

Enfoques, métodos y herramientas para el análisis de la conectividad

Caso de estudio: ecorregiones del Perú, Puna Central de los Andes

1. Introducción:

La conectividad ecológica es esencial para sostener procesos como la dispersión, el flujo génico y la recolonización, además de amortiguar la variabilidad ambiental mediante rutas alternativas entre parches de hábitat. Bajo el enfoque moderno de disponibilidad de hábitat, la conectividad se concibe como el área accesible en función del tamaño de los parches y la probabilidad de desplazamiento entre ellos, lo que proporciona una base cuantitativa para priorizar sitios y evaluar políticas (Saura & Pascual-Hortal, 2007; Keeley et al., 2021). En paisajes de montaña, la fragmentación topográfica y antrópica favorece la formación de “islas” ecológicas que restringen los movimientos y merman la resiliencia poblacional y ecosistémica (Hilty et al., 2020; Tucker et al., 2018).

En los Andes del Perú incluida la Puna Central y ecorregiones adyacentes los cambios de uso del suelo asociados a la expansión agropecuaria, la infraestructura vial y actividades extractivas han reconfigurado el territorio, generando discontinuidades y cuellos de botella para la fauna. La evidencia reciente documenta aceleración de la deforestación, fuertes gradientes de presión antrópica y el papel de carreteras (Móstiga et al., 2024; Bax & Francesconi, 2018; Southworth et al., 2011). Por lo que es necesario que existan intervenciones que aumenten la permeabilidad de la matriz y la redundancia de enlaces, donde por un lado si bien las redes de áreas naturales protegidas (ANP), jugarían un papel fundamental, muchas veces sin planificación adecuada tienden a operar como conjuntos de parches relativamente aislados.

Por lo cual nace la importancia de evaluar no solo cuánto territorio está protegido, sino qué fracción de ese territorio protegido permanece funcionalmente conectada. El indicador ProtConn cuantifica el porcentaje de territorio protegido y conectado y se reporta a escala de país y ecorregión, resultando útil para el seguimiento de metas internacionales y la planificación multiescalar (Saura et al., 2017). A escala mundial, el promedio de “tierras protegidas y conectadas” ronda 9.3 % para una distancia de dispersión de referencia de 10 km, evidenciando una brecha sustantiva respecto de los compromisos internacionales (Saura et al., 2017). Entre las aplicaciones para analizar conectividad se encuentra Makurhini (Godínez-Gómez et al., 2025), que implementa indicadores como ProtConn, desarrollado para el seguimiento internacional del estado de conectividad de las ANP (Saura & Pascual-Hortal, 2007; Saura et al., 2017; Keeley et al., 2021).

Este trabajo tiene como objetivo analizar las ecorregiones terrestres del Perú con énfasis en la Puna Central de los Andes, siguiendo el marco biogeográfico del WWF para ecorregiones terrestres (WWF, 2012). Donde la pregunta general esta enfocada en: ¿qué tan bien conectada está la red de ANP en estas ecorregiones y qué áreas o enlaces contribuyen en mayor medida a esa conectividad? Para lo cual se plantean los siguiente objetivos especificos: (i) estimar ProtConn y sus fracciones por ecorregión, (ii) cuantificar la contribución relativa de cada ANP a la conectividad regional y (iii) evaluar el progreso hacia la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming–Montreal, bien conectados y equitativamente gobernados para 2030 con el fin de proporcionar una línea base reproducible que oriente decisiones de conservación en la Puna y ecorregiones peruanas.

2. Metodología:

Área de estudio

El análisis se realizó para las ecorregiones biogeográficas presentes en el territorio peruano y áreas contiguas del territorio, con foco en la Puna Central de los Andes como caso de estudio. El inventario abarcó 19 ecorregiones de la clasificación Terrestrial Ecoregions of the World (TEOW), que incluyen, entre otras, Central Andean Dry Puna, Central Andean Puna, Central Andean Wet Puna, Sechura Desert y Peruvian Yungas. Las capas de Áreas Protegidas (AP) se organizaron por escala administrativa y localización: nacionales (ANP), subnacionales (ACR, ACP y ZR) (Geoservidor MINAM, <https://geoservidor.minam.gob.pe/>) y áreas de conservación en países vecinos denominadas (Transboundary) (<https://www.protectedplanet.net/>), las cuales fueron preprocesadas y recortadas respecto al límite de las ecorregiones, a fin de evaluar conectividad transfronteriza potencial (Fig. 1.)

