



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

Modelamiento correlativo de la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja periodo 1970-2080: potenciales cambios bajo un contexto de cambio climático

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

AUTOR

Diego Fernando Poma Sarango

DIRECTOR

Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg.Sc.

CO-DIRECTOR

Ing. César Bernardo Benavidez Silva, PhD (c)

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 01 de septiembre de 2023

Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg. Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Modelamiento correlativo de la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja periodo 1970-2080: potenciales cambios bajo un contexto de cambio climático**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, de autoría del estudiante **Diego Fernando Poma Sarango**, con **cédula de identidad Nro. 1104757321**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

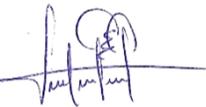
OSCAR LENIN
JUELA
SIVISACA

Firmado digitalmente por OSCAR
LENIN JUELA SIVISACA
DN: cn=OSCAR LENIN JUELA
SIVISACA, c=EC, h=LOJA
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicación:
Fecha: 2023-09-01 10:05:05:00

Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg. Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Diego Fernando Poma Sarango**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mí Trabajo de Titulación, en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula: 1104757321

Fecha: 01 de septiembre de 2023

Correo electrónico: diego.poma@unl.edu.ec

Teléfono: 0998095108

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo **Diego Fernando Poma Sarango**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Modelamiento correlativo de la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja, periodo 1970-2080: potenciales cambios bajo un contexto de cambio climático**, como requisito para optar el Título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

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

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja al primer día del mes de septiembre del dos mil veintitrés.

Firma:



Autor: Diego Fernando Poma Sarango

Cédula de identidad: 1104757321

Dirección: Loja, Calles Monte Sinaí y Jerusalén

Correo electrónico: diego.poma@unl.edu.ec

Teléfono: 0998095108

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Oscar Lenin Juela Sivisaca, Mg.Sc

Co-director del Trabajo de Titulación: Ing. César Bernardo Benavidez Silva, PhD (c)

Dedicatoria

Con infinito amor a mis padres Nelson Poma y Carmen Sarango, por su valentía, por su amor, por su bondad infinita y apoyo incondicional, por siempre confiar en mis capacidades y ser ejemplo de lucha e inspiración, gracias por haberme dado la vida.

A mis hermanos Johana, Christian, Darío, Cristina, Elías, María, Marco, Alejandra y Paola, por siempre estar presentes en todo momento, por ser el motor que me impulsa a superarme y ser un mejor ser humano.

Diego Fernando Poma Sarango

Agradecimiento

Al culminar esta etapa de mi vida quiero agradecer al todo poderoso, por bendecirme con fortaleza, valentía, perseverancia y salud para poder cumplir uno de los retos propuestos. Mi gratitud para todos los docentes de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, por impartir sus conocimientos en esta etapa de mi vida, a mi Director del Trabajo de Titulación, Ing. Oscar Juera, Mg. Sc, que en este tramo final me ha direccionado con sus conocimientos, a mi Codirector Ing. César Benavidez un agradecimiento especial por su loable valor de enseñanza, apoyo, paciencia, constancia y sus aportes de conocimiento se pudo culminar la presente investigación. Finalmente, a todos quienes me apoyaron y confiaron en este proceso, en especial a mis amigos, compañeros y familiares que siempre estuvieron presentes en los momentos más difíciles de mi vida, gracias infinitas.

Diego Fernando Poma Sarango

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	ix
Índice de figuras:.....	x
Índice de anexos:.....	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	7
4.1. Cambio climático	7
4.1.1. <i>Bases del cambio climático</i>	7
4.1.2. <i>Manifestaciones del cambio climático</i>	8
4.2. Distribución de ecosistemas de la provincia de Loja	9
4.2.1. <i>Manifestaciones del cambio climático sobre los ecosistemas</i>	10
4.3. Modelamiento correlativo	12
4.3.1. <i>Tipos de modelos</i>	13
4.3.2. <i>Variables biofísicas</i>	14

5. Metodología	15
5.1. Área de estudio.....	15
5.2. Diseño de investigación	16
5.3. Modelamiento correlativo de ecosistemas	17
5.3.1. Datos	18
5.3.2. Calibración	21
5.3.3. Evaluación	22
5.3.4. Simulación/proyección.....	23
6. Resultados	25
6.1. Variables biofísicas que determinan la distribución de los ecosistemas.....	25
6.2. Modelamiento correlativo de ecosistemas y su distribución potencial.....	27
7. Discusión.....	32
8. Conclusiones	37
9. Recomendaciones	38
10. Bibliografía	39
11. Anexos	48

Índice de tablas:

Tabla 1. Gases de efecto invernadero.	8
Tabla 2. Ecosistemas naturales de la provincia de Loja.	10
Tabla 3. Métodos de modelación.	13
Tabla 4. Variables climáticas utilizadas en los modelos.	20
Tabla 5. Variables biofísicas utilizadas para cada ecosistema.	25
Tabla 6. Respuesta, dirección y rango de cambio de los ecosistemas de la provincia de Loja bajo un escenario de cambio climático.	31

Índice de figuras:

Figura 1. Mapa de ubicación.....	16
Figura 2. Diagrama de flujo para el modelamiento correlativo de ecosistemas.	17
Figura 3. Distribución altitudinal de los ecosistemas de la provincia de Loja.	19
Figura 4. Matriz de confusión.....	23
Figura 5. Gráfica de correlaciones (ecosistema AdBn01).	26
Figura 6. Áreas de recambio de ecosistemas para el año 2080 – RCP 6.0.	28
Figura 7. Rango de cambio de los ecosistemas.	30

Índice de anexos:

Anexo 1.	Precipitación actual y futura por ecosistema de la provincia de Loja.....	48
Anexo 2.	Temperatura actual y futura por ecosistema de la provincia de Loja	48
Anexo 3.	Ecosistema arbustal desértico del Sur de los valles.	49
Anexo 4.	Ecosistema arbustal semideciduo del sur de los valles.	49
Anexo 5.	Ecosistema arbustal siempreverde montano alto del páramo del sur.....	50
Anexo 6.	Ecosistema arbustal siempreverde montano del sur de los andes.	50
Anexo 7.	Ecosistema arbustal siempreverde y herbazal del páramo.....	51
Anexo 8.	Ecosistema bosque deciduo montano bajo del Catamayo-Alamor.....	51
Anexo 9.	Ecosistema bosque deciduo piemontano del Catamayo-Alamor.....	52
Anexo 10.	Ecosistema bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo.	52
Anexo 11.	Ecosistema bosque bajo y arbustal de tierras bajas del Jama-Zapotillo.	53
Anexo 12.	Ecosistema bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor..	53
Anexo 13.	Ecosistema bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor.....	54
Anexo 14.	Ecosistema bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo.	54
Anexo 15.	Ecosistema bosque semideciduo montano bajo del Catamayo-Alamor.	55
Anexo 16.	Ecosistema bosque y arbustal semideciduo del sur de los valles.....	55
Anexo 17.	Ecosistema bosque semideciduo piemontano del Catamayo-Alamor.	56
Anexo 18.	Ecosistema bosque siempreverde alto del sur de la cordillera oriental de los Andes.	56
Anexo 19.	Ecosistema bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor.....	57
Anexo 20.	Ecosistema bosque siempreverde montano bajo del sur de la cordillera oriental de los Andes.	57
Anexo 21.	Ecosistema bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor.....	58
Anexo 22.	Ecosistema bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes.	58
Anexo 23.	Ecosistema bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor.....	59
Anexo 24.	Ecosistema herbazal del páramo.	59
Anexo 25.	Certificación de la traducción del resumen.....	60

Acrónimos

AR5:	Quinto Informe de Evaluación del IPCC (por sus siglas en ingles).
AUC:	Área Bajo la Curva (por sus siglas en ingles).
BIOMOD:	Plataforma de conjuntos para la modelización de la distribución de especies
ENM:	Modelos de Nicho Ecológico (por sus siglas en ingles).
GEI:	Gases Efecto Invernadero.
IPCC:	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en ingles).
MAATE:	Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica.
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
ROC:	Característica Operativa de Receptor (por sus siglas en ingles).
RCP:	Rutas de Concentración Representativas (por sus siglas en Ingles)
RCP 8.5:	Escenario de trayectorias de emisiones muy alto de CO2.
RCP 6.0:	Escenario de trayectorias de emisiones medias de CO2.
RCP 2.6:	Escenario de trayectorias de emisiones bajas de CO2.
SDM:	Modelos de Distribución Potencial (por sus siglas en ingles).
TSS:	Estadístico de Habilidad Verdadera (por sus siglas en ingles).
VIF:	Factor de Inflación de Varianza (por sus siglas en ingles).

1. Título

Modelamiento correlativo de la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja periodo 1970-2080: potenciales cambios bajo un contexto de cambio climático

2. Resumen

El cambio climático es un fenómeno innegable, se ha identificado como la principal amenaza para la integridad y funcionalidad de los ecosistemas terrestres en el último siglo. En la presente investigación se modelaron los ecosistemas terrestres de la provincia de Loja para el año 2080, buscando determinar su distribución potencial actual y futura bajo un escenario climático de emisiones medias de dióxido de carbono IPCC – AR5 – RCP 6.0. Los modelos se implementaron en R utilizando la librería de Biomod2 que genera modelos de consenso a partir de 10 técnicas de modelamiento de última generación. Biomod2, consta de 3 etapas importantes como son: calibración, evaluación y modelación/proyección y requiere de los registros de presencia y ausencia de los ecosistemas, así como un set de 19 variables climáticas y 4 topográficas. Con el fin de eliminar la multicolinealidad y el sobreajuste de los modelos se implementaron dos métodos estadísticos: la correlación de Pearson y Variance Inflation Factor. Para evaluar el rendimiento de los modelos se empleó dos métricas basadas en el aprendizaje automático como lo es ROC y TSS, se considera un umbral de 0.8 como métrica para evaluar los modelos, los modelos que superen esté umbral son considerados para los ensambles finales y los mal evaluados serán descartados. Los resultados nos indican que la temperatura sufriría un incremento para todos los ecosistemas, en promedio 3.2 °C; mientras que la precipitación se incrementaría en promedio 110.5 mm, pero no para todos los ecosistemas, algunos ecosistemas de pisos altitudinales como Páramo y Bosque Montano Alto decrecería. La variabilidad climática posiblemente genere nuevas configuraciones climáticas y los ecosistemas en respuesta tiendan a redistribuirse ya sea ganando, perdiendo o manteniéndose en su rango de distribución actual.

Palabras clave: Cambio climático, Modelamiento, Biomod2, Ecosistemas, Loja

2.1. Abstract

Climate change is an undeniable phenomenon, it has been identified as the main threat to the integrity and functionality of terrestrial ecosystems in the last century. In the present investigation, the terrestrial ecosystems of the province of Loja were modeled for the year 2080, seeking to determine their current and future potential distribution under a climate scenario of average carbon dioxide emissions IPCC - AR5 - RCP 6.0. The models were implemented in R using the Biomod2 library that generates consensus models from 10 state-of-the-art modeling techniques. Biomod2 consists of 3 important stages such as: calibration, evaluation and modeling/projection and requires records of presence and absence of ecosystems, as well as a set of 19 climatic and 4 topographic variables. In order to eliminate multicollinearity and overfitting of the models, two statistical methods were implemented: Pearson correlation and Variance Inflation Factor. To evaluate the performance of the models, two metrics based on machine learning were used, such as ROC and TSS, a threshold of 0.8 is considered as a metric to evaluate the models, the models that exceed this threshold are considered for the final assemblies and the badly evaluated will be discarded. The results indicate that the temperature would suffer an increase for all ecosystems, on average 3.2 °C; while precipitation would increase by an average of 110.5 mm, but not for all ecosystems, some ecosystems of altitudinal floors such as Páramo and Bosque Montano Alto would decrease. Climate variability possibly generates new climatic configurations and the ecosystems in response tend to redistribute, either gaining, losing or staying in their current distribution range.

Keywords: Climate change, Modeling, Biomod2, Ecosystems, Loja.

3. Introducción

El cambio climático en la actualidad es un fenómeno innegable (Malhi et al., 2020). Este fenómeno a escala mundial es producto de la variabilidad de la concentración de gases efecto invernadero (GEI), provenientes de las actividades humanas como la combustión de combustibles fósiles, deforestación, crecimiento demográfico, agricultura, ganadería, generación de residuos, entre otros (Masson-Delmotte et al., 2020; United, 2022). El incremento de GEI ha provocado modificaciones en los patrones de temperatura y precipitación a nivel global particularmente notable desde el siglo XX (Aguirre et al., 2015; IPCC, 2008; Masson-Delmotte et al., 2020).

Debido a estos cambios, se han documentado efectos sobre los ecosistemas naturales y la distribución y abundancia natural de las especies, que no se explican con la variabilidad natural, sino que se relacionan con el calentamiento global (Aguirre et al., 2017a; Guitérrez & Trejo, 2014). En consecuencia, se tendrían impactos negativos sobre la biodiversidad, como modificar los límites geográficos de las especies e impulsar la redistribución de vida sobre el planeta (Ashraf et al., 2017; Correa-Lima et al., 2019; Dagtekin et al., 2020; Pecl et al., 2017).

Por otro lado, el cambio de uso de suelo representa una amenaza significativa para la biodiversidad, se considera como el principal impulsor de la pérdida de biodiversidad en todo el mundo (Powers y Jetz, 2019; Riordan y Rundel, 2014). Esto ha provocado que selvas tropicales se conviertan en sabanas, cultivos agrícolas y áreas urbanas (Jakob, 2017; Sales et al., 2020); además, de alterar el funcionamiento natural de los ecosistemas, modificando la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, fragmentación de hábitats y modificaciones en el sistema climático (Martinuzzi et al., 2015; Thies et al., 2014; Vanacker et al., 2018).

Existe una alta certeza de que el cambio climático, al interactuar de manera sinérgica con el cambio de uso de suelo, deforestación y otros factores estresantes, se potencie sus efectos sobre los ecosistemas terrestres (Malhi et al., 2020; Mantyka-pringle et al., 2012). Sobre este tema, Aguirre et al. (2015) y Tapia-Armijos et al. (2015) mencionan, que Ecuador además de ser considerado como un país vulnerable frente a los efectos del cambio climático, posee las tasas de deforestación más altas de América del Sur durante los últimos 20 años, con tasas anuales de 1,5 % y 1,8 % para los periodos 1990-2000 y 2001-2010, respectivamente. Por lo que, la biodiversidad distribuida sobre esta zona se vería amenazada (Bendix et al., 2021; Manchego et al., 2017).

En el caso de la Región Sur del Ecuador, el cambio de uso de suelo ha sido producto del crecimiento urbano, la deforestación, expansión de la frontera agrícola; lo que ha llevado

históricamente a la fragmentación de los ecosistemas, siendo los bosques secos, los ecosistemas más amenazados debido a los procesos de conversión agrícola que han sufrido en los últimos años (Aguirre et al., 2015; Manchego et al., 2017; Tapia-Armijos et al., 2015). Si esto se suma a la variabilidad climática, es decir alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura, se esperaría que los sistemas ambientales sean vulnerables al cambio climático (Aguirre et al., 2015).

Es probable que los patrones climáticos y cambios de usos de suelo tengan un fuerte impacto en el futuro sobre el balance natural de los ecosistemas terrestres de la provincia de Loja; por ello, es necesario identificar las condiciones climáticas futuras (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011), que en un contexto ecológico el clima y sus variaciones tienen una influencia directa sobre los ecosistemas y la distribución de natural vida sobre el planeta (Aguirre et al., 2017b).

Los modelos de distribución de especies (SDM) se han transformado en los últimos años en una herramienta cada vez más importante en ecología, biogeografía y ciencias ambientales. Estos avances permiten construir una relación entre la distribución geográfica observada de las especies/ecosistemas con un grupo de variables ambientales disponibles, permitiendo analizar y evaluar los impactos del cambio global sobre la distribución de la biodiversidad (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).

En esta investigación utilizamos los SDM como la herramienta que permite explicar, y dimensionar la respuesta potencial de los ecosistemas al cambio climático (Ashraf et al., 2017; Guisan et al., 2000). Se modelaron los ecosistemas terrestres de la provincia de Loja para el periodo 1970 – 2080, para determinar su distribución potencial actual y futura bajo un escenario climático de emisiones medias de dióxido de carbono (CO₂) del quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC – AR5 – RCP 6.0). La modelización climática se desarrolló en el entorno de programación R, utilizando el paquete Biomod2 (Thuiller et al., 2022).

Biomod2 tiene la capacidad de realizar modelos de distribución potenciales de especies/ecosistemas con varias técnicas para diferentes condiciones ambientales, reduce la incertidumbre metodológica y analiza las correlaciones que se da entre las especies/ecosistemas y su entorno ambiental, así como la capacidad de construir rápidamente modelos individuales y combinarlos de diferentes maneras mediante ensambles (Hao et al., 2019; Thuiller et al., 2009); relacionando sets predictivos (variables biofísicas) con la ocurrencia/ausencia de los ecosistemas que se desea modelar (Benavidez-Silva et al., 2021; Brun et al., 2019; Hao et al., 2019).

En concreto se busca conocer ¿Cuáles son las principales variables bioclimáticas y topográficas que influyen en la configuración espacial de los ecosistemas terrestres de la provincia de Loja en el escenario actual y un escenario futuro en un contexto del cambio climático? Y así dar cumplimiento a los siguientes objetivos: i) Analizar las principales variables biofísicas que determinan la distribución potencial, actual y futura de los ecosistemas, para determinar su importancia e influencia en un contexto de cambio climático; ii) Implementar modelos con enfoque correlativo para determinar la distribución potencial futura de los ecosistemas de la provincia de Loja para el año 2080 bajo el escenario climático IPCC – AR5 – RCP 6.0.

Una de las limitaciones en esta investigación tiene que ver con disponibilidad de información relacionada con el modelamiento de ecosistemas y potenciales efectos del cambio climático, a nivel regional es la primera investigación que se realiza mediante este enfoque. Y, otra limitante es la escala espacial de las variables climáticas, debido a que si se aumenta la resolución de las variables es necesario contar con mejores computadores para llevar a cabo estos procesos.

4. Marco teórico

4.1. Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno global que está modificando aspectos del clima como la temperatura y precipitación tanto en su intensidad como en su frecuencia, debido a la alteración de la química atmosférica (Aguirre et al., 2015). Estos cambios pueden darse por procesos internos naturales (erupciones volcánicas), por forzamientos radioactivos externos (modulaciones de los ciclos solares) o como consecuencia de actividades humanas (Aguirre et al., 2015; Masson-Delmotte et al., 2020; Tigmasa, 2020).

El cambio climático se lo atribuye al incremento de los GEI y aerosoles provenientes del desarrollo antropogénico insostenible con el advenimiento de la revolución industrial, avances de medicina e higiene que tiene como consecuencia mundial el crecimiento poblacional; y, la industria, transporte y la agricultura para hacer frente a la demanda de suministros y servicios a aumentando el uso de combustibles fósiles, expansión de la frontera agrícola, tala indiscriminada y uso excesivo de agroquímicos (Malhi et al., 2020; Masson-Delmotte et al., 2020; Roca Villanueva et al., 2019; Toulkeridis et al., 2020).

4.1.1. Bases del cambio climático

Las crecientes concentraciones de GEI y aerosoles en la atmósfera desde el siglo XX producto de las actividades económicas-productivas, son la causa dominante del cambio climático (Masson-Delmotte et al., 2020). El cambio climático consiste en el calentamiento del planeta, que es consecuencia del efecto invernadero, el cual se genera debido al atrapamiento excesivo de calor en las capas atmosféricas más cercanas a la superficie terrestre (Roca Villanueva et al., 2019). Las concentraciones normales de GEI hacen posible la vida en el planeta, pero el incremento de estos, conduciría a un aumento de la temperatura global hasta niveles incompatibles con la vida (Roca Villanueva et al., 2019; Vidal et al., 2013).

La evidencia científica señala que a eras geológicas e históricas de tiempo, el clima más cálido en la tierra ha estado asociado a una mayor concentración de carbono en la atmósfera, por ello, es de esperar que un aumento de GEI en la atmósfera exacerbe el comportamiento de variables asociadas al cambio climático (Vidal et al., 2013). El dióxido de carbono (CO₂) contribuye en mayor medida al efecto invernadero, por su elevada concentración en la atmósfera respecto a la época preindustrial, pasando de 280 partes por millón (ppm) a superar las 400 ppm (Roca Villanueva et al., 2019). Otros gases también resultantes de actividades antrópicas como el metano

(CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), hexafluoruro de azufre (SF₆) y los perfluorocarbonos (PFC) (Tabla 1), también contribuyen en gran medida al calentamiento global (Montzka et al., 2011).

Tabla 1. Gases de efecto invernadero.

