

ANÁLISIS DE NICHO ECOLÓGICO Y FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE EN LA CUENCA NANAY-AMAZONAS Y SUS AFLUENTES DE LA RANITA DE ALLPAHUAYO ENTRE EL AÑO 1985 Y 2020

Camilo Muñoz Rimachi¹, Sergio Campos Torres¹

¹ E.P. Ingeniería Geográfica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

RESUMEN

El presente estudio analiza los cambios en el nicho ecológico de la ranita de Allpahuayo (*Ranitomeya reticulata*) y la fragmentación del paisaje en la cuenca Nanay-Amazonas entre 1985 y 2020. Se utilizó modelamiento de nicho ecológico con Maxent y análisis de métricas del paisaje con Fragstats. Los resultados muestran una disminución del área potencial de presencia de la especie, especialmente en zonas de conectividad. Esto se correlaciona con un aumento significativo de áreas agrícolas y mosaicos agropecuarios en detrimento de bosques naturales. Las métricas del paisaje indican una fuerte fragmentación, con un aumento de más de 50,000 nuevos parches y una reducción del tamaño promedio de los parches de bosque de 275 ha a 55 ha. La distancia entre parches también disminuyó, indicando mayor aislamiento. El estudio concluye que la fragmentación del paisaje por expansión agrícola está afectando negativamente el hábitat y distribución potencial de la ranita de Allpahuayo.

Palabras clave: *Ranitomeya reticulata*, nicho ecológico, fragmentación del paisaje.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio de uso del suelo en la cuenca Nanay-Amazonas (Loreto, Perú) ha afectado de manera considerable la distribución del nicho ecológico de la ranita de Allpahuayo (*Ranitomeya reticulata*). Ello debido a que esta especie depende de ecosistemas específicos, como bosques primarios y secundarios bien conservados. ¹

Esta especie, del orden *Anura* y la familia de los *Dendrobatidae* es una especie endémica de anfibios pertenecientes a la Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana. ² Su hábitat tiende a encontrarse en sotobosques tropicales húmedos, cercanos a cuerpos de agua. ³ Tiene un limitado rango de distribución, por lo cual es fácilmente amenazada por las prácticas de deforestación por agricultura migratoria en la Amazonía peruana.

Para predecir su distribución espacial en función de las condiciones ambientales que necesita para sobrevivir, es factible la técnica del modelamiento de nicho ecológico. Este enfoque se basa en el concepto de nicho ecológico, definido por Joseph Grinnell como el conjunto de condiciones ambientales

específicas en que una especie puede sobrevivir y mantenerse. ⁴

Este nicho ecológico puede definirse a través del principio de máxima entropía, el cual establece que entre todas las distribuciones de probabilidad posibles que concuerdan con las observaciones, la que tiene la máxima entropía (la más uniforme) es la que mejor representa el estado actual del conocimiento. ⁵ Por otro lado, para estimar la magnitud del cambio del uso de suelo, es factible el estudio del paisaje utilizando índices y métricas específicos. Al emplear métricas como el índice de fragmentación, la diversidad de parches y la conectividad del hábitat, es posible cuantificar los cambios estructurales en el paisaje que impactan directamente a esta especie. ^{4,6}

Estos análisis permiten identificar áreas críticas para la conservación y diseñar estrategias de manejo que mitiguen los efectos negativos del cambio de uso del suelo en el hábitat del ranita de Allpahuayo, esenciales para asegurar su supervivencia.

Por tanto, el presente artículo tiene como objetivo analizar la variación del nicho ecológico del ranita de Allpahuayo (*Ranitomeya reticulata*) y la fragmentación del paisaje en la cuenca Nanay-Amazonas entre los años 1985 y 2020.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

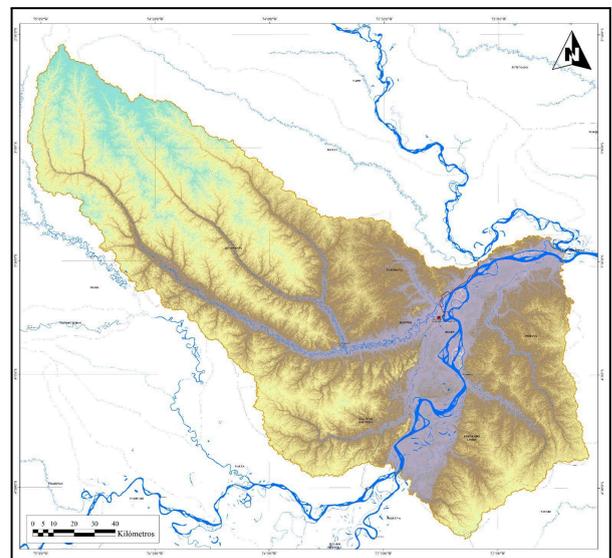
La cuenca del río Nanay-Amazonas, Unidad Hidrográfica 4979, abarca un área de 2 819 627.20 ha en el departamento de Loreto. ⁷

Dentro de ella, abarca las cuencas de los ríos Tahuayo, Itaya, Nanay y Manití los cuales son afluentes directos del río Amazonas. ⁷

La cuenca incluye el recorrido del río Amazonas desde su nacimiento hasta la afluencia del río Mazán. ⁷ Asimismo, abarca la ciudad de Iquitos, la más extensa y poblada de la Amazonía peruana, con cerca de 500000 habitantes. ⁸

Figura 1

Área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.2. Recolección y limpieza de datos

2.2.1. Descarga de datos de presencia

Los registros de presencia del *Ranitomeya reticulata* para el modelamiento de nicho ecológico se obtuvieron de la plataforma GBIF (Sistema Global de Información sobre Biodiversidad). ⁹ Esta red internacional permite el acceso libre a información de avistamientos de todas las especies en la Tierra.

