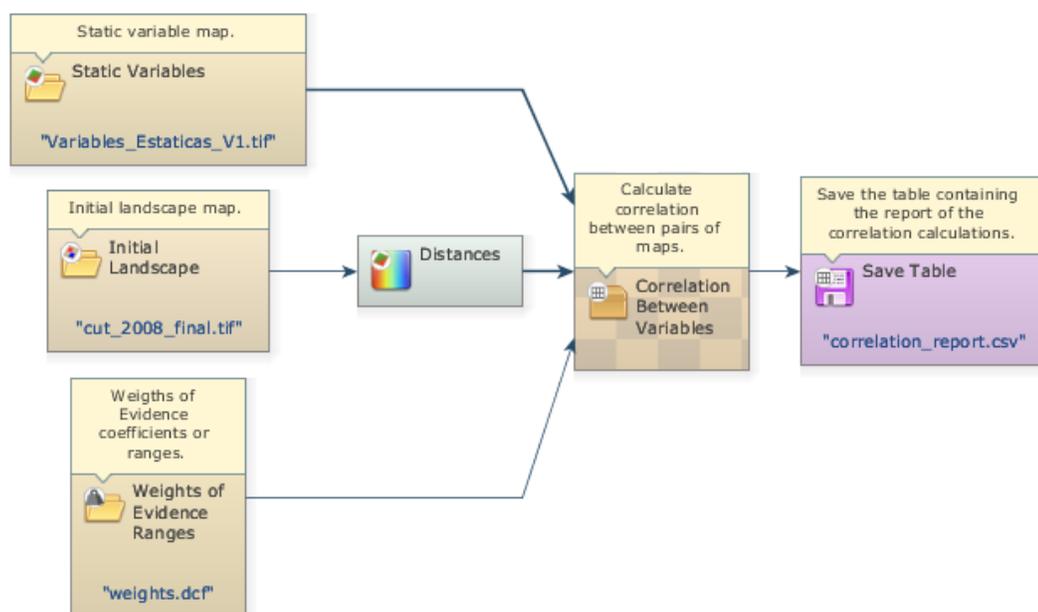
El único supuesto del método de pesos de evidencia es que los mapas a ser utilizados como insumos (mapas de variables) sean espacialmente independientes. A fin de comprobar la validez de este supuesto, se realiza un análisis de correlación, para lo cual Dinámica EGO incluye un modelo que realiza pruebas comparando las variables en pares y aplica el índice de Cramer. Este índice opera en valores reales entre 0 y 1. Mientras las variables comparadas se encuentren más cercanas a 1, poseen mayor correlación y son menos independientes, por lo que una de ellas se elimina del proceso de modelación. No se indica un límite de tolerancia del índice de Cramer, pero existen algunos estudios que consideran el valor de 0.50 (Macedo et al., 2013).

Este modelo (figura 13) requiere como insumos el cubo ráster de las variables y el mapa de cobertura inicial. También es necesario especificar las transiciones de

estudio que se determinaron en el paso 1 e incluir los coeficientes de pesos de evidencia del paso 3. El resultado es un archivo con los diferentes estadísticos e índices que permiten descartar las variables que presentan alta correlación.

Figura 13

Modelo para el análisis de la correlación espacial de variables

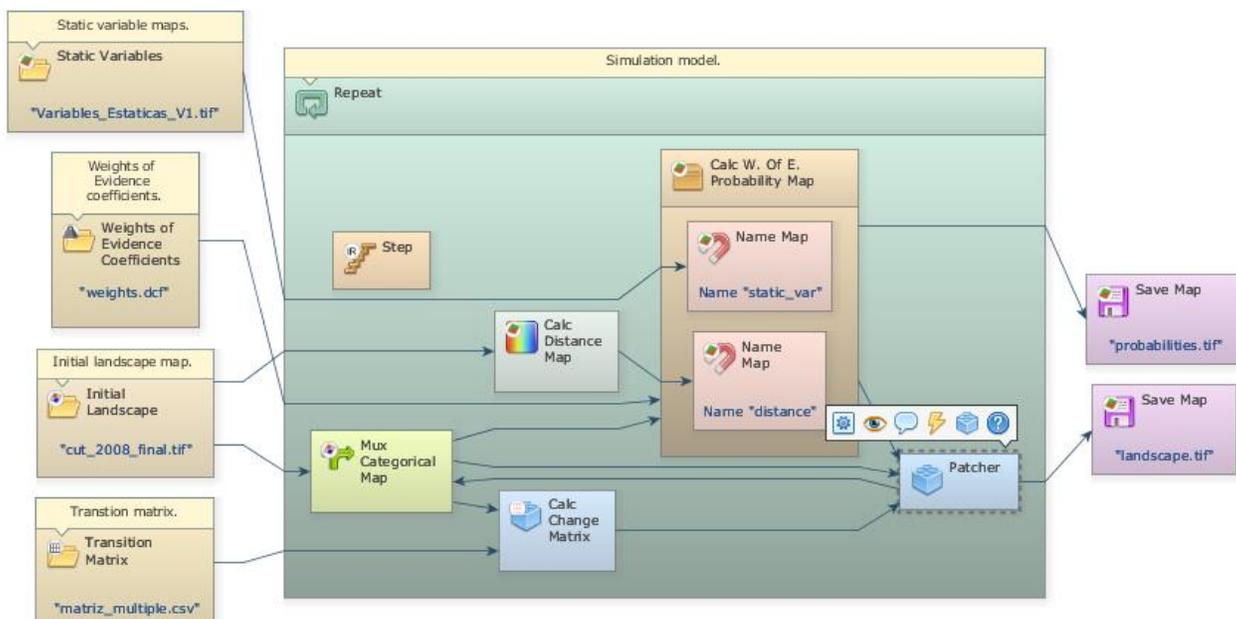


3.7 Construcción y ejecución del modelo de simulación (paso 5)

En este modelo (figura 14), el software simula un mapa (mapa simulado 2016) con la finalidad de compararlo con el mapa real observado (CUT 2016 del MAE) para determinar la capacidad del modelo de predecir los cambios de tal forma que sea lo más parecido posible a la realidad.

Figura 14

Modelo de simulación



Para ello, cuenta con la función *Mux Categorical Map*, que permite actualizar dinámicamente el mapa del paisaje utilizado como insumo, y con la función *Calc W. Of E. Probability Map*, que calcula un mapa de probabilidades de transición para cada una de las transiciones al sumar los pesos de evidencia. A su vez, el *Calc Change Matrix* recibe la matriz de transición, compuesta por tasas netas, y la usa para calcular tasas brutas, en términos de la cantidad de celdas que cambian, al multiplicar las tasas de transición por el número de celdas disponibles para un cambio específico.

Dinámica EGO trabaja con autómatas celulares (Ramírez, 2011), que son definidos como sistemas espaciales dinámicos muy simples, capaces de demostrar comportamientos complejos en los que el estado de cada celda o píxel va a depender de los estados previos de las celdas vecinas (Benavente, 2016). Esta herramienta está compuesta por dos funciones de transición complementarias, el *expander* y el *patcher*, especialmente diseñados para reproducir los patrones espaciales de cambio. El

expander se dedica a expandir o contraer parches de una clase de cobertura de suelo ya existente, mientras que el *patcher* está diseñado para generar o formar nuevos parches de una cobertura de suelo través de un mecanismo “semilla”.

Al variar los parámetros, estas funciones permiten la formación de parches con distintos tamaños y formas, parámetros que son determinados de acuerdo con una probabilidad de distribución log-normal. Por lo tanto, es necesario indicar los parámetros de esta función, representados por la media y varianza del tamaño de los parches a ser formados (Jean-françois Mas et al., 2015). Ya que el mapa utilizado como insumo tiene una resolución aproximada de 100 metros, se definieron los parámetros de *Mean Patch* (media) y *Patch Size Variance* (varianza) como “1”, lo que no permite la formación de nuevos parches para todas la transiciones a excepción de las transiciones de 3 a 4 (mosaico agropecuario a asentamientos urbanos) y de 3 a 5 (mosaico agropecuario a vegetación arbustiva y herbácea) donde después de varias pruebas se estableció el tamaño del parche (1,5 ha) de varianza (3 ha) e isometría (1,5), como se muestra en la figura 15.

Figura 15

Definición de parámetros para la simulación

The screenshot shows the 'Changes' software interface. The main window is titled 'Changes' and contains a 'Transition Parameters' section. The parameters are defined for a transition from state 3 to state 4.

Transition Parameters Matrix:

From \ To	1	2	3	4	5
1	↓	---	1.0	---	1.0
2	---	◇	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	◇	1.5	1.5
4	---	---	---	↓	---
5	1.0	---	1.0	1.0	◇

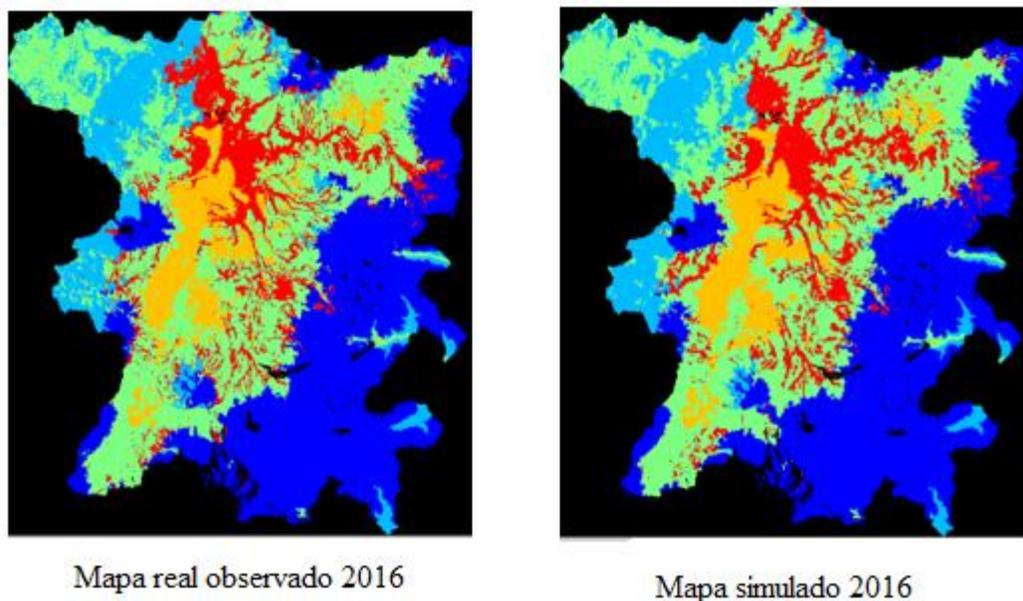
Input Fields:

- From: 3
- To: 4
- Mean Patch Size (Ha): 1.5
- Patch Size Variance (Ha): 3.0
- Patch Isometry: 1.5

Como se mencionó anteriormente, este modelo genera un mapa con las probabilidades de transición que puede ser comparado visualmente con el mapa observado real (figura 16).

Figura 16

Comparación visual del mapa simulado con el observado



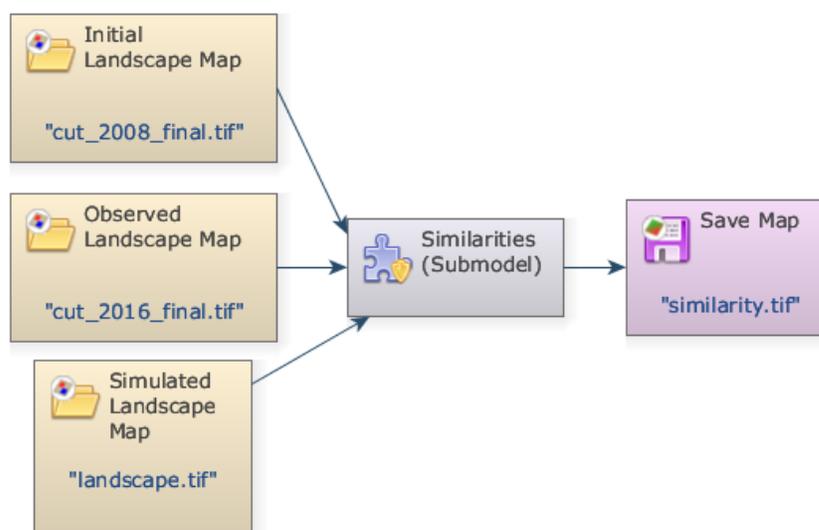
3.8 Validación del modelo mediante una función exponencial de decaimiento (paso 6)

Con base en la simulación previa del modelo, se lleva a cabo una comparación cuantitativa del mapa simulado con el mapa real observado dentro de un contexto de vecindad, porque incluso los mapas que no concuerdan exactamente entre celda y celda podrían presentar patrones espaciales similares e igualmente, similitud espacial dentro de una cierta vecindad de celdas. Esta validación utiliza índices de similitud difusa que emplea una función exponencial de decaimiento en la que se determina una distribución del peso de las celdas de una determinada ventana, en función de su distancia a la celda central (Rodrigues et al., 2007).