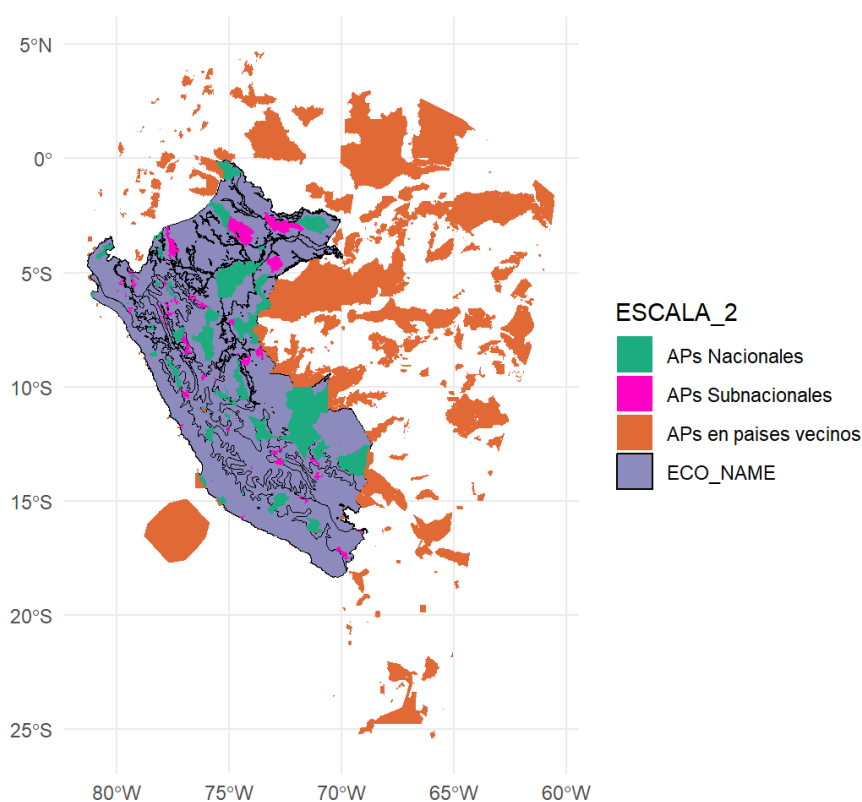


Fig 1. Área de estudio, mostrando las Áreas Protegidas según las escalas identificada para Perú y para las áreas transfronterizas

Índice de conectividad seleccionado y justificación

El cálculo de conectividad se ejecutó con MK_ProtConn para cada ecorregión y con MK_ProtConnMult para el conjunto completo, a fin de asegurar comparabilidad entre regiones bajo una misma configuración. Todas las áreas se trabajaron en hectáreas y la distancia entre unidades protegidas se modeló con el tipo “edge” (medición borde–borde), aplicando keep = 0.1 para estabilizar la detección de contactos y minimizar artefactos por pequeñas imprecisiones geométricas. Se fijó un umbral de dispersión de 10 km, representativo de desplazamientos medianos de vertebrados de montaña y bosques andinos, y se adoptó una probabilidad de movimiento de 0.5 en el umbral, lo que implementa una conexión binaria acorde con la

formulación del índice. Para capturar aportes transfronterizos se incluyó un buffer de 50 km más allá del límite nacional, incorporando la influencia de ANP contiguas en países vecinos. Además, se corrió la variante “ProtConn bound”, que estima el límite superior teórico de conectividad bajo la misma cobertura protegida, útil como referencia de máximo alcanzable. Finalmente, se activó Δ ProtConn (delta = TRUE) para cuantificar la contribución marginal de cada ANP a la conectividad regional y sustentar la priorización de acciones (expansión, restauración o establecimiento de corredores). Todos los parámetros no reportados se mantuvieron en sus valores por defecto del paquete Makurhini (Godínez-Gómez et al. 2025)

3. Resultados:

La red de áreas protegidas de la ecorregión denominada Central Andean Puna muestra cobertura baja a moderada y conectividad funcional limitada con un valor de Prot = 10.57 % del territorio y ProtConn = 6.02 %, con RelConn = 56.94 % del área protegida efectivamente integrada a la red (Tabla 1). Estos valores sitúan a la conectividad funcional en un rango medio, suficiente para sostener movimientos locales entre núcleos, pero todavía limitado para asegurar flujos a escala regional y redundancia de rutas.

Tabla 1. Resultados de análisis de ProtConn para el área de Central Andean Puna en Peru

Index	Value	ProtConn indicator	Percentage
EC(PC)	405704.98	Prot	10.5744
PC	3.6000e-03	Unprotected	89.4256
Maximum landscape attribute	6737801.05	ProtConn	6.0213
Protected surface	712483.90	ProtUnconn	4.5531
		ProtUnconn_Design	4.5531
		ProtConn_Bound	6.0213
		RelConn	56.9423
		ProtConn_Prot	97.4653
		ProtConn_Trans	0.0675
		ProtConn_Unprot	2.4671
		ProtConn_Within	97.4654
		ProtConn_Contig	2.5346
		ProtConn_Within_land	5.8687
		ProtConn_Contig_land	0.1526
		ProtConn_Unprot_land	0.1486
		ProtConn_Trans_land	0.0041

El origen de la conectividad se concentra casi por completo dentro de las propias ANP. La fracción Within explica 97.46 % del ProtConn, mientras que las contribuciones por contigüidad entre polígonos (2.54 %) y a través de la matriz no protegida (2.47 %) son secundarias, y la influencia transfronteriza es residual (0.067 %). Expresado en porcentaje del territorio, esto equivale a Within_land 5.87 %, Contig_land 0.153 %, Unprot_land 0.149 % y Trans_land 0.004 %. El patrón describe una red nuclearizada, dependiente de grandes polígonos individuales y con escasez de enlaces cortos entre ANP cercanas, lo que reduce la redundancia y la resiliencia ante pérdidas locales (Tabla 1).

Respecto a las metas del Marco Mundial de Biodiversidad Kunming–Montreal y Aichi, el porcentaje protegido informado por el panel (10.57 %) está muy por debajo del objetivo 30×30, y solo 6.02 % del territorio cumple la condición de protegido-y-conectado. Estos resultados

señalan que incrementar superficie protegida sin medidas de articulación funcional no es suficiente; se requiere elevar la proporción conectada dentro del sistema, con intervenciones focalizadas en brechas cortas, pasos en matriz y nodos de alto $\Delta\text{ProtConn}$.