2.2.2. Descarga de datos climáticos

Se extrajeron datos de índices bioclimáticos actuales/históricos (1970 – 2000) de la plataforma WorldClim, con una resolución de

30'', equivalente a 1 km, aproximadamente. ¹⁰

En total, se descargaron 19 índices bioclimáticos y la altitud, los cuales se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1

Índices bioclimáticos

ID	Índice Bioclimático
1	Temperatura media anual
2	Rango medio diario (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))
3	Isotermalidad ($I2/I7 \times 100$)
4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$)
5	Temperatura máxima del mes más cálido
6	Temperatura mínima del mes más frío
7	Rango anual de temperatura (I5 - I6)
8	Temperatura media del trimestre más húmedo
9	Temperatura media del trimestre más seco
10	Temperatura media del trimestre más cálido
11	Temperatura media del trimestre más frío
12	Precipitación anual
13	Precipitación del mes más húmedo
14	Precipitación del mes más seco
15	Estacionalidad de las precipitaciones (Coeficiente de variación)
16	Precipitación del trimestre más húmedo
17	Precipitación del cuarto más seco
18	Precipitación del trimestre más cálido
19	Precipitación del cuarto más frío

Fuente: WorldClim. ¹⁰

De forma similar, se descargaron datos de índices bioclimáticos del futuro (2021 - 2040) a través de la opción *Future climate data*, con la misma resolución. ¹⁰ Estos escenarios futuros están basados en proyecciones propuestas por Modelos Climáticos Generales (GCM), basados en las Rutas de Concentración Representativa (RCP) de gases de efecto invernadero. ¹¹ También se consideran las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) o escenarios de desarrollo económico, demográfico y tecnológico, para producir una proyección climática integral ¹².

2.2.3. Descarga de datos de uso de suelo

Los datos de la cobertura de uso de suelo fueron descargados a partir de la Red Global Map Biomas. ¹³ Este conjunto de datos utiliza mosaicos anuales generados con imágenes Landsat 4 hasta el Landsat 9 entre 1985 y 2021. ¹³ La clasificación semi automatizada se realizó a través del algoritmo Random Forest y se obtuvo un total de 20 clases, en 5 categorías: formación boscosa, formación natural no boscosa, área agropecuaria, área sin vegetación y cuerpos de agua. ¹³

Tabla 2

Cobertura de uso de suelo de MapBiomas

ID	Clase	Color	Categ.
1. Formación boscosa			
3	1.1. Bosque		Natural
4	1.2. Bosque seco		Natural
5	1.3. Manglar		Natural
6	1.4. Bosque inundable		Natural
2. Formación natural no boscosa			
11	2.1. Zona pantanosa o pastizal inundable		Natural
12	2.2. Pastizal / herbazal		Natural
32	2.3. Salina		Natural
13	2.4. Matorral y otras formaciones no boscosas		Natural
3. Área agropecuaria			
15	3.1. Pastos		Antrópico
18	3.2. Agricultura		Antrópico
9	3.3. Plantación forestal		Antrópico
35	3.4. Palma aceitera		Antrópico
16	3.5. Mosaico agropecuario		Antrópico
4. Áreas sin vegetación			
24	4.1. Infraestructura		Antrópico
30	4.2. Minería		Antrópico
25	4.3. Otra área sin vegetación		Natural
5. Cuerpos de agua			
33	5.1. Río, lago u océano		Natural
31	5.2. Acuicultura		Natural
34	5.3. Glaciar		Natural
27	6. No observado		Indefinido

Fuente: MapBiomas. ¹³

2.3. Análisis de nicho ecológico

2.3.1. Lectura y extracción de registros de presencia

Se realizó la preparación de los datos para el modelamiento desde el editor de texto RStudio y a través del lenguaje R. El código utilizado se encuentra en el Anexo.

Primero, se realizó la lectura de los registros de presencia en csv. A continuación se realizó la limpieza de datos a través de la función *subset* de la librería *dplyr* para obtener aquellos, pertenecientes al Perú, que posean longitud, latitud y localidad.

Consecuentemente, se recortan los datos finales a la cuenca Nanay-Amazonas, que cuenta con 65 registros de presencia de *Ranitomeya reticulata*, a través de la función *st_intersect* de la librería *sf*.

2.3.2. Lectura y extracción de datos ráster

A través de la función *stack*, perteneciente a la librería *raster*, se leen los datos de las variables bioclimáticas. Este proceso se repite para los dos conjuntos de datos, previamente cortados al área de estudio.

Para continuar el proceso, se necesita extraer los datos del ráster en los puntos de registro de presencia, lo cual se realiza a través de la función *extract*, de la librería *raster*. Estos datos extraídos se combinan con los registros de presencia a través de la función *cbind*.

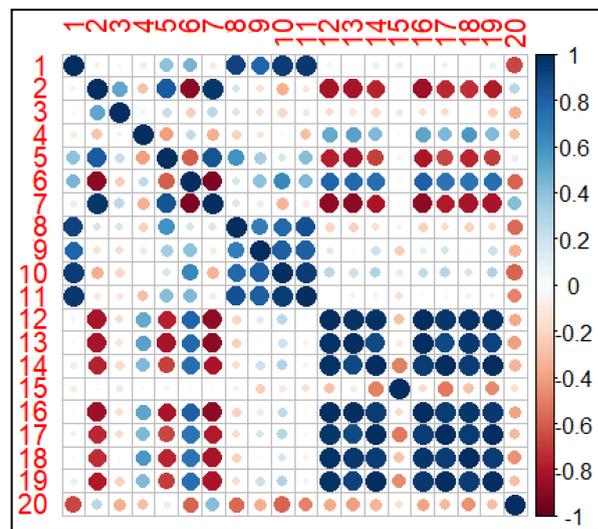
2.3.3. Análisis de correlación entre las variables bioclimáticas

Se construye una matriz con únicamente los valores de los índices y la altitud. A través de la función *cor* de la librería *corrplot*, se

realiza un análisis de correlación de cada uno de los índices con los otros 19 índices.

Figura 2

Análisis de correlación entre los índices



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.3.4. Análisis VIF de multicolinealidad

A través de la función *vif*, de la librería *car*, se realiza un análisis de multicolinealidad de la matriz. Este proceso se realiza para obtener las variables cuyo VIF sea inferior a 5. En total, se obtuvieron 7 variables que cumplen con estas características.