Como insumos, el modelo recibe los paisajes inicial y final, además del paisaje final simulado (figura 17). Usa la función *Calc Reciprocal Similarity Map* que permite calcular la similitud espacial I en dos direcciones: del primer mapa al segundo, y del segundo al primero, analizando entre mapas de cambios y no entre los mapas completos. Por lo tanto, el mapa resultante solo muestra las celdas que han cambiado (figura 18). Esta prueba emplea una función exponencial de decaimiento aplicada por defecto a un tamaño de ventana de 11 x 11 píxeles; es decir, que para el presente estudio, al tener píxeles de 100 metros cada uno el software compara ventanas de (1100 x 1100) metros.

Figura 17

Modelo de validación mediante la función exponencial de decaimiento



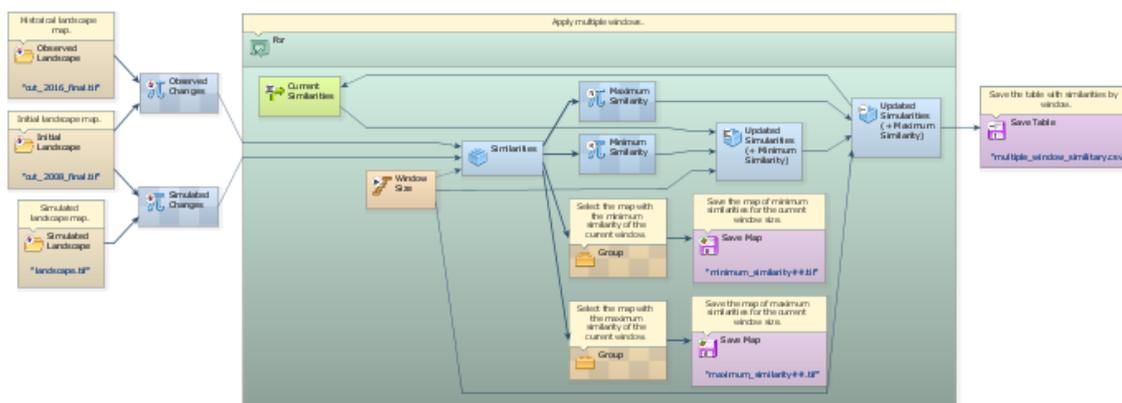
3.9 Validación del modelo usando ventanas múltiples y función de decaimiento constante (paso 7)

La validación del modelo también se realiza al medir el ajuste espacial entre el mapa simulado y el mapa observado por medio de un análisis de similitud de ventanas múltiples. Este método emplea una función de decaimiento constante con ventanas

múltiples, generando comparaciones desde una ventana de tamaño de un píxel (que en este caso corresponde a 100*100 m o 1 ha en la realidad), lo que se incrementa de dos en dos hasta 15 píxeles (1500*1500 m o 225 ha en la realidad). Si el mismo número de celdas cambiadas es encontrado dentro de la ventana, el ajuste tendrá un valor de 1, sin importar su ubicación. Este modelo arroja dos similitudes, de las que se consideró la mínima similitud para no sobredimensionar el rendimiento del modelo de simulación. Piontekowski, Silva, Mendoza, Costa & Ribeiro (2012) sugieren que la obtención de valores por encima de un 50 % de similitud entre los mapas comparados sería satisfactoria para la validación del modelo.

Figura 18

Modelo de validación usando ventanas múltiples y función de decaimiento constante



3.10 Ejecución de modelo y proyección (pasos 8, 9 y 10)

En esta fase se realizan una serie de simulaciones en las que se utilizan mapas simplificados y se cambian los parámetros de las funciones de transición (*Patcher* y *Expander*). Los resultados son evaluados utilizando mediciones de estructuras del paisaje, tales como la dimensión fractal, el índice de cohesión de parches y la distancia de vecindad más cercana. Luego de calibrar y validar el modelo, se generan los escenarios de cambio con la finalidad de entender y anticipar los cambios para mejorar la toma de decisiones. En el modelo se incluyen las variables explicativas, el mapa

simulado, las matrices de transición del periodo estudiado y los coeficientes de pesos de evidencia de las variables con las modificaciones que permitieron tener una similitud de más del 50%. Este modelo es el mismo que se usa en el paso 5 con pocas diferencias que consisten en que, en el paisaje inicial, que ahora es el mapa del 2016, el número de iteraciones son ahora “22”, y tres functors adicionales (*Calculate Value*, *Number Value*, y *Steps*) empleados para proporcionar el sufijo (*suffix*) para el nombre de los paisajes simulados en todos los años a partir del 2017 a fin de obtener las proyecciones al 2030.

Con el mapa de proyección y los datos arrojados por el modelo, se pueden analizar las trayectorias de los cambios y los principales impulsores de cambio a partir de un análisis de los resultados obtenidos en los pesos y coeficientes de evidencia ajustados al modelo.

CAPÍTULO IV

4. Resultados y discusión

4.1 Tasas y transiciones de cambio

Los mapas de cobertura y uso de suelo usados como insumo en la modelación se interpretaron con base en un sistema clasificatorio que permite distinguir las diferentes coberturas que presentan cambios de una manera sencilla e intuitiva, ya que se agrupan ciertos tipos de cobertura (tabla 5).

Tabla 5

Variables usadas en el modelo

Categoría	Uso / Cobertura	Abreviación
1	Páramo	PA
2	Bosque Nativo	BN
3	Mosaico Agropecuario	MA
4	Zona Urbana/infraestructura	ZU
5	Vegetación herbácea y arbustiva	VHA

En la primera etapa del modelo, se calcularon la matriz de transición simple (tabla 6) que indica las tasas de cambio producidas durante todo el periodo de análisis (2008-2016) y la matriz de transición múltiple (tabla 7), donde los valores representan el porcentaje de cambio por unidad de tiempo, es decir, por año para cada transición.

Tabla 6

Matriz de transición simple 2008 -2016

From / To	PA	BN	MA	ZU	VHA
PA	XXX	----	0,012034	----	0,0004001
BN	----	XXX	0,1030324	0,0002457	0,0005498
MA	0,0011214	0,0164703	XXX	0,0605278	0,116559
ZU	----	----	----	XXX	----
VHA	0,0008085	-----	0,0816026	0,0038268	XXX

Tabla 7*Matriz de transición múltiple 2008 -2016*

From / To	PA	BN	MA	ZU	VHA
PA	XXX	----	0,0016646	----	----
BN	----	XXX	0,0149070	----	----
MA	0,000149	0,0023835	XXX	0,0083059	0,0167206
ZU	----	----	----	----	----
VHA	0,0000999	-----	0,0117059	0,0001704	XXX

En la matriz simple se reflejan 12 transiciones de cambio, mientras que la matriz múltiple muestra solo 9 transiciones. Esto se debe a que los porcentajes de cambio en el análisis del periodo completo de 8 años es menor al 1% y, por tanto, sus porcentajes de cambio anuales son imperceptibles. Por otro lado, se observa que dentro de este período de tiempo, la deforestación en zonas de páramo fue del 12 % y está ocurriendo a una tasa neta anual de 0.16 % que cambió hacia una cobertura de mosaico agropecuario. De esta forma, se analizan las 8 transiciones restantes en la tabla 8. Hay que considerar que las tasas de transición son impuestas una y otra vez sobre el stock de la extensión remanente de cada cobertura año a año.

Tabla 8*Porcentaje de cambio por transición*

Transición	Uso / Cobertura 2008	Uso / Cobertura 2016	Tasa neta periodo (2008-2016)	Tasa neta anual (%)
1	PA	MA	1,2	0,16646
2	PA	VHA	0,04	-
3	BN	MA	10,3	1,4907
4	BN	ZU	0,02	-
5	BN	VHA	0,05	-
3	MA	PA	0,1	0,0149
4	MA	BN	1,6	0,23835
5	MA	ZU	6	0,83059
6	MA	VHA	11	1,67206
7	VHA	PA	0.08	0,00999
8	VHA	MA	8,1	1,17059
9	VHA	ZU	0.38	0,01704

La mayor tasa de cambio anual se produce en la transición de mosaico agropecuario a vegetación arbustiva y herbácea con el 1.67%. Sin embargo, se observa que también existe un alto porcentaje de cambio en la transición inversa, es decir, de vegetación arbustiva a mosaico agropecuario con el 1.17 %. Hay que tomar en cuenta que la categoría de vegetación arbustiva está representada principalmente en zonas de ribera de quebradas, parques y jardines en zonas cercanas a la urbe y, por tanto, están ubicadas en zonas por debajo de los 2800 msnm, por lo que no contempla una recuperación de la vegetación en las zonas de recarga hídrica del DMQ.

Este paso del proceso de modelación también entrega una matriz de tasas brutas, ya que la matriz de transiciones netas pasa al modelo de simulación y analiza el mapa del paisaje para contar el número de celdas que tuvieron cambios (ver tabla 9). En el presente estudio, al contar con celdas de 100x100 m, se puede decir que cada celda representa 1 ha y, por tanto, en esta tabla se puede analizar el área de cambio en cada una de las transiciones.

Tabla 9

Número de celdas de cambio por transición (2008-2016)

From / To	PA	BN	MA	ZU	VHA
PA	XXX	----	2707	----	90
BN	----	XXX	8807	21	47
MA	301	4421	XXX	16247	31287
ZU	----	----	----	XXX	----
VHA	45	-----	4542	213	XXX

Se observa que la cobertura de mosaico agropecuario cambió en más de 31200 ha, convirtiéndose en cobertura de vegetación herbácea y arbustiva, como se puede observar también en las figuras 19 y 20.