Símbolo	Nombre	Fuentes emisoras
CO ₂	Dióxido de carbono	Combustión de combustibles fósiles, deforestación, producción de cemento, crecimiento demográfico, etc.
CH ₄	Metano	Vertederos, producción y distribución de gas natural y petróleo, ganadería, agricultura, combustión de combustibles fósiles, cambios de usos de suelos y descomposición de materia orgánica.
N ₂ O	Óxido nitroso	Combustión de combustibles fósiles, fertilizantes, producción de nailon, estiércol, etc.
HFC's	Hidrofluorocarbonos	Gases refrigerantes, fundición de aluminio, fabricación de semiconductores, etc.
PFC's	Perfluorocarbonos	Producción de aluminio, industria de semiconductores, etc.
SF ₆	Hexafluoruro de azufre	Sistemas de transmisión y distribución eléctrica, disyuntores, producción de magnesio, etc.

Fuente: (Masson-Delmotte et al., 2020 ; United, 2022)

4.1.2. *Manifestaciones del cambio climático*

La variabilidad de las concentraciones de GEI y aerosoles a la atmósfera, las variaciones de la cobertura terrestre y la radiación solar, han alterado el equilibrio energético del sistema climático del planeta (IPCC, 2008), incrementando la temperatura media de la superficie terrestre en un ~1 °C en relación a la temperatura media de los años 1951-1980 (periodo preindustrial), y se estima que la temperatura podría incrementarse de 1,4 a 5,8 °C para el año 2100 (Dagtekin et al., 2020; Masson-Delmotte et al., 2020).

En el informe presentado por el IPCC en el 2018 se propone la reducción inmediata de GEI como el CO₂ para mantener la temperatura media mundial en superficie por debajo de los 1,5 °C para los años 2030-2052 (Masson-Delmotte et al., 2020); sin embargo, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) alerta sobre la posibilidad de superar este umbral para el periodo 2022-2026 . Se estima que existe una pequeña probabilidad (10%) de que la media de temperatura de los 5 años (2022-2026) supere el umbral de 1.5°C. En paralelo, la posibilidad de que al menos un año entre 2022-2026 sea el más cálido registrado es del 93 %, esto superando al 2016 como el año más caluroso (World Meteorological Organization, 2022).

Entre los impactos que genera el cambio climático incluye, entre otros, el aumento de la temperatura, el aumento del nivel del mar, la disminución del hielo ártico, la adsorción de la energía térmica por los océanos, la acumulación de GEI en la atmósfera, la acidificación de los

océanos por la absorción de CO₂, precipitaciones intensas en ciertas regiones del planeta, así como, olas de calor y sequías intensas en otras regiones (Toulkeridis et al., 2020); las mismos que son perjudiciales para la humanidad y la biodiversidad del planeta (Malhi et al., 2020).

Se ha documentado que las modificaciones climáticas y antrópicas a nivel global, han empezado a modificar la diversidad y funcionamientos de los ecosistemas naturales, presentando alteraciones de estructura y funcionamiento (Aguirre et al., 2015). Esto conduce a que los rangos de distribución de las especies sean alterados, provocando el desplazamiento de éstas en distintas direcciones, altitudes y velocidades; por ejemplo, las especies podrían migrar desde una área que potencialmente podría estar protegida hacia una que no estaría protegida, lo que podría producir dos respuestas generales adaptación o extinción (Busch et al., 2012; Delgado-Aguilar et al., 2017).

Otros autores como Dagtekin et al. (2020); Vanacker et al. (2018) y Weiskopf et al. (2020), mencionan que, las especies en respuesta a las variaciones climáticas y modificaciones antrópicas están cambiando su comportamiento, su morfología, fenología, rango geográfico de distribución y la interacción que se da entre especies. De esta manera se pone en riesgo la posibilidad de conservar la biodiversidad en el planeta (Aguirre et al., 2015). Y si estas variaciones continúan incrementándose, incluso en escenarios optimistas (RCP 2.6), el cambio climático afectaría de manera negativa la biodiversidad y consecuentemente cambios en la composición y función a nivel de ecosistema (Aguirre et al., 2017a).

4.2. Distribución de ecosistemas de la provincia de Loja

Los ecosistemas son sistemas dinámicos donde un grupo de organismos coexisten dentro de paisajes con variables biofísicas, gradientes ambientales y procesos dinámicos similares (MAE, 2013). En este sistema, una red de interacciones entre organismos y sus entornos define la estructura y función de la comunidad; dichas funciones contribuyen a regular los procesos bioquímicos y climáticos de la tierra, ayudando a mantener la funcionalidad de los ecosistemas (Aguirre et al., 2015).

El sur del Ecuador se caracteriza por su gran diversidad de especies y endemismo (Brehm et al., 2008), y está situada dentro de hotspots (puntos críticos) de biodiversidad: Andes Tropicales y Tumbes-Choco-Magdalena (Tapia-Armijos et al., 2015). Estas características hacen que la diversidad ecosistémica de provincia de Loja esté representada por 22 de los 92 ecosistemas existentes en la clasificación del Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (MAATE) para el Ecuador continental, representando el 32,91 % de los ecosistemas del país (Tabla 2)

(Aguirre Mendoza et al., 2017), los mismos que se encuentran distribuidos en diferentes pisos bioclimáticos y con una fisiografía diferente a la del resto del país (Vazquez et al., 2005).

Tabla 2. Ecosistemas naturales de la provincia de Loja.

Ecosistema	Superficie (ha)
Bosque siempreverde montano bajo del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	0,001
Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo	0,3
Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del sur	1,6
Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor	164,4
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	3 959,5
Bosque decíduo montano bajo del Catamayo-Alamor	4 819,7
Bosque siempreverde montano alto del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	7 335,1
Arbustal desértico del sur de los Valles	7 875,6
Arbustal siempreverde montano del sur de los Andes	8 953,6
Herbazal del Páramo	9 367,0
Bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor	13 303,5
Bosque bajo y Arbustal decíduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo	13 380,5
Bosque y Arbustal semidecíduo del sur de los Valles	15 303,7
Bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo- Alamor	15 792,3
Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	29 962,7
Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor	33 435,0
Bosque decíduo piemontano del Catamayo-Alamor	39 416,7
Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor	48 952,3
Bosque decíduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo	51 043,5
Bosque semidecíduo montano bajo del Catamayo-Alamor	66 059,2
Arbustal semidecíduo del sur de los Valles	71 260,2
Bosque semidecíduo piemontano del Catamayo-Alamor	161 867,9
Total	602 254,3

Fuente: (Aguirre Mendoza et al., 2017; MAE, 2013).

4.2.1. Manifestaciones del cambio climático sobre los ecosistemas

El cambio climático asociado al cambio de uso de suelo y al desarrollo socioeconómico global, representan una amenaza significativa, y posiblemente inmediata sobre la biodiversidad del planeta (Ramachandran et al., 2020; Riordan y Rundel, 2014), amenazando la integridad y funcionalidad de los ecosistemas terrestres, lo que podría comprometer un vasto conjunto de los bienes y servicios proporcionados al ser humano (Anjos y de Toledo, 2018).

Los cambios de uso de suelo se considera como un factor importante para la fragmentación de los ecosistemas y en la destrucción de hábitats, y una amenaza para la biodiversidad (Riordan y Rundel, 2014); como consecuencia, en las próximas décadas podrían reducirse sustancialmente las zonas idóneas de hábitats para las especies a escala global, lo que afectaría aproximadamente a 1700 especies de vertebrados terrestres (Powers y Jetz, 2019). El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en ingles) (2020), en su informe concluye que cerca de 4.400

especies monitoreadas de mamíferos, peces, aves, reptiles y anfibios desde 1970 hasta el 2016 han descendido en un 68 % su tamaño poblacional, siendo América Latina y el Caribe la región con el mayor descenso del tamaño poblacional (94 %), por consiguiente repercutiendo directamente sobre los ecosistemas y limitando su capacidad de respuesta frente al cambio climático.

Quizá las zonas más afectadas sean los hotspots que se ubican en los trópicos, donde posiblemente ocurran la mayoría de los cambios por el uso de suelo. Jantz et al. (2015) estima que estas zonas han perdido el 70 % de su vegetación primaria, componentes estructurales de mucha importancia para los ecosistemas ya que controlan numerosos procesos ecológicos y sustentan una amplia variedad de organismos, por lo tanto, las amenazas del cambio climático y usos de suelo que afecten a la flora afectan a todo el ecosistema (Ramachandran et al., 2020).

Esto conlleva a que los ajustes requeridos por las especies para responder al trastorno climático estén por fuera de las capacidades y exceda la posibilidad de mantenimiento y atributos propios para muchos ecosistemas (estructura de paisaje, estructura de vegetación, composición florística, especies indicadoras, etc.) (Vidal et al., 2013). Es la relación de los atributos funcionales (morfología, fisiología, fenología) y el contexto ecosistémico lo que determinaría, en parte, el éxito de las respuestas, aunque, existe mucha incertidumbre sobre el efecto y el grado de vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas ante esta amenaza.

En la Región Sur del Ecuador, en donde el cambio de uso de suelo, la deforestación, la fragmentación y la colonización, históricamente son los causantes de la degradación de los ecosistemas, siendo los bosques secos los ecosistemas más amenazados debido a que se encuentran muy fragmentados (Aguirre et al., 2015; Manchego et al., 2017; Tapia-Armijos et al., 2015). Estos estresores climáticos (precipitaciones extremas, sequías prolongadas, olas de frío y calor) y antrópicos (uso de suelo, deforestación, expansión agrícola, etc.) han influenciado de manera negativa sobre los ecosistemas de la provincia de Loja, convirtiéndola en una provincia vulnerable al cambio climático (Aguirre et al., 2015).

En el análisis de vulnerabilidad de la Zona Sur (ZS) frente al cambio para el año 2050 se prevé un incremento de precipitación hasta un 17 % para un escenario RCP 2,6 y de 31 % para un RCP 8,5. La temperatura también sufriría un incremento de 1,46 °C para un escenario RCP 2,6 y de 2,37 °C para un escenario RCP 8,5. Por su parte la sensibilidad evidencia que el 22 % de la ZS muestra alta sensibilidad a los estresores ambientales e intrínsecos, siendo la región occidental de la provincia de Loja (Célica, Macará y Paltas), una de las zonas más sensibles. Y la capacidad de

adaptación de la ZS frente a cambios climáticos y antrópicos, solo el 9 % posee capacidad adaptativa muy alta, mientras que el 34 % tiene una capacidad adaptativa muy baja, en donde la provincia de Loja solo el 1,9 % de superficie cuenta con capacidad adaptativa; siendo los Parques Nacionales Podocarpus y Yacuri que contribuyen a aumentar la capacidad para absorber los impactos, mientras que, zonas con menos área o estrategias de conservación como el bosque seco presentan una menor capacidad adaptativa frente al cambio climático (Aguirre et al., 2015).

4.3. Modelamiento correlativo

La idea de conservar todo en el lugar donde existe, en la actualidad suena un poco utópico debido a todas las evidencias científicas relacionadas con el cambio climático. Por ello, surge la necesidad de identificar los patrones espaciales y temporales que gobiernan la distribución de los seres vivos sobre el planeta (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Para este fin los SDM son la herramienta que permite predecir posibles distribuciones geográficas de especies y comunidades, además nos permite comprender los efectos del clima en las especies y ecosistemas (Coetsee et al., 2009; Hannah, 2015; Rodríguez-Medina et al., 2020; Thuiller et al., 2009).

Los SDM correlativos son una técnica que continua evolucionando, pueden subestimar los sistemas naturales y no es razonable esperar que los modelos reflejen con precisión los mecanismos inherentes a un proceso espacio-temporal tan complejo como la distribución de especies (Mateo et al., 2011; Ren et al., 2016); por ello, es normal que exista debate sobre el uso de los SDM correlativos y nos lleve a preguntar si los modelos estiman el nicho ecológico de las especies o simplemente su rango geográfico (Gil, 2018). Sin embargo, los SDM correlativos están siendo utilizados en casi todas las ramas de las ciencias ambientales y de la vida, ya que permite realizar modelos de riqueza de especies y su distribución, exploración de hipótesis ecológicas y evolutivas, predicción del impacto del cambio climático pasado y futuro en las especies y comunidades, etc. (Hao et al., 2019; Mateo et al., 2011; Thuiller et al., 2009).

Para Mateo et al. (2011) los modelos correlativos son representaciones parciales de la realidad que reflejan alguna de sus propiedades. Los SDM extrapolan las relaciones identificadas a partir de estructuras estadísticas entre ocurrencias y entorno ambiental (Brun et al., 2019). Estos modelos generalmente se basan en varias hipótesis que buscan explicar en cómo los factores ambientales influyen en la distribución de especies y comunidades en distintas etapas temporales (Guisan et al., 2000). Bajo esta perspectiva se puede decir que, un modelo de distribución de

especies es una representación cartográfica de idoneidad de un hábitat potencial para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación.

Estos modelos de distribución relacionan datos de presencia/ausencia con variables ambientales que describen el espacio geográfico y climático en donde están ubicadas las especies o ecosistemas, así como técnicas que permiten estimar el potencial rango de distribución de la especie o ecosistema evaluado, generando mapas potenciales de distribución en nuevos tiempos y espacios geográficos (Atauchi et al., 2020; Guisan y Thuiller, 2005; Marino et al., 2011; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

4.3.1. Tipos de modelos

Se han desarrollado técnicas basadas en datos, que incluyen los modelos de nicho ecológico (ENM) y los modelos de distribución de especies (SDM), que estiman las distribuciones potenciales de las especies, identificar áreas adecuadas y señalar las variables ambientales más importantes para la persistencia (Atauchi et al., 2020). Si bien es cierto, los distintos modelos por sí solos pueden generar aproximaciones válidas para predecir la distribución potencial, sin embargo, una reciente aproximación es utilizar modelos de consenso (combinar modelos individuales en un solo paquete), que permite mejorar la capacidad predictiva de los resultados obtenidos y reducir las incertidumbres asociadas a los modelos (Hao et al., 2019; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Tabla 3. Métodos de modelación.

Métodos de modelación disponibles en BIOMOD		
Nombre	Abreviatura	Datos requeridos
Generalized linear models	GLM	Presencia/ausencia
Generalised additive models	GAM	Presencia/ausencia
Multivariate adaptive regression splines	MARS	Presencia/ausencia
Classification tree análisis	CTA	Presencia/ausencia
Mixture discriminant análisis	MDA	Presencia/ausencia
Artificial neural networks	ANN	Presencia/ausencia
Random forests	RF	Presencia/ausencia
Generalized boosted model	GBM	Presencia/ausencia
Maximum Entropy	MaxEnt	Presencia
Sur-face-range envelope	SRE	Presencia

Fuente: (Hao et al., 2019; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Nota: Tenga en cuenta que el paquete “Biomod2” usa diferentes nombres para algunas de sus clases, por ejemplo, Generalized boosted model (GBM) en lugar de Boosted regression tree (BRT) y Sur-face-range envelope (SRE) en lugar de Bioclimatic envelope (BIOCLIM).

Biomod2 relaciona sets predictivos (variables biofísicas) con la ocurrencia de los ecosistemas que se desea modelar, se puede usar todos los modelos individuales disponibles, o

usar solo modelos que mejor desempeño cumplieron a un umbral específico de las métricas seleccionadas para generar ensambles con los modelos correctamente calibrados, que son evaluados por distintas métricas como AUC o TSS (Brun et al., 2019; Fletcher y Fortin, 2018; Hao et al., 2019). El número adecuado de ocurrencias a utilizar como presencia de especies o ecosistemas puede ser de 30 puntos, permitiendo un buen desempeño y capacidad predictiva de los modelos (Fletcher y Fortin, 2018; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

4.3.2. Variables biofísicas

Conocer el espacio geográfico y climático de la distribución de especies y ecosistemas es fundamental para la planificación ecológica. Estas distribuciones están determinadas por distintos factores como las condiciones abióticas (clima, topografía) y bióticas (interacciones entre especies) (Atauchi et al., 2020). Las variables biofísicas (bioclimáticas y topográficas) actúan sobre las especies y condicionan su distribución, en donde la precipitación y temperatura gobiernan la distribución de especies animales y vegetales (Samaniego et al., 2015), las mismas que deben ser elegidas de acuerdo a la extensión espacial y escala de trabajo; bajo esta perspectiva se menciona tres condiciones: i) que sean potencialmente explicativas, ii) que muestren una variabilidad significativa en la zona de estudio y iii) que sean independientes o al menos no estén excesivamente correlacionadas entre si (Mateo et al., 2011).

Las variables más utilizadas en los SDM se encuentran las variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad, etc.) y las topo-edáficas (elevación, pendiente, orientación, etc.) (Chay-Hernández et al., 2012). Las variables climáticas comúnmente se trabajan con un set de 19 variables predefinidas disponibles en bases de datos y las topo-edáficas se las deriva de imágenes satelitales; el uso de las variables ambientales en conjunto con la topo-edáficas se ha probado que puede mejorar el resultado de los modelos a escalas espaciales de mayor detalle (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

La variabilidad altitudinal asociada a la temperatura juega un papel importante en el establecimiento de comunidades de plantas, en consecuencia, de animales y por lo tanto de ecosistemas (MAE, 2013). Por ello, las variables climáticas se utilizan a menudo para predecir patrones biogeográficos, estos estudios en general utilizan medios climáticos mensuales o anuales para analizar los patrones de distribución de las especies (Zimmermann et al., 2009). Las variables climáticas se consideran como el principal impulsor para explicar los rangos de especies en extensiones espaciales más grandes, mientras que el hábitat y la topografía se consideran solo

como modificadores de las distribuciones de especies vegetales en extensiones más pequeñas (Beck et al., 2018).

5. Metodología

5.1. Área de estudio

Esta investigación se realizó en toda el área geográfica de la provincia de Loja (Figura 1), caracterizada por su gran diversidad biológica, climática y étnica, se ubicada en la región Sur del Ecuador (Samaniego et al., 2015), entre los 03° 20' y 04° 45' S y entre 79° 6' y 80° 29' O, con una superficie de ~ 11 063 km² divididos en 16 cantones y con un rango altitudinal entre los 120 hasta los 3 880 m s.n.m (Cueva, 2012).

Presenta algunas particularidades a nivel de su topografía, se encuentra ubicada en la Depresión de Huancabamba, la misma que se constituye como una barrera climática que incide sobre las tres grandes regiones naturales presentes en esta zona, que se caracteriza por tener regímenes de temperatura y precipitación muy variados; y por ende, una gran diversidad de especies, endemismo y ecosistemas, que incluyen valles secos, páramos, bosques nublados y bosques amazónicos tanto en la cordillera occidental como oriental (Aguirre et al., 2015; Brehm et al., 2008).

La temperatura de la provincia fluctúa entre los 6 °C en las cumbres de los cerros Fierrohurco y Picachos (Saraguro y Espíndola, respectivamente) y 26 °C en Zapotillo, Paletillas Mangahurco. En cuanto al clima, predomina el clima tropical (con el 32,5 % de la cobertura territorial), subtropical (28,5 %), temperado (29 %), y un 10 % del territorio es de clima frío (Prefectura de Loja, 2019); y, según la clasificación Köppen, en la provincia de Loja se diferencian 6 tipos de clima, entre los que tenemos: Sabana Tropical (Aw), Sabana Tropical de altura (Awh), Tropical Semiárido con lluvia en verano (BSw), Templado Húmedo de invierno seco (Cw), Templado húmedo sin estación seca (Cf), Templado Frío de invierno seco (Dw).

Mientras que el régimen pluviométrico de la provincia de Loja se destacan 4 variedades: árido con menos de 400 mm/año (abarca el 1,53 % de la superficie), semiárido con precipitaciones de 400 a 600 mm/año (con el 17,77 %), semihúmedo con precipitaciones de 600 a 1 000 mm/año siendo la variedad más importante ya que se distribuye en el 44,75 % de la provincia, y húmedo con precipitaciones superiores a 1 000 mm/año y que se distribuye en el 35 % de la superficie provincial (Prefectura de Loja, 2019).

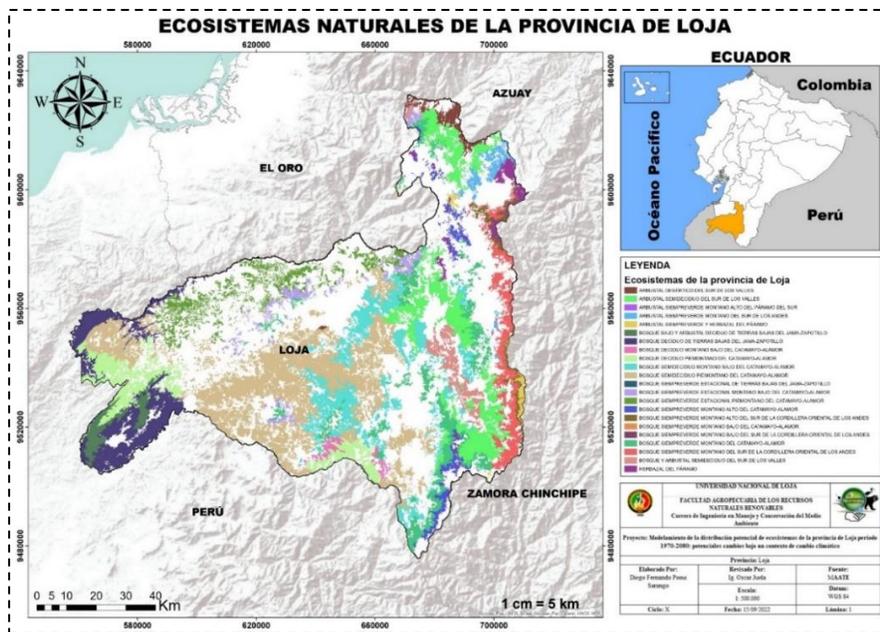


Figura 1. Mapa de ubicación.