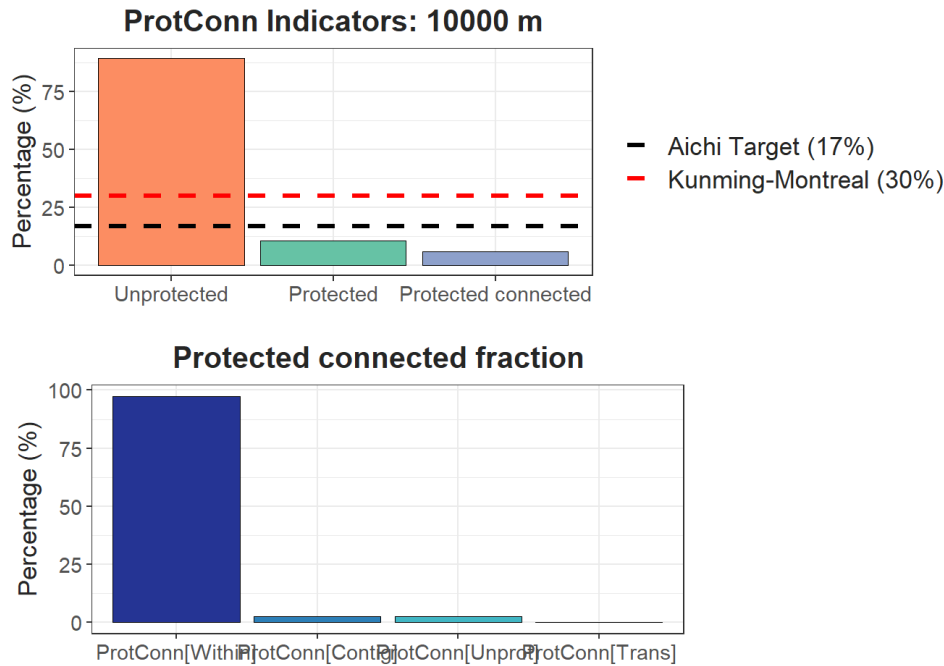


Fig. 2 Cobertura y conectividad protegida (ProtConn) a 10 km, con desagregación de fracciones y comparación con las metas Aichi y Kunming–Montreal

La contribución marginal de cada área protegida ($\Delta\text{ProtConn}$) revela una jerarquía funcional clara. A escala nacional, la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca presenta la mayor aportación ($d\text{ProtConn}$ 30.465), seguida por la Reserva Paisajística Subcuenca del Cotahuasi ($d\text{ProtConn}$ 22.598). Entre las unidades subnacionales, Vilacota Maure (ACR) muestra un aporte relevante ($d\text{ProtConn}$ 3.908), mientras que Tres Cañones (ACR) (0.460) y Cerro Khapia (ZR) (0.104) contribuyen en menor magnitud; otras figuras, como Checca (ACP) y Totorabamba (ACP), exhiben valores muy bajos (0.0044 y 0.00005, respectivamente). En términos operativos, la pérdida de los nodos con mayor $d\text{ProtConn}$ implicaría una merma desproporcionada del índice, y su consolidación debería priorizarse para sostener y ampliar la red (Tabla 2, Fig. 3)

Tabla 2. Contribución marginal de las áreas protegidas a la conectividad de la red ($d\text{ProtConn}$) y a la cobertura protegida ($d\text{Prot}$), por tipo y escala; variación asociada de ProtConn (varProtConn) con umbral de dispersión = 10 km para la ecorregione Central Andean Puna.

Nombre AP	Tipo	Escala	dProt	dProtConn	varProtConn
Reserva Paisajística Cerro Khapia	ZR	Subnacional	2.60	0.10	0.01
Tres Cañones	ACR	Subnacional	3.76	0.46	0.03
Vilacota Maure	ACR	Subnacional	15.75	3.91	0.24
Checca	ACP	Subnacional	0.08	0.00	0.00
Totorabamba	ACP	Subnacional	0.06	0.00	0.00
Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca	ANP	Nacional	40.93	30.47	1.84
Reserva Nacional Pampa Galeras Barbara D' Achille	ANP	Nacional	0.88	0.01	0.00
Reserva Paisajística Subcuenca del Cotahuasi	ANP	Nacional	35.93	22.60	1.36

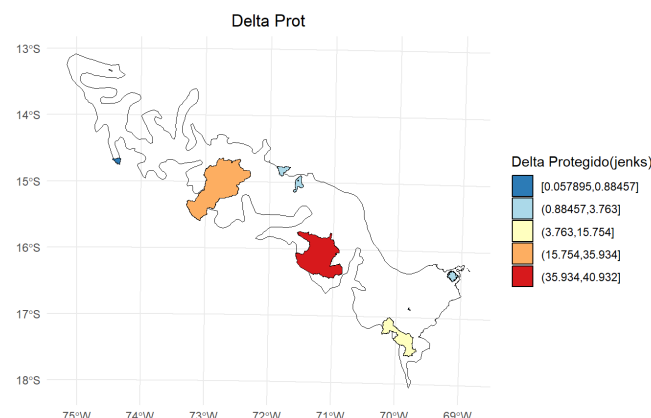


Fig 3. Contribución marginal a la cobertura protegida (Δ Prot) por área natural protegida en la Puna Central de los Andes

La evaluación conjunta por ecorregiones para Perú, revela una fuerte heterogeneidad en la cobertura protegida (Prot). El promedio multirregional estimado para Prot es 17.9 %, (SD 21.24, ES 4.87 , CI 8.35–27.18 %), lo que indica grandes contrastes entre ecorregiones en la fracción del territorio bajo protección formal. El desempeño de la red protegida de AP, el indicador RelConn alcanza 55.08 %, lo que sugiere que, dado el porcentaje de superficie protegida existente, la red logra aproximadamente 57 % del máximo de conectividad posible bajo el umbral de dispersión empleado. Este valor apunta a cuellos de botella estructurales entre áreas protegidas que limitan la integración espacial a la escala de análisis.