Tabla 3

Índices bioclimáticos utilizados en el modelo

ID	Índice Bioclimático	VIF
3	Isotermalidad	1.59
4	Estacionalidad de la temperatura	1.57
8	Temperatura media del trimestre más húmedo	4.59
9	Temperatura media del trimestre más seco	2.66
13	Precipitación del mes más húmedo	2.72
15	Estacionalidad de las precipitaciones	1.25
20	Altitud	4.19

Fuente: Elaboración propia (2024).

Estas variables serán exportadas, a través de un ciclo *for*, hacia el formato ASCII. Este proceso se repetirá para el segundo conjunto de datos (2021-2040).

2.3.5. Generación del modelo de nicho ecológico con Maxent

Se llevó a cabo la ejecución del modelamiento de nicho ecológico a través del modelo Maxent, a través de un ejecutable. Para ello, se seleccionaron los registros de presencia y las variables bioclimáticas con una regresión de tipo logística.

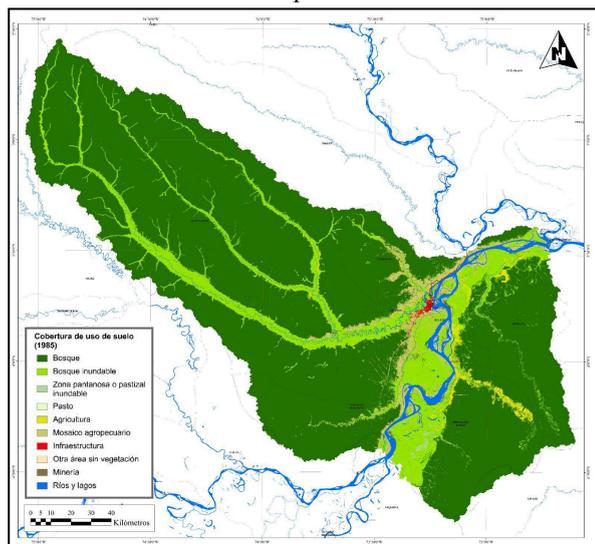
2.4. Análisis del paisaje

Para realizar el análisis del paisaje se utilizó las imágenes descargadas de la base de datos de MapBiomias Perú, de los años 1985 y 2020. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 30 m, por lo cual satisfacen la escala de trabajo para sectores relativamente extensos de la Amazonía.

Estas imágenes se recortaron para la cuenca del Nanay-Amazonas, tal como muestran la figura 3 y la figura 4, correspondientes a los años 1985 y 2020, respectivamente.

Figura 3

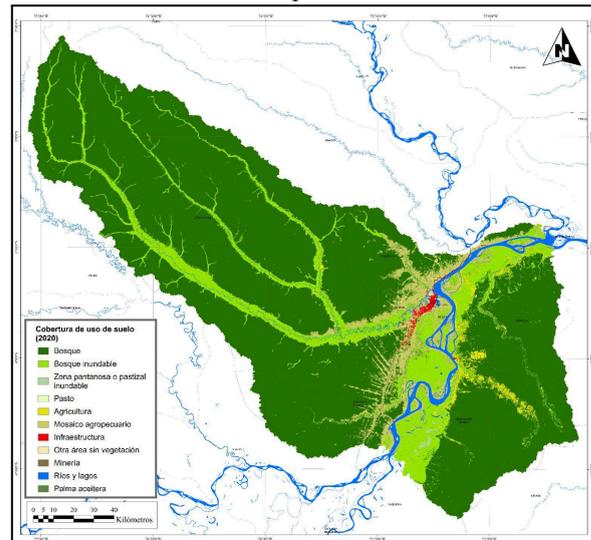
Cobertura de uso de suelo para 1985



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 4

Cobertura de uso de suelo para 2020



Fuente: Elaboración propia (2024).

Para este análisis se aplicaron distintas métricas del paisaje a nivel de parche, de clase y de paisaje. Asimismo, el análisis contempló índices de área, índices de forma, índices de distancia e índices de diversidad.

Tabla 4

Métricas e índices utilizados en el análisis

Métricas de Pache o Fragmento

- Área del parche (AREA)
- Perímetro del parche (PERIM)
- Índice de forma (SHAPE)
- Índice de dimensión fractal (FRAC)
- Distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN)

Métricas de Clase

- Área total de clase (CA/TA)
- Porcentaje de paisaje (PLAND)
- Índice de parche más grande (LPI)
- Borde total (TE)
- Densidad de borde (ED)
- Número de parches (NP)
- Dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC)
- Distribución de la distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN_MN)

Métrica de Paisaje

- Área total de paisaje (CA/TA)
- Índice de parche más grande (LPI)
- Borde total (TE)
- Densidad de borde (ED)
- Número de parches (NP)
- Dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC)
- Distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN_MN)
- Riqueza de parches (PR)
- Densidad de riqueza de parches (PRD)
- Índice de diversidad de Shannon (SHDI)
- Índice de diversidad de Simpson (SIDI)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el cálculo de dichas métricas, se utilizó el software Fragstats 4.2-64, el cual requiere una imagen ráster clasificada y un archivo *txt* que contenga las clases presentes.¹⁴ Una vez realizado el análisis de paisaje, se procede a realizar comparativas entre los resultados de ambas imágenes.

3. RESULTADOS

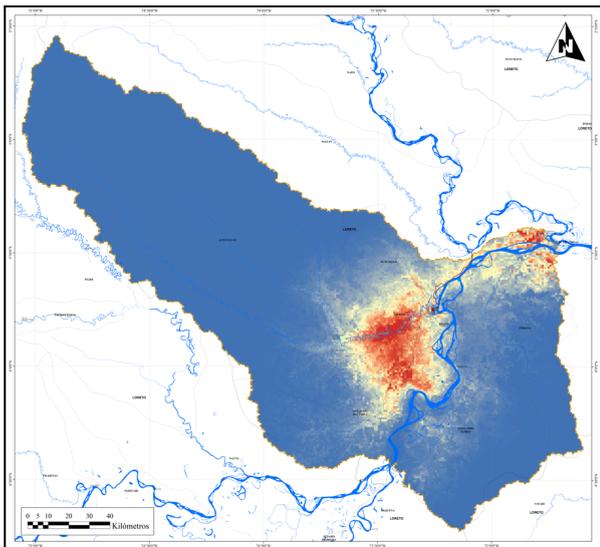
3.1. Resultados del nicho ecológico

3.1.1. Distribución actual (1970 - 2000)

Una vez realizado el modelamiento del nicho ecológico se obtuvo la distribución actual (1970-2000) de la *Ranitomeya reticulata*