Figura 19

Cobertura y uso de suelo 2008

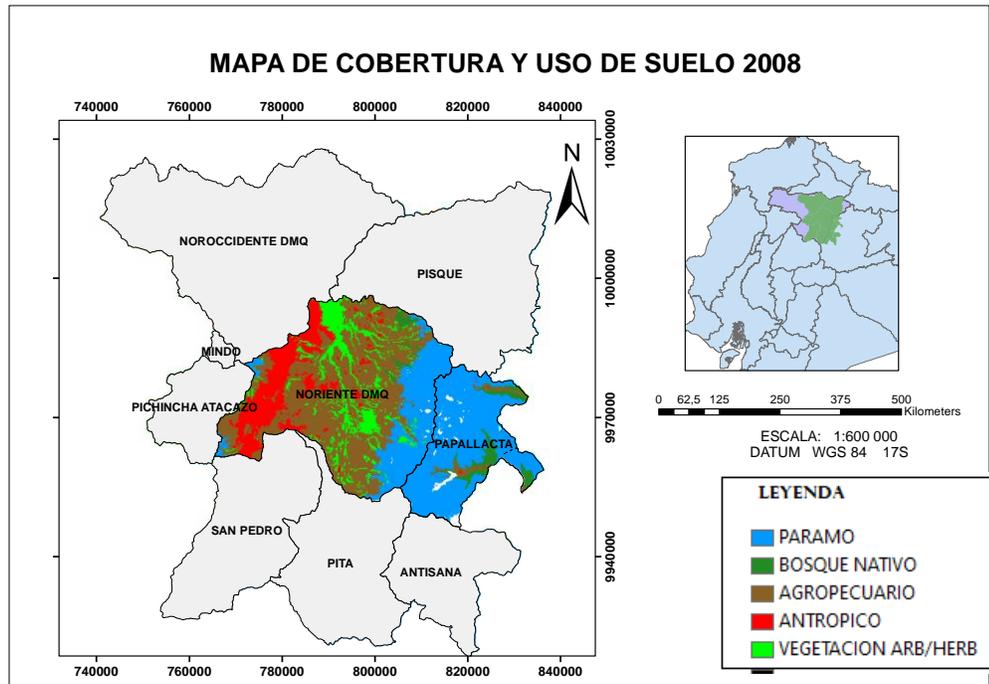
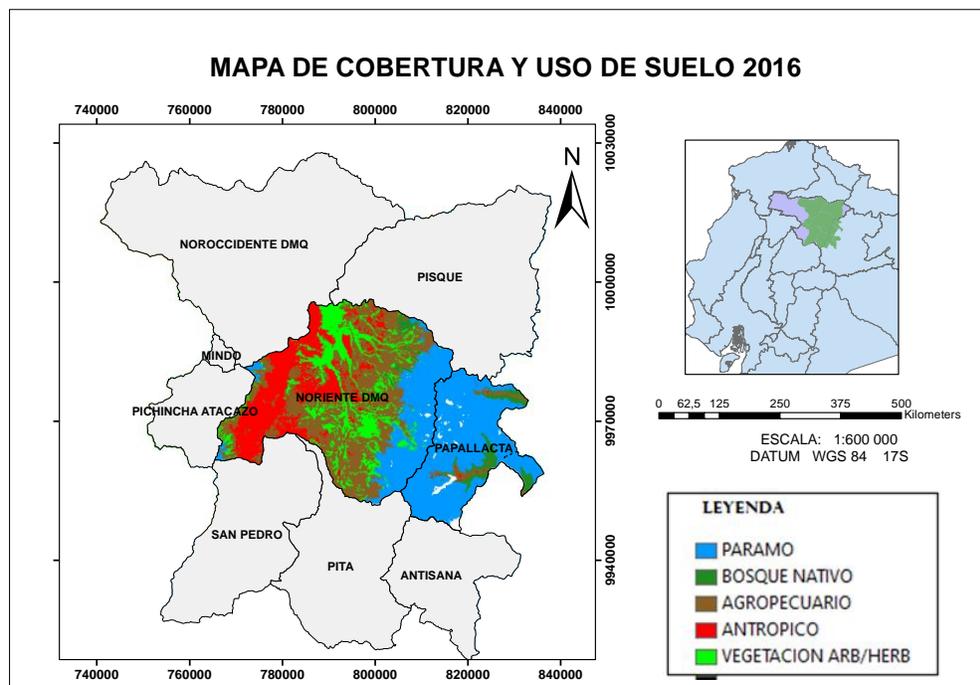


Figura 20

Cobertura y uso de suelo 2016



Sin embargo, esto podría deberse a un error de clasificación de las imágenes satelitales analizadas o a un error en el procesamiento informático posterior a dicho análisis en generación de los mapas de CUS 2008 y 2016.

En el trabajo realizado por Silva (2020), en el que realiza un análisis de la cobertura y uso de suelo del DMQ de 1990 al 2010 mediante el procesamiento de imágenes satelitales, también observa que la vegetación herbácea y arbustiva incrementa en más de 10.200 ha durante el periodo de análisis. Por otro lado, en el trabajo realizado por Ercole & Metzger (2015), en el que se lleva a cabo un estudio de la vulnerabilidad de los ecosistemas representativos del DMQ, se determinó que la vegetación de arbustales secos y relictos de bosque seco en la cercanía del área urbana tiene un incremento de más de 17.000 ha en un periodo de 23 años. Sin embargo, también señala que podría existir una sobreestimación de la cobertura de VHA, ya que este tipo de vegetación podría corresponder a zonas de cultivo o plantaciones de bosques exóticos. Es atípico que los datos muestren un incremento de cobertura, ya que es evidente que la extensión del ecosistema natural de riberas del DMQ se ha reducido significativamente en las últimas décadas por la gran expansión que la mancha urbana ha tenido en este ecosistema.

4.2 Variables explicativas espaciales de mayor relevancia

Para la determinación de la influencia de cada variable en las diferentes transiciones de cambio de uso y cobertura de suelo, se observaron los rangos y coeficientes de pesos de evidencia obtenidos de sus modelos. El eje x representa la variable de estudio y el eje y el peso para cada rango.

Como se ha mencionado anteriormente, los coeficientes de pesos de evidencia pueden ser positivos o negativos; esto depende del grado de atracción o repulsión que tiene cada variable en las transiciones. En el presente estudio solo se analizan 3 de las

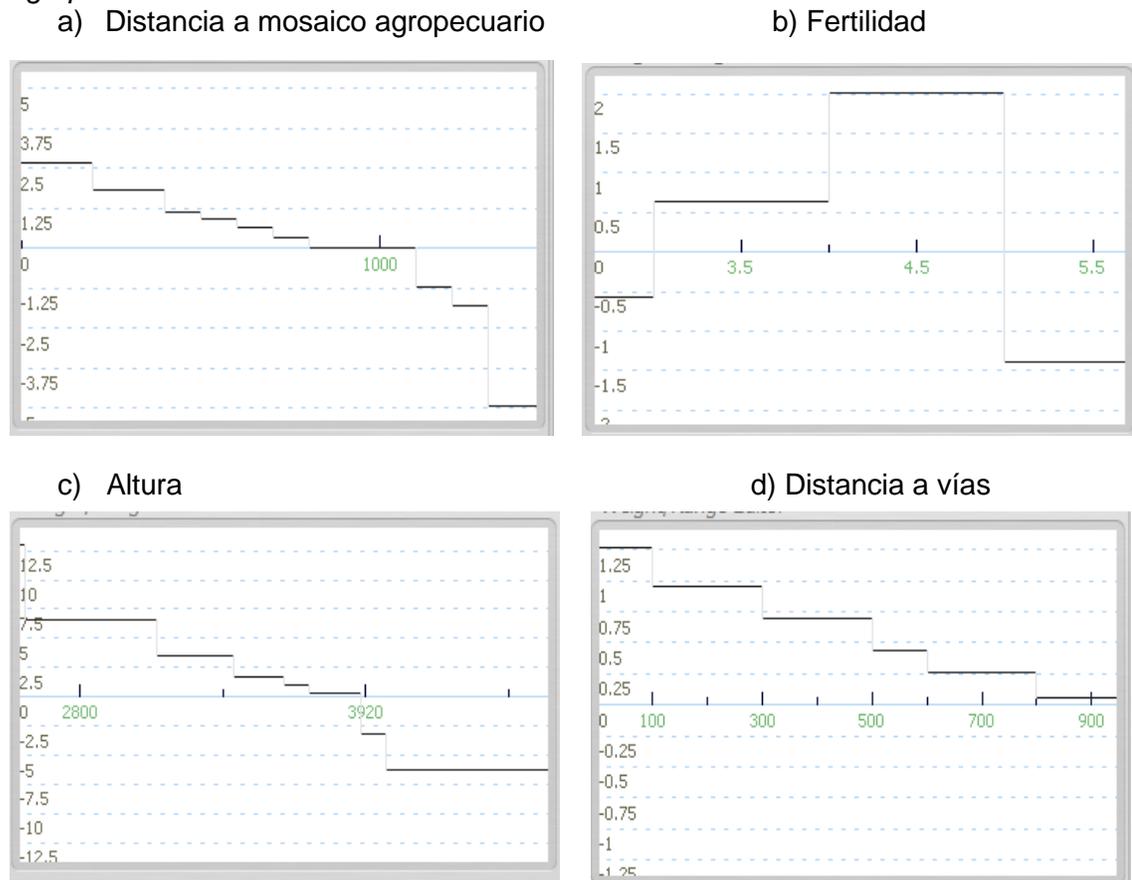
9 transiciones que muestra el modelo, puesto que el objetivo de análisis son las zonas de recarga hídrica del DMQ, es decir, los cambios de uso y cobertura que se producen y pueden afectar la funcionalidad ecosistémica de los páramos y bosques.

4.2.1 Transición de páramo a mosaico agropecuario

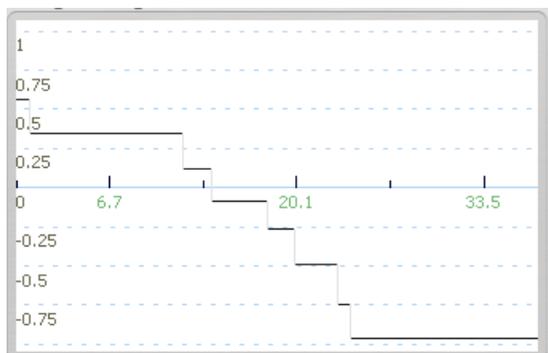
Esta transición presenta pesos de evidencia positivos en las 12 variables analizadas en el modelo. En la figura 21 se presentan las variables físico-ambientales y socioeconómicas que mayor influencia indican.

Figura 21

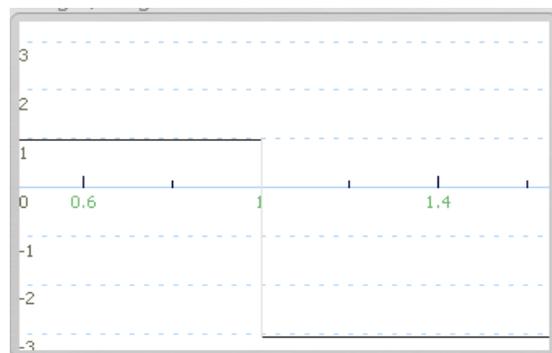
Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de páramo a mosaico agropecuario



e) Pendiente



f) Áreas de conservación hídrica



En el caso de la distancia a mosaico agropecuario o zonas ya deforestadas, se observa que las distancias menores a 800 metros presentaron un peso positivo, siendo 2,67 el más alto para distancias entre 0 y 200 metros; es decir, la cercanía al mosaico agropecuario favorece el cambio de cobertura de vegetación de páramo hacia el uso de suelo en actividades agropecuarias. La variable fertilidad divide el suelo en 4 categorías: 1 (fertilidad muy baja), 2 (fertilidad baja), 3 (fertilidad media) y 4 (fertilidad alta). Al analizar el gráfico se observa que, efectivamente, los suelos que están en las categorías 3 y 4 presentan pesos positivos, siendo los de la categoría 4 los más propensos a ser usados en actividades agropecuarias con un peso de 2,00. La variable altura es la de mayor influencia en esta transición e indica que las áreas que se encuentran hasta los 3600 msnm presentan valores positivos, donde las zonas que están entre los 2800 y 3100 msnm son las de mayor peso con 6,5, al igual que lo que sucede con la variable de pendiente que muestra pesos positivos en los terrenos que tienen pendientes entre 0 y 14 grados. La distancia a vías también es un factor importante en esta transición, puesto que las zonas que están a distancias menores a 800 metros favorecen esta transición con un peso de 1,26.

Todas las variables categóricas enfocadas al establecimiento de zonas de protección como: áreas de conservación hídrica ACH, acuerdos de conservación, restauración activa y pasiva (zonas establecidas por FONAG y EPMAPS), SNAP y socio bosque (zonas de protección establecidas por MAE) presentan resultados similares donde las áreas que están fuera de las zonas de protección tienen un peso cercano a cero, es decir, que no influyen de ninguna forma en la transición. Sin embargo, las zonas que forman parte de las zonas de protección presentan pesos negativos, es decir, que repelen la transición de páramo a mosaico agropecuario. Cabe mencionar que los gráficos indican que las zonas de protección que mayor efecto de conservación tienen son las que se encuentran establecidas como áreas de conservación hídrica con un peso de -3.06, seguido por zonas que están dentro del SNAP con -1.18.

No se han encontrado estudios que determinen el CCUS con Dinámica EGO en ecosistemas de páramo. Sin embargo, el trabajo realizado por Osorio et al. (2015) en su “Análisis y modelación de los procesos de deforestación en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México” indica que la altitud, la distancia a carreteras, la distancia a localidades y, sobre todo, la pendiente del terreno, fueron indicadores importantes para explicar la deforestación. Esto coincide con lo que muestra el modelo en el presente estudio, con respecto a las variables de distancia a vías, altura y pendiente, pero no coincide en la influencia de la variable de fertilidad del suelo, relación que sí se ha reportado en otras investigaciones como la de Tang & Chen (2007).