La desagregación de ProtConn aporta claves operativas. La fracción ProtConn_Within es 77.161 %, lo que indica que la mayor parte del desempeño de conectividad proviene del área intra-ANP (intraparches), más que de enlaces entre parches a través de la matriz. La componente mediada por territorio no protegido (ProtConn_Unprot) es 5.026 %, señalando que los corredores en la matriz existen pero aún tienen peso marginal en el desempeño general; potenciar su funcionalidad podría rendir ganancias netas de conectividad entre ANP hoy aisladas. (Tabla 3)

Tabla 3. Resultados de análisis de ProtConn para las ecorregiones del Peru

ProtConn indicator	Values (%)	SD	SEM	normal.lower	normal.upper	basic.lower	basic.upper	percent.lower	percent.upper	bca.lower	bca.upper
3 Prot	17.902	21.237	4.872	8.354	27.182	7.153	25.086	10.718	28.652	11.776	32.696
4 Unprotected	82.098	21.237	4.872	72.818	91.646	74.914	92.847	71.348	89.282	67.304	88.224
5 ProtConn	15.049	21.691	4.976	5.319	24.561	3.958	22.308	7.790	26.140	8.859	30.151
6 ProtUnconn	2.853	2.701	0.620	1.643	4.013	1.592	4.011	1.694	4.113	1.690	4.100
7 RelConn	55.808	34.449	7.903	40.743	70.373	40.757	69.885	41.732	70.860	40.821	69.671
8 ProtConn_Prot	85.086	23.655	5.427	74.737	95.328	76.386	96.684	73.487	93.786	67.208	92.286
9 ProtConn_Trans	4.625	8.797	2.018	0.798	8.473	0.354	8.071	1.179	8.897	1.856	10.308
10 ProtConn_Unprot	5.026	6.355	1.458	2.248	7.836	1.938	7.535	2.517	8.114	3.002	8.965
11 ProtConn_Within	77.161	25.771	5.912	65.989	88.334	66.897	89.543	64.779	87.424	62.543	86.141
12 ProtConn_Contig	17.576	18.252	4.187	9.583	25.514	9.487	25.564	9.588	25.665	10.407	26.418
13 ProtConn_Within_land	11.863	20.972	4.811	2.407	21.116	0.639	18.700	5.027	23.087	6.011	27.596
14 ProtConn_Contig_land	2.535	3.577	0.821	0.968	4.076	0.744	3.873	1.197	4.326	1.440	5.020
15 ProtConn_Unprot_land	0.583	0.669	0.154	0.278	0.884	0.268	0.858	0.308	0.898	0.326	0.966
16 ProtConn_Trans_land	0.777	1.747	0.401	0.010	1.557	0.000	1.374	0.179	1.702	0.321	2.680

Si bien, la mayor parte del territorio permanece no protegida (75–85 %), mientras que la superficie protegida ronda entre 15–20 %, y la protegida y conectada se ubica en 8–12 %. Las barras con

dispersiones amplias indican alta heterogeneidad entre ecorregiones. Frente a las metas, la cobertura protegida se sitúa cerca del umbral Aichi 17 %, pero por debajo del objetivo Kunming–Montreal 30 %; la fracción protegida y conectada queda claramente por debajo de ambos referentes, lo que evidencia que no solo falta superficie protegida, sino integración funcional entre unidades (Fig. 4). Por otro lado, predomina la fracción intraparche (ProtConn[Within] 70–80 %), lo que señala que el desempeño actual depende sobre todo del tamaño y continuidad interna de las áreas protegidas existentes. La fracción contigua (ProtConn[Contig] 10–20 %) ocupa el segundo lugar, indicando que bloques adyacentes o colindantes aportan una parte relevante de la red. Las fracciones a través de matriz no protegida (ProtConn[Unprot] 3–7 %) y transfronteriza (ProtConn[Trans] 5–12 %) son secundarias en el promedio, aunque su variabilidad sugiere que en ciertas ecorregiones sí desempeñan un papel importante.

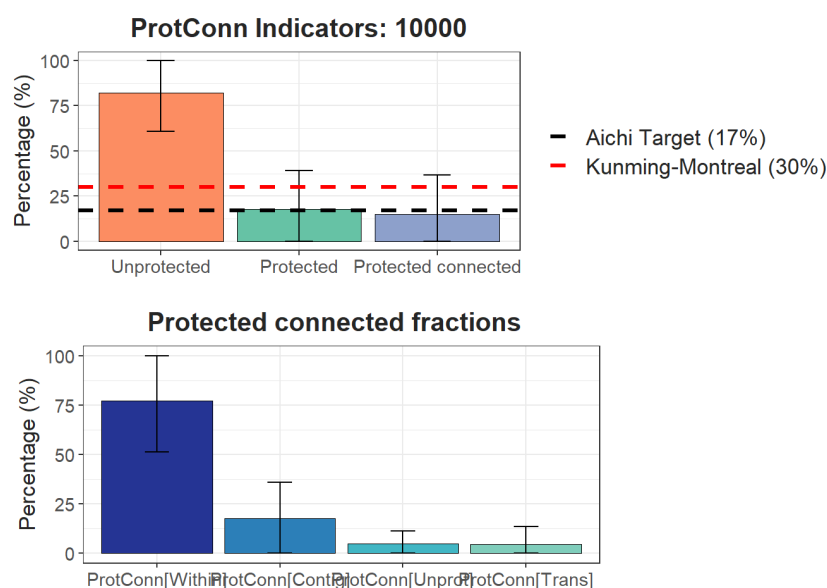


Fig. 4 Cobertura y conectividad protegida (ProtConn) a 10 km, con desagregación de fracciones y comparación con las metas Aichi y Kunming–Montreal