Figura 5

Modelamiento de nicho ecológico (1970 – 2000)



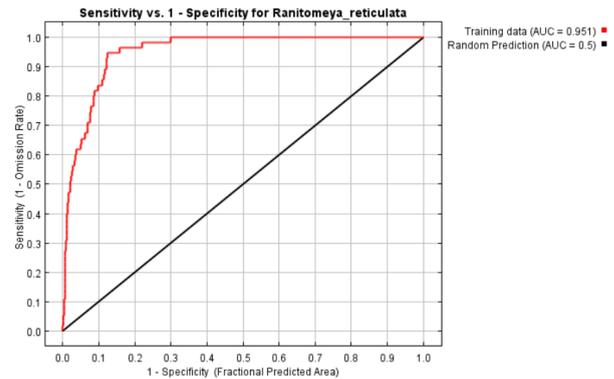
Fuente: Elaboración propia (2024).

El AUC se interpreta como la probabilidad de que las instancias positivas y negativas se hayan clasificado de forma correcta y es un buen indicador del grado de bondad del modelo.⁵ Los valores de AUC se diferencian en cinco niveles de rendimiento: excelente (> 0.9), bueno (0.8- 0.9), aceptable (0.7- 0.8), mala (0.6- 0.7) y no válida (0.5- 0.6).¹⁵ El modelamiento de nicho ecológico para el

Ranitomeya reticulata presenta un área debajo de la curva $AUC=0.951$, considerándose como un modelamiento excelente, demostrando que el área presenta condiciones óptimas donde la especie puede desarrollarse en su hábitat natural.

Figura 6

Curva AUC del modelo (1970 – 2000)

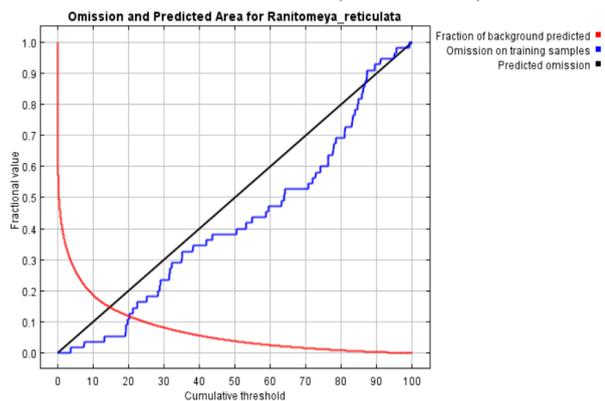


Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el análisis de omisión/comisión, la tasa de omisión se calcula de los puntos de presencia de la especie ubicados por fuera del área potencial de la cuenca de estudio. La línea negra que es la omisión prevista se usa como los puntos previstos para la presencia de la especie; por ello la tasa de omisión debe estar cerca de la omisión prevista. Además, se muestra cómo las omisiones calculadas a partir de puntos de entrenamiento y el área predicha como favorable para la presencia de la especie, varían según el valor límite acumulativo.

Figura 7

Análisis de omisión/comisión (1970 – 2000)



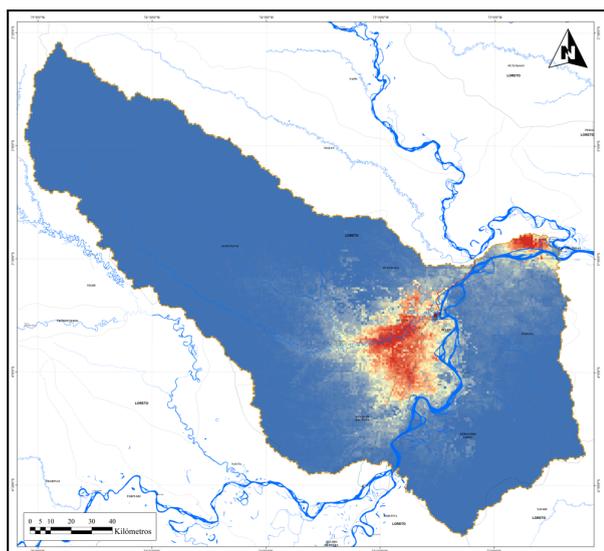
Fuente: Elaboración propia (2024).

3.1.1. Distribución futura (2021 - 2040)

Asimismo, se obtuvo su distribución potencial en el futuro (2021-2040).

Figura 8

Modelamiento de nicho ecológico (2021 – 2040)

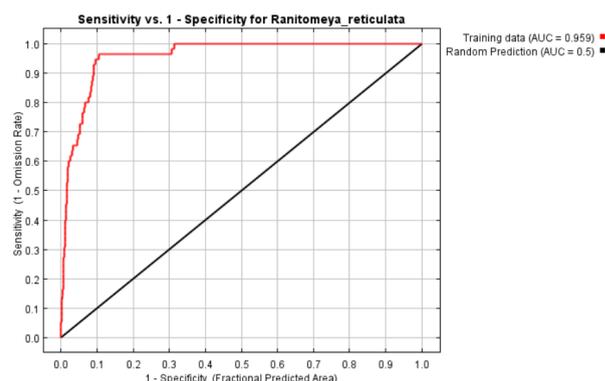


Fuente: Elaboración propia (2024).

Para los datos futuros, el modelamiento de nicho ecológico para el *Ranitomeya reticulata* presenta un área debajo de la curva-AUC=0.959, considerándose, al igual que en los datos actuales, como un modelamiento excelente.