5.2. Diseño de investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo de tipo correlacional. Cuantitativo porque se mide la relación entre dos variables cuantificables. Correlacional porque se relaciona las variables de presencia y ausencia de ecosistemas de la provincia de Loja con las variables biofísicas (variables bioclimáticas y topográficas). Dicho de otro forma, esta técnica establece la relación (ajuste de modelo) entre la posición geográfica de los ecosistemas (presencia/ausencia) y el conjunto de datos de las variables donde están ubicados los puntos (Hernández et al., 2014; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Se utiliza un diseño no experimental en el cual se mide las variables y se evalúa la relación estadística (la correlación) entre ellas, sin la influencia de ninguna variable extraña, la característica principal es que no se manipula a ninguna de las variables involucradas (Hernández et al., 2014), solo se mide y se busca relaciones, no se prueba causa y efecto. Este método sirve para realizar estudios exploratorios en áreas donde muy poco o nada se ha hecho.

Las variables utilizadas son cuantitativas tanto dependientes como independientes: las dependientes son las ocurrencias de presencia y ausencia de los ecosistemas naturales de provincia de Loja y, las variables independientes son las biofísicas entre las que tenemos, las bioclimáticas y las topográficas. Para la obtención de los datos de presencia y ausencia de los ecosistemas se utiliza el método probabilístico estratificado (Hernández et al., 2014), siendo la unidad de muestreo las formaciones vegetales naturales de la provincia de Loja.

5.3. Modelamiento correlativo de ecosistemas

Los modelos de distribución potencial de ecosistemas se generaron usando dos tipos de fuentes de información: datos de presencia/ausencia de ecosistemas a modelar y las variables biofísicas (bioclimáticas y topográficas) (Benavidez-Silva *et al.*, 2021; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). El proceso de modelamiento de la distribución potencial se realizó en Biomod2 v 4.0 (Thuiller *et al.*, 2022), que se basa en el ensamble de diferentes técnicas de modelamiento (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Biomod2 es un paquete open source implementado en el entorno de programación R versión 4.2.0 (2022) que nos permite generar modelos individuales, así como ensambles de los modelos mejor evaluados que pueden ser usados para explicar la distribución de las especies o ecosistemas en distintas escalas espaciales y temporales.

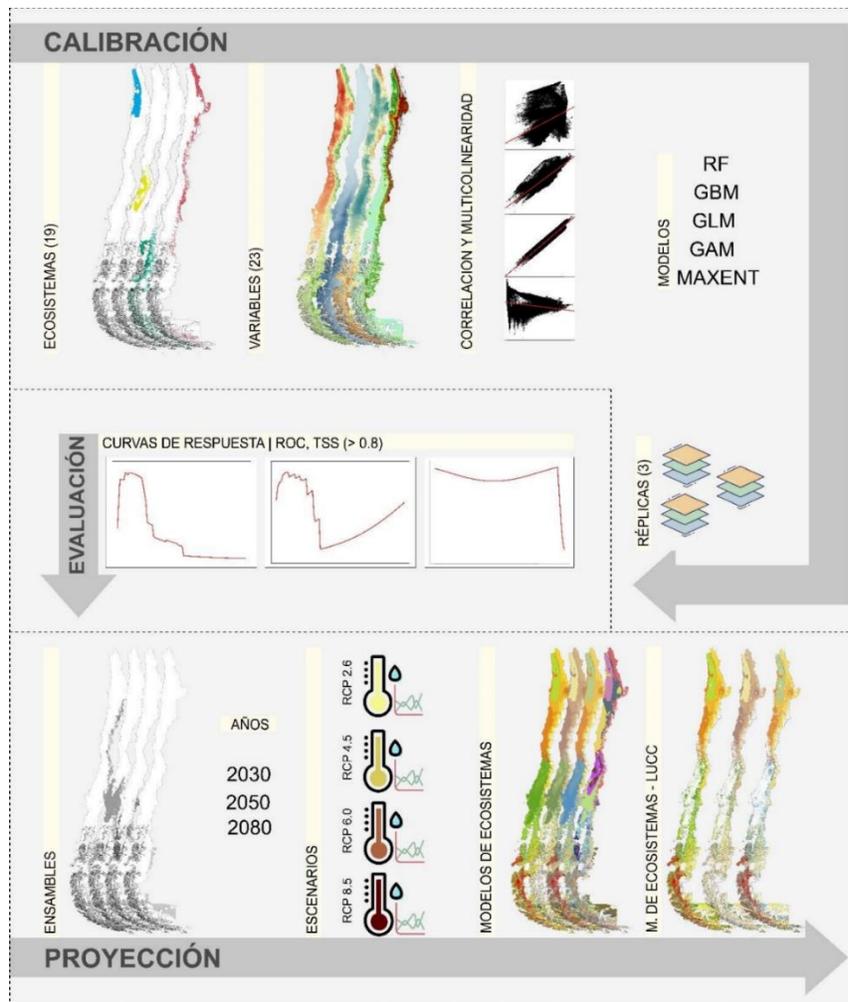


Figura 2. Diagrama de flujo para el modelamiento correlativo de ecosistemas.

Fuente: (Benavidez-Silva *et al.*, 2021)

El modelamiento correlativo se ejecutó utilizando 10 métodos diferentes (Tabla 3) y consta de 3 etapas importantes como son: calibración, evaluación y modelación/proyección que se evidencia en el diagrama de flujo sugerido para el modelamiento correlativo de ecosistemas (Figura 2), y que hablaremos más adelante de cada una de ellas (Benavidez-Silva et al., 2021; Plissock y Fuentes-Castillo, 2011; Thuiller, 2003).

5.3.1. Datos

Es importante tomar en cuenta que para realizar los modelos de distribución potencial de ecosistemas requieren información de presencias, ausencias y variables explicativas (variables bioclimáticas y topográficas) que permitan evidenciar los principales procesos de cambio que podrían existir.

5.3.1.1. Información ecológica (ecosistemas: formaciones vegetales).

Para el desarrollo de la presente investigación se consideró los tipos de cobertura vegetal según (Aguirre Mendoza et al., 2017), dando un total de 22 formaciones ecosistémicas naturales presentes en la provincia de Loja (Tabla 2), las mismas que son consideradas como unidades muestrales a modelar. El criterio a seguir respecto al número de datos es que, los datos de presencia deben ser de 30 a 50 registros como mínimo, para cada ecosistema, que se necesita para evitar la generación de modelos mal evaluados (Plissock y Fuentes-Castillo, 2011; Ren et al., 2016).

Sin embargo, se consideró la irregularidad topográfica de la zona de estudio y la variabilidad climática que tiene cada ecosistema dependiendo de su ubicación altitudinal (Figura 3). Por ello se utilizó el siguiente criterio: ecosistemas que se encuentren distribuidos en un rango altitudinal entre 0 y 1 000 metros, el número de presencias será de 50; ecosistemas distribuidos en un rango altitudinal entre 0 y 2 000 metros, el número de presencias será de 100; y, ecosistemas que se encuentren distribuidos en un rango altitudinal entre 0 y 3 880 metros el número de presencias será de 150.

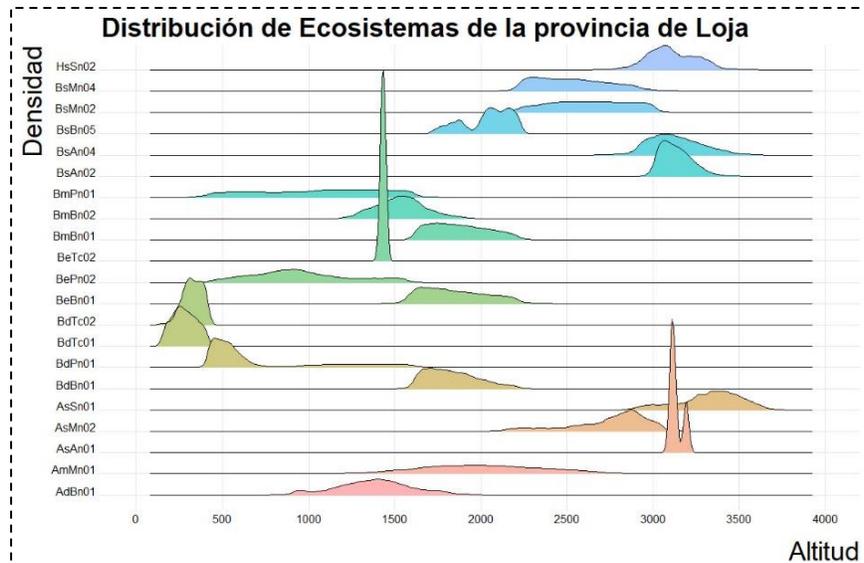


Figura 3. Distribución altitudinal de los ecosistemas de la provincia de Loja.

Nota: **AdBn01**, Arbustal desértico del sur de los Valles; **AmMn01**, Arbustal semidecuido del sur de los Valles; **AsAn01**, Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del sur; **AsMn02**, Arbustal siempreverde montano del sur de los Andes; **AsSn01**, Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo; **BdBn01**, Bosque deciduo montano bajo del Catamayo-Alamor; **BdPn01**, Bosque deciduo piemontano del Catamayo-Alamor; **BdTc01**, Bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BdTc02**, Bosque bajo y Arbustal deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BeBn01** Bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo- Alamor; **BePn02**, Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor; **BeTc02**, Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BmBn01**, Bosque semidecuido montano bajo del Catamayo-Alamor; **BmBn02**, Bosque y Arbustal semidecuido del sur de los Valles; **BmPn01**, Bosque semidecuido piemontano del Catamayo-Alamor; **BsAn02**, Bosque siempreverde montano alto del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes; **BsAn04**, Bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor; **BsBn05**, Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor; **BsMn02**, Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes; **BsMn04**, Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor; **HsSn02**, Herbazal del Páramo. *El ecosistema **BsBn02**, Bosque siempreverde montano bajo del Sur de la Cordillera Oriental De Los Andes, no se consideró en este gráfico debido a que es una entidad muy pequeña.

Se consideran presencias a los puntos georreferenciados de cada ecosistema, los mismos que se encuentran distantes 1 km uno de otro, estos puntos representan las observaciones de cada ecosistema, es decir los puntos representan a la entidad evaluada en el espacio geográfico (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Como los ecosistemas son unidades mutuamente excluyentes y sustitutos geográficos, por lo que cuando un determinado ecosistema se registró como presencia (1), los demás se registraron como ausencias o pseudo-ausencias (0) (Anjos y de Toledo, 2018) o lugares donde presumiblemente no se encuentran distribuidos los ecosistemas. Para las ausencias se genera una nube de 10 000 puntos fuera de cada ecosistema, estos puntos permitieron representar las ausencias reales de cada ecosistema (Benavidez-Silva et al., 2021). Los datos de presencia y ausencia de ecosistemas fueron seleccionados aleatoriamente y georreferenciados en coordenadas geográficas con ayuda de una herramienta de geoprocso en el software ArcGIS pro 2.8.4 (licencia estudiantil).

Es importante mencionar que las unidades muestrales (ecosistemas) trasvasan fronteras impuestas por el ser humano, bajo esta perspectiva se ha considerado a la unidad muestral a toda la Zona Sur del Ecuador y no solo dentro de los límites políticos de la provincia de Loja para que sea representativa, debido a que hay ecosistemas muy pequeños y muy fragmentados.

5.3.1.2. Variables biofísicas.

La elección de las variables debe revelar la información más importante de la entidad natural analizada, debido a que éstas determinan el resultado final de los modelos predictivos (Plisoff y Fuentes-Castillo, 2011). Se utilizaron variables climáticas (Tabla 4) con una resolución de 1 km x 1km, las mismas que, permitieron representar adecuadamente la distribución potencial de los ecosistemas en el espacio climático y geográfico. Los periodos de tiempo que se propone evaluar están basados en un escenario actual que representan un periodo de tiempo de 1970 – 2020 y un escenario climático futuro proyectado para el 2080 (promedio 2060 – 2089) (Gang et al., 2017).

Tabla 4. Variables climáticas utilizadas en los modelos.

Variables Bioclimáticas		
Nombre	Descripción	Unidades
BIO1	Temperatura media anual	°C
BIO2	Rango diurno medio (media mensual (Temp max - Temp min))	°C
BIO3	Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (× 100)	
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar × 100)	°C
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	°C
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	°C
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	°C
BIO9	Temperatura media del cuarto más seco	°C
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C
BIO11	Temperatura media del cuarto más frío	°C
BIO12	Precipitación anual	mm
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	mm
BIO14	Precipitación del mes más seco	mm
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	mm
BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo	mm
BIO17	Precipitación del cuarto más seco	mm
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
BIO19	Precipitación del cuarto más frío	mm

Fuente: (Karger et al., 2021)

Con lo descrito anteriormente las variables ambientales se las obtuvo de los portales web Climatology at high resolution for the earth's land surface areas (CHELSA) (<https://chelsa->

climate.org/) y de Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), (<http://www.ccafs-climate.org/>) que ofrecen una mejor calidad de datos. Además se consideran 4 variables topográficas como hillshade (sombreado de laderas), slope (pendiente) y aspect (orientación) que se derivan del Modelo Digital de Elevación (DEM) a una resolución espacial de 1km x 1km, las cuales según Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011) son de gran utilidad para obtener modelos con mayor ajuste y detalle.

5.3.2. Calibración

Una vez determinada las observaciones para cada ecosistema, se relaciona las observaciones con las variables climáticas y topográficas para así determinar el espacio climático en el que se encuentran los distintos ecosistemas, esta selección es importante, ya que permite revelar información de las variables que más influyen sobre la distribución de los ecosistemas. Si dos o más variables están correlacionadas entre sí, podría ser difícil separar los efectos individuales de cada variable sobre el modelo y fundamentalmente variables correlacionadas podrían generar efectos negativos importantes sobre los resultados al momento de transferir el modelo a un nuevo espacio geográfico o un nuevo tiempo (Feng et al., 2019).

Por lo tanto, se determina las medidas correlativas entre las variables bioclimáticas y topográficas para eliminar la multicolinealidad, evitando que el modelo se sobreajuste y minimizar la incertidumbre de la predicción del modelo (Anjos y de Toledo, 2018; Benavidez-Silva et al., 2021; Ren et al., 2016). Los predictores altamente correlacionados son eliminados del modelo usando la correlación por pares de Pearson con un umbral de 0,7 (Benavidez-Silva et al., 2021; Brun et al., 2019; Ren et al., 2016) y el método de Variance Inflation Factor (VIF) donde se consideró que los valores superiores a 5 en primera instancia o 10 en un segundo análisis que podrían indicar multicolinealidad entre variables, lo que causaría errores de predicción (Atauchi et al., 2020; Benavidez-Silva et al., 2021).

El método de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Mientras que VIF estima la severidad del efecto de la multicolinealidad, midiendo el grado en que la varianza de una regresión aumenta debido a la colinealidad en comparación con el uso de variables correlacionadas. En este caso los valores de VIF cercanos a 10 son considerados como críticos en la correlación de variables múltiples.

Además, para evaluar la calidad de los predictores que mejor describen la presencia de los ecosistemas, se entrena los modelos mediante el procedimiento de validación cruzada, que consiste en dividir los datos de presencia de manera aleatoria en dos subconjuntos, para calibrar el 70% y el 30% restante se usó para evaluar las predicciones del modelo (Benavidez-Silva et al., 2021; Thuiller, 2003). Guisan y Thuiller (2005) recomiendan utilizar criterios sólidos que permitan detectar problemas como el sobreajuste, sobre dispersión o la multicolinealidad de las variables predictoras y así asegurar que las predicciones sean exitosas.

5.3.3. Evaluación

Es fundamental evaluar la precisión predictiva (o desempeño) de los modelos de distribución (Allouche et al., 2006), para ello, es fundamental elegir métricas adecuadas que permitan caracterizar adecuadamente la confiabilidad de los resultados generados, en este estudio se utilizó dos métodos estadísticos para evaluar el rendimiento de los modelos: True Skill Statistics (TSS > 0.8) y Receiver Operating Characteristic (ROC (AUC > 0.8)), que se basan en la sensibilidad y especificidad (Anjos y de Toledo, 2018; Benavidez-Silva et al., 2021; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Los modelos que generan predicciones de presencia-ausencia generalmente evalúan comparando predicciones con un conjunto de sitios de validación y construyendo una matriz de confusión que registra el número de verdaderos positivos (a), falsos positivos (b), falsos negativos (c), verdadero negativo (d), casos predichos por el modelo. Dos medidas alternativas que a menudo se derivan de la matriz de confusión son la sensibilidad y la especificidad. La sensibilidad es la proporción de presencias que se identifican correctamente mientras que la especificidad es la proporción de ausencias que se identifican correctamente (Figura 3) (Somodi et al., 2017)

Tanto ROC y TSS utilizan estas métricas para evaluar los SDM correlativos. ROC es la representación gráfica del área bajo la curva (AUC) de la capacidad discriminativa de un modelo para todos los posibles puntos de corte y necesita que todos los datos que se evalúen sean de presencia/ausencia. En el eje de las ordenadas se representa el error de omisión (sensibilidad) y el de las abscisas representa al error de comisión, ya que representa el complemento de la especificidad o falsos positivos. Los valores de AUC varían entre 0 y 1, AUC y se aplica ampliamente como métrica para evaluar los SDM, pero se menciona que tiende a ser muy optimista, y por lo tanto a menudo se complementa con otra métrica como TSS (Somodi et al., 2017).

Por su parte TSS se define en función de los componentes de la matriz estándar que representan coincidencias y desajustes entre observaciones y predicciones. Es independiente de la prevalencia, ya que su valor se puede calcular a partir de varias tasas de error, sin utilizar el valor de prevalencia. A partir de la matriz de confusión se calcula la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y la tasa de verdaderos negativos (especificidad); entonces, TSS es igual a la sensibilidad más la especificidad menos 1 (Figura 3) (Feng et al., 2019; Somodi et al., 2017).

Los índices se representan por medio de una gráfica que mide el equilibrio entre la sensibilidad (proporción de presencias verdaderas respecto al número total de presencias proyectadas) y especificidad (proporción de presencias falsas respecto al número total de ausencias proyectadas) en función del umbral de clasificación (Berry et al., 2007).

		Actual class		
		Presence	Absence	
Predicted class	Presence	a	b	Accuracy: $\frac{a+d}{a+b+c+d}$
	Absence	c	d	True skill statistics (TSS): $Sensitivity + Specificity - 1$
		Sensitivity: $\frac{a}{a+c}$	Specificity: $\frac{d}{a+d}$	

Figura 4. Matriz de confusión.

Fuente: (Yoon & Lee, 2023)

En esta etapa se calcula la contribución de cada predictor bioclimático en cada modelo que permite explicar los patrones de la variables de respuesta que varía entre cero (menor importancia) y 1 (mayor importancia) (Anjos y de Toledo, 2018). Para esta investigación se considera un umbral de 0.8 como métrica para evaluar los modelos, los modelos que superen esté umbral son considerados para los ensambles finales y los mal evaluados serán descartados de los ensambles finales (Anjos y de Toledo, 2018; Benavidez-Silva et al., 2021).

5.3.4. Simulación/proyección

La proyección en el espacio geográfico es el paso final en el proceso de modelamiento (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Cada modelo se ejecutó para cada ecosistema, se comparó y se usó para derivar predicciones espaciales sobre los datos originales. La última etapa del

modelamiento de ecosistemas considera los modelos con el mejor poder predictivo para la proyección en el espacio geográfico y climático (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011), la misma que será implementada luego de haber calibrado y evaluado el desempeño de los modelos y se implementará un umbral específico que permita identificar los valores inferiores al umbral como ausencia de ecosistemas y valores superiores al umbral serán considerados como presencias (Benavidez-Silva *et al.*, 2021).

Luego de modelar el ecosistema actual, se implementó un método de ensamble, incluyendo todos los modelos que Biomod2 permitió reducir la incertidumbre bajo el poder predictivo (<0.8 en el TSS y ROC). Los modelos con el mejor poder predictivo se consideraron para el ensamble de los modelos, considerando los umbrales individuales de cada técnica, los cuales nos permitir obtener un resultado más robusto, estos modelos individuales fueron proyectados posteriormente al espacio geográfico actual y luego se proyectaron al espacio geográfico futuro para el año 2080 bajo el escenario de emisión RCP 6.0, considerando las mismas variables predictivas establecidas en la etapa de calibración (Benavidez-Silva *et al.*, 2021).