El conjunto de métricas revela un gradiente claro de desempeño en cobertura y conectividad entre ecorregiones. En el extremo alto, Solimões–Japurá Moist Forests y Bolivian Yungas concentran los mayores valores simultáneos de cobertura y conectividad: Prot = 28.40 % y ProtConn = 28.33 % en Solimões–Japurá, con RelConn = 99.77 % y PC = 0.0803, y Prot = ProtConn = 27.64 % en Bolivian Yungas con RelConn = 100 % y PC = 0.0764. En ambos casos, la conectividad efectiva se apoya en grandes bloques continuos de 61.8 % y 91.0 %, respectivamente, complementados por conectividad por contigüidad (38.2 % y 9.0 %) y un aporte transfronterizo pequeño en Bolivian Yungas (1.16 %). Los valores altos de EC(PC) (1.67–0.13 millones de ha) confirman la disponibilidad de áreas efectivamente conectadas a escala regional. Iquitos Várzea muestra un desempeño sólido con Prot = 25.29 %, ProtConn = 23.45 %, RelConn = 92.73 % y PC = 0.055; sin embargo, la conectividad se explica casi por completo por el componente intraparque (98.70 %), lo que indica que las ganancias futuras dependerán de crear puentes entre polígonos más que de aumentar el tamaño de los existentes (Tabla 4, Fig. 4).

En un nivel intermedio, Napo Moist Forests (Prot = 18.67 %, ProtConn = 12.53 %, RelConn = 67.08 %, PC = 0.0157) y Eastern Cordillera Real Montane Forests (Prot = 12.89 %, ProtConn = 6.97 %, RelConn = 54.02 %, PC = 0.0049) combinan núcleos protegidos con déficits de enlace. Napo presenta una contribución por contigüidad elevada (30.75 %), señal de brechas cortas que

pueden cerrarse con ampliaciones o manejo conjunto de polígonos adyacentes. Eastern Cordillera Real depende en mayor medida de contigüidad (36.88 %), tránsitos por matriz no protegida (24.59 %) y conectividad transfronteriza (6.46 %), lo que sugiere una red fragmentada, sensible a la calidad de la matriz y a la cooperación binacional. (Tabla 4, Fig. 4).

Las ecorregiones Marañón Dry Forests y Tumbes–Piura Dry Forests presentan coberturas bajas (Prot 7 %), ProtConn modesto (4.21–5.03 %) y PC reducido (0.0018–0.0025). La conectividad depende de enlaces por contigüidad (31–34 %) y, en Marañón, de la matriz (15.15 %), por lo que las prioridades pasan por incrementar superficie protegida y mejorar la permeabilidad del paisaje, antes de esperar grandes aumentos en PC.

Tabla 4. Contribución marginal de las áreas protegidas a la conectividad de la red (dProtConn) y a la cobertura protegida (dProt) para las ecorregiones del Perú

ECO_NAME	EC(PC)	PC	Prot	Unprotect ed	ProtConn	ProtUnco nn	RelConn	ProtConn_ Prot	ProtConn_ Trans	ProtConn_ Unprot	ProtConn_ Within	ProtConn_ Contig	ProtConn_ Within_Ja nd	ProtConn_ Contig_Ja nd	ProtConn_ Unprot_Ja nd	ProtConn_ Trans_Ja nd
1 Bolivian Yungas	131392.28	0.0764	27.64	72.36	27.64	0.00	100.00	91.02	1.16	7.81	91.02	8.98	25.16	2.48	2.16	0.32
2 Eastern Cordillera Real Montane Forests	180820.84	0.0049	12.89	87.11	6.97	5.93	54.02	68.95	6.46	24.59	63.12	36.88	4.40	2.57	1.71	0.45
3 Iquitos Varzea	1949567.24	0.0550	25.29	74.71	23.45	1.84	92.73	98.70	0.27	1.03	98.70	1.30	23.15	0.30	0.24	0.06
4 Napo Moist Forests	1753200.62	0.0157	18.67	81.33	12.53	6.15	67.08	96.73	2.68	0.59	69.25	30.75	8.68	3.85	0.07	0.34
5 Marañón Dry Forests	47847.65	0.0018	7.02	92.98	4.21	2.80	60.04	84.23	0.62	15.15	68.52	31.48	2.89	1.33	0.64	0.03
6 Tumbes-Piura Dry Forests	193040.08	0.0025	7.60	92.40	5.03	2.57	66.21	90.26	0.36	9.39	65.70	34.30	3.31	1.73	0.47	0.02
7 Lake: Neotropic	47.02	0.0000	0.17	99.83	0.17	0.00	NA	100.00	NA	NA	100.00	NA	NA	NA	NA	NA
8 Peruvian Yungas	1561993.14	0.0070	16.35	83.65	8.39	7.96	51.31	67.93	22.08	9.99	52.59	47.41	4.41	3.98	0.84	1.85
9 Purus Varzea	20692.65	0.0000	7.15	92.85	7.15	0.00	NA	100.00	NA	NA	100.00	NA	NA	NA	NA	NA
10 Solimoes-Japurá Moist Forests	1668762.84	0.0803	28.40	71.60	28.33	0.07	99.77	98.62	0.18	1.20	61.81	38.20	17.51	10.82	0.34	0.05