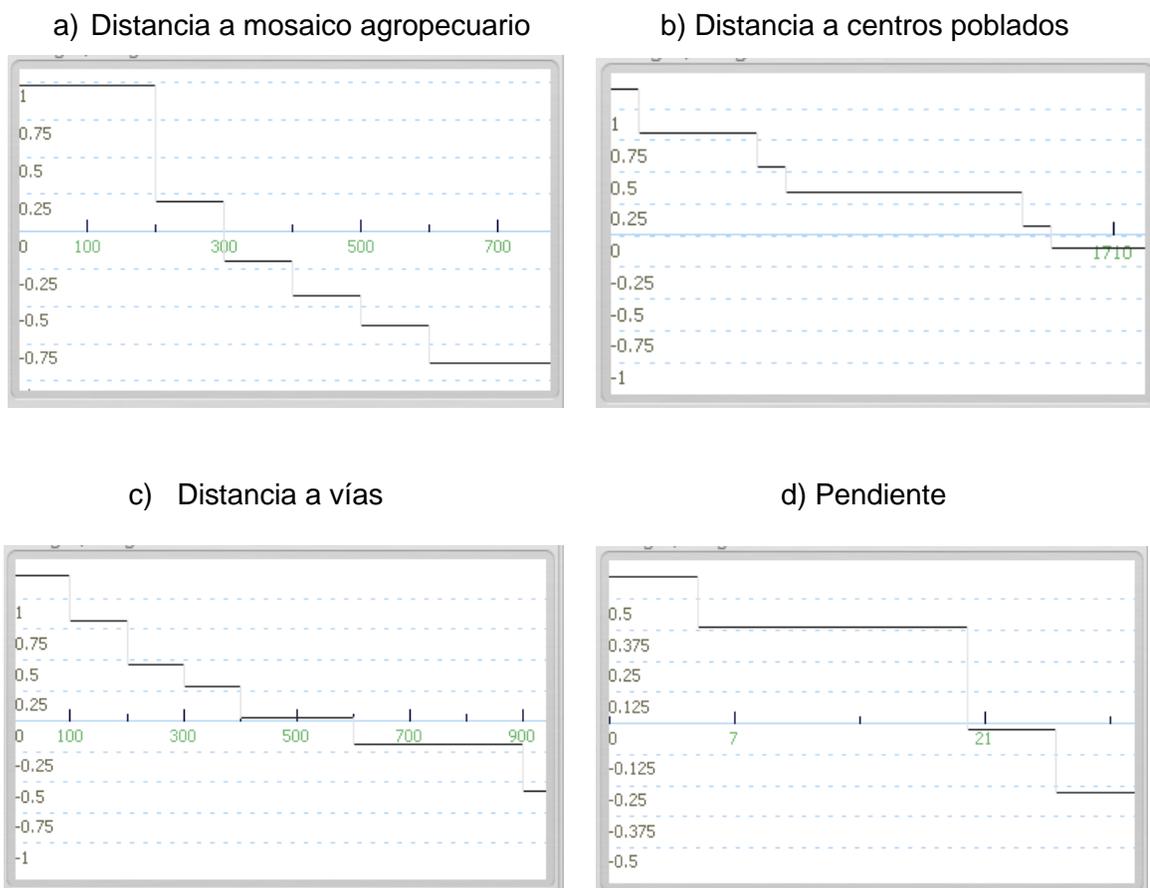
4.2.2 Transición de bosque nativo a mosaico agropecuario

Alrededor del 12% de la zona de estudio tiene cobertura vegetal de bosques nativos que están ubicados principalmente en el noroccidente del DMQ. Sin embargo, presentan una dinámica de uso similar a la que se desarrolla en los páramos que

rodean la ciudad de Quito. Las variables con mayor influencia en esta transición se presentan en la figura 22.

Figura 22

Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de bosque nativo a mosaico agropecuario



La distancia a mosaico agropecuario obtuvo pesos positivos que favorecen el cambio hasta distancias menores a 300 metros. El peso más alto fue de 0,97 que es bajo en relación con lo que sucede en la transición de PA a MA, donde la misma variable tenía un valor de 2,67. Esto puede deberse a que la deforestación en páramos generalmente responde a incendios de grandes áreas que son provocados para posteriormente arar y sembrar. En cambio, la deforestación de zonas de bosque se da principalmente por el interés económico de la venta de madera. La variable distancia a

centros poblados tiene mayor influencia en este tipo de transición: presenta pesos positivos en distancias menores a 1500 metros y las distancias menores a 100 metros tienen pesos de 1,15. La distancia a vías también es un factor que influye en este tipo de transición, puesto que disminuye los costos de transporte de la madera. El gráfico indica que las zonas que están a distancias menores a 400 metros tienen pesos positivos y las distancias mayores a 1000 metros repelen esta transición con un peso de -1.69. En cuanto a la variable de pendiente, se puede ver que este tipo de transición se da en pendiente de hasta 25 grados, lo que aumenta el rango geográfico de deforestación en bosques.

Las variables de ACH, restauración activa y pasiva, y acuerdos de conservación fueron eliminadas en esta transición puesto que el FONAG no cuenta con áreas de protección dentro de la categoría de bosque. Sin embargo, el ministerio de ambiente del Ecuador sí cuenta con zonas bajo la categoría de SNAP y socio bosque que se encuentran en el noroccidente de Quito. El modelo indica que estas variables tienen un peso negativo considerable (-12,53), lo que significa que funciona positivamente en la disminución de procesos de deforestación.

De igual forma, Campos (2018), en su estudio con Dinámica EGO en la cuenca Cupucuy al sur del Ecuador que analiza el CCUS en las coberturas de bosque, tierra agropecuaria, zona antrópica y cuerpos de agua, indica que para la transición de bosque a tierra agropecuaria, las variables de mayor influencia son las de distancias a centros poblados, distancia a pozos petroleros y distancia a vías, las cuales presentan pesos de evidencia positivos, siendo la variable de distancia a centros poblados la de mayor influencia con pesos mayores a 2.

Con respecto a la distancia a vías y la distancia a centros poblados, la deforestación ocurre con mayor frecuencia en áreas accesibles, es decir, sitios cercanos a poblados o carreteras, tal como lo reportan Gellrich & Zimmermann (2007). Por su

parte, la pendiente se relaciona negativamente con la deforestación, es decir, a menores pendientes, mayores probabilidades de deforestación. De igual forma, esta relación se ha reportado en otras investigaciones como la de Nagendra & Southworth (2002).

El modelo indica que también existen procesos de recuperación de la cobertura vegetal en páramo y bosques, pues hay transiciones de mosaico agropecuario a páramo con una tasa de cambio anual de 1.49 y de mosaico agropecuario a bosque con 23.8. Esta gran diferencia puede deberse a que los procesos de recuperación en zonas de páramo son lentos por efectos de las condiciones ambientales de este tipo de ecosistema.

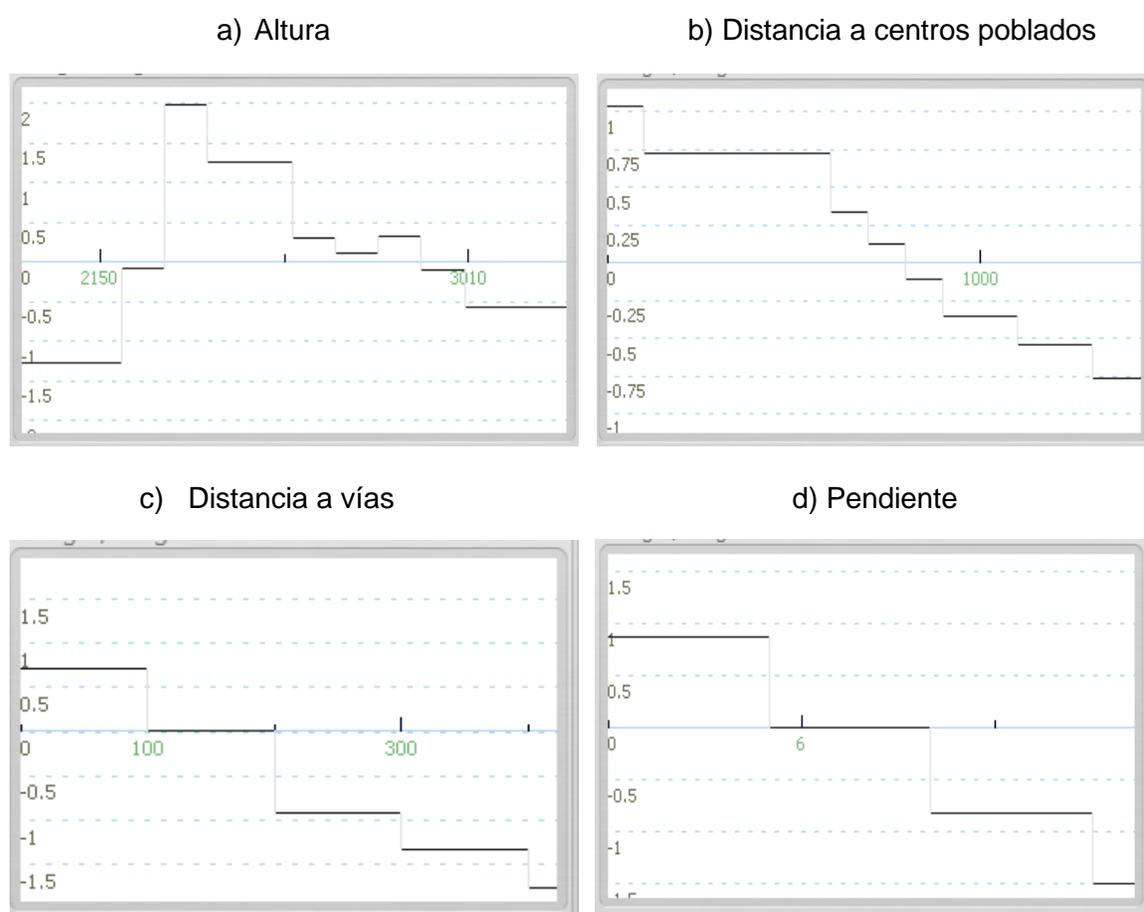
Por el contrario, en zonas de bosque que están por debajo de los 2500 msnm donde los procesos son mucho más rápidos, estas transiciones están influenciadas principalmente por las variables de fertilidad, pendiente y distancia a ríos. Las zonas con suelos poco fértiles facilitan la recuperación de la vegetación natural, al igual que pendientes superiores a 17 grados. En el caso de la transición de MA a BN, se puede observar que las variables SNAP y socio bosque también tienen influencia positiva en este tipo de transición. Los acuerdos por parte del MAE con propietarios privados y comunitarios que establecen zonas de protección estricta con la eliminación de tensionantes como incendios, ganado o extracción de madera, permiten que la recuperación natural de la vegetación sea visible a pesar de que el periodo de 8 años es corto. Con base en lo anterior, la mayoría de las variables ambientales reportadas en este estudio, y en estudios previos, sugieren que los factores ambientales y de accesibilidad juegan un papel importante en la determinación o predisposición de las condiciones iniciales en las que los cambios de cubierta vegetal y uso del suelo se llevan a cabo.

4.2.3 Transición de mosaico agropecuario a zona urbana/infraestructura

Esta transición es una de las que presenta mayor tasa de cambio anual con 0,83%. El crecimiento poblacional y, por tanto, de infraestructura de vivienda es evidente y según el modelo, está influenciada por las variables: altura, distancia a centros poblados, distancia a vías y pendiente como se muestra en la figura 23.