Una vez evaluado el desempeño de cada modelo, se realizaron ensambles de los modelos, considerando los umbrales individuales de cada técnica, los cuales nos podrían permitir un resultado más robusto, estos modelos individuales fueron proyectados posteriormente al espacio actual y futuro donde se consideraron las mismas variables predictivas de la etapa de calibración. Para ello fue necesario considerar que cada modelo evaluado con TSS y ROC debe mostrar valores mínimos de 0.8 para ser considerados en el ensamble individual de cada ecosistema.

Es necesario en esta etapa considerar que, al proyectar sobre el mismo espacio geográfico, pero en distinto espacio climático futuro, podría existir incertidumbres asociadas al comportamiento de las variables bioclimáticas, ya que en general, se puede asumir un cambio lineal de estas variables, pero, puede que las combinaciones de variables respondan a climas que no existen en la actualidad o que son nuevos para determinadas zonas geográficas.

6. Resultados

6.1. Variables biofísicas que determinan la distribución de los ecosistemas.

En los análisis de correlación de Pearson y VIF para el grupo de las 23 variables predictoras utilizadas para generar los modelos correlativos de los ecosistemas de la provincia de Loja, se encontró que los ecosistemas no utilizan los mismos predictores ambientales para explicar su presencia en el espacio geográfico. La Tabla 5 muestra un resumen de todas variables explicativas que no presentan problemas de correlación y que son utilizadas por cada ecosistema para el proceso de modelamiento.

Tabla 5. Variables biofísicas utilizadas para cada ecosistema.

Variables Biofísicas	ECOSISTEMAS DE LA PROVINCIA DE LOJA																						
	AdBn01	AmMn01	AsAn01	AsMn02	AsSn01	BdBn01	BdPn01	BdTc01	BdTc02	BeBn01	BePn02	BeTc02	BmBn01	BmBn02	BmPn01	BsAn02	BsAn04	BsBn02	BsBn05	BsMn02	BsMn04	HsSn02	
Bio 1																							
Bio 2	+		+							+		+							+	+		+	
Bio 3	+	+		+			+	+	+	+	+		+	+	+		+					+	
Bio 4		+		+		+			+	+	+		+	+	+	+	+	+			+	+	
Bio 5				+					+		+												
Bio 6												+											
Bio 7		+	+	+	+										+	+	+					+	
Bio 8									+														
Bio 9					+		+								+				+				
Bio 10									+														
Bio 11									+														
Bio 12	+	+		+	+						+		+			+			+	+		+	
Bio 13			+												+							+	
Bio 14							+								+			+				+	
Bio 15		+		+							+	+		+									
Bio 16																							
Bio 17							+	+					+										
Bio 18	+	+	+	+	+		+			+			+			+	+	+		+	+	+	
Bio 19	+	+				+				+	+		+	+					+		+		
DEM	+	+	+			+				+			+	+		+	+		+	+	+	+	
Aspect		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+		
Hillshade				+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+			+				+	
Slope	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: **AdBn01**, Arbustal desértico del sur de los Valles; **AmMn01**, Arbustal semidecuido del sur de los Valles; **AsAn01**, Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del sur; **AsMn02**, Arbustal siempreverde montano del sur de los Andes; **AsSn01**, Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo; **BdBn01**, Bosque deciduo montano bajo del Catamayo-Alamor; **BdPn01**, Bosque deciduo piemontano del Catamayo-Alamor; **BdTc01**, Bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BdTc02**, Bosque bajo y Arbustal deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BeBn01** Bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo- Alamor; **BePn02**, Bosque siempreverde estacional

piemontano del Catamayo-Alamor; **BeTc02**, Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo; **BmBn01**, Bosque semidecuido montano bajo del Catamayo-Alamor; **BmBn02**, Bosque y Arbustal semidecuido del sur de los Valles; **BmPn01**, Bosque semidecuido piemontano del Catamayo-Alamor; **BsAn02**, Bosque siempreverde montano alto del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes; **BsAn04**, Bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor; **BsBn02**, Bosque siempreverde montano bajo del Sur de la Cordillera Oriental De Los Andes; **BsBn05**, Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor; **BsMn02**, Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes; **BsMn04**, Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor; **HsSn02**, Herbazal del Páramo.

En la Tabla 5 muestra que las variables bioclimáticas Bio 1 y Bio 16 que corresponden a la Temperatura media anual y Precipitación del cuarto más húmedo respectivamente, no se consideran como variables explicativas para ningún ecosistema, esto debido a que son variables que generaran una elevada correlación con otras variables en la etapa de calibración (Figura 4, ejemplo de cómo se realiza la matriz de correlación). Mientras que las variables explicativas que mayor presencia tienen en el proceso de modelamiento son las topográficas, consideradas en la mayoría de los ecosistemas: Slope (pendiente) en 20 modelos, Aspect (orientación de laderas) en 18 modelos, y Hillshade (sombreado de laderas) y el DEM (modelo digital de elevación) se consideraron para modelar 13 ecosistemas (Tabla 5).

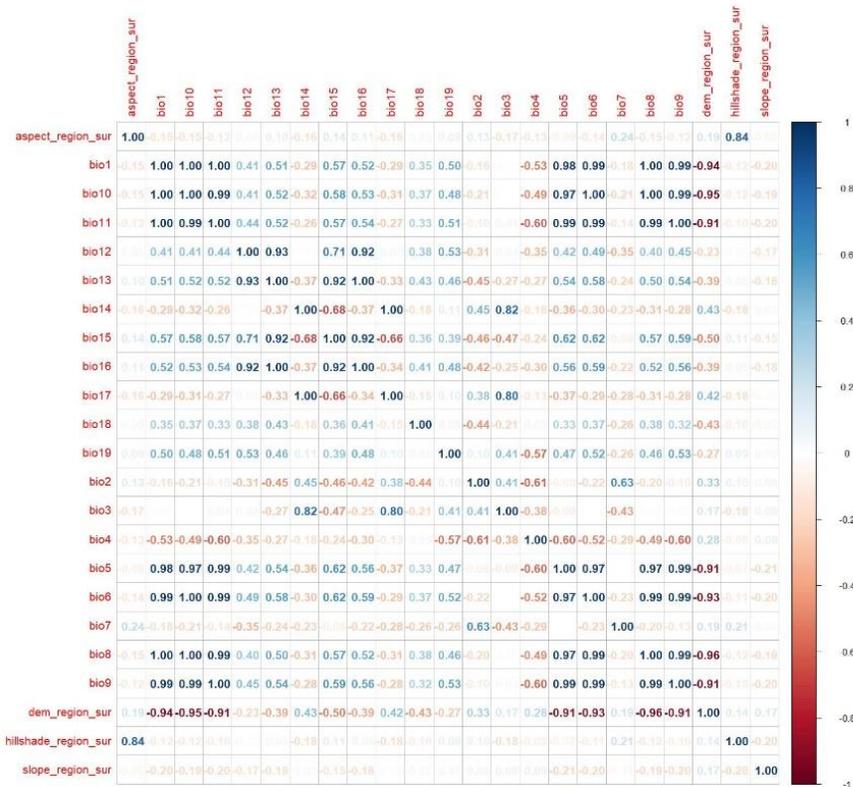


Figura 5. Gráfica de correlaciones (ecosistema AdBn01).

Mientras que las variables bioclimáticas aparecen en menor cantidad en los procesos del modelamiento, pero no por ello de menor importancia. Entre las más importantes tenemos a la Bio 4 que corresponde a la Estacionalidad de la temperatura que aparece como la más importante de las variables bioclimáticas que se utilizó para el modelamiento de 15 ecosistemas (Arbustal, Bosque siempreverde estacional, Bosque semidecíduo montano, Bosque siempreverde montano y Páramo), seguida de la Bio 18 que corresponde a la Precipitación del trimestre más cálido que se utilizó para el modelamiento de 14 ecosistemas (Arbustal, Bosque siempreverde montano y Páramo), la Bio 3 que corresponde a la Isotermalidad se la utiliza para modelar 13 ecosistemas (Bosque decíduo montano, Bosque siempreverde estacional y Bosque semidecíduo piemontano) y la Bio 12 que corresponde a la Precipitación anual se utilizó para el modelamiento de 10 ecosistemas (Arbustal y Bosque siempreverde montano).

Las variables bioclimáticas son elaboradas en función de la precipitación y temperatura, por ello, es importante considerar como se distribuyen sobre la zona de estudio y el posible cambio que pueden presentar a futuro. En el Anexo 1 y 2 muestra que, tanto la precipitación como temperatura son diferentes de un ecosistema a otro (independientemente si comparten pisos altitudinales), para el año 2080 la temperatura se incrementaría para todos los ecosistemas en promedio ~ 3.2 °C (actual 16.7 °C, año 2080 19.9 °C). Mientras que la precipitación también se incrementaría en promedio ~ 110.5 mm (actual 1 193.5 mm, año 2080 1 304 mm) pero no para todos los ecosistemas ya que posiblemente existiría una disminución de precipitación en 8 de los 22 ecosistemas con una tendencia generalizada en los Bosques montanos (BsMn02 y AsMn02), Bosques montanos alto y Páramo (HsSn02, BsAn04, AsSn01, BsAn02 y AsAn01), con la particularidad del Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor (BsBn05), sería el ecosistema con mayor disminución de precipitación.

6.2. Modelamiento correlativo de ecosistemas y su distribución potencial

Dado que las evaluaciones de los modelos han sido positivas, se procedió a realizar las simulaciones para el escenario de distribución actual y posteriormente para el escenario IPCC – AR5 – RCP 6.0 para el año 2080. Los resultados obtenidos nos permitieron observar que los ecosistemas potencialmente podrían compartir espacios climáticos similares, es decir, que los ecosistemas podrían sobreponer su distribución en distintas zonas con similitud climática y geográfica en el futuro, provocando un comportamiento difuso y una limitante metodológica de los modelos. A esto se lo conoce como áreas de recambio que se muestran en la Figura 6.

Estas áreas de recambio que se visualizan en la Figura 6 se las realiza uniendo o sobreponiendo todos los mapas de los ecosistemas proyectados para el año 2080; en donde las zonas de color rojo serían las áreas de mayor recambio o sobreposición de condiciones climáticas y topográficas que podrían dar en el futuro, mientras que el color azul indica las áreas donde posiblemente no exista sobreposición de condiciones climáticas y topográficas.

Para la provincia de Loja, posiblemente las zonas de recambio más evidentes son la parte centro-norte y centro-oeste, mientras que las partes altas (zonas ocupadas por el ecosistema Arbustal semideciduo del Sur de los Valles y Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes ubicados en el cantón Loja) y las partes bajas ocupadas por el Bosque deciduo serían las zonas con menor sobre posición de condiciones climáticas y topográficas (Figura 6).

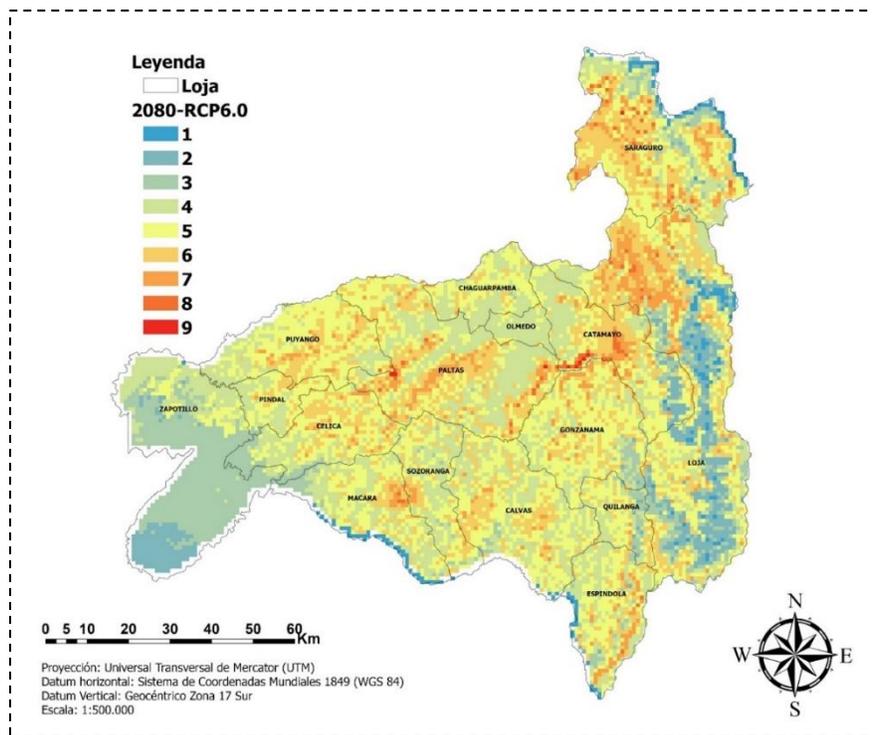


Figura 6. Áreas de recambio de ecosistemas para el año 2080 – RCP 6.0.

Nota: 1 menor acumulación de ecosistemas y 9 mayor acumulación de ecosistemas para el año 2080.

Estas zonas de recambio o acumulación de ecosistemas potencialmente podrían prestar las condiciones ambientales para el desarrollo de diversas especies vegetales que son el componente estructural de los ecosistemas. Se identificó mediante observación y comparación entre los modelos realizados y un mapa de ecosistemas, que las áreas de mayor recambio que se podrían dar, actualmente se encuentran ocupadas por diferentes actividades antrópicas y algunos

ecosistemas fragmentados como el Bosque semidecuido piemontano del Catamayo-Alamor, Arbustal semidecuido del Sur de los Valles, Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor, Bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor, Bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor, Herbazal del Páramo y Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (Figura 6).

El norte del cantón Loja y Suroeste del cantón Saraguro que se muestran en la Figura 6, es una de las zonas de mayor acumulación de ecosistemas donde podrían formarse nuevas configuraciones climáticas que potencien la formación de ecosistemas como: Arbustal desértico del Sur de los Valles, Arbustal semidecuido del Sur de los Valles, Arbustal siempreverde montano alto del Páramo del Sur, Bosque siempreverde montano alto del Sur de la cordillera oriental de los Andes, Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera oriental de los Andes, Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor y Herbazal del Páramo.

Otro espacio geográfico de la provincia de Loja en donde posiblemente exista nuevas configuraciones climáticas y se potencie la mayor formación de estructuras vegetales es el valle de Catamayo, Paltas, Puyango, Célica y Pindal, aquí posiblemente se dé la formación de ecosistemas como: Bosque deciduo montano bajo del Catamayo-Alamor, Bosque deciduo piemontano del Catamayo-Alamor, Bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo, Bosque bajo y arbustal deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo, Bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor, Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor, Bosque semidecuido montano bajo del Catamayo-Alamor, Bosque deciduo piemontano del Catamayo-Alamor (Figura 6), para mayor detalle ver los Anexos 2 – 24.

De acuerdo a lo observado en el modelamiento correlativo nos permite identificar ecosistemas que podrían sufrir cambios representativos respecto a la situación actual (Figura 6 y 7). Dentro de los principales resultados se puede destacar la variación latitudinal y longitudinal con movimientos más tendientes a la redistribución dentro de condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de las especies que albergan los diferentes ecosistemas, estos resultados se pueden observar en la Figura 6 y 7, con mayor detalle en la Tabla 6 y los Anexos 2 – 24.

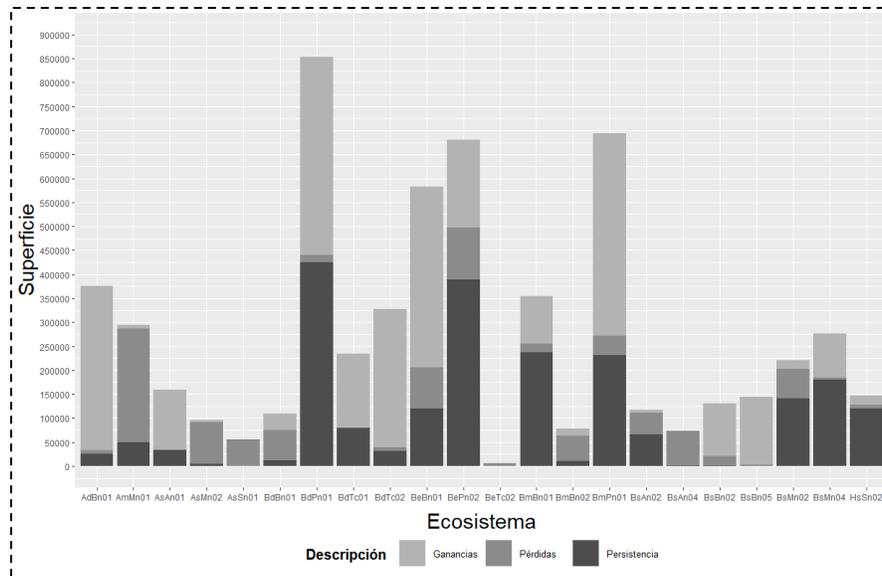


Figura 7. Rango de cambio de los ecosistemas.

Para el escenario (IPCC – AR5 – RCP 6.0) se podría esperar un comportamiento variado de los ecosistemas, algunos mantendrían su rango de distribución en el futuro, es decir se esperaría que persistan en el espacio geográfico actual independientemente de si ganan o pierden superficie, como ejemplo tenemos el Bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo (BdTc01) que persiste el 99.97 % de su superficie proyectada; otros moverían su distribución ganando nuevas áreas como el ecosistema Bosque siempreverde montano bajo de Catamayo-Alamor (BsBn05) que gana 4 249,32 % respecto de su área proyectada; y, algunos ecosistemas se esperaría que pierdan la totalidad de su superficie proyectada en la actualidad como es el ecosistema Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo que pierde el 100 % de la superficie proyectada (Tabla 6 y Anexos 2 - 24).

La respuesta del movimiento futuro hacia áreas adecuadas para los ecosistemas da cuenta de los cambios que podría darse para la mayoría de los ecosistemas, se observa una expansión en los Bosque secos de tierras bajas (a excepción de BeTc02 que potencialmente desaparecería de la provincia de Loja), Bosques piemontano, Bosque montano Bajo (BmBn02 posee un rango de cambio negativo). Mientras que ecosistemas pertenecientes a pisos altitudinales como Bosque montano y Bosque montano Alto, posible sufran una contracción. El ecosistema más estable es el Herbazal del páramo y Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor. La Tabla 6 muestra un resumen de los cambios observados y el posible movimiento futuro para cada ecosistema de la provincia.

Tabla 6. Respuesta, dirección y rango de cambio de los ecosistemas de la provincia de Loja bajo un escenario de cambio climático.

Formación Vegetal	Superficie proyectada (Ha)	Persistencia (%)	Ganancias (%)	Pérdidas (%)	Rango de cambio (%)	Dirección RCP 6.0 2080
AdBn01	33128.09	76.48	1033.19	23.52	1009.67	↓
AmMn01	286560.83	17.09	2.89	82.91	-80.03	●
AsAn01	33988.82	95.23	368.98	4.77	364.21	← ↓
AsMn02	91435.08	4.76	5.05	95.24	-90.19	→
AsSn01	54950.12	0.92	0.00	99.08	-99.08	●
BdBn01	74505.67	16.13	47.27	83.87	-36.60	↖
BdPn01	440131.43	96.64	93.98	3.36	90.62	↗
BdTc01	79057.43	99.97	195.79	0.03	195.76	→
BdTc02	39606.59	79.13	725.34	20.87	704.46	↑ →
BeBn01	206076.45	58.28	182.46	41.72	140.74	↘
BePn02	497426.48	78.08	36.76	21.92	14.84	●
BeTc02	5888.46	0.00	0.00	100.00	-100.00	
BmBn01	255348.92	93.19	38.73	6.81	31.92	↑
BmBn02	63304.30	16.57	22.49	83.43	-60.94	→
BmPn01	272388.56	84.85	154.61	15.15	139.46	↑ →
BsAn02	110904.17	59.33	6.00	40.67	-34.67	●
BsAn04	73799.08	1.16	0.00	98.84	-98.84	
BsBn02	20884.91	5.37	527.36	94.63	432.74	↑ ↓
BsBn05	3302.73	0.00	4249.32	100.00	4149.32	↙
BsMn02	202953.10	69.34	9.08	30.66	-21.58	●
BsMn04	184901.77	97.53	49.51	2.47	47.04	●
HsSn02	127430.08	94.08	15.81	5.92	9.88	→

Nota: Tonos cálidos indican contracción de la distribución futura y los tonos fríos indican expansión. Color verde indica estabilidad de la distribución futura. Las flechas señalan la dirección del movimiento de la distribución futura y el círculo cuenta la estabilidad del ecosistema.