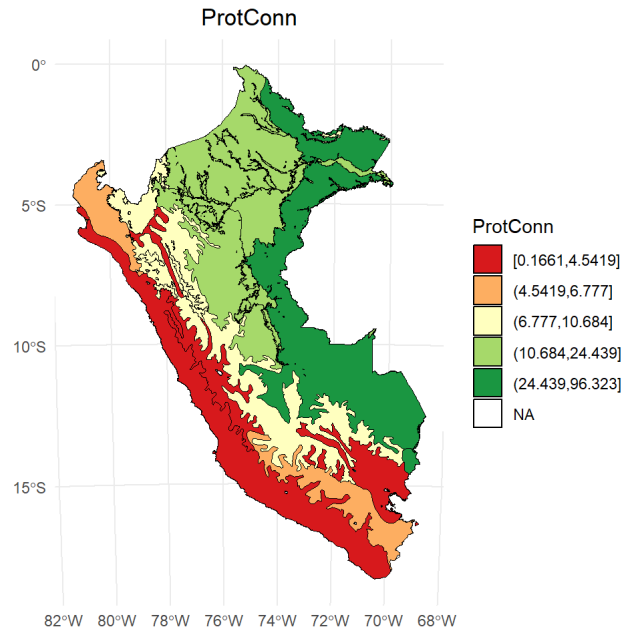


Fig. 5. Contribución marginal a la cobertura protegida (Δ Prot) por área natural protegida en las ecorregiones del Perú

4. Discusión

Los resultados para la Central Andean Puna muestran una red con cobertura baja–moderada y conectividad funcional limitada (Prot = 10.57 %, ProtConn = 6.02 %, RelConn = 56.94 %). Ecológicamente, este es un desempeño suficiente para sostener movimientos locales y algunos intercambios génicos entre estos, pero todavía insuficiente para garantizar redundancia de rutas y flujos a escala regional en un paisaje montano fragmentado. La dominancia del componente intra (Within 97.46 %) indica que la mayor parte del éxito de la red depende del tamaño e integridad interna de las ANP, mientras que los aportes por contigüidad (2.54 %) y por matriz no protegida (2.47 %) son marginales. Este patrón es consistente con la teoría de disponibilidad de hábitat

subyacente a los índices PC/ProtConn, donde la conectividad cae abruptamente cuando los parches están separados por matrices de alto costo de movimiento (Saura & Pascual-Hortal, 2007; Keeley et al., 2021). En sistemas altoandinos, la topografía, la infraestructura lineal y los usos productivos reducen la permeabilidad, efecto que se traduce en rutas escasas entre polígonos y en menor resiliencia frente a perturbaciones locales. A escala global, los movimientos de mamíferos se reducen en paisajes con alta huella humana, lo que refuerza el diagnóstico de conectividad subóptima en la Puna (Tucker et al., 2018).

La jerarquía funcional basada en Δ ProtConn revela pocos nodos críticos que sostienen desproporcionadamente la red (p. ej., Salinas y Aguada Blanca; Subcuenca del Cotahuasi). Este patrón de “cuellos de botella” es común en redes donde unas pocas ANP grandes aportan la mayor fracción del desempeño, mientras segmentos amplios presentan cobertura y enlace insuficientes (Castillo et al., 2020; Saura et al., 2018). Operativamente, sugiere priorizar consolidación de bordes, ampliaciones contiguas y ordenamiento de presiones en esos nodos, porque la pérdida de cualquiera de ellos provocaría caídas desproporcionadas de ProtConn.

En el marco comparativo, los valores de ProtConn para la Puna se sitúan por debajo del promedio mundial reportado para ecorregiones (9–10 % con umbral 10 km), y confirman la heterogeneidad regional documentada por análisis globales de conectividad protegida (Saura et al., 2017, 2019). Esta brecha se agrava frente al Target 3 del Marco Kunming–Montreal, que exige sistemas representativos y bien conectados que cubran al menos el 30 % del territorio hacia 2030: con Prot = 10.57 % y ProtConn = 6.02 %, la Puna enfrenta una doble deuda de cobertura y articulación funcional (CBD, 2022).

El análisis multiecorregión evidencia una heterogeneidad marcada en el desempeño de la red de áreas protegidas del Perú. El promedio de Prot es 17.9 % (SD = 21.24; ES = 4.87; IC95 % = 8.35–27.18), mientras que el desempeño relativo de la red (RelConn) se sitúa alrededor de 55 %, es decir, la mitad del máximo de conectividad posible dado el nivel de cobertura actual. La desagregación de ProtConn indica un dominio del componente intra (Within 77.2 %), con contribuciones secundarias de la contigüidad (10–20 %), de pasos a través de la matriz no protegida (Unprot 5.0 %) y, en menor medida, de la conectividad transfronteriza (5–12 %, con alta variabilidad entre ecorregiones). En términos ecológicos, el sistema nacional funciona sobre la base de grandes núcleos protegidos, pero con pocos enlaces efectivos entre polígonos; esto limita la redundancia de rutas, la dispersión y la persistencia metapoblacional, especialmente en zonas montañosas y secas donde la matriz es más costosa para el movimiento.