Figura 23

Variables que tuvieron mayores pesos en la transición de mosaico agropecuario MA a zona urbana ZU



La ciudad de Quito y sus valles está constituida en un rango altitudinal que va desde 2300 a 2850 msnm aproximadamente, lo cual coincide con lo que muestra el modelo con la variable de altitud, que indica que las zonas que están entre 2300 y 3000

msnm tienen pesos de evidencia positivos de 1.24. Sin embargo, las zonas entre 2300 y 2400 msnm son las que mayor incremento poblacional han tenido durante el periodo en estudio con un valor de 1.9. Fuera de esos rangos, se produce una repulsión al crecimiento de ZU. La distancia a centros poblados es una variable que influye en el cambio de mosaico agropecuario a zona urbana hasta distancias menores a 800 metros, pero las distancias menores a 100 m tienen el mayor peso con 1,03. Para la variable de distancia a vías, valores menores a 100 m obtuvieron pesos positivos que favorecen el establecimiento de uso urbano con un peso de 0.70. Finalmente, la variable de pendiente muestra valores positivos de 0,86 que influencia en zonas que presentan pendientes menores a 8 grados, aunque las zonas de mayor cambio están ubicadas en áreas que no sobrepasan los 5 grados de pendiente. Las variables de distancia a mosaico agropecuario y ríos no presentan ningún tipo de influencia en esta transición al igual que todas las variables categóricas.

Bruna (2015), a través del software Dinámica Ego, analiza el proceso de expansión urbana de la Región Metropolitana de Santiago y determina que el mayor porcentaje de los cambios que ocurren en el área de estudio ocurre en la transición agrícola – urbano. Además, muestra que al igual que en el presente estudio, la variable pendiente tiene peso positivo en zonas de hasta 5 grados de pendiente con valores de 0.02. Es decir, que la mayor cantidad de celdas con uso agrícola poseen el rango de 0 a 5 grados, y, por lo tanto, a pesar de que la mayoría de los cambios en esta transición ocurren en ese rango, estos cambios representan una proporción baja del total de celdas agrícolas con este rango de pendiente. Las variables de distancia a vías y distancia a uso urbano también fueron variables que presentaron pesos positivos importantes y se usaron en el modelo de proyección al año 2030 de la ciudad de Santiago de Chile.

Otro caso de estudio es el realizado por Arellano & Castro(2019) para el cantón Ibarra, en la provincia de Imbabura, Ecuador, en el que se observó que la variable de distancia a zonas pobladas tiene un peso máximo de 3,1 en distancias menores a 20 m aunque tiene influencia positiva hasta los 240 m, mientras que en el presente estudio la variable tiene un peso máximo de 1,03 para distancias menores a 100 metros y una influencia hasta los 800 m. Esto puede deberse a que la ciudad de Ibarra tiene un crecimiento más enfocado a la expansión de la zona urbanizada ya existente, mientras que en Quito, al ser una ciudad más grande y topográficamente más irregular, puede existir la creación de parches. La variable de distancia a vías presenta resultados similares para ambos estudios, tiene pesos de cercanos a 1 en distancias de hasta 110 m.

4.3 Correlación entre variables

Como resultado del cálculo de la correlación espacial, se obtuvo el estadístico de Cramer para todas las relaciones entre las 12 variables utilizadas en cada transición. La tabla 10 indica los tres valores más altos obtenidos por cada transición.

Tabla 10

Estadístico de Cramer entre variables

Transición	Primera variable	Segunda variable	Índice de Cramer
PA a MA	Distancia a MA	Cultivos	0,485
	SNAP	Distancia a centros poblados	0,481
	SNAP	Distancia a vías	0,479
BN a MA	SNAP	Vías	0,478
	Distancia a MA	SNAP	0,472
	Distancia a MA	Cultivos	0,461
MA a PA	SNAP	Cultivos	0,467
	SNAP	Distancia a centros poblados	0,452
	SNAP	Vías	0,449
MA a BN	SNAP	Cultivos	0,459

Transición	Primera variable	Segunda variable	Índice de Cramer
	SNAP	Alturas	0,426
	Fertilidad	SNAP	0,411
MA a ZU	SNAP	Vías	0,482
	Fertilidad	SNAP	0,411
	SNAP	Distancia a centros poblados	0,393
MA a VHA	SNAP	Vías	0,444
	Fertilidad	SNAP	0,411
	Alturas	Cultivos	0,382
VHA a PA	SNAP	Alturas	0,499
	Distancia a MA	Cultivos	0,487
	SNAP	Distancia a centros poblados	0,426
VHA a ZU	SNAP	Distancia a centros poblados	0,490
	SNAP	Vías	0,484
	Distancia a MA	SNAP	0,460
VHA a ZU	Distancia a MA	Alturas	0,501
	Fertilidad	Alturas	0,484
	Distancia a MA	Fertilidad	0,470

En la aplicación de estos métodos al ámbito de las geociencias, no se indica un límite de tolerancia del índice de Cramer, pero existen algunos estudios que consideran el valor de 0.50 (Macedo et al. 2013; Cleary. 2019 ; Tramontina, 2015).

A pesar de que en ninguna de las transiciones las variables muestran índices de cramer mayores a 0,5, se puede observar que para casi todas las transiciones las variables SNAP y distancia a mosaico agropecuario tienen los índices más altos y cercanos a 0.5, por lo que se decidió eliminar la variable SNAP del modelo. El resto de las variables presentaron una correlación aún más baja, comprobando así la independencia de las variables y conservándolas a todas dentro del modelo.

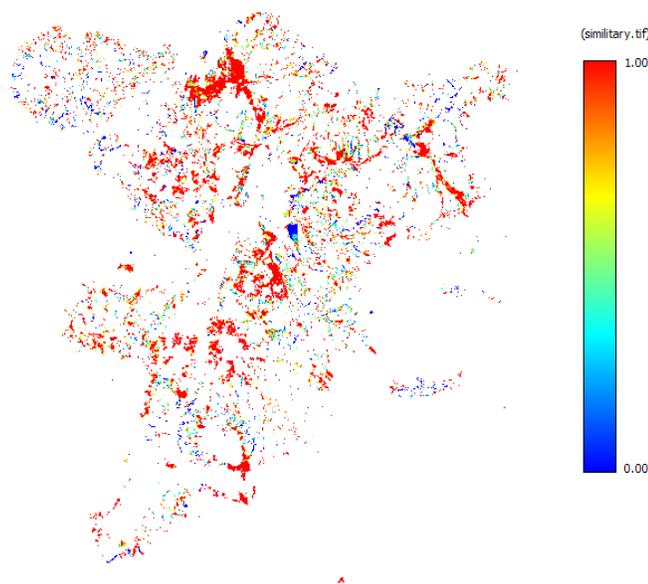
4.4 Simulación y validación del modelo

Se realizó la validación usando dos tipos de función de decaimiento. La primera es *Calc Reciprocal Similarity Map*, cuyo mapa resultante muestra solo las celdas que

han cambiado. La similaridad más alta probable es la de factor 1, la cual se logra cuando existe total coincidencia entre un patrón verificado en la realidad y el patrón simulado. Como se observa en la figura 24, y considerando un factor de 0,5 a 1 como valor con alto nivel de predicción, el modelo fue capaz de predecir con gran acierto varios patrones de expansión, especialmente aquellos que se desarrollan como fragmentos separados de la mancha urbana principal. Las zonas en color azul indican que tienen alta variabilidad en el área de estudio, ya que en los sectores donde no existe coincidencia entre los patrones de expansión se obtuvieron valores cercanos a 0. Las zonas de color rojo representan las de mayor similitud y las zonas en blanco son aquellas que no presentan cambios en el periodo de estudio. Estos valores de muy baja o nula similaridad entre ambos mapas pueden obtenerse tanto por la existencia de una omisión como de una comisión en la proyección de los patrones de cambio. Una omisión ocurre cuando existe una expansión verificada en el año 2016, que el modelo no fue capaz de proyectar; y, por el contrario, una comisión ocurre cuando se proyecta un patrón de cambio que no ocurrió.

Figura 24

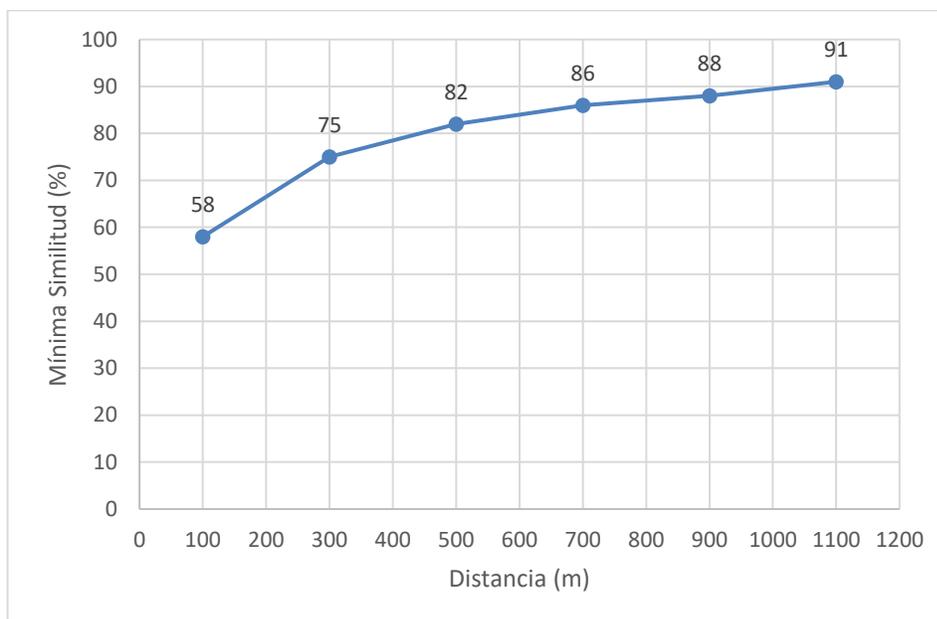
Mapa de similitud aplicando la función exponencial de decaimiento



La segunda corresponde al modelo de validación de la simulación usando ventanas múltiples y, como se puede observar en la figura 25, la similitud entre el mapa simulado (2016) y el observado (2016) aumenta a medida que lo hace el tamaño de la ventana. En un área de 100 x 100 m o 1 ha (tamaño de ventana de 1 píxel), la similitud fue entre 0.58 y 0.67%, mientras que en un área de 1100 x 1100 m o 11 ha (tamaño de ventana de 11 píxeles), la similitud fue de 0.91%. Piontekowski et al. (2012) sugiere que la obtención de valores por encima de un 50 % en la mínima similitud entre los mapas comparados sería satisfactoria para la validación del modelo.

Figura 25

Gráfico de validación con ventana múltiples del mapa simulado 2016



Adicionalmente, se calculó el porcentaje de error (tabla 11) al comparar las áreas de las zonas del mapa simulado versus el mapa observado del 2016, y se encontraron errores de menos del 1% en todas las categorías, siendo la categoría de bosque nativo la que presenta mayor error con 0.8% y la categoría de mosaico agropecuario la de

menor error con 0.1%. Es decir, que se puede asumir un nivel de confianza mayor al 95%, lo que permite aceptar el modelo generado.

Tabla 11

Porcentajes de error del mapa simulado de cobertura y uso de suelo del 2016

Uso/Cobertura	Mapa observado (ha)	Mapa simulado (ha)	Error%	Error (ha)
PA	222.495	222.337	0,071	158
BN	81.024	80.353	0,828	671
MA	232.222	232.191	0,013	31
ZU	55.580	55.904	0,582	324
VHA	82.284	82.820	0,651	536

4.5 Proyección al año 2030

Después de calibrar y validar el modelo, se obtuvo la simulación al año 2030, aplicando los insumos que se obtuvieron en los puntos anteriores. La tabla 12 y la figura 25 muestran el número de hectáreas y los porcentajes que ocupan las diferentes zonas con respecto al área total en estudio para los años 2008, 2016 y 2030.