Figura 9

Curva AUC del modelo (2021 – 2040)

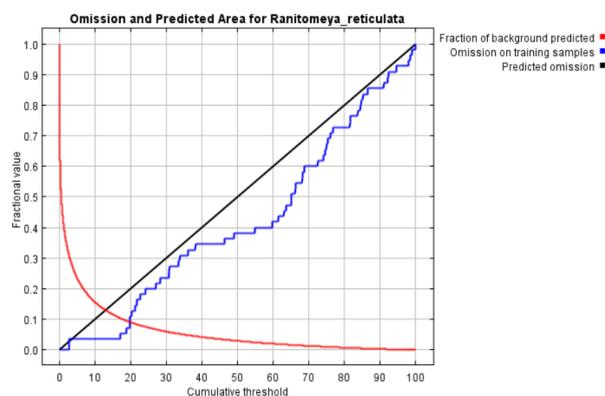


Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el análisis de omisión/comisión, el comportamiento del gráfico demuestra resultados similares a los proporcionados por la data actual, con ligeras variaciones en la tasa de omisión.

Figura 10

Análisis de omisión/comisión (2021 – 2040)



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.2. Resultados del análisis de paisaje

3.2.1. Métricas de parche

Con respecto a los índices de área, superficie, densidad y variabilidad se tiene al área y perímetro de cada fragmento; así como sus respectivas desviaciones estándar.

Tabla 5

Índices de área a nivel parche para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985				
Clase	AREA	SD AREA	PERIM (m)	SD PERIM
Agricultura	13.25	178.35	2633.95	22632.89

Bosque	275.78	15447.27	3702.95	148248.53
Bosque inundable	56.43	1669.34	4890.59	94870.52
Infraestructura	17.44	213.16	2957.87	25638.81
Minería	0.38	0.33	351.00	252.90
Mosaico agropecuario	15.53	311.60	2639.71	30319.71
Otra área sin vegetación	2.83	9.57	1037.31	2160.74
Zona pantanosa o pastizal inundable	12.24	63.95	2410.05	6674.37
Pastos	0.79	0.41	625.78	280.55
Ríos y lagos	45.66	1456.89	4836.45	96062.33

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 6

Índices de área a nivel parche para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020				
Clase	AREA	SD AREA	PERIM (m)	SD_PERIM
Agricultura	10.34	96.34	2497.74	16193.60
Bosque	55.11	6798.58	1004.63	70147.85
Bosque inundable	33.87	1009.41	3200.34	62904.76
Infraestructura	22.41	319.22	3500.71	33591.18
Minería	0.40	0.94	278.63	268.27
Mosaico agropecuario	10.99	348.16	1891.92	41731.73
Otra área sin vegetación	1.32	4.59	631.15	1112.46
Palma aceitera	9.30	8.44	1573.06	884.10
Zona pantanosa o pastizal inundable	12.54	64.33	2424.71	6747.84
Pastos	0.26	0.30	234.78	179.36
Ríos y lagos	34.14	1268.44	3784.34	95117.67

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se evidencia una fuerte disminución en el área media de fragmentos de bosque, pasando de 275.78 ha a 55.11 ha. Asimismo, se observa una disminución de más de 1500 m del perímetro medio de los fragmentos de bosque y bosque inundable. Estas métricas indican la formación de parches más pequeños, es decir, una fuerte fragmentación del paisaje en dicho periodo.

Con respecto a los índices de forma se tiene al índice de forma (SHAPE) y el índice de dimensión fractal (FRAC).

Tabla 7

Índices de forma a nivel parche para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985			
Clase	\bar{x} SHAPE	\bar{x} FRAC	
Agricultura	1.78	1.10	
Bosque	1.64	1.10	
Bosque inundable	1.86	1.11	

Infraestructura	1.71	1.09
Minería	1.28	1.06
Mosaico agropecuario	1.76	1.11
Otra área sin vegetación	1.56	1.09
Zona pantanosa o pastizal inundable	1.92	1.12
Pastos	1.67	1.12
Ríos y lagos	2.16	1.14

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 8

Índices de forma a nivel parche para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020		
Clase	\bar{x} SHAPE	\bar{x} FRAC
Agricultura	1.74	1.10
Bosque	1.23	1.04
Bosque inundable	1.67	1.09
Infraestructura	1.78	1.09
Minería	1.17	1.04
Mosaico agropecuario	1.45	1.07
Otra área sin vegetación	1.37	1.07
Palma aceitera	1.34	1.05
Zona pantanosa o pastizal inundable	1.88	1.11
Pastos	1.13	1.03
Ríos y lagos	1.91	1.12

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se evidencia una disminución del índice de forma para el bosque y los pastos, indicando que sus parches actualmente son más compactos.

Con respecto a los índices de distancia, vecindad y conectividad se tiene a la distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN).

Tabla 9

Índices de distancia a nivel parche para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985	
Clase	\bar{x} ENN (m)
Agricultura	144.56
Bosque	156.72
Bosque inundable	177.80
Infraestructura	249.41
Minería	1122.18
Mosaico agropecuario	189.22
Otra área sin vegetación	389.03
Zona pantanosa o pastizal inundable	567.37
Pastos	2246.37
Ríos y lagos	328.03

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 10

Índices de distancia a nivel parche para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020	
Clase	\bar{x} ENN (m)
Agricultura	129.41
Bosque	98.58
Bosque inundable	135.89
Infraestructura	159.61
Minería	131.11

Mosaico agropecuario	132.14
Otra área sin vegetación	223.67
Palma aceitera	1050.32
Zona pantanosa o pastizal inundable	1219.33
Pastos	906.67
Ríos y lagos	249.22

Fuente: Elaboración propia (2024).

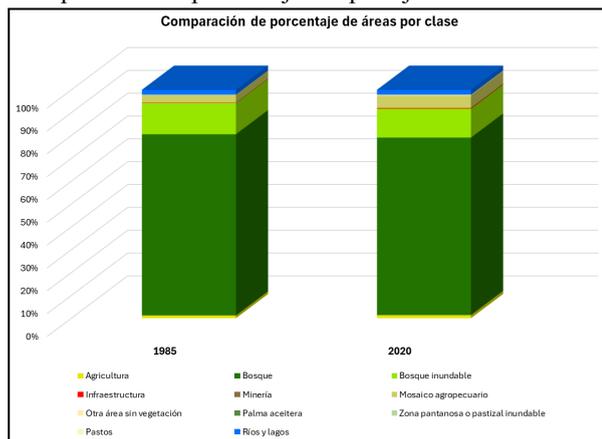
Se evidencia una drástica disminución de 1339.70 m del ENN para la clase de pastos. Ello indica que estos parches están cada vez menos aislados entre sí.