Los contrastes biogeográficos son claros. En las ecorregiones húmedas amazónicas con grandes bloques (p. ej., Solimões–Japurá y Bolivian Yungas) la ProtConn es alta y el PC/EC(PC) es elevado, señal de cohesión espacial y de rutas múltiples, con la contigüidad como refuerzo. En cambio, en ecorregiones montañosas y secas (p. ej., Eastern Cordillera Real, Marañón y Tumbes–Piura) la Prot es baja o media, la ProtConn es modesta y el aporte relativo de contigüidad y matriz es mayor, reflejando cuellos de botella y fragmentación. Ecorregiones de transición andino-amazónica (p. ej., Peruvian Yungas) muestran dependencia transfronteriza apreciable, lo que sugiere que los flujos funcionales están parcialmente anclados a AP en países vecinos.

Estos patrones concuerdan con diagnósticos globales y regionales de conectividad protegida. A escala mundial, la fracción de territorio protegido y conectado (ProtConn) se ha estimado alrededor de 9–10 % con umbrales de dispersión comparables y con gran variabilidad entre ecorregiones; muchas regiones montañosas y áridas presentan déficits de enlace, incluso con coberturas moderadas (Saura et al., 2017; Saura et al., 2018).

Implicaciones y líneas de acción

Los hallazgos permiten indicar que se requiere trabajar en algunos aspectos como: (i) consolidar los nodos de alto $\Delta\text{ProtConn}$ (p. ej., Salinas y Aguada Blanca, Cotahuasi), (ii) cerrar brechas cortas para elevar la fracción Contig alrededor de núcleos y entre AP colindantes, (iii) habilitar corredores en matriz donde el *Unprot* es hoy marginal, priorizando zonas con presión humana y baja permeabilidad, y (iv) evaluar acuerdos transfronterizos focales allí donde la proximidad geográfica lo permita.

5. Conclusión

En la Puna Central Andina, la red de ANP muestra cobertura baja–moderada y conectividad funcional limitada. La conectividad está hiperdependiente del interior de las ANP con aportes bajos por contigüidad, donde la conectividad transfronteriza es residual. Además se identifica una jerarquía funcional que incia con la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca y Subcuenca del Cotahuasi son nodos críticos; entre las subnacionales destaca Vilacota Maure, donde su consolidación debe ser prioritaria, pues su pérdida reduciría desproporcionadamente el desempeño.

A escala multirregional en Perú, existe alta heterogeneidad que sugiere que, con la cobertura actual, la red alcanza cerca de la mitad del potencial de conectividad. Donde las ecorregiones amazónicas con grandes bloques (p. ej., Solimões–Japurá, Bolivian Yungas) sostienen ProtConn y PC altos; en contraste, ecorregiones andinas y secas mantienen brechas de enlace y matrices poco permeables.

6. Referencias

Bax, V., & Francesconi, W. (2018). Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied Geography*, 94, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.002>
alicia.concytec.gob.pe

Castillo, L. S., Correa Ayram, C. A., Matallana Tobón, C. L., Corzo, G., Areiza, A., González-M., R., & Godínez-Gómez, O. (2020). Connectivity of protected areas: Effect of human pressure and subnational contributions in the ecoregions of Tropical Andean Countries. *Land*, 9(8), 239. <https://doi.org/10.3390/land9080239>

CBD. (2024). *Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/gbf>

Connectscape. (s. f.). *Analyzing landscape connectivity* • Makurhini. <https://connectscape.github.io/Makurhini/> connectscape.github.io

Convention on Biological Diversity (CBD). (2024). *Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework: Target 3*. <https://www.cbd.int/gbf/targets/3/> [Convention on Biological Diversity](https://www.cbd.int/gbf/targets/3/)

Hilty, J., Worboys, G. L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B., Locke, H., Carr, M., Pulsford, I., Pittock, J., White, J. W., & Tabor, G. (2020). *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/node/49061> [IUCN Portals](https://portals.iucn.org/library/node/49061)

JRC–DOPA. (2023). *Connectivity of terrestrial protected areas (ProtConn): Factsheet C.1*. European Commission, Joint Research Centre.

<https://dopa.jrc.ec.europa.eu/static/dopa/static/dopa/files/factsheets/en/DOPA%20Factsheet%20C1%20EN%20Connectivity.pdf> dopa.jrc.ec.europa.eu

Keeley, A. T. H., Beier, P., & Jenness, J. S. (2021). Connectivity metrics for conservation planning and monitoring. *Biological Conservation*, 255, 109008. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109008>

McRae, B. H., Dickson, B. G., Keitt, T. H., & Shah, V. B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 89(10), 2712–2724. <https://doi.org/10.1890/07-1861.1>

Móstiga, M., et al. (2024). Two decades of accelerated deforestation in Peruvian forests. *Regional Environmental Change*, 24, 89. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02189-5>

Godínez-Gómez, O., Correa-Ayram, C., Goicolea, T., & Saura, S. (2025). Makurhini: An R package for comprehensive analysis of landscape fragmentation and connectivity. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6398746/v1>

Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 83(2–3), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>

Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators*, 76, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>

Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2018). Protected area connectivity: Shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biological Conservation*, 219, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.12.020>

Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2019). Global trends in protected area connectivity from 2010 to 2018. *Biological Conservation*, 238, 108183. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.07.028>