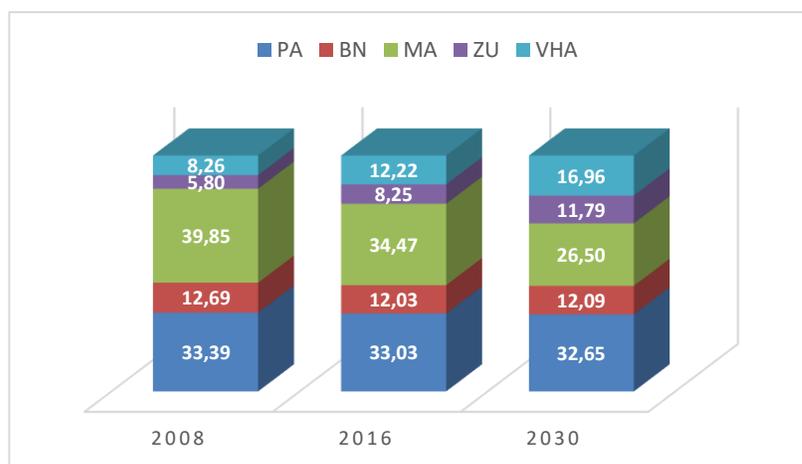
Tabla 12

Análisis multitemporal de cobertura y uso de suelo (2008, 2016 y 2030)

Uso/Cobertura	2008	Superficie (%)	2016	Superficie (%)	2030	Superficie (%)
Páramo	224946	33,39	222495	33,03	219956	32,65
Bosque nativo	85478	12,69	81024	12,03	81450	12,09
Mosaico agropecuario	268422	39,85	232222	34,47	178529	26,50
Zona urbana	39099	5,80	55580	8,25	79427	11,79
Vegetación herbácea y arbustiva	55660	8,26	82284	12,22	114243	16,95
TOTAL	673605		673605		673605	

Figura 25

Dinámica de la variación de superficies (%) para los años 2008,2016 y 2030



La zona de estudio tiene un total de 673.605 hectáreas de las cuales, en el 2008, se destaca el área ocupada por la cobertura de mosaico agropecuario (39.85%) seguida por la cobertura de páramo (33.39%) y bosque nativo con el (12, 69%). Sin embargo, el modelo indica que para el 2030, la cobertura de mosaico agropecuario disminuirá considerablemente a (26.50%), mientras que la vegetación herbácea y arbustiva aumentará su ocupación de territorio de (8.26% a 16.395%). La tabla 13 muestra los cambios en área y porcentajes que se estiman en el periodo 2016 -2030 para cada tipo de cobertura y uso de suelo.

Tabla 13

Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo (2016-2030)

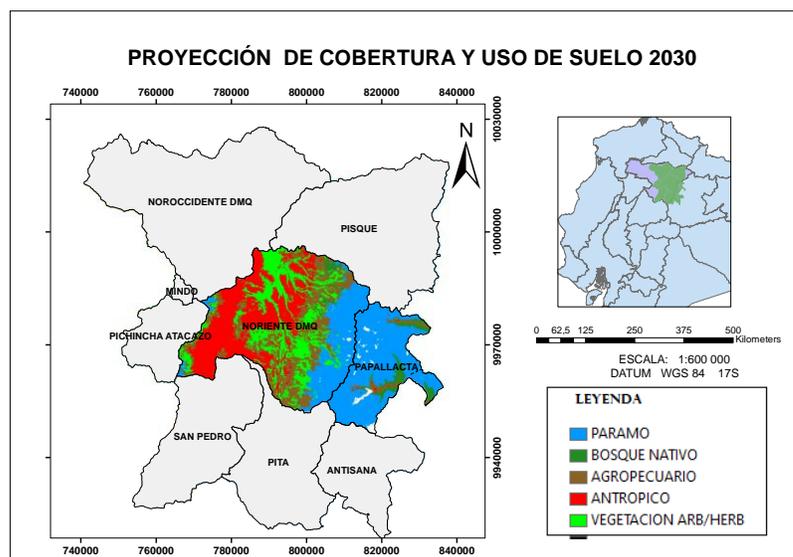
Uso/Cobertura	2016	2030	Cambio (ha)	Cambio (%)
Páramo	222495	219956	(-)-2539	-1,14
Bosque Nativo	81024	81450	(+)-426	0,53
Mosaico Agropecuario	232222	178529	(-)-53693	-23,12
Zona Urbana	55580	79427	(+)-23847	42,91
Vegetación herbácea y arbustiva	82284	114243	(+)-31959	38,84

Se observa que la zona urbana, los bosques y la vegetación herbácea y arbustiva de zonas que están en los alrededores de la ciudad tienen un incremento, mientras que las zonas de páramo, y mosaico agropecuario pierden superficie. Tomando como punto de inicio el año 2016, se puede afirmar que la vegetación natural de páramo para el año 2030 tendría una pérdida de 2539 ha (1,14%) y las zonas de bosque aumentarían 426 ha, que es casi la misma cantidad de bosques existentes en el año 2008; es decir, que habría un proceso de regeneración vegetal. Las áreas de mosaico agropecuario tienden a disminuir y para el 2030 se esperaría que disminuya en 53.693 ha, es decir, alrededor del 23%. Esto puede deberse a que existe una evidente tendencia de convertir esos suelos en zonas urbanas, puesto que el modelo indica que esta categoría tendrá un aumento de 23.847ha.

Las zonas de vegetación herbácea y arbustiva presentan la mayor probabilidad de cambio con tendencia al aumento en sus áreas. Se espera que para el 2030 sumen 31.959 ha, es decir, 38 % más del territorio que ocupaba en el 2016. En la figura 26 se observa de manera gráfica la cobertura y uso de suelo proyectada al 2030.

Figura 26

Mapa de cobertura y uso de suelo 2030



Si realizamos un análisis por unidad hidrográfica, en la tabla 14 se observa que en las unidades del Antisana, Papallacta y Mindo, la cobertura vegetal natural de bosque y páramo ocupan casi la totalidad del área y que para el 2030, tendrían una afectación de menos del 0.08%. Las unidades del Pita, Noroccidente y Atacazo podrían estar afectadas en alrededor del 1,5% en sus zonas de páramo. Sin embargo, en las unidades hidrográficas San Pedro y Nororiente se observa que para el 2030 podrían estar altamente intervenidas con el 5 % y 2,5% respectivamente, afectando la vegetación natural de páramo en las zonas de recarga hídrica pasando a ser zonas de mosaico agropecuario.

Tabla 14

Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo (2016-2030) por unidad hidrográfica

Unidad Hidrográfica	Año	Páramo	Bosque Nativo	Mosaico Agropecuario	Zona Urbana	Vegetación herbácea y arbustiva
MINDO	2016	38,46	60,85	0,14	0,00	0,55
	2030	37,88	60,85	0,72	0,00	0,55
PAPALLACTA	2016	85,65	9,63	4,27	0,4	0,05
	2030	85,62	9,63	4,22	0,43	0,1
NOROCCIDENTE	2016	3,31	30,68	42,68	6,1	17,23
	2030	3,26	30,93	32,95	7,64	25,23
PISQUE	2016	33,74	1,95	41,53	5,68	17,1
	2030	33,67	1,95	33,76	8,26	22,36
ANTISANA	2016	90,70	9,27	0	0,01	0,02
	2030	90,63	9,27	0,07	0,01	0,01
PITA	2016	77,26	0,24	16,98	0,63	4,9
	2030	76,03	0,24	15,7	1,52	6,51
SAN PEDRO	2016	16,95	3,91	59,82	11,31	8,01
	2030	15,93	3,91	50,82	17,91	11,43
ATACAZO	2016	17,95	49,14	24,61	0,05	8,24
	2030	17,61	49,26	17,02	0,25	15,86
NORORIENTE	2016	19,37	1,23	39,03	22,53	17,84
	2030	18,88	1,23	24,43	32,09	23,37

4.6. Afectaciones del cambio de uso de suelo en la disponibilidad de agua

Los cambios en el uso del suelo y cobertura de la tierra son las principales razones de la alteración hidrológica en los Andes tropicales. Sin embargo, cuantificar sus impactos resulta complicado debido a la diversidad extrema de condiciones meteorológicas, lo que se combina con el vacío de conocimiento acerca de los procesos hidrológicos a escala local. En este sentido, Bravo (2020) realiza la evaluación de la herramienta de simulación del recurso hídrico Hydro-BID para la cuantificación de la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayllabamba y las unidades hídricas aportantes de agua al DMQ, generando así un estimado de los caudales disponibles de la presente zona de estudio que se muestra en la tabla 15.

Tabla 15

Promedio multianual mensual de caudal simulado por HydroBID en las subcuencas del área de influencia EPMAPS-FONAG

SISTEMA HÍDRICO	EXTENSIÓN (Km²)	Caudal 2010 (l/s)	Caudal 2016 (l/s)	Disponibilidad de agua mm/año
Papallacta	484,5	15800	18000	3196
Pita	725,54	12960	13110	1423
San Pedro	753,9	13000	11100	535
Atacazo	327,22	5140	4800	1037
Noroccidente DMQ	1548,77	47400	41100	268
Antisana	473,96	10800	11900	1261
Pisque	1127,49	7100	5900	227
Mindo	39,3	590	600	324
Nororiente DMQ	1349,13	35700	3100	338
		148490	109610	

Nota. Tabla recuperada de Bravo, 2020.

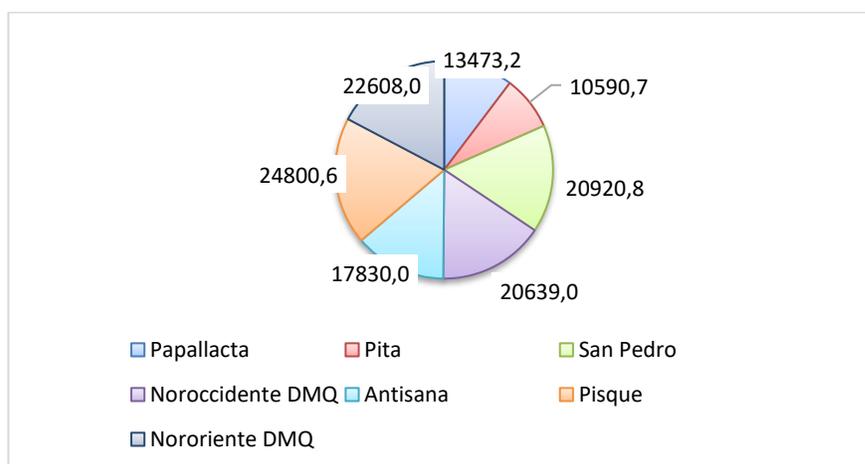
Se observa que entre los años 2010 y 2016 existe una disminución de caudal en un 26,1% y que las unidades hídricas con mayor cantidad de agua disponible son

aquellas localizadas en la zona oriental cuyo drenaje se dirige hacia la Amazonía. Es así que la unidad Papallacta es la que provee mayor cantidad del recurso hídrico con 3196 mm/año. En contraste, las cuencas Pisque, Mindo, Nororiente y Noroccidente del DMQ presentan menor disponibilidad de agua y, particularmente, la unidad de hidrográfica Pisque tiene una gran extensión con 1127,49 Km² y presenta la disponibilidad de agua más baja con 227 mm/año.

En cuanto a la demanda, esta depende en gran medida del conocimiento de los caudales concesionados por la SENAGUA, ya que contar con la base de autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua permite cuantificar el caudal por tipo de uso de agua y por cada unidad hídrica, como muestran las figuras 27 y 28 con datos del año 2010. El mayor volumen de caudal otorgado está en las unidades de Pisque, Nororiente del DMQ, San Pedro y Noroccidente del DMQ. En las unidades hídricas orientales, el tipo de uso con mayor volumen concesionado se destina a la provisión de agua para consumo humano.

Figura 27

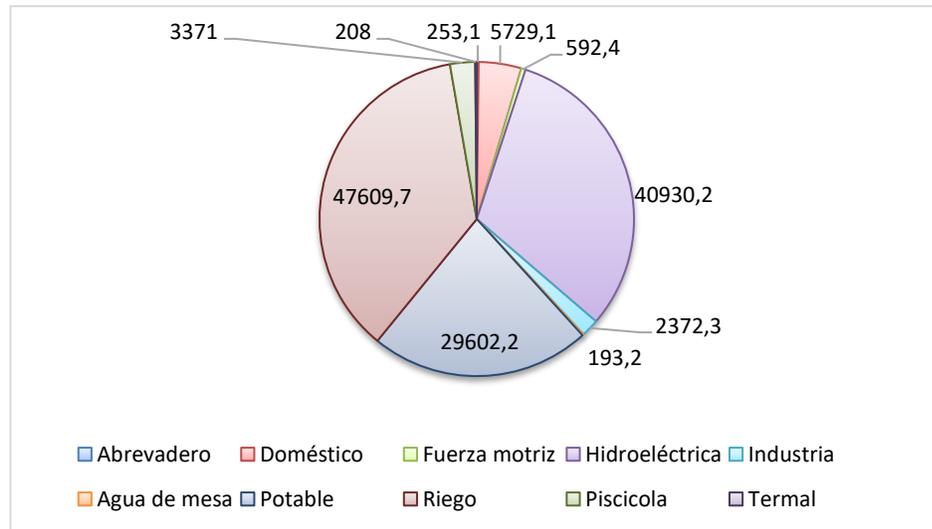
Volumen de agua (l/s) otorgados por SENAGUA



Nota. Gráfico recuperado de la base de autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua SENAGUA, 2010.