3.2.1. Métricas de clase

Con respecto a los índices de área, superficie, densidad y variabilidad se tiene al área total de la clase (CA/TA), el porcentaje del paisaje (PLAND).

Figura 11

Comparación de porcentaje del paisaje 1985 - 2020



Fuente: Elaboración propia (2024).

No se evidencia un cambio muy drástico en ninguna de las clases, exceptuando la aparición de la clase Palma aceitera para el año 2020. Se evidencia una reducción en 1.63% del área de bosque y un aumento de 2.12% del mosaico agropecuario.

Además, también se encuentran el índice de parche más grande (LPI), el borde total (TE), la densidad de borde (ED) y el número de parches (NP).

Tabla 11

Índices de área a nivel clase para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985				
Clase	NP	LPI	TE	ED
Agricultura	2534	0.26	6671921.14	2.37
Bosque	8112	42.20	28723970.02	10.19
Bosque inundable	6837	3.55	33353133.67	11.83
Infraestructura	223	0.11	659455.67	0.23
Minería	7	0.00	2456.97	0.001
Mosaico agropecuario	5966	0.69	15725900.77	5.58
Otra área sin vegetación	1107	0.01	1146264.53	0.41
Zona pantanosa o pastizal inundable	304	0.03	732595.35	0.26
Pastos	61	0.0001	38172.86	0.01
Ríos y lagos	1307	1.868	6303166.50	2.24

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 12

Índices de área a nivel clase para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020				
Clase	NP	LPI	TE	ED
Agricultura	3701	0.11	9241068.61	3.28
Bosque	39760	41.46	38645438.44	13.71
Bosque inundable	10547	2.11	33675086.11	11.94
Infraestructura	338	0.21	1182489.80	0.42
Minería	214	0.0003	59626.37	0.02
Mosaico agropecuario	13880	0.99	26213789.74	9.30
Otra área sin vegetación	7073	0.01	4462569.37	1.58
Palma aceitera	12	0.001	18876.69	0.01
Zona pantanosa o pastizal inundable	301	0.03	729778.83	0.26
Pastos	377	0.0001	88480.74	0.03
Ríos y lagos	1737	1.87	6558870.74	2.33

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se evidencia un aumento en el NP de casi todas las clases siendo el mayor de estos el bosque con 31648 más. De forma similar sucede con el TE, siendo las clases con mayor aumento el mosaico agropecuario y el bosque. En ambos casos, la clase de zona pantanosa es la única que disminuye

En el caso del LPI no se observa una gran diferencia entre las clases. Por el contrario, en el ED se observa un aumento de 3.52 y 3.72 en las clases de bosque y mosaico agropecuario. Ello indica una mayor fragmentación del paisaje.

Con respecto a los índices de forma se tiene a la dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC).

Tabla 13

Índices de forma a nivel clase para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985	
Clase	PAFRAC
Agricultura	1.54
Bosque	1.53
Bosque inundable	1.56
Infraestructura	1.54
Minería	N/A
Mosaico agropecuario	1.53
Otra área sin vegetación	1.45
Zona pantanosa o pastizal inundable	1.51
Pastos	2.10
Ríos y lagos	1.63

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 14

Índices de forma a nivel clase para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020	
Clase	PAFRAC
Agricultura	1.53
Bosque	1.49
Bosque inundable	1.50
Infraestructura	1.49
Minería	1.43
Mosaico agropecuario	1.46
Otra área sin vegetación	1.43
Palma aceitera	1.22
Zona pantanosa o pastizal inundable	1.50
Pastos	1.46
Ríos y lagos	1.58

Fuente: Elaboración propia (2024).

La única clase que evidencia un cambio fuerte del PAFRAC son los pastos, los cuales disminuyen en 0.64. Ello indica que esta clase, de origen antrópico, ha disminuido su complejidad, teniendo una forma geométrica más simple.

3.2.1. Métricas de paisaje

Con respecto a los índices de área, superficie, densidad y variabilidad se tiene al área total del paisaje (CA/TA), el índice de parche más grande (LPI), el borde total (TE), la densidad de borde (ED) y el número de parches (NP).

Tabla 15

Índices de área a nivel paisaje para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985	
Índice	Valor
Área total del paisaje (CA/TA)	2819627.2 ha
Índice de parche más grande (LPI)	42.20
Borde total (TE)	46678518.74 m
Densidad de borde (ED)	16.55
Número de parches (NP)	26458

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 16

Índices de área a nivel paisaje para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020	
Índice	Valor
Área total del paisaje (CA/TA)	2819627.2 ha
Índice de parche más grande (LPI)	41.46
Borde total (TE)	60438037.71 m
Densidad de borde (ED)	21.43
Número de parches (NP)	77940

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se visualiza la generación de 51.482 nuevos parches en el paisaje en el periodo analizado. Ello se condice con el aumento del TE en casi 13 millones de metros; así como con el aumento en 4.88 de la ED. Por lo cual, se puede deducir que existe una fuerte fragmentación del paisaje.

Con respecto a los índices de forma se tiene la dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC); así como, para los índices de distancia, vecindad y conectividad se tiene a la distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN).

Tabla 17

Índices de área a nivel paisaje para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985	
Índice	Valor
Dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC)	1.53
Distribución distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN_MN)	197.09 m

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 18

Índices de área a nivel paisaje para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020	
Índice	Valor
Dimensión fractal perímetro-área (PAFRAC)	1.46
Distribución distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN_MN)	134.51 m

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se evidencia una disminución tanto del PAFRAC como del ENN_MN. Lo cual indica que, en promedio, el paisaje está adquiriendo una forma levemente más compacta, con una geometría simple y con parches más cercanos. Finalmente, con respecto a los índices de diversidad del paisaje se tiene a la riqueza de

parche (PR), la densidad de riqueza de parches (PRD), el índice de diversidad de Shannon (SHDI) y el índice de diversidad de Simpson (SIDI).