Southworth, J., Marsik, M., Qiu, Y., Perz, S., Cumming, G. S., Stevens, F., Rocha, K., Duchelle, A., Barnes, G., Baraloto, C., Brondizio, E., & Walker, R. (2011). Roads as drivers of change: Trajectories across the tri-national frontier in MAP, the southwestern Amazon. *Remote Sensing*, 3(5), 1047–1066. <https://doi.org/10.3390/rs3051047>

Tucker, M. A., Böhning-Gaese, K., Fagan, W. F., Fryxell, J. M., Van Moorter, B., Alberts, S. C., ... Mueller, T. (2018). Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science*, 359(6374), 466–469. <https://doi.org/10.1126/science.aam9712>

WWF. (2012). *Terrestrial Ecoregions of the World*. World Wildlife Fund. <https://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world>

7. Material anexo:

TRABAJO FINAL

CESAR LUQUE FERNANDEZ

2025-08-23

PAQUETES

```
library(sf)
library(Makurhini)
library(tmap)
library(dplyr)
library(purrr)
library(ggplot2)
library(sf)
library(terra)
library(raster)
library(RColorBrewer)
library(rmapshaper)
```

CARGANDO DATOS

```
APs <- read_sf("AP_PERU_7.shp")
nrow(APs)

## [1] 655

Ecorreg <- read_sf("ECOREGION_PERU.shp")

APs <- APs[,c("NAME_AP", "Type", "ESCALA_2")]
Ecorreg <- Ecorreg[, "ECO_NAME"]

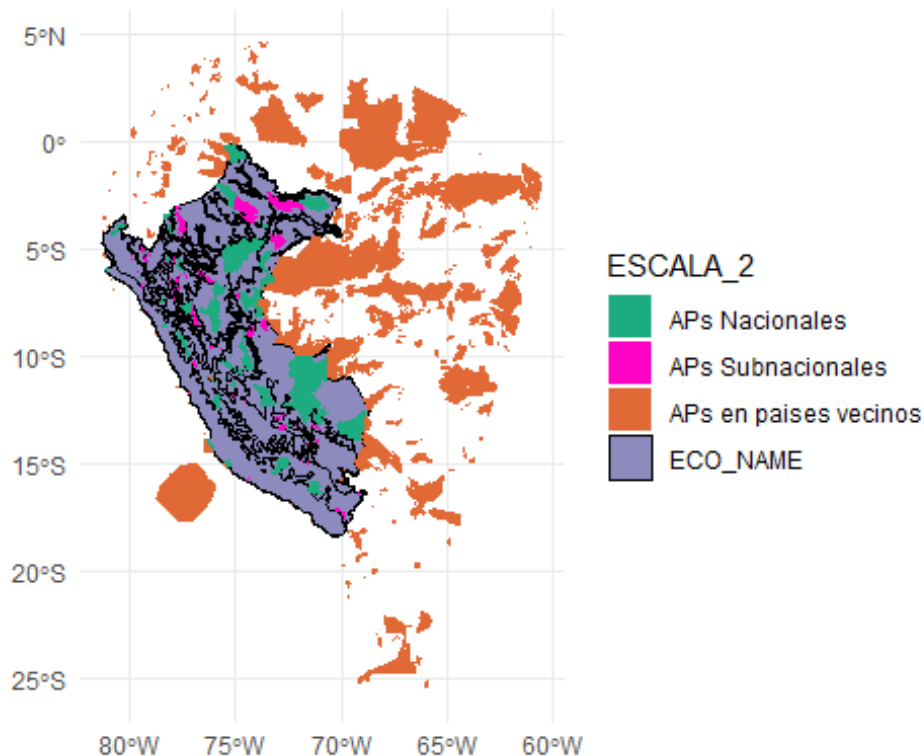
mask_ecorreg <- ms_dissolve(Ecorreg)
APs_nacionales <- ms_clip(APs, mask_ecorreg)

APs_transnacionales <- ms_erase(APs, mask_ecorreg)
APs_transnacionales$Tipo <- "APs en paises vecinos"

APs_subnacionales <- APs_nacionales[APs_nacionales$ESCALA_2 == "Subnacional",]
APs_subnacionales$Tipo <- "APs Subnacionales"

APs_nacionales <- APs_nacionales[APs_nacionales$ESCALA_2 == "Nacional",]
APs_nacionales$Tipo <- "APs Nacionales"
APs_vis <- rbind(APs_nacionales, APs_subnacionales, APs_transnacionales)
APs_vis$Tipo <- factor(APs_vis$Tipo, levels = c("APs Nacionales", "APs Subnacionales", "APs en paises vecinos"))
```

```
ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg, aes(fill = "ECO_NAME"), color = "black") +
  geom_sf(data = APs_vis, aes(fill=Tipo), color = NA) +
  scale_fill_manual(name = "ESCALA_2", values = c("#1DAB80", "#FF00C5",
    "#E06936", "#8D8BBE"))+
  theme_minimal()
```



Correccion de geometrias y raster

```
## Linking to liblwgeom 3.0.0beta1 r16016, GEOS 3.13.1, PROJ 9.6.0
##
## Adjuntando el paquete: 'lwgeom'
##
## The following objects are masked from 'package:sf':
##
##   st_minimum_bounding_circle, st_perimeter
##
## Spherical geometry (s2) switched off
##
## although coordinates are longitude/latitude, st_union assumes that
## they are
## planar
```

LISTADO ECORREGIONES PERU

1. Bolivian Yungas