Figura 28

Volumen de agua (l/s) por uso otorgados por SENAGUA



Nota. Gráfico recuperado de la base de autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua SENAGUA, 2010

Haciendo un análisis de oferta y demanda del año 2010, se puede observar que la oferta total es de aproximadamente 148.490,0 l/s y la demanda de 130.862 l/s, lo que significa que a nivel general, no existía stress hídrico, pero si analizamos por unidad hidrográfica, observamos que las unidades hídricas de Pisque y San Pedro tienen un déficit en la oferta de agua.

Por otro lado, el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) es una de las áreas más densamente pobladas del Ecuador, con las consecuentes presiones sobre la demanda de agua que en el 2010 era de aproximadamente el 22% de total concesionado. De acuerdo con los estudios de población urbana y rural realizados por EPMAPS en 2011, durante los estudios de actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado para el DMQ, la población para el 2030 podría ser 3,575,829 habitantes como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

Resumen de Proyecciones de Población (habitantes) del DMQ

	2010	2020	2030
Distrito Urbano de Quito	1736541	2025125	2439467
Parroquias Rurales	380676	556364	677055
Parroquia Urbanas	268288	381112	459307
Total DMQ	2385605	2962601	3575829

Nota. Recuperado de Hanzen & Sawyer, 2011.

La población en el año 2010 era de alrededor de 2.4 millones de habitantes, y para brindar el servicio de agua potable la EPMAPS, contaba con un caudal de 9.4 m³/s. Actualmente, el caudal seguro de agua disponible en las fuentes aprovechadas en el DMQ es de 8.6 m³/s, aproximadamente (EPMAPS, 2020), y dota de agua al 98% de la población del DMQ. El caudal disponible ha empezado a ser insuficiente de manera que ya no se pueden satisfacer nuevas demandas. Ante esta reducción, las autoridades se ven forzadas a realizar nuevos proyectos como el proyecto Ramal Chalpi Grande - Papallacta que ya se encuentra en marcha, donde se estima captar un caudal de 2.2 m³/s del río Chalpi Grande y sus afluentes, así como conducirlo al sistema Papallacta para garantizar el suministro de agua al DMQ hasta el año 2040 (EPMAPS, 2016).

Si bien es cierto que la oferta hídrica podría solventarse con la creación de nuevos proyectos, actualmente ya se observa que en proyectos ya existentes, la reducción de oferta de agua cruda se reduce en aproximadamente un 30% desde 1998 hasta el año 2010, y este caso se repite en las distintas fuentes de abastecimiento (Proaño, 2010). Esto puede deberse al cambio climático que en los últimos años ha modificado la temporada y altitud de la siembra, expandiendo la actual frontera agrícola,

que de la mano de un incremento demográfico, ha generado un déficit en los diferentes usos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en nuestro país y principalmente, en el DMQ, las fuentes de agua más importantes son los páramos y, sin embargo, poco o casi nada se conoce sobre los procesos hidrológicos que ocurren en estos ecosistemas de montaña. Bajo esta premisa, Célleri Alvear, De Bièvre, & Vicente (2001) realizaron un estudio sobre la influencia de la cobertura vegetal en las microcuencas de páramo en el que analizaron datos de precipitación-escorrentía en dos cuencas de similares características geomorfológicas al noroeste de la ciudad de cuenca, pero con diferente cobertura vegetal: la primera, con el 86% de vegetación de pajonal, y la otra, con 98% de cobertura forestal de bosques exóticos (pinos).

Tabla 17

Resultados de análisis de efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica

Zona de estudio	Área (km)	Rango Altitudinal	Lluvia	Caudal	Coef: escorrentía	Caudal específico (l/s/ha)
Cuenca 1 (Pajonal)	1003	2980-3740	76629,99	37257,4	0,54	0,104
Cuenca 2 (Pinos)	0,59	3240-3700	42416,89	8738,66	0,22	0,035

Nota. Recuperado de Célleri Alvear et al., 2001.

En la tabla 17 se observa que existe una evidente diferencia en los valores del coeficiente de escorrentía, siendo el de la cuenca con pajonal más del doble que la cuenca de pinos, lo que significa mayor consumo de agua en los pinos, es decir, mayor evapotranspiración. La cuenca con pajonal tiene producción hídrica casi tres veces mayor que la cuenca con pinos.

Por otro lado, Ochoa (2020) realizó un análisis de las respuestas hidrológicas de tres biomas andinos (páramo, jalca y puna) frente a los principales tipos de intervenciones humanas cultivo, forestación y pastoreo.

La subcuenca de páramo estudiada por Ochoa está ubicada en la cuenca del Antisana con un rango altitudinal de 4144 a 4500 msnm y una extensión de 2.25 km². Los resultados indican que las microcuencas cultivadas responden a eventos de lluvia con caudales máximos mayores y más rápidos que las cuencas naturales, mientras que sus recesiones de caudal caen más rápido, sosteniendo caudales base menores. Esto indica una pérdida de la capacidad de regulación hidrológica. Mientras que los caudales altos son muy similares entre microcuencas pares, los caudales diarios promedio de las cuencas cultivadas son aproximadamente la mitad de aquellos de las microcuencas naturales. Y en cuanto al rendimiento hídrico, manifiesta que existió una diferencia de 142 mm/año entre el páramo natural y el cultivado.

Si bien es cierto que la respuesta hidrológica de una cuenca depende de varios factores como la precipitación, tipo de suelo, evapotranspiración, temperatura, entre otros, para el presente estudio, son datos que no nos permiten hacer un análisis real de la pérdida en la oferta hídrica que significaría el cambio de uso de suelo de páramo a mosaico agropecuario. Sin embargo, se realizó una estimación subjetiva con base en las investigaciones realizadas por Célleri Alvear et al., (2001) y Ochoa (2020).

El modelo realizado con Dinámica EGO indica que la vegetación de páramo podría perderse en un estimado de 25 km², y el estudio de Célleri Alvear et al., (2001) y Ochoa (2020) indica que al ser transformada una zona de páramo en zona de cultivo, se perdería aproximadamente la mitad de caudal de la cuenca. Es decir, que si la zona de estudio tiene una extensión de alrededor de 2225 km² de páramo y un caudal de 109610 l/s en año 2016, se puede inferir que el cambio de cobertura de páramo a cultivos significaría una disminución de 627,35 l/s aproximadamente, cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de consumo de alrededor de 301.128 personas en DMQ, que tiene un promedio de consumo de 180 l/día.

Al realizar un análisis por unidad hidrográfica en la tabla 18, se observa que las zonas de mayor pérdida de recurso hídrico son Pita, San Pedro y Nororiente del DMQ con más de 150 l/s.

Tabla 18

Cálculo de la pérdida de caudal proyectado al 2030

Unidad Hidrográfica	Área de paramo ha (2016)	Área de paramo ha (2030)	Cambio área de páramo ha (2016-2030)	Caudal 2016 (l/s)	Pérdida de caudal proyectado l/s al (2030)
Papallacta	43501	43486	15	18000	3,69
Pita	49544	48755	789	13110	194,34
San Pedro	12666	11908	758	11100	186,70
Atacazo	5446	5343	103	4800	25,37
Noroccidente DMQ	5218	5132	86	41100	21,18
Antisana	40655	40625	30	11900	7,39
Pisque	38157	38069	88	5900	21,68
Mindo	1122	1105	17	600	4,19
Nororiente DMQ	26194	25533	661	3100	162,81
	222503	219956	2547	109610	627,35

CAPÍTULO V

5. Conclusiones

Del cálculo de las tasas y las matrices de transición simple y múltiple, se evidencia que para el periodo 2008-2016 se presentan 9 patrones de cambio de uso de suelo, siendo una de las mayores transiciones la de mosaico agropecuario hacia vegetación herbácea y arbustiva con 31.287 ha (11%), seguida por la transición de mosaico agropecuario a zona urbana con 16.247 ha (6 %). En cuanto a la cobertura de páramo, se observa que presenta una transición hacia mosaico agropecuario de 2.707 ha (1,2%) y hacia vegetación herbácea y arbustiva de 90 ha (0.04%). Es decir que el constante crecimiento de la mancha urbana podría estar provocando el incremento de la frontera agrícola hacia las zonas de páramo.

Los pesos de evidencia en la calibración del modelo indican que, las variables de mayor influencia en las transiciones analizadas son altura, pendiente y distancia a centros poblados, mosaico agropecuario y vías. En el caso de las zonas de páramo que están entre los 2800 y 3100 msnm con suelos que están en las categorías 3 y 4 (fertilidad media y fertilidad alta respectivamente) presentan pesos positivos, siendo los de la categoría 4 los más propensos a ser usados en actividades agropecuarias. La pendiente también es una variable determinante en los procesos de deforestación ya que el análisis muestra que las zonas con pendientes de hasta 14 grados en páramos y 25 grados en bosques tienen altas probabilidades de cambio.

Todas las variables categóricas enfocadas al establecimiento de zonas de protección como las áreas de conservación hídrica ACH, los acuerdos de conservación,

la restauración activa y pasiva (zonas establecidas por FONAG y EPMAPS), SNAP y el socio bosque (zonas de protección establecidas por MAE), presentan resultados similares donde las áreas que están en un rango de 0 a 100 metros fuera de las zonas de protección tienen un peso cercano a cero, es decir, que no influyen de ninguna forma en la transición. Sin embargo, las zonas que forman parte de las zonas de protección presentan pesos negativos, es decir, que repelen la transición de páramo a mosaico agropecuario. Cabe mencionar que los gráficos indican que las zonas de protección que mayor efecto de conservación tienen son las que se encuentran establecidas como áreas de conservación hídrica con un peso de -3.06, seguido por zonas que están dentro del SNAP con -1.18.

La comparación de similitud de patrones espaciales entre el mapa simulado (2016) y el observado (2016) muestra que, en un área de 100 x 100 m o 1 ha (tamaño de ventana de 1 píxel), la similitud fue entre 0.58 y 0.67%, mientras que en un área de 1100 x 1100 m o 11 ha (tamaño de ventana de 11 píxeles), la similitud fue de 0.91%. lo que significa que la similitud entre los mapas comparados es satisfactoria para la validación del modelo. Además, en el cálculo del porcentaje de error se encontraron errores de menos del 1% en todas las categorías.

La proyección al 2030 indica que, si se toma como punto de inicio el año 2016, la vegetación natural de páramo tendría una pérdida de 2539 ha (1,14%) y las zonas de bosque aumentarían 426 ha; es decir, habría un proceso de regeneración vegetal. Las áreas de mosaico agropecuario tienden a disminuir y para el 2030 se esperaría que disminuya en 5.369 ha, es decir, alrededor del 23%. Esto puede deberse a que existe una evidente tendencia de convertir esos suelos en zonas urbanas, puesto que el modelo indica que esta categoría tendrá un aumento de 23847 ha.

La zona de estudio tiene una extensión de alrededor 2225 km² de páramo y un caudal aproximado de 109610 l/s en el año 2016. Para el año 2030 se estima perder 25 Km² de páramo convirtiéndose en zona de cultivo, lo que a su vez se puede traducir en la pérdida de aproximadamente la mitad del caudal que se produce en estas zonas, en decir 627,35 l/s aproximadamente, que es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de alrededor de 301.128 personas en DMQ, que tiene un promedio de consumo de 180 l/día. Siendo las unidades hidrográficas del Pita, San Pedro y Nororiente del DMQ las zonas de mayor pérdida de recurso hídrico con más de 150 l/s.

6. Recomendaciones

Para futuros análisis de cambio de cobertura y uso de suelo, se recomienda que para la generación de modelos de simulación se use cartografía a mayor escala y correctamente validada en cuanto a la clasificación de imágenes satelitales, puesto que, al existir una clasificación errónea, se puede inferir en los resultados de las matrices de transición y de la proyección en el modelo. Para lograr esto, una buena práctica es elaborar metadatos con base en estándares nacionales o internacionales.