Tabla 19

Índices de diversidad a nivel paisaje para 1985

Cobertura de uso de suelo 1985	
Índice	Valor
Riqueza de parche (PR)	10
Densidad de riqueza de parches (PRD)	0.0004
Índice de diversidad de Shannon (SHDI)	0.7279
Índice de diversidad de Simpson (SIDI)	0.3501

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 20

Índices de diversidad a nivel paisaje para 2020

Cobertura de uso de suelo 2020	
Índice	Valor
Riqueza de parche (PR)	11
Densidad de riqueza de parches (PRD)	0.0004
Índice de diversidad de Shannon (SHDI)	0.7998
Índice de diversidad de Simpson (SIDI)	0.3764

Fuente: Elaboración propia (2024).

Se evidencia la aparición de una nueva clase, la cual refiere a la palma aceitera, debido a que esta especie no se cultivaba a tal magnitud en 1985. Este mismo hecho, se condice con un aumento del índice de Shannon y el índice de Simpson, ambos referidos a la variedad de parches. Sin embargo, se evidencia que la distribución de las áreas de las clases no es proporcional.

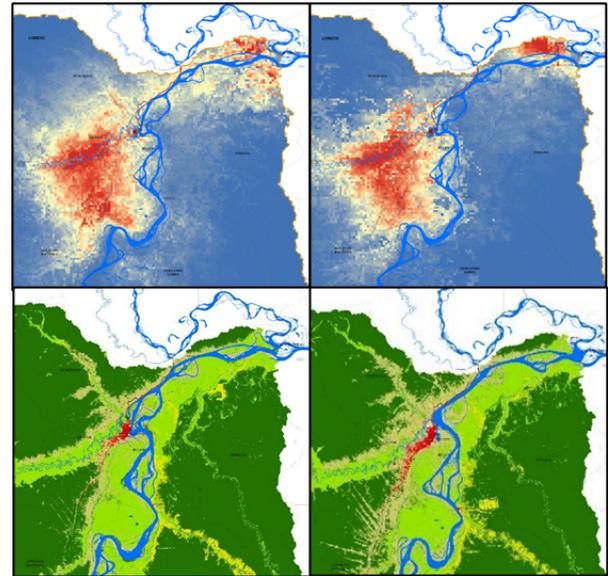
3.3. Comparativa de resultados

A través de un análisis visual, se evidencia que ha existido una disminución del área de alta probabilidad de presencia del *Ranitomeya reticulata* justamente en la zona de conectividad de las dos áreas centrales. Ello reduce la posibilidad de la especie para transitar entre ambas partes.

Esta reducción se colige con el aumento drástico de las áreas de mosaico agropecuario en desmedro de los bosques y bosques

inundables que se presentan de forma natural, como lo muestra la figura 12.

Figura 12



Comparación de porcentaje del paisaje 1985 - 2020

Fuente: Elaboración propia (2024).

4. DISCUSIÓN

Uno de los efectos más claros evidenciados refiere a la fuerte relación de la fragmentación del paisaje, calculada a través de índices y métricas, con la afectación de la distribución potencial de la ranita de Allpahuayo. Ello se condice con los resultados de otras investigaciones ^{16 4} que indican el efecto de la fragmentación del paisaje afecta a los componentes funcionales del ecosistema.

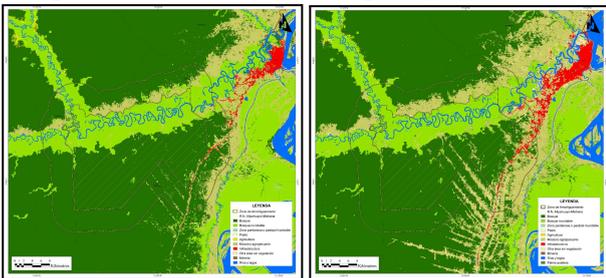
Asimismo, cabe resaltar que la fragmentación en la zona de la Amazonía está íntimamente relacionada con el aumento de la agricultura. Según indican otros autores ^{17 18 6} estas actividad es la principal impulsora de la deforestación; la cual está estrechamente relacionado con el aumento de la infraestructura vial. Esta permite el acceso de la población a áreas anteriormente naturales,

permitiendo el desarrollo de actividades económicas.

Es notable mencionar que gran parte de los ejemplares de la *Ranitomeya reticulata* se encuentran comprendidos en la Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana. Se evidencia un claro aumento del área agrícola que va más allá de la Zona de Amortiguamiento, cercana a la vía Iquitos-Nauta.

Figura 13

Comparación del uso de suelo Allpahuayo-Mishana

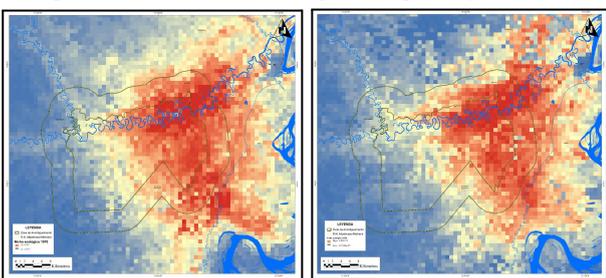


Fuente: Elaboración propia (2024).

El efecto de la fragmentación anteriormente mencionada y demostrada a través de índices, se materializa en la reducción del área potencial de presencia de la *Ranitomeya reticulata* en la zona núcleo, disminuyendo el alcance y la probabilidad de presencia.

Figura 14

Comparación del nicho ecológico Allpahuayo-Mishana



Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos resultados de la fragmentación del paisaje y pérdida del bosque, producen variaciones de la meteorología local. Ello produciría un efecto negativo en el nicho ecológico de especies como anfibios, los

cuales poseen alta sensibilidad a dichos cambios, como indican diversos autores ^{19 20}.

5. CONCLUSIONES

Gracias a la información resultante a través de la ecología del paisaje, se demostró que existe aumento de la actividad agrícola en la zona de estudio, afectando el área de vegetación natural de la zona la cual ha ido disminuyendo con el pasar del tiempo. En el caso de la especie *Ranitomeya reticulata* ve afectado su desarrollo al depender de las zonas boscosas la cual son su hábitat natural. Finalmente, se ha podido observar que la mayor concentración de ejemplares de la especie se encuentra cercano a la Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana, lo cual da sentido a que la especie pueda desarrollarse en dicha zona. A pesar de ello, la zona urbana en la parte sur de la reserva ha mantenido un crecimiento en su extensión, convirtiéndose en una amenaza para la especie.