7. Discusión

En este estudio simulamos la distribución geográfica actual y proyectamos la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja bajo un escenario climático futuro para el año 2080 – RCP 6.0. Aunque los modelos correlativos de distribución potencial están asociados a mucha incertidumbre (Ramachandran et al., 2020), se los sigue utilizando como una herramienta para evaluar las posibles consecuencias de un entorno cambiante sobre la distribución geográfica de las especies (Ashraf et al., 2017; Guisan y Zimmermann, 2000; Robinson et al., 2017). En este caso nos proporciona los medios para realizar una descripción general del comportamiento y las posibles respuestas de los ecosistemas bajo condiciones climáticas futuras.

A partir de los hallazgos encontrados en la presente investigación acerca de las variables explicativas que se utiliza para cada ecosistema, nos lleva a preguntar ¿por qué las variables explicativas son diferentes de un ecosistema a otro aún si comparten pisos bioclimáticos similares? Una posible explicación a esto sería la ubicación geográfica y la irregularidad topográfica que presenta la zona de estudio, que se caracteriza por tener regímenes de temperatura y precipitación muy variados de ecosistema a ecosistema.

Autores como Zangiabadi et al. (2021) y Williams et al. (2012) mencionan que la inclusión de predictores ambientales apropiados en el modelo es un paso crucial ya que afectaría el rendimiento, precisión y realidad de las predicciones. Si se usa demasiadas variables se tiende a tener problemas de correlación y sobreajuste, y el uso deficiente lleva a sobreestimar las predicciones. En este caso, con la finalidad de evitar los errores mencionados, primero se analiza las correlaciones entre variables usando el coeficiente de correlación de Pearson y Variance inflation factor (VIF), cuyo valor debe ser inferior a 0,7, y después se elige las variables menos correlacionas para el proceso de evaluación y proyección.

El uso de variables estáticas y dinámicas ha cobrado relevancia en los últimos tiempos en los procesos de modelamiento, las variables dinámicas (climáticas) se ha demostrado en muchos estudios que el clima es el factor más influyente en la distribución de la vegetación y por lo tanto de ecosistemas (Beck et al., 2018; Beigaité et al., 2022; Feng et al., 2019); mientras que las variables estáticas (topografía) aumentarían la precisión y confiabilidad de los modelos generando resultados más realistas (Zangiabadi et al., 2021).

De acuerdo a los resultados obtenidos la elección de las variables fue relativamente divergente de un ecosistema a otro, sin embargo, se evidencia que las variables topográficas son

las más utilizadas e influyentes en los procesos de modelamiento de la mayoría de ecosistemas de este estudio (Tabla 5), esto es respaldado por la tesis central de ecología vegetal mencionada por Brovkin (2002) en donde las condiciones climáticas ejercen control dominante sobre la distribución espacial de los principales tipos de vegetación a escala global, mientras que a escala de paisaje (como la que estamos estudiando), la contribución de factores secundarios como el tipo de suelo y topografía también son importantes, influyendo en factores como temperatura, radiación solar, hidrología, entre otros. Estas variables cobran aún más relevancia en su uso al tratarse de una provincia que se sitúa en una de las zonas más irregulares del país, con predominancia montañosa, de llanuras raras, pequeñas y profundas y, con un clima inestable (Alvarado y Benavidez-Silva, 2022).

Para poder predecir la respuesta de los ecosistemas ante el cambio climático Beigaité et al. (2022) menciona que es fundamental identificar y comprender los patrones y procesos que vinculan a la vegetación con el clima; por ejemplo los umbrales de temperatura son eficientes para explicar la presencia de Bosques caducifolios, Bosques mixtos, Bosque siempreverde; mientras que los umbrales de precipitación determina la presencia de Pastizales, Sabanas leñosas. Los mismos autores utilizando árboles de decisión (machine learning) identificaron los umbrales climáticos que están relacionados con el tipo de vegetación; por ejemplo, para Matorral cerrado (dominado por plantas perennes leñosas) las variables encontradas son la Bio 12, Bio 11, Bio 3 y Bio5, para Sabana (bosques deciduos) las variables encontradas son la Bio 12, Bio 11, Bio 5, Bio 10 y Bio 14, resultados que si bien están elaborados con una baja resolución respaldan el uso de las variables climáticas utilizados en este estudio.

Sin embargo, en este estudio no es muy fácil distinguir que grupos de variables tanto de precipitación como de temperatura actúan sobre los ecosistemas; de las variables estacionales como la Bio 4, Bio 7 y la Bio 15, son utilizadas en gran medida en casi todos los modelos de ecosistemas; de las medias estacionales se utilizó la Bio 12. En contraste se tiene a las variables limitantes tanto mensuales como anuales como la Bio 5, Bio 6, Bio 13 y Bio 14 no son tan influyentes en los procesos de calibración, consideradas importantes, las mismas que ayudarían a distinguir los tipos de vegetación dominante de las formaciones vegetales y la distribución en el espacio climático (Beigaité et al., 2022). En general, tanto variables de temperatura y precipitación aportan información a los modelos de ecosistemas que modelamos en esta investigación.

Al realizar la elección de las variables que se va a utilizar en el proceso de modelamiento se puede incurrir a errores de comisión (ocurrencia prevista donde no ocurre el ecosistema) y omisión (ausencia prevista donde realmente si ocurre el ecosistema), pero, estos desajustes de predicción no se deben a que el modelo sea malo, sino a que modelo podría estar incompleto (Araújo y Peterson, 2012), debido a que en los procesos de modelamiento no se ha considerado modelar las diferentes especies vegetales presentes en las formaciones vegetales que conforman los ecosistemas de la provincia de Loja. También se debe mencionar que no se ha considerado presiones antrópicas como variables predictoras. En este caso los modelos correlativos generados en esta investigación solo buscan estimar las distribuciones potenciales más que el área de distribución ocupada por los ecosistemas.

Se supone que los predictores topográficos pueden permanecer constantes durante escalas de tiempo considerables (Brun et al., 2019) a menos que suceda una catástrofe, no es el caso con las variables bioclimáticas que están sujetas a cambios. Si bien la información sobre los impactos potenciales del cambio climáticos sobre los ecosistemas para Loja son escasos, los análisis recientes realizados por Armenta et al. (2016) y las proyecciones realizadas Beck et al. (2018), Aguirre et al. (2015), por el IPCC, entre otros concuerdan con los datos obtenidos en este estudio, en un posible incremento tanto de precipitación como de temperatura para escenarios futuros.

Los resultados nos indican que es posible que exista un incremento tanto de precipitación (~ 110.5 mm en promedio) como de temperatura (~ 3.2 °C en promedio) para el escenario analizado en la zona de estudio (Anexos 1 y 2), resultados que concuerdan con las proyecciones realizadas por Armenta et al. (2016) para el año 2071 – 2100 (RCP 8.5), en donde predicen un incremento en la temperatura media de aproximadamente entre 2.5 y superior a 4 °C, y un incremento en la precipitación de hasta el 30 % (pero no en toda la provincia de Loja) y una reducción de hasta el 20 % para ciertos lugares donde se encuentran estaciones meteorológicas.

Así mismo, los resultados obtenidos tienen concordancia con las proyecciones de la clasificación climática Köppen-Geiger para el 2071 – 2100, en donde la temperatura se incrementaría ~ 3 °C y la precipitación se incrementaría ~ 1.4 (sin unidades en el paper) para la zona de estudio (Beck et al., 2018). Y, con las proyecciones realizadas por Aguirre et al. (2015) para un escenario más pesimista (RCP 8.5) y para el año 2050, en donde la precipitación promedio anual sufriría un incremento máximo del 16.8 al 20.4% en el 14% de la provincia de Loja (Pindal, Zapotillo, Puyango). Mientras que la temperatura promedio anual se incrementaría gradualmente

desde la costa hasta la cuenca amazónica (de 2.01 a 2.26 °C), predicciones que si bien se daría un incremento en su intensidad no sucederían de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio.

Otra limitante de este estudio es el comportamiento difuso de los modelos (Figura 4) se debe a la relación que existe entre espacio geográfico con el espacio ambiental, es decir que, “para cada punto en el espacio geográfico existe solo un punto en el espacio ambiental, pero para cada punto en el espacio ambiental se puede encontrar varios puntos del espacio geográfico”(Soberón et al., 2017), lo que eventualmente genera que los ecosistemas potencialmente podrían compartir un espacio climático-geográfico similar y una posible sobre posición de ecosistemas en el futuro. Sin embargo, los resultados no deben interpretarse sin una comprensión cuidadosa de las numerosas limitaciones implicadas, como la falta de interacción entre los organismos que componen los ecosistemas, sensibilidad, resiliencia y adaptación al cambio climático.

En cuanto a las proyecciones del modelo para el 2080, se esperan cambios futuros para la mayoría de los ecosistemas. Nuestros modelos sugieren una posible disminución de idoneidad climática, especialmente para los ecosistemas de Bosque montano alto, Bosque montano, Bosque montano alto y Páramo. Una posible explicación estaría asociado con la disminución de precipitación en los meses más secos (Bio 18), volviéndose más sensibles a la variabilidad climática, principalmente debido a la disminución de la disponibilidad de humedad (Bio 15) (Anjos y de Toledo, 2018). Por lo tanto, los bosques se volverían más vulnerables a las sequías (Rocha, 2022). En el caso del ecosistema Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo se predice una posible pérdida de toda su distribución geográfica para la provincia de Loja, se podría deber a las bajas temperaturas (Bio 6) que limitan la distribución hacia latitudes más altas.

Por otro lado, es probable que las nuevas condiciones climáticas favorezcan el desarrollo de formaciones vegetales y por consiguiente la expansión o formación de otros ecosistemas, se predijeron ganancias para la mitad de las formaciones vegetales de Loja, los ecosistemas de Bosque seco de tierras bajas y Bosque piemontano serían posiblemente los que expandan su superficie, trasladándose hacia superficies más elevadas. Sin embargo, dado que la distribución de las especies se encuentra limitado por varios factores, estos resultados se deberían interpretar como las condiciones climáticas idóneas de las formaciones vegetales más no como modelos de distribución de ecosistemas (Anexos 3 a 24). Así también se daría la posibilidad de algunos ecosistemas permanecer en tiempo y espacio sin presentar variaciones en su distribución.

Los ecosistemas son propensos a dinámicas no lineales que pueden cambiar su función y estructura de una configuración a otra, ejemplos de tales cambios de régimen incluyen las transiciones de bosques a sabanas, difíciles de revertir y puede afectar a los servicios que la sociedad obtiene de los ecosistemas, incluida su pérdida de resiliencia (capacidad de un sistema para soportar la soportar perturbaciones sin perder su funcionalidad, estructura y, por lo tanto, su identidad). Sin embargo, predecir cuándo y dónde ocurrirán estas transiciones sigue siendo un desafío para los investigadores. Comprender esto está relacionado con la capacidad de observar y medir la resiliencia (Li et al., 2018).

En la práctica la superposición espacial y geográfica, proporciona un mapa intuitivo para la toma de decisiones y la adaptación al cambio climático. Los mapas de distribución potencial de ecosistemas pueden utilizarse para identificar el impacto del cambio climático. También se puede utilizar para plantear estrategias apropiadas de conservación de los ecosistemas bajo climas cambiantes. Las estrategias de manejo deben enfatizar la identificación y protección de refugios climáticos, áreas o especies, la protección de ecosistemas naturales intactos y la minimización de la interferencia y las actividades humanas. Deben protegerse áreas o restaurarse para ayudar a los ecosistemas a sobrevivir a condiciones climáticas severas.

8. Conclusiones

Las variables explicativas más utilizadas en el proceso de modelamiento de los ecosistemas son las topográficas como el Slope, Aspect, Hillshade y DEM; que se utilizaron para modelar la mayoría de los ecosistemas.

Las variables bioclimáticas más importantes tenemos a la Bio 4 (estacionalidad de la temperatura) que se utilizó para el modelamiento de 15 ecosistemas, seguida de la Bio 18 (precipitación del trimestre más cálido) que se utilizó para el modelamiento de 14 ecosistemas, la Bio 3 que (Isotermalidad) utilizada para modelar 13 ecosistemas y la Bio 12 (precipitación anual) que se utilizó para el modelamiento de 10 ecosistemas.

Tanto temperatura como precipitación se incrementaría en el futuro, la temperatura posiblemente se incremente 3.2 °C, mientras que la precipitación se incrementaría en promedio 110.5 mm, pero no para todos los ecosistemas ya que posiblemente existiría una disminución de precipitación en 8 de los 22 ecosistemas con una tendencia generalizada para los ecosistemas que se encuentran en los pisos bioclimáticos como: Bosques montano, Bosques montanos alto y Páramo.

Los modelos de distribución potencial de ecosistemas bajo el escenario medio de emisión de CO₂ RCP 6.0 para el año 2080, nos indican que es posible que exista áreas con similitud climática y topográfica, lo que supondría una sobreposición de ecosistemas en el futuro. Estas áreas en la actualidad se encuentran ocupadas por diferentes actividades antrópicas. Lo que podría generar nuevas configuraciones climáticas y por lo tanto de ecosistemas.

Como conclusión final tenemos que el calentamiento global si tendría efectos sobre los ecosistemas de la provincia de Loja, los resultados nos indican que existiría una redistribución geográfica de las condiciones climáticas que hoy gobiernan los ecosistemas, ahora bien, hay que preguntarse si esas condiciones climáticas son suficientes como para que las principales formaciones vegetales que dominan los ecosistemas se puedan desarrollar; porque las condiciones climáticas están ahí, pero no sabemos si las formaciones vegetales van a tener la capacidad de colonizar estas zonas geográficas o si las especies que habitan estas zonas van a ser capaces de adaptarse a los cambios de precipitación y temperatura en el futuro. Es esto lo que podría definir si un ecosistema se expande, se contrae o si se mantiene en su rango geográfico.

9. Recomendaciones

Los SDM correlativos es una técnica que continua evolucionando, pueden subestimar o sobreestimar los sistemas naturales y no es razonable esperar que los modelos reflejen con precisión los mecanismos inherentes a un proceso espacio-temporal tan complejo como la distribución de especies; por ello, se debe considerar los resultados generados en este estudio como la distribución potencial de los diferentes ecosistemas, es decir, ahí se encuentran las condiciones ambientales que favorecen el desarrollo de las especies vegetales de los diferentes ecosistemas.

La calibración juega un papel determinante en los procesos de modelamiento tanto de especies como ecosistemas. Para ello es fundamental elegir métricas adecuadas que permitan discriminar de manera objetiva las variables que generen colinealidad y se genere sobreajuste, subestimación o sobreestimación de las predicciones de distribución potencial

Estos resultados deben verse como una fuente de información sobre los posibles cambios espaciales en los ecosistemas bajo un escenario de cambio climático. Por lo tanto, se recomienda interpretar los resultados desde la perspectiva de las "condiciones climáticas" para el posible establecimiento de un determinado ecosistema. Este trabajo constituye en comprender los impactos del cambio climático de los ecosistemas en lugar de las especies individuales, pero se recomienda analizar también la sensibilidad y la resiliencia de la vegetación de los ecosistemas frente al cambio climático.

10. Bibliografía

- Aguirre Mendoza, Z., Aguirre Mendoza, N., & Muñoz, J. (2017). Biodiversidad de la provincia de Loja, Ecuador. *Arnaldoa*, 24(2), 523–542. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24206>
- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Coronel, V., Samaniego, N., Ojeda, T., & Aguirre, Z. (2015). Vulnerabilidad al cambio climático en la Región Sur del Ecuador: Potenciales impactos en los ecosistemas, producción de biomasa y producción hídrica. In *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/298753988%0AVulnerabilidad>
- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Ojeda, T., Sanamiego, N., Furniss, M., & Aguirre, Z. (2017a). Potential impacts to dry forest species distribution under two climate change scenarios in southern Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 18–29. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1258867>
- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Ojeda, T., Sanamiego, N., Furniss, M., & Aguirre, Z. (2017b). Potential impacts to dry forest species distribution under two climate change scenarios in southern Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 18–29. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1258867>
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Alvarado, M., & Benavidez-Silva, C. (2022). *Cambio y continuidad en la valorización del espacio agrario de Loja*. May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11054.38725>
- Anjos, L. J. S., & de Toledo, P. M. (2018). Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. *PLOS ONE*, 13(3), e0194654. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194654>
- Araújo, M. B., & Peterson, A. T. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93(7), 1527–1539. <https://doi.org/10.1890/11-1930.1>
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). *PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA ECUADOR, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*. <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/EQU/14> Proyecciones de Clima Futuro para Ecuador en base a IPCC-AR5.pdf
- Ashraf, U., Peterson, A. T., Chaudhry, M. N., Ashraf, I., Saqib, Z., Ahmad, S. R., & Ali, H. (2017). Ecological niche model comparison under different climate scenarios: A case study of *Olea*

- spp. in Asia. *Ecosphere*, 8(5), 1–13. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1825>
- Atauchi, P. J., Auca-Chutas, C., Ferro, G., & Prieto-Torres, D. A. (2020). Present and future potential distribution of the endangered *Anairetes alpinus* (Passeriformes: Tyrannidae) under global climate change scenarios. *Journal of Ornithology*, 161(3), 723–738. <https://doi.org/10.1007/s10336-020-01762-z>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Beigaitė, R., Tang, H., Bryn, A., Skarpaas, O., Stordal, F., Bjerke, J. W., & Žliobaitė, I. (2022). Identifying climate thresholds for dominant natural vegetation types at the global scale using machine learning: Average climate versus extremes. *Global Change Biology*, 28(11), 3557–3579. <https://doi.org/10.1111/gcb.16110>
- Benavidez-Silva, C., Jensen, M., & Pliscoff, P. (2021). Future scenarios for land use in Chile: Identifying drivers of change and impacts over protected area system. *Land*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/land10040408>
- Berry, P. M., Harrison, P. a, Dawson, T. P., & Walmsley, C. a. (2007). Modelling Natural Resource Responses to Climate Change (MONARCH): MONARCH 3 contract report. *UKCIP Technical Report, January*.
- Brehm, G. ., Homeier, J. ., Fiedler, K. ., Kottke, I. ., Illig, J. ., Nöske, N. M. ., Werner, F. A. ., & Breckle, S. W. (2008). Mountain Rain Forests in Southern Ecuador as a Hotspot of Biodiversity – Limited Knowledge and Diverging Patterns. *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. Ecological Studies*, 15–23. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_2
- Brovkin, V. (2002). Climate-vegetation interaction. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 12(10), 57–72. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020452>
- Brun, P., Thuiller, W., Chauvier, Y., Pellissier, L., Wüest, R. O., Wang, Z., & Zimmermann, N. E. (2019). Model complexity affects species distribution projections under climate change. *Journal of Biogeography*, 47(1), 130–142. <https://doi.org/10.1111/jbi.13734>
- Busch, J., Dave, R., Hannah, L., Cameron, A., Rasolohery, A., Roehrdanz, P., & Schatz, G. (2012). Climate Change and the Cost of Conserving Species in Madagascar. *Conservation Biology*, 26(3), 408–419. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01838.x>

- Chay-Hernández, D. A., Delfín-González, H., Meléndez-Ramírez, V., & González-Hernández, A. (2012). Revisión de modelos predictivos de especies en el control biológico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *15*(2), 337–356.
- Coetsee, B. W. T., Robertson, M. P., Erasmus, B. F. N., van Rensburg, B. J., & Thuiller, W. (2009). Ensemble models predict important bird areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, *18*(6), 701–710. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00485.x>
- Correa-Lima, A. P. A., Varassin, I. G., Barve, N., & Zwiener, V. P. (2019). Spatiooral effects of climate change on the geographical distribution and flowering phenology of hummingbird-pollinated plants. *Annals of Botany*, *124*(3), 389–398. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz079>
- Cueva, J. L. (2012). Elaboración y análisis del estado de la cobertura vegetal de la provincia de Loja - Ecuador. In *Universidad Internacional de Andalucía*. <https://dspace.unia.es/handle/10334/1794>
- Dagtekin, D., Şahan, E. A., Denk, T., Köse, N., & Dalfes, H. N. (2020). Past, present and future distributions of Oriental beech (*Fagus orientalis*) under climate change projections. *PLoS ONE*, *15*(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242280>
- Delgado-Aguilar, M. J., Konold, W., & Schmitt, C. B. (2017). Community mapping of ecosystem services in tropical rainforest of Ecuador. *Ecological Indicators*, *73*, 460–471. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.020>
- Feng, X., Park, D. S., Liang, Y., Pandey, R., & Papeş, M. (2019). Collinearity in ecological niche modeling: Confusions and challenges. *Ecology and Evolution*, *9*(18), 10365–10376. <https://doi.org/10.1002/ece3.5555>
- Fletcher, R., & Fortin, M.-J. (2018). Spatial Ecology and Conservation Modeling. In *Spatial Ecology and Conservation Modeling*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01989-1>
- Gang, C., Zhang, Y., Wang, Z., Chen, Y., Yang, Y., Li, J., Cheng, J., Qi, J., & Odeh, I. (2017). Modeling the dynamics of distribution, extent, and NPP of global terrestrial ecosystems in response to future climate change. *Global and Planetary Change*, *148*, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.007>
- Gil, G. (2018). *Modelos de distribución y su aplicación en la conservación de mamíferos terrestres sudamericanos* (Issue January) [universidad Autónoma de Madrid]. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/681434/gil_carbo_guillermo_eduardo.pdf

?sequence=1

- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Guisan, A., Zimmermann, N. E., Cartografía, S. De, Cscf, F., & Neuchâtel, C.-. (2000). *Modelos predictivos de distribución de hábitat en ecología pocas especies en términos de sus respuestas para evaluar el impacto del uso acelerado de la distribución de organismos (por ejemplo , clima - Actualmente se utiliza una variedad de modelos de es. 135, 147–186.*
- Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Hannah, L. (2015). Modeling Species and Ecosystem Response. *Climate Change Biology*, 237–262. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-420218-4.00011-1>
- Hao, T., Elith, J., Guillera-Aroita, G., & Lahoz-Monfort, J. J. (2019). A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions*, 25(5), 839–852. <https://doi.org/10.1111/ddi.12892>
- Hernández, R., Hernández, C., & Baptista, P. (2014). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. In S. A. D. C. V. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (Ed.), *Journal of Materials Processing Technology* (6ta ed.). https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- IPCC. (2008). Cambio climático. In *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IEEE. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Jantz, S. M., Barker, B., Brooks, T. M., Chini, L. P., Huang, Q., Moore, R. M., Noel, J., & Hurtt, G. C. (2015). Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*, 29(4), 1122–1131. <https://doi.org/10.1111/cobi.12549>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N., Linder, H. P., & Kessler, M. (2021). Climatologies at high resolution for the Earth land

surface areas. *EnviDat*, July, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.16904/envidat.228.v2.12>

- Li, D., Wu, S., Liu, L., Zhang, Y., & Li, S. (2018). Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change. *Global Change Biology*, 24(9), 4095–4106. <https://doi.org/10.1111/gcb.14327>
- Loja, P. de. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Loja 2015-2025*. <https://prefecturaaloja.gob.ec/documentos/lotaip/2019/PDOT-2019.pdf>
- MAE. (2013). Sistema de clasificación de los ecosistemas de Ecuador Continental. In *Subsecretaría de Patrimonio Natural*. Quito. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/NIVEL_NACIONAL/MAE/ECOSISTEMAS/DOCUMENTOS/Sistema.pdf
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Manchego, C. E., Hildebrandt, P., Cueva, J., Espinosa, C. I., Stimm, B., & Günter, S. (2017). Climate change versus deforestation: Implications for tree species distribution in the dry forests of southern Ecuador. *PLoS ONE*, 12(12), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190092>
- Mantyka-pringle, C. S., Martin, T. G., & Rhodes, J. R. (2012). Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: A systematic review and meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(4), 1239–1252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02593.x>
- Marino, J., Bennett, M., Cossios, D., Iriarte, A., Lucherini, M., Plissock, P., Sillero-Zubiri, C., Villalba, L., & Walker, S. (2011). Bioclimatic constraints to Andean cat distribution: A modelling application for rare species. *Diversity and Distributions*, 17(2), 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00744.x>
- Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Skea, J., Slade, R., Ferrat, M., Neogi, S., Portugal, J., Kissick, K., Calvo, E., Connors, S., Haughey, E., Pathak, M., Vyas, P., Belkacemi, M., Zhai, P., Roberts, D., Shukla, P., van Diemen, R., Luz, S., ... Malley, J. (2020). El cambio climático y la tierra. In *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una

- revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217–240.
<https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., & Butler, J. H. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476(7358), 43–50. <https://doi.org/10.1038/nature10322>
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., ... Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332).
<https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: Una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2011(48), 61–79. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022011000100005>
- Powers, R. P., & Jetz, W. (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change*, 9(4), 323–329.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0406-z>
- Ramachandran, R. M., Roy, P. S., Chakravarthi, V., Joshi, P. K., & Sanjay, J. (2020). Land use and climate change impacts on distribution of plant species of conservation value in Eastern Ghats, India: a simulation study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2).
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-8044-5>
- Ren, Z., Peng, H., & Liu, Z. W. (2016). The rapid climate change-caused dichotomy on subtropical evergreen broad-leaved forest in Yunnan: Reduction in habitat diversity and increase in species diversity. *Plant Diversity*, 38(3), 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2016.04.003>
- Riordan, E. C., & Rundel, P. W. (2014). Land use compounds habitat losses under projected climate change in a threatened California ecosystem. *PLoS ONE*, 9(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086487>
- Robinson, N. M., Nelson, W. A., Costello, M. J., Sutherland, J. E., & Lundquist, C. J. (2017). A systematic review of marine-based Species Distribution Models (SDMs) with recommendations for best practice. *Frontiers in Marine Science*, 4(DEC), 1–11.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00421>

- Roca Villanueva, B., Beltrán Salvador, M., & Gómez Huelgas, R. (2019). Change climate and health. *Revista Clinica Espanola*, 219(5), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2019.01.004>
- Rocha, J. C. (2022). Ecosystems are showing symptoms of resilience loss. *Environmental Research Letters*, 17(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac73a8>
- Rodríguez-Medina, K., Yañez-Arenas, C., Peterson, A. T., Ávila, J. E., & Herrera-Silveira, J. (2020). Evaluating the capacity of species distribution modeling to predict the geographic distribution of the mangrove community in Mexico. *PLoS ONE*, 15(8 August), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237701>
- Sales, L. P., Galetti, M., & Pires, M. M. (2020). Climate and land-use change will lead to a faunal “savannization” on tropical rainforests. *Global Change Biology*, 26(12), 7036–7044. <https://doi.org/10.1111/gcb.15374>
- Samaniego, N., Eguiguren, P., Maita, J., & Aguirre, N. (2015). Clima de la Región Sur el Ecuador: historia y tendencias. *Biodiversidad Del Páramo: Pasado, Presente y Futuro ClimaClima*, December, 43.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Somodi, I., Lepesi, N., & Botta-Dukát, Z. (2017). Prevalence dependence in model goodness measures with special emphasis on true skill statistics. *Ecology and Evolution*, 7(3), 863–872. <https://doi.org/10.1002/ece3.2654>
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & De La Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in south Ecuador since the 1970s - Losing a hotspot of biodiversity. *PLoS ONE*, 10(9), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>
- Thies, B., Meyer, H., Nauss, T., & Bendix, J. (2014). Projecting land-use and land-cover changes in a tropical mountain forest of Southern Ecuador. *Journal of Land Use Science*, 9(1), 1–33. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2012.718378>
- Thuiller, Lafourcade, B., Engler, R., & Araújo, M. B. (2009). BIOMOD - A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32(3), 369–373. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>
- Thuiller, W. (2003). BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology*, 20(12), 3591–3592.

<https://doi.org/10.1111/gcb.12728>

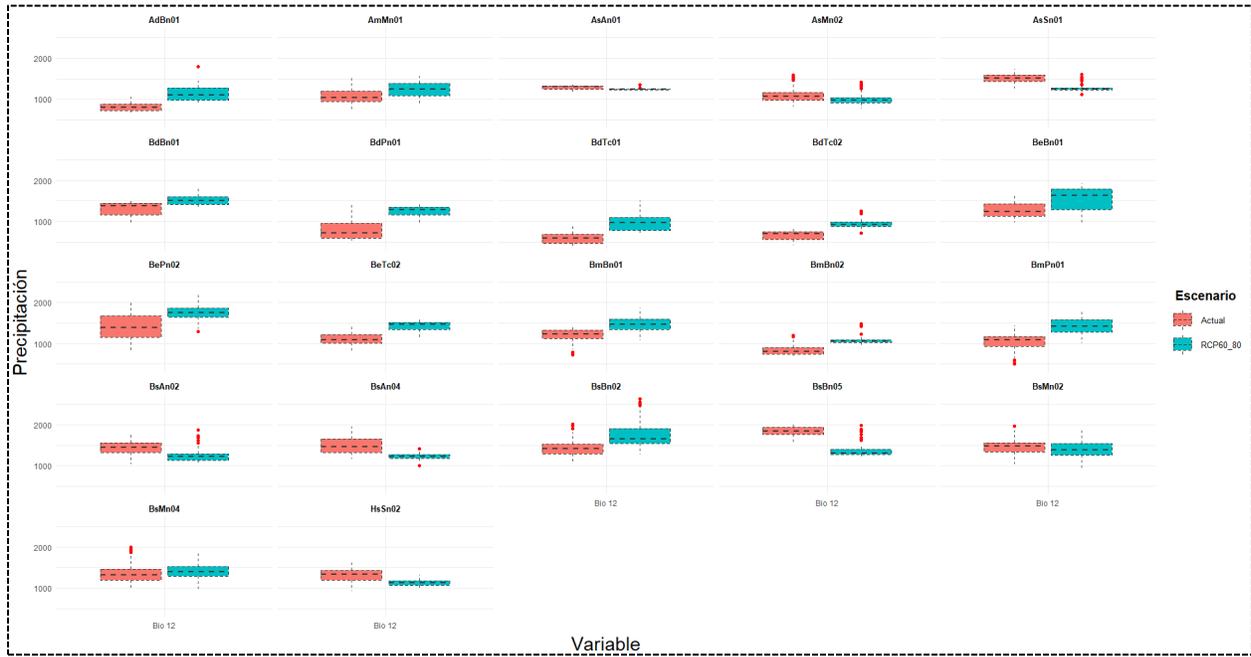
- Thuiller, W., Georges, D., Gueguen, M., Engler, R., Breiner, F., & Lafourcade, B. (2022). *biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling*. R Package Version 4.0. <https://biomodhub.github.io/biomod2/>
- Toulkeridis, T., Tamayo, E., Simón-Baile, D., Merizalde-Mora, M. J., Reyes -Yunga, D. F., Viera-Torres, M., & Heredia, M. (2020). Climate change according to ecuadorian academics-perceptions versus facts. *Granja*, 31(1), 21–49. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>
- United, N. (2022). *¿Qué es el cambio climático?* <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Vanacker, V., Molina, A., Torres, R., Calderon, E., & Cadilhac, L. (2018). Challenges for research on global change in mainland Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 4(1), 114–118. <https://doi.org/10.1080/23766808.2018.1491706>
- Vazquez, M. A., Freire, J. F., & Suárez, L. (2005). Biodiversidad en los bosques secos de la zona de Cerro Negro-Cazaderos, occidente de la provincia de Loja: Un reporte de las evaluaciones ecológicas y socioeconómicas rápidas. In *EcoCiencia, MAE y Proyecto Bosque Seco. Quito. Fotografías*.
- Vidal, L. F., Useche, D. C., & Hernández, S. (2013). Biodiversidad y el cambio antrópico del clima: ejes temáticos que orientan la generación de conocimiento para la gestión frente al fenómeno. *Ambiente y Desarrollo*, XVII(32), 79–96.
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morisette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Williams, K. J., Belbin, L., Austin, M. P., Stein, J. L., & Ferrier, S. (2012). Which environmental variables should I use in my biodiversity model? *International Journal of Geographical Information Science*, 26(11), 2009–2047. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.698015>
- World Meteorological Organization. (2022). *WMO update: 50:50 chance of global temperature temporarily reaching 1.5°C threshold in next five years*. World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-update-5050-chance-of-global->

temperature-temporarily-reaching-15°c-threshold

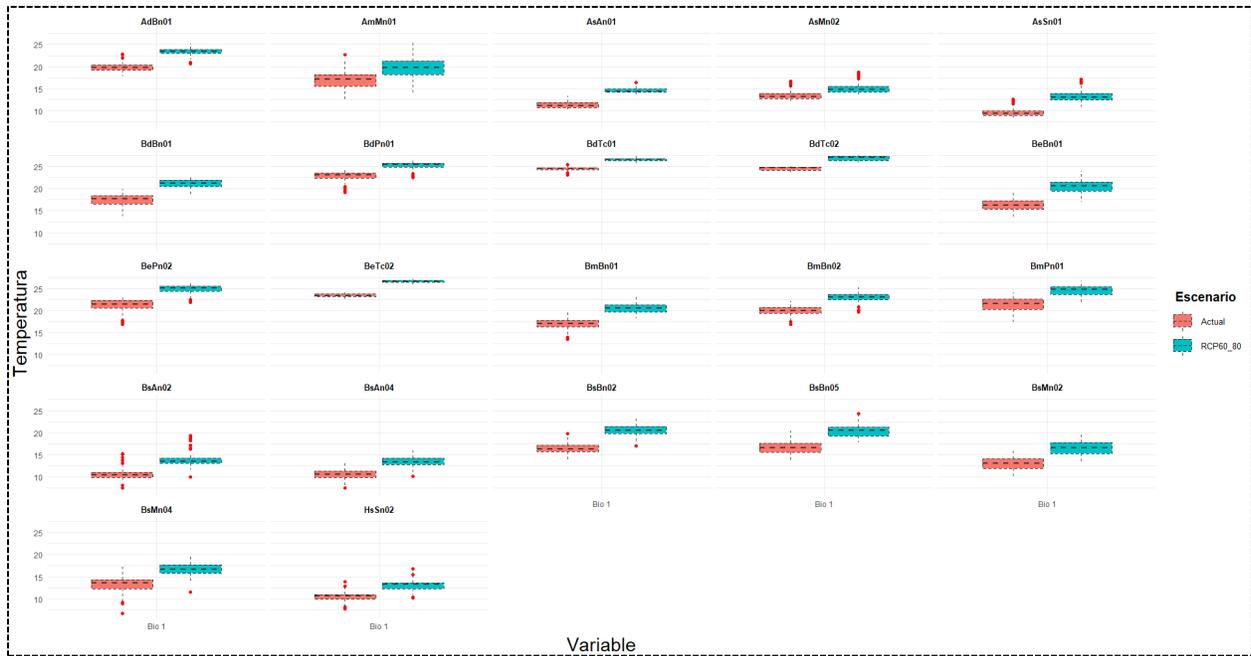
- WWF. (2020). Living Planet Report 202 - Bending the curve of biodiversity loss. In *Wwf*.
https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/livingplanetreport_2020_informe_completo.pdf?55320/Informe-Planeta-Vivo-2020.
- Yoon, S., & Lee, W. H. (2023). Application of true skill statistics as a practical method for quantitatively assessing CLIMEX performance. *Ecological Indicators*, *146*, 109830. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.109830>
- Zangiabadi, S., Zaremaivan, H., Brotons, Li., Mostafavi, H., & Ranjbar, H. (2021). Using climatic variables alone overestimate climate change impacts on predicting distribution of an endemic species. *PLOS ONE*, *16*(9), e0256918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256918>
- Zimmermann, N. E., Yoccoz, N. G., Edwards, T. C., Meier, E. S., Thuiller, W., Guisan, A., Schmatz, D. R., & Pearman, P. B. (2009). Climatic extremes improve predictions of spatial patterns of tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(SUPPL. 2), 19723–19728. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901643106>

11. Anexos

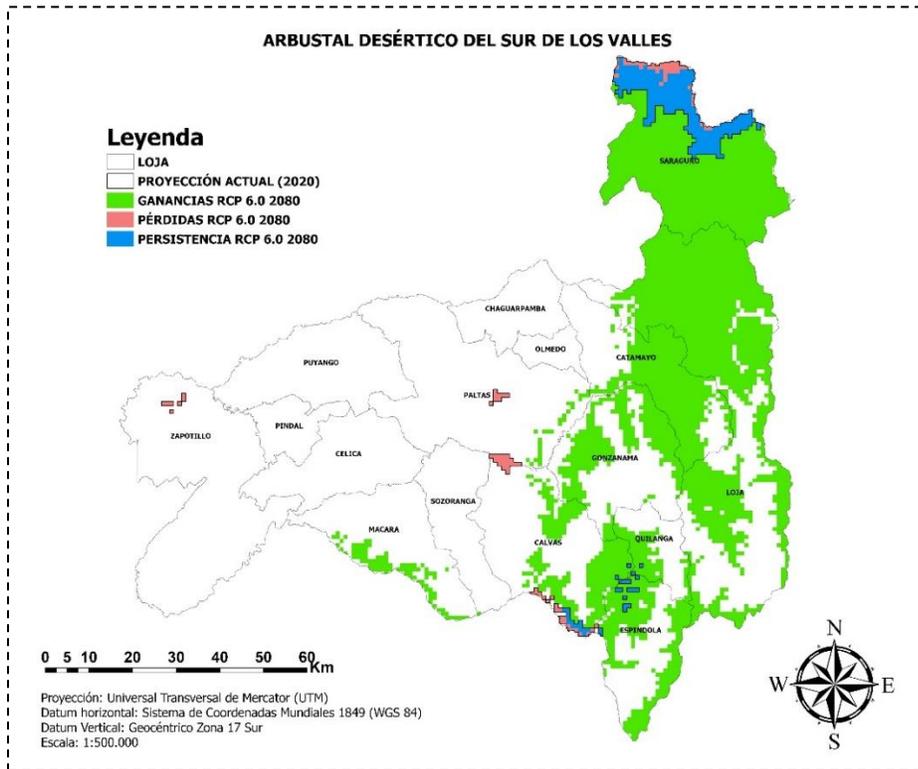
Anexo 1. Precipitación actual y futura por ecosistema de la provincia de Loja.



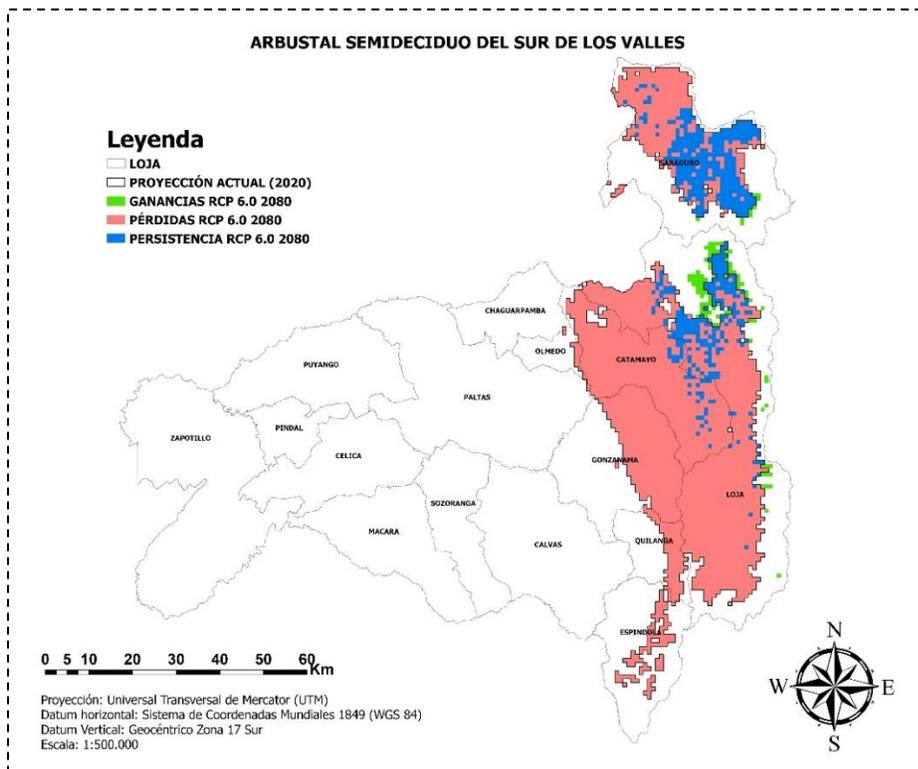
Anexo 2. Temperatura actual y futura por ecosistema de la provincia de Loja



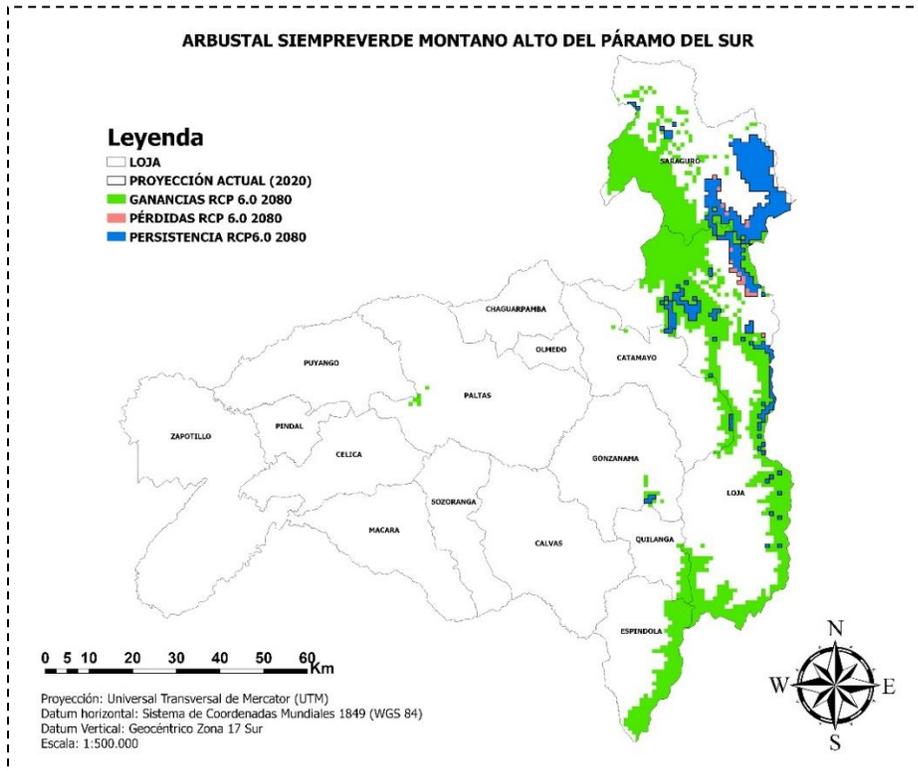
Anexo 3. Ecosistema arbustal desértico del Sur de los valles.



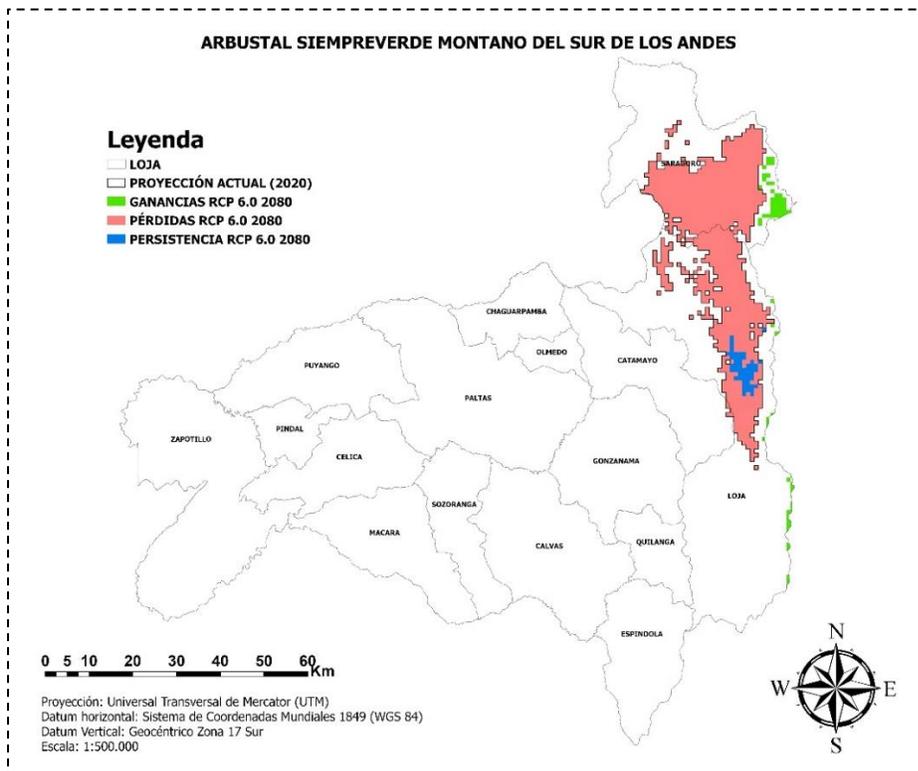
Anexo 4. Ecosistema arbustal semideciduo del sur de los valles.



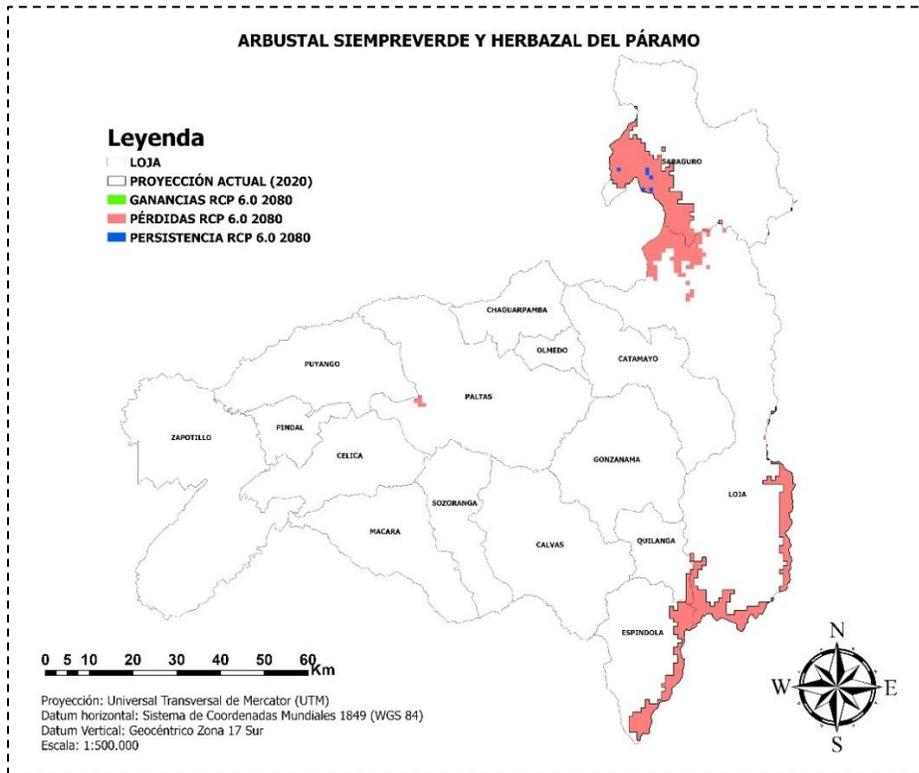
Anexo 5. Ecosistema arbustal siempreverde montano alto del páramo del sur.



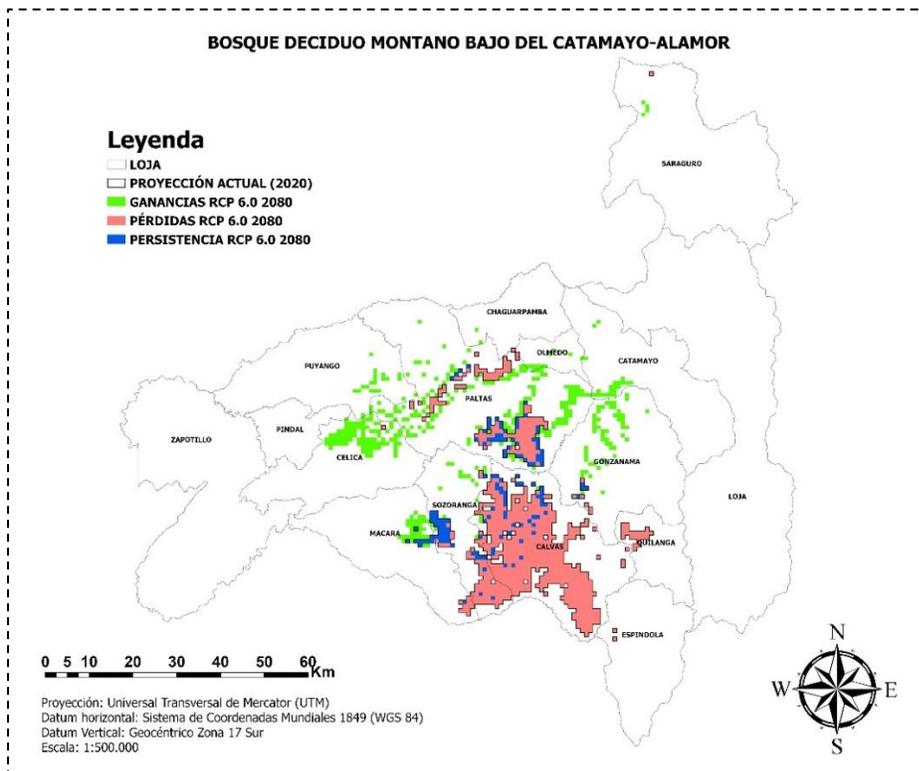
Anexo 6. Ecosistema arbustal siempreverde montano del sur de los andes.



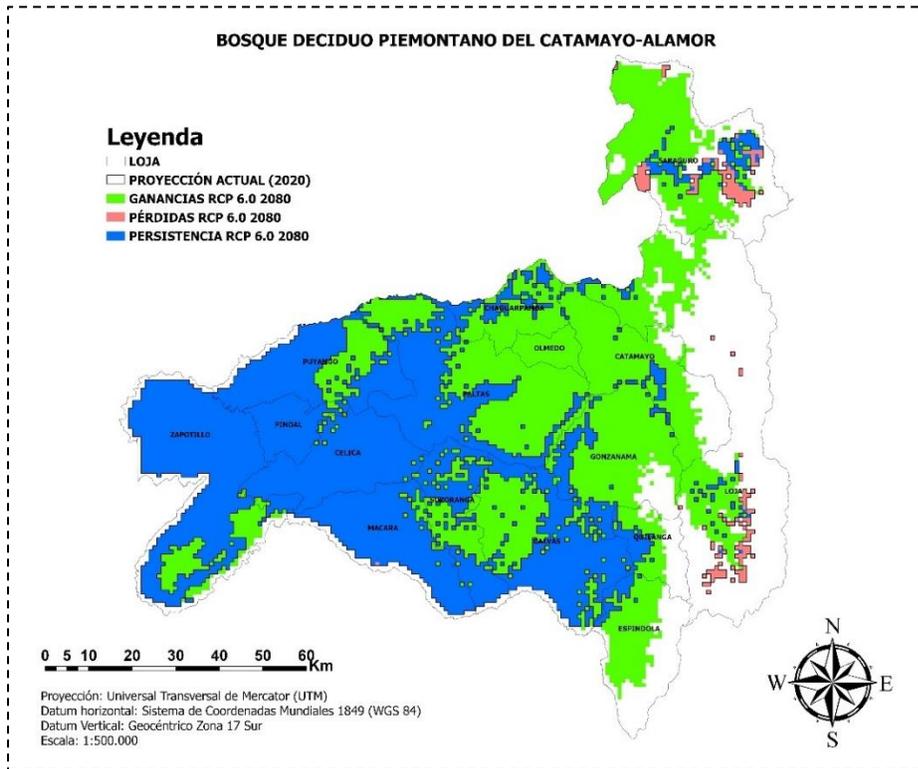
Anexo 7. Ecosistema arbustal siempreverde y herbazal del páramo.



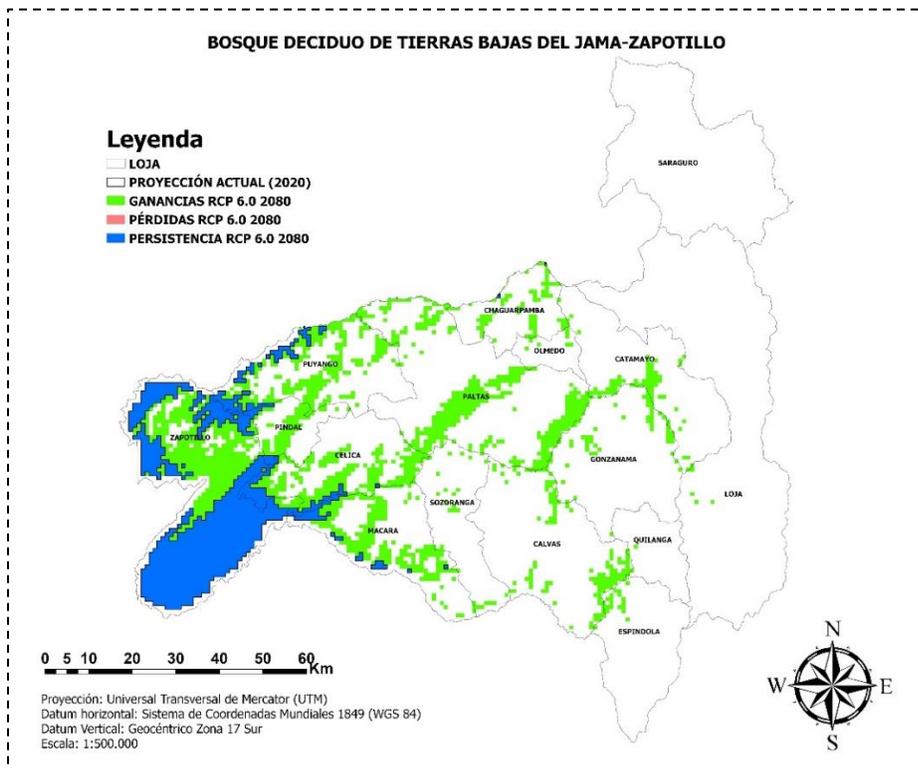
Anexo 8. Ecosistema bosque decido montano bajo del Catamayo-Alamor.



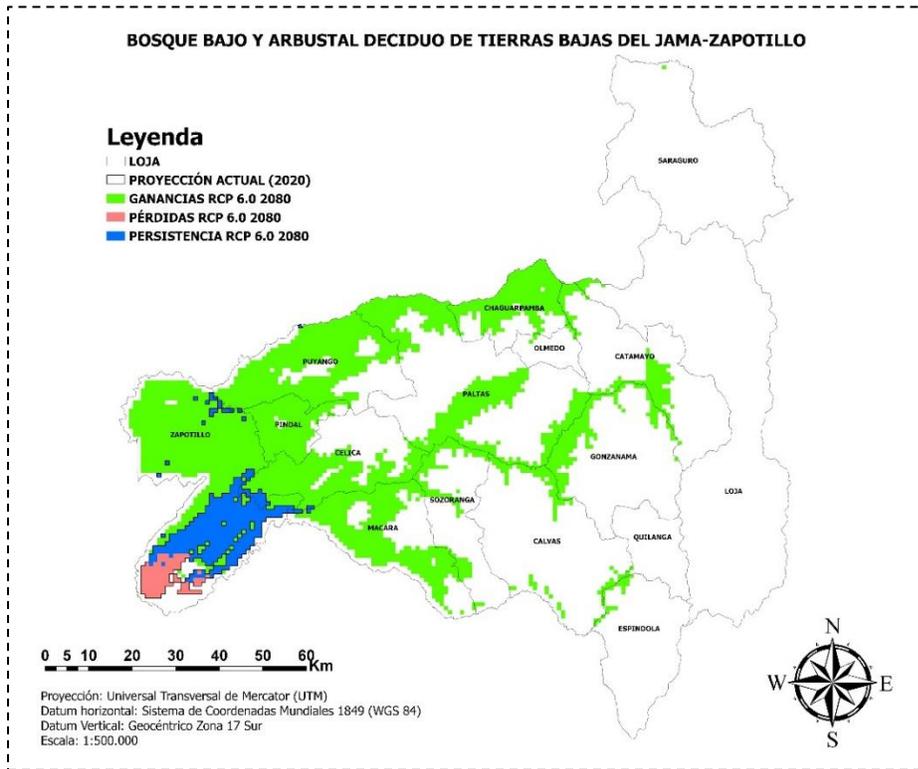
Anexo 9. Ecosistema bosque decido piemontano del Catamayo-Alamor.



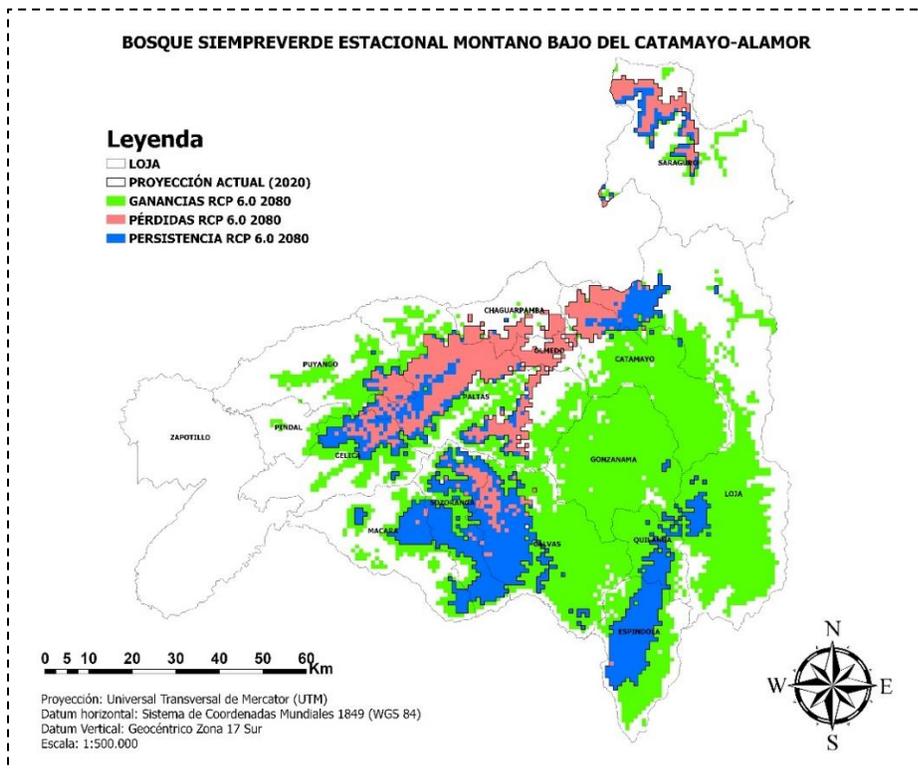
Anexo 10. Ecosistema bosque decido de tierras bajas del Jama-Zapotillo.



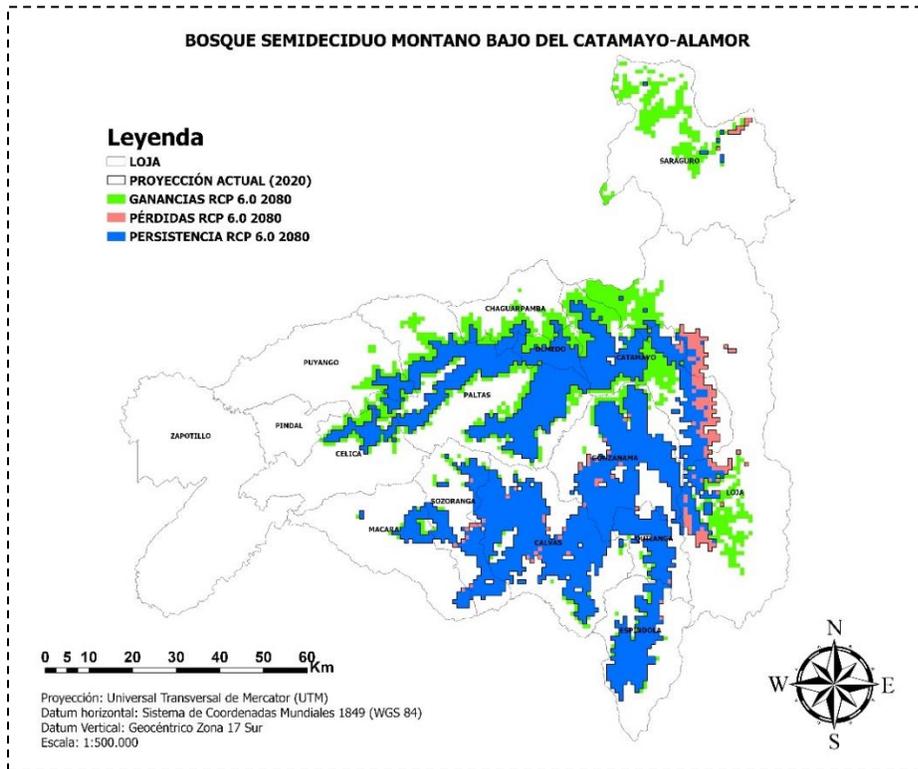
Anexo 11. Ecosistema bosque bajo y arbustal de tierras bajas del Jama-Zapotillo.



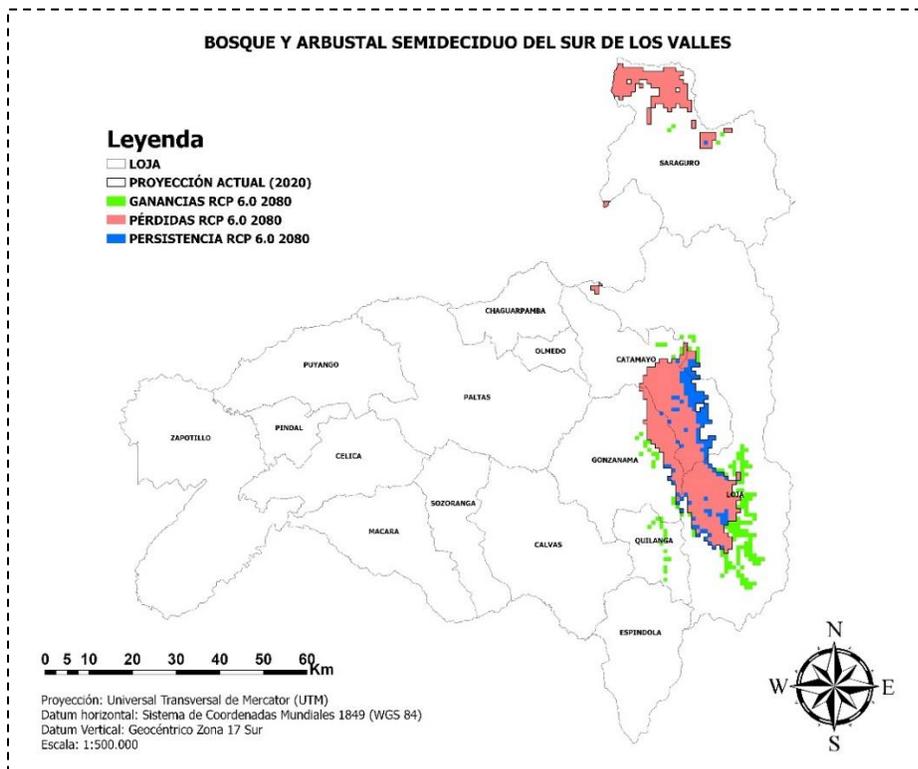
Anexo 12. Ecosistema bosque siempreverde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor.



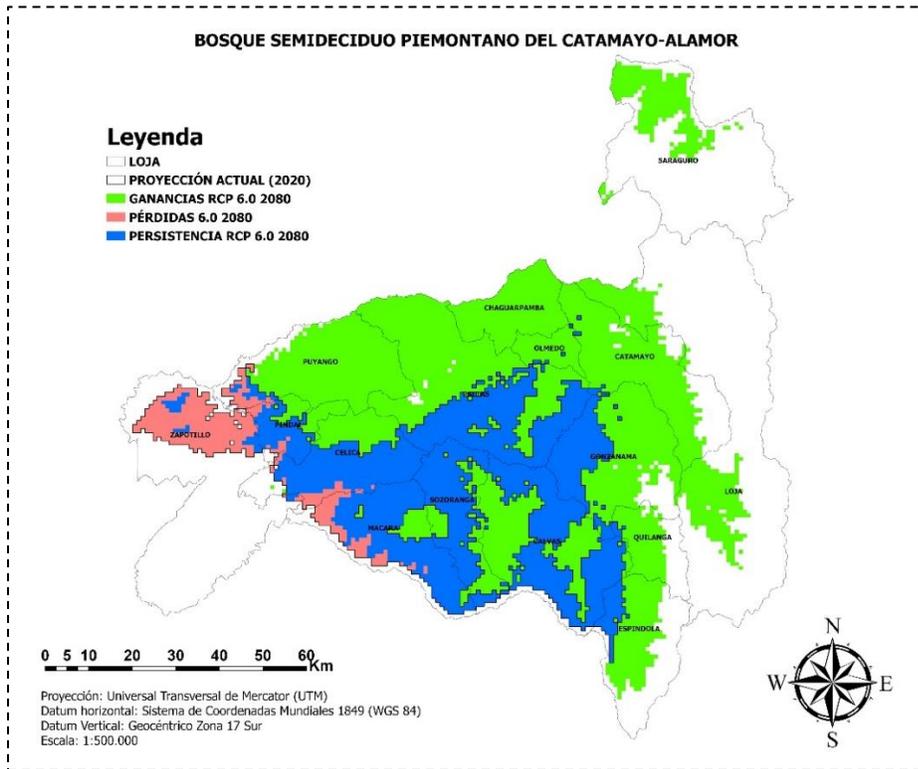
Anexo 15. Ecosistema bosque semideciduo montano bajo del Catamayo-Alamor.



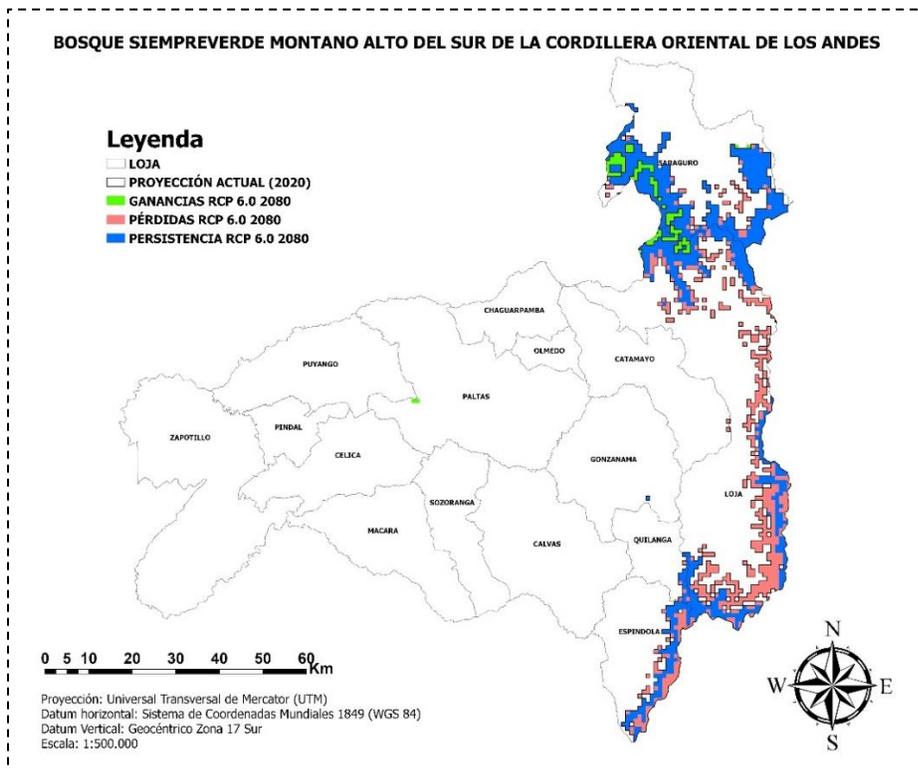
Anexo 16. Ecosistema bosque y arbustal semideciduo del sur de los valles.



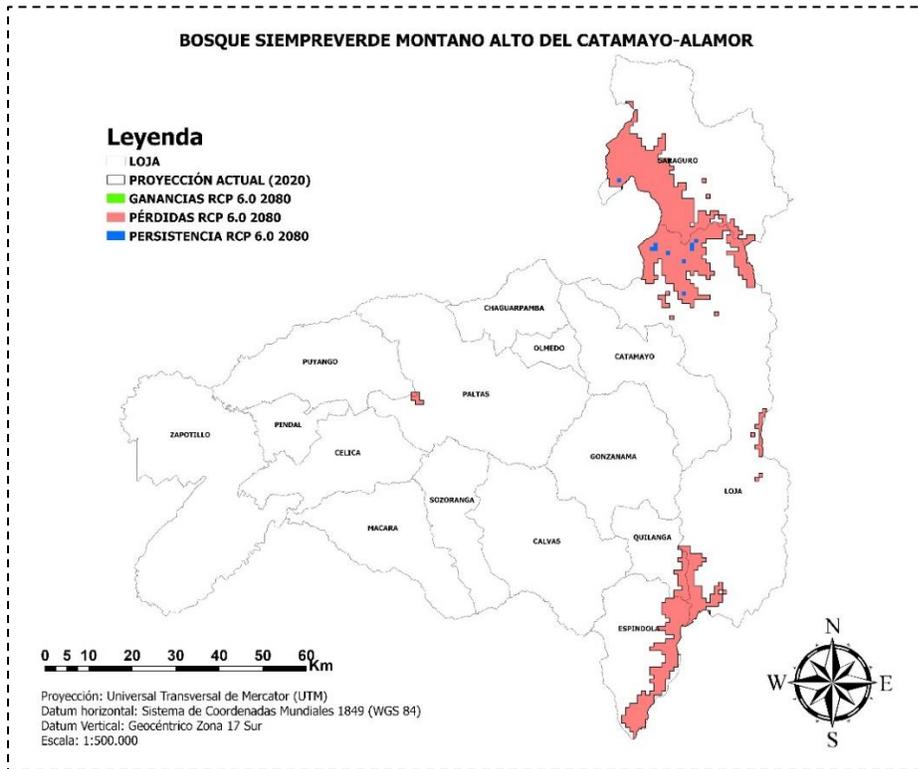
Anexo 17. Ecosistema bosque semidecuido piemontano del Catamayo-Alamor.



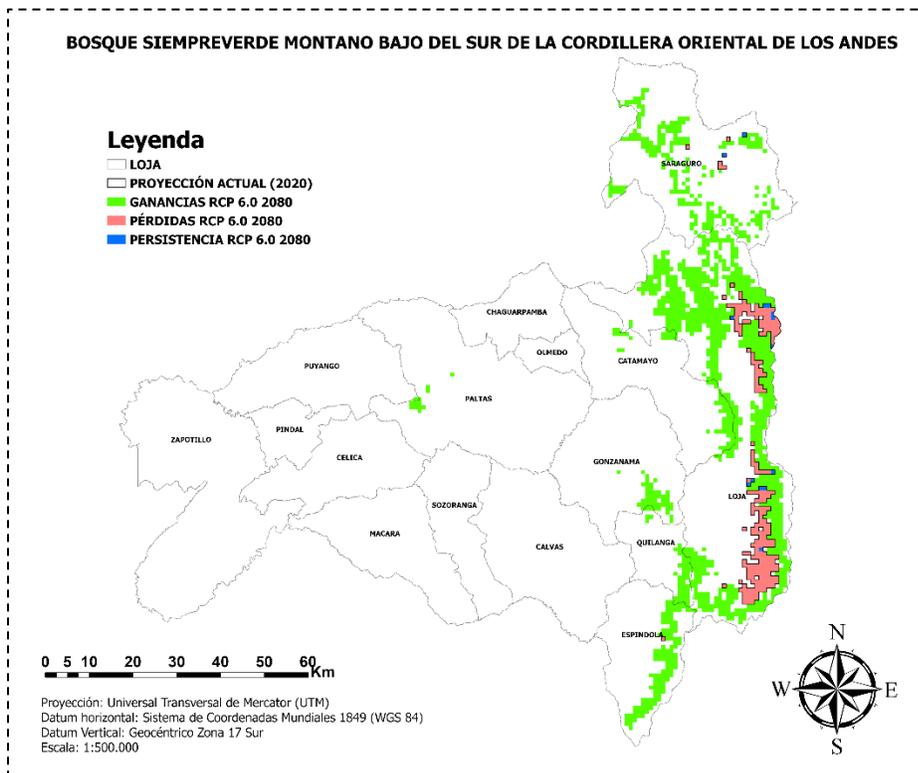
Anexo 18. Ecosistema bosque siempreverde alto del sur de la cordillera oriental de los Andes.



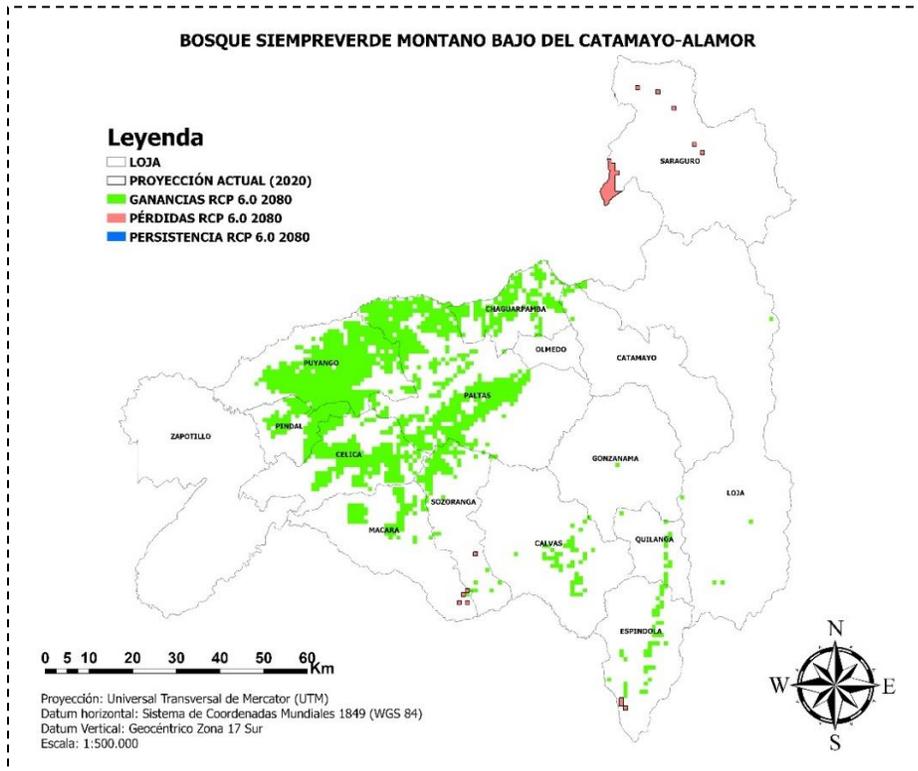
Anexo 19. Ecosistema bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor.



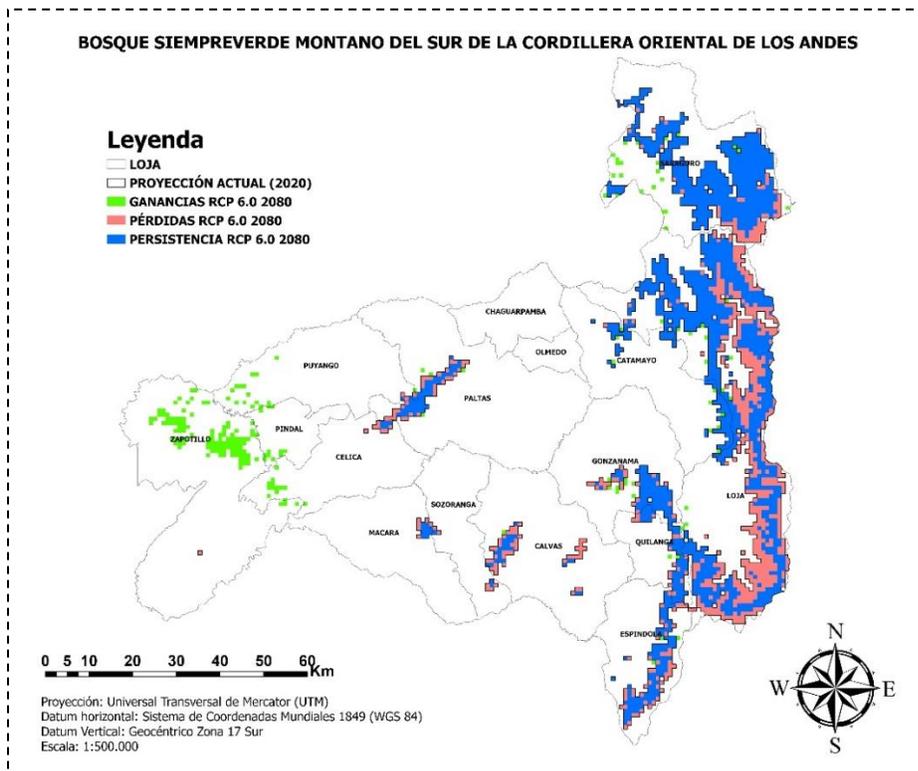
Anexo 20. Ecosistema bosque siempreverde montano bajo del sur de la cordillera oriental de los Andes.



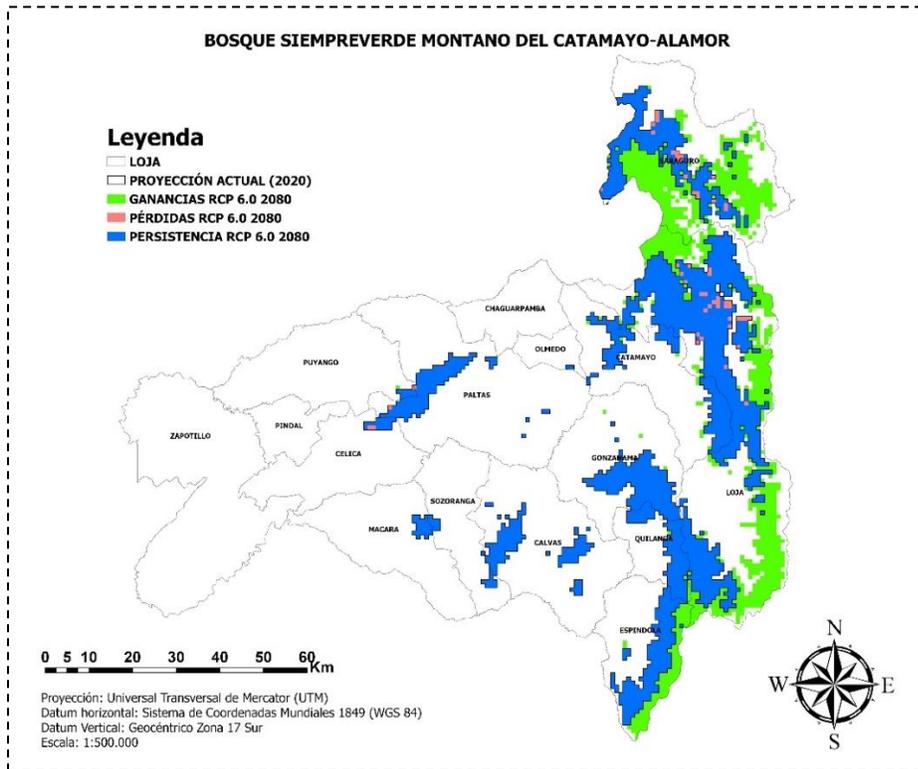
Anexo 21. Ecosistema bosque siempreverde montano bajo del Catamayo-Alamor.



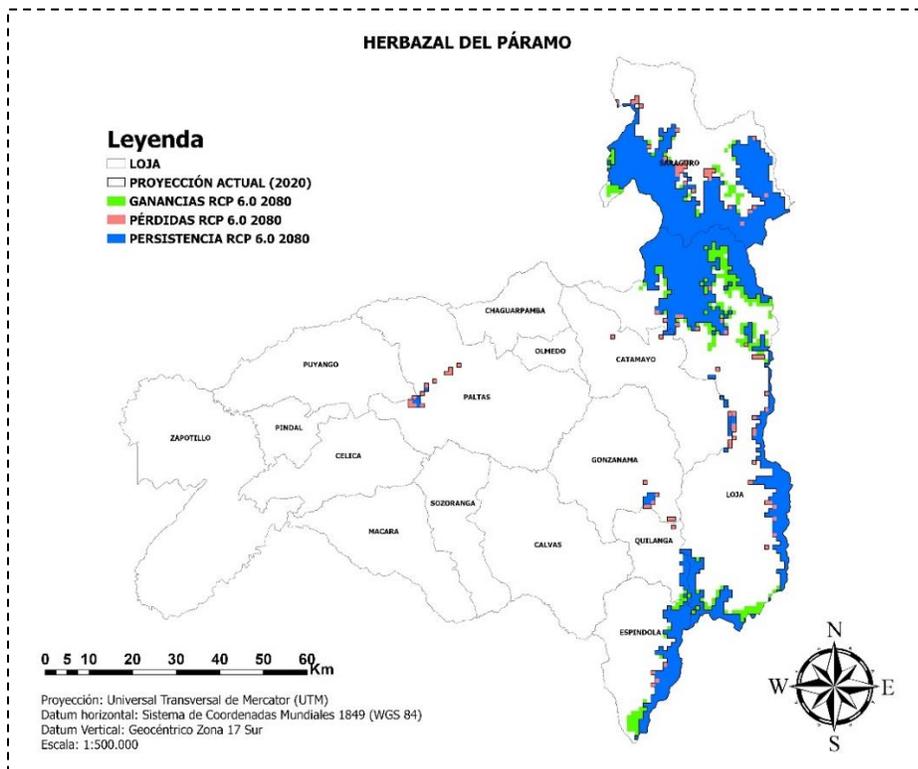
Anexo 22. Ecosistema bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes.



Anexo 23. Ecosistema bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor.



Anexo 24. Ecosistema herbazal del páramo.



Anexo 25. Certificación de la traducción del resumen.

CERTIFICADO DE TRADUCCIÓN DEL RESUMEN

Loja, 31 de agosto del 2023

Yo, Livia Rosario Vega Luzuriaga, con número de cédula **1103259428** y con título de Licenciada en Ciencias de la Educación, especialidad de idioma inglés, registrado en el **SENESCYT** con número **1008-15-1403516**,

CERTIFICO:

Que he traducido minuciosamente el Resumen del Trabajo de investigación titulado: **Modelamiento correlativo de la distribución potencial de ecosistemas de la provincia de Loja periodo 1970-2080: potenciales cambios bajo un contexto de cambio climático**, de autoría del estudiante: Diego Fernando Poma Sarango, portador de la cédula de identidad: **1150508057**, egresado de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Loja, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente para fines pertinentes.

Atentamente



Lic. Livia Rosario Vega Luzuriaga

C.I. 1103259428

Celular: 0988513538

Correo: liviavega10@gmail.com