Se recomienda aplicar otro tipo de software como CLUE, CA_MARKOV y *Land Change Modeler* que permita comparar los resultados y evaluar las posibilidades y los límites de Dinámica EGO; aunque se debe tomar en cuenta que ningún software de modelamiento puede predecir exactamente lo que sucederá en un corto, mediano o largo plazo, pero sí puede ayudar a conocer las tendencias que podrían seguir los cambios bajo distintos escenarios.

Para futuros estudios, se recomienda incluir más variables como la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración, a fin de evaluar la influencia del clima en las transiciones que se producen durante el estudio.

En el modelo, las variables que establecen áreas de protección muestran una influencia que repele actividades agropecuarias, por lo que se recomienda a las autoridades establecer más zonas de protección en las áreas de recarga hídrica del DMQ y que estén formadas por ecosistema de páramo.

El manejo de los recursos requiere del entendimiento de los principios ecológicos, de la apreciación de los procesos ecológicos que suceden en el área y de la aceptación de que el manejo de los recursos naturales es una forma especializada de uso de la tierra. Por ello, se recomienda realizar estudios a mediana y gran escala de los efectos que conllevaría la pérdida de la cobertura vegetal de páramo, tanto a nivel de retención como de regulación del agua.

Lista de referencias

- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de Loja*.
- Arellano, K., & Castro, S. (2019). *Modelamiento del crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025 para la planificación del uso y ocupación del suelo*. 103.
- Arzac, A., Chacón-Moreno, E., Llambí, L. D., & Dulhoste, R. (2011). Distribución de formas de vida de plantas en el límite superior del Ecotono bosque Páramo en Los Andes Tropicales. *Ecotropicos*.
- Benavente, A. (2016). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bravo, V. (2020). *Evaluación de la herramienta de simulación del recurso hídrico HYDRO-BID para la cuantificación de la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayallabamba y unidades hídricas aprotantes de agua para el Distrito Metropolitano de Quito*.
- Bruna, J. (2015). Modelación y simulación del proceso de expansión urbana en la región metropolitana de Santiago. *Universidad de Santiago de Chile*.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). *HIDROLOGÍA DEL PÁRAMO ANDINO: PROPIEDADES, IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/228459137>
- Campos, C. (2018). Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para el desarrollo de un modelo probabilístico prospectivo en la cuenca del río capucuy. *Universidad Internacional SEK*.
- Cano, A., & Rojas, Á. (2016). Autómatas celulares y aplicaciones. *Revista*

- Iberoamericana de Educación Matemática*, 46, 33–48. Retrieved from www.fisem.org/web/unionhttp://www.revistaunion.org
- Célleri Alvear, R., De Bièvre, B., & Vicente, I. (2001). *EFFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA REGULACIÓN HIDROLÓGICA DE MICROCUENCAS DE PÁRAMO* Rolando Célleri Alvear 1 , Bert De Bièvre, Vicente Iñiguez Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador. 1–23.
- Cleary, M. (2019). 濟無No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cotler, Priego, & Rodríguez. (2004). *Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de Lerma_Chapala*. *Gaceta ecológica* 71:79-92. (January), 79–92.
- Crespo, P., Celleri, R., Buytaert, W., Feyen, J. A. N., Iñiguez, V., Borja, P., ... Cuenca, U. De. (2009). *Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems*. (April). <https://doi.org/10.13140/2.1.5137.6320>
- Díaz P., J., & Hewitt, R. (2013). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales . Comparando dos aplicaciones de software. *Revista Internacional de La Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 14(2009), 19–21.
- EPMAPS. (2016). *Estudios de factibilidad y diseños definitivos del proyecto de agua potable Ramla Chalpi Grande*.
- Ercole, R. D., & Metzger, P. (2015). *Vulnerabilidad de ecosistemas representativos del Distrito Metropolitano de Quito*. (Censo 2010), 4–499.
- Ercole, R. D., Metzger, P., Ercole, R. D., Metzger, P., Metropolitano, D., & Ird, D. Q. (2015). *Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. (Censo 2010), 4–499.
- Espinoza, V. (2017). *Dinamica Ego : Una Herramienta Gratuita Para Modelar Y Brindar*. (December 2016).
- FAO. (2014). *Servicios de las cuencas hidrográficas*. 5–8. Retrieved from

www.fao.org/ag/

- Farfán, M. (2015). *Escenarios de deforestación (2004-2018) en la reserva de la biósfera sierra de manantlán y su impacto en las áreas potenciales de distribución de dos especies de felinos. 1.*
- Feoli Boraschi, S. (2009). Corredores biológicos: una estrategia de conservación en el manejo de cuencas hidrográficas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(17), 1–5.
- Filho, B. S. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. (2009). *Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO.*
- FONAG. (2017). *Mapeo a detalle de la composición florística de comunidades vegetales y nivel de intervención en cobertura vegetal natural y humedales, en el ámbito geográfico del FONAG. 1.*
- Gellrich, M., & Zimmermann, N. E. (2007). Investigating the regional-scale pattern of agricultural land abandonment in the Swiss mountains: A spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning*, 79(1), 65–76.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.03.004>
- Hammen, Thomas van der. Cleef, A. M. (2008). *Panoramas y perspectivas sobre la gestión ambiental de los ecosistemas de páramo.*
- Hanzen, & Sawyer. (2011). *Estudios de Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado para el DMQ Plan Maestro de Agua Potable Reconocimiento.*
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945–964.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.05.002>
- Hernandez, A. J., & Cand. (2009). *Propuesta metodológica para la simulación de escenarios tendenciales y alternativos del cambio de la cobertura vegetal.*

- Hincapié, J., Castillo, C., & Argüello, S. (2002). Transformación y cambio en el uso del suelo en los páramos de Colombia en las últimas décadas. *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia En Condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor*, 210–333.
- Hofstede, R. et. al. (2014). *Los Páramos Andinos ¿ Que sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo.* (UICN).
- Iñiguez, V. (2003). *Balance hídrico de microcuencas de páramo.* Tesis de grado. Universidad de Cuenca.
- Kehrer, W., & Kaaden, V. Der. (1979). Notes on the geology of Ecuador with special reference to the western cordillera. *Geologisches Jahrbuch*, 35.
- Luteyn, J. (1992). Páramo: an andean ecosystem under human influence. *Editorial London, Academic Press, GB*, (ISBN 0-12-4600442-0).
- Macedo, R. D. C., De Almeida, C. M., Dos Santos, J. R., & Rudorff, B. F. T. (2013). Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 19(2), 313–337. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702013000200009>
- MAE. (2015). *Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la Tierra del Ecuador continental 2013-2014, Escala 1:100000.* 1–49.
- Mas, Jean-françois, Kolb, M., Paegelow, M., Camacho, M. T., Houet, T., Mas, J., ... Houet, T. (2015). *Inductive pattern-based land use / cover change models : A comparison of four software packages To cite this version : HAL Id : hal-01187569.*
- Mas, Jean, & Sandoval, A. F. (2011). *Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México.* 5(1), 1–24.
- Minas, S. J. (2006). *Municipio del distrito metropolitano de Quito.*
- Monteiro Junior, J. J., Silva, E. A., De Amorim Reis, A. L., & Mesquita Souza Santos, J.

- P. (2019). Dynamical spatial modeling to simulate the forest scenario in Brazilian dry forest landscapes. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(1), 46–52.
<https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1481658>
- Mosquera, N., & Baile, S. (2017). *Análisis multitemporal para determinar el cambio en el uso del suelo y la cobertura vegetal en áreas de protección ecológica del DMQ periodo 2001-2015*.
- Muñoz Guerrero, D. A., & Gómez Zotano, J. (2017). Propuesta metodológica para la gestión de los paisajes de páramo en el marco de la Iniciativa Latinoamericana del Paisaje (LALI). *Perspectiva Geográfica*, 21(2), 225.
<https://doi.org/10.19053/01233769.5850>
- Nagendra, H., & Southworth, J. (2002). Accessibility as a determinant of landscape transformation in western Honduras: linking pattern and process Harini. *Landscape Ecology*, 18(3), 141–158. <https://doi.org/10.1023/A:1024430026953>
- Ochoa, B. (2020). *Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas*. (August). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29456.43526>
- Oriosto, A. (2017). *Modelación de la vegetación y cambio de uso de suelo del 2005 al 2025, en la microcuenca la Unión en el municipio de Chiapas*.
- Orozco, R. (2009). *Urkukuna: Los páramos*. Quito: Instituto de Estudios Ecuatorianos & Latacunga.
- Osorio, L. P., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación : un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla , Guerrero , México Analysis and modeling of deforestation processes : a case study in the Coyuquilla River Basin , Guerrero , Mexico. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía*, 2015(88), 60–74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- Oumer, H. (2009). *Land use an land cover change, drivers and its impact: A comparative study from Kuhar Michael and Lenche Dima of blue Nile and Awash basins of*

- Ethiopia*. (August). Retrieved from [http://soilandwater.bee.cornell.edu/Research/international/docs/Thesis Hussien Ali_Formatted2.pdf](http://soilandwater.bee.cornell.edu/Research/international/docs/Thesis%20Hussien%20Ali_Formatted2.pdf)
- Peralvo, Bastidas, M. (2014). Monitoreo de cambio de cobertura y uso de la tierra a escala de sitios. *CONSESAN*.
- Peralvo, M., Postigo, J. C., & Lopez, S. (2012). *Adaptación en Sistemas Productivos Andinos a los efectos del Cambio Climático : revisión y síntesis del estado del conocimiento*. (May).
- Piontekowski, V. J., Silva, S. S. da, Mendoza, E. R. H., Costa, W. L. de S., & Ribeiro, F. C. (2012). Modelagem do desmatamento para o Estado do Acre utilizando o programa DINAMICA EGO. *4º Simpósio de Geotecnologias No Pantanal, Bonito, MS*, 20–24.
- Price, J., & J Waddington. (2000). Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrological Processes*.
- Proaño, E. (2010). *MODELACIÓN OFERTA-DEMANDA DE AGUA EN CUENCAS DESARROLLADAS-CUENCA ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA Y CUENCAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE QUITO, CON LA AYUDA DE LA HERRAMIENTA WEAP*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2601/1/CD-3280.pdf>
- Ramírez, D. (2011). Escenarios de cambios de cobertura y uso de suelo en el corredor biológico Mesoamericano - México. *Biodiversitas*, 47, 1–3.
- Rangel, O. (2000). *La región de vida paramuna. Colombia diversidad biótica III*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodrigues, H. O., Soares-Filho, B. S., & Costa, W. L. D. S. (2007). Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, (September), 3089–3096.

- Romero, N. (2003). *Comentarios sobre la definición de Autómata Celular*. *X*(1), 59–77.
- Sauer, W. (1957). El mapa geológico del Ecuador. *Editorial Universitaria*, 70. Retrieved from
http://biblioteca.unach.edu.ec/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=13420
- Siddhartho, P. *Analysis of land use and land cover change in kiskatinaw river watershed: a remote sensing, gis & modeling approach.* , (2013).
- Silva, P. Análisis multicriterial de los determinantes de la cobertura vegetal en el DMQ. , Pontificia Universidad Católica del Ecuador (2020).
- Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O., Costa, W. L., & Schlesinger, P. (2010). *Dinamica_EGO_guidebook*.
- Tang, F. S., Chen, X., Luo, G. P., Lin, Q., & Liu, H. L. (2007). A contrast of two typical LUCC processes and their driving forces in oases of arid areas: A case study of Sangong River Watershed at the northern foot of Tianshan Mountains. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 50(SUPPL. 1), 65–75.
<https://doi.org/10.1007/s11430-007-5003-8>
- Tramontina, J. (2015). Modelagem Dinâmica do uso e cobertura da terra do município de Sobradinho-RS Juliana. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasi*, (1), 6381–6388.
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius, G., & Veldkamp, A. (2008). *Land use, modelling, change, land cover*. (August). <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Winckell, A., Zebrowski, C., & Delaune, M. (1997). Evolution du modele quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Equateur. Premiere partie: le volcanisme pyroclastique recent. *Geodynamique*, 6(2), 97–117.