6. REFERENCIAS

1. Brown, J. *et al.* A taxonomic revision of the Neotropical poison frog genus *Ranitomeya* (Amphibia: Dendrobatidae). *Zootaxa* **3083**, 1–120 (2011).
2. Rivera-González, C. *et al.* Una evaluación preliminar de la herpetofauna en la Zona Reservada Allpahuayo–Mishana, Loreto, Perú. **14**, 139–148 (2003).
3. Romero Documet, J. Inventario de la fauna herpetológica en la estación biológica Allpahuayo (Bosques primarios y secundarios) Zona Reservada Allpahuayo Mishana, Loreto, Perú. (Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, 2011).

4. Lu, N., Jia, C.-X., Lloyd, H. & Sun, Y.-H. Species-specific habitat fragmentation assessment, considering the ecological niche requirements and dispersal capability. *Biol. Conserv.* **152**, 102–109 (2012).
5. Merow, C., Smith, M. J. & Silander Jr, J. A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* **36**, 1058–1069 (2013).
6. Bonilla-Bedoya, S., Molina, J. R., Macedo-Pezzopane, J. E. & Herrera-Machuca, M. A. Fragmentation patterns and systematic transitions of the forested landscape in the upper Amazon region, Ecuador 1990–2008. *J. For. Res.* **25**, 301–309 (2014).
7. ANA. *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Nanay*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4696> (2019).
8. Cabudivo Moena, A. Dinámica del aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca media - alta del río nanay, loreto, Perú base para los lineamientos de un desarrollo rural sostenible. (Universidad Nacional de Trujillo, 2008).
9. GBIF Occurrence Download. GBIF <https://doi.org/10.15468/dl.hhmrfj> (2024).
10. Fick, S. & Hijmans, R. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **37**, (2017).
11. Weng, C., Bush, M. B. & Athens, J. S. Holocene climate change and hydrarch succession in lowland Amazonian Ecuador. *Rev. Palaeobot. Palynol.* **120**, 73–90 (2002).
12. Mano, G. B., Lopes, A. & Piedade, M. T. F. Will climate change favor exotic grasses over native ecosystem engineer species in the Amazon Basin? *Ecol. Inform.* **75**, 102102 (2023).
13. Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG). MapBiomias Amazonia. (2023).
14. McGarigal, K. & Marks, B. J. *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*. PNW-GTR-351 <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/3064> (1995) doi:10.2737/PNW-GTR-351.
15. Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E. & Blair, M. E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* **40**, 887–893 (2017).
16. Zambrano, L., Aronson, M. F. J. & Fernandez, T. The Consequences of Landscape Fragmentation on Socio-Ecological Patterns in a Rapidly Developing Urban Area: A Case Study of the National Autonomous University of Mexico. *Front. Environ. Sci.* **7**, (2019).
17. Kleemann, J. *et al.* Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land* **11**, 268 (2022).
18. López, S. Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. *Appl. Geogr.* **145**, 102749 (2022).
19. González-del-Pliego, P. *et al.* Thermal tolerance and the importance of microhabitats for Andean frogs in the context of land use and climate change. *J. Anim. Ecol.* **89**, 2451–2460 (2020).
20. Seneviratne, T., Dissanayake, M. & Sumanasekara, V. Review on use of amphibian taxa as a bio-indicator for watershed health and stresses. **6**, 178 (2015).

7. ANEXO

Anexo 1

Código de ejecución del modelamiento de nicho

```
#Librerías
library("sf")
library("sp")
library("raster")
library("tidyverse")
library("dismo")
library("ggplot2")
library("terra")
library("corrplot")
library("usdm")
library("car")
Cuenca <- st_read("D:/Ecologia
aplicada/SHAPES/CUENCA.shp")
ranita <- st_read("D:/Ecologia
aplicada/SHAPES/ranita_cuenca2.shp")
#Lectura y extracción de datos ráster
library(raster)
data_actual <- stack("D:/Ecologia
aplicada/1970-2000/Antiguo_cuenca.tif")
#data 1970-2000
ranita_stack <- raster::extract(data_actual,
ranita) #extraccion de datos para el VIF
ranita_cuenca_tabla <- read.csv("D:/Ecologia
aplicada/ranita_cuenca_tabla.csv", sep=",")
ranita_stack2 <- cbind(ranita_cuenca_tabla,
ranita_stack) #union con la tabla anterior
#Análisis de correlación
library(corrplot)
matriz
<-ranita_stack2[,4:ncol(ranita_stack2)]
#creación de matriz
names(matriz)
modelo_ranita <- cor(matriz) #analisis de
correlación
head(modelo_ranita)
corrplot(modelo_ranita, method = 'circle')
#Análisis VIF de multicolinealidad
library(car)
library(usdm)
vif.res <- ?vif(x=
ranita_stack2[,4:ncol(ranita_stack2)])
#análisis VIF
vif.step <- vifstep(x =
ranita_stack2[,4:ncol(ranita_stack2)],
th=10) #análisis VIF, determina los menores
a 5
vrs <- vif.step@results$Variables %>%
as.character()
vrs
```

```
#Exportación de datos a formato ASCII
#Datos 1970-2000
for (i in vrs){
  capa <- data_actual[[i]]
  nombre <- paste0("actual_", i, ".asc")
  writeRaster(capa, filename=nombre, format
= "ascii")
}
data_futuro <- stack("D:/Ecologia
aplicada/2020-2040/Futuro.tif") #data
2021-2040
futuro_cuenca <- raster::crop(data_futuro,
Cuenca) %>% mask(Cuenca)
#2021-2040
fut_nombres <- names(futuro_cuenca)
fut_nombres <-
fut_nombres[c(7,9,10,14,16,20)]
for (i in fut_nombres){
  capa <- futuro_cuenca[[i]]
  nombre <- paste0("D:/Ecologia
aplicada/2020-2040/futura_", i, ".asc")
  writeRaster(capa, filename=nombre, format
= "ascii")
}
```

Fuente: Elaboración propia (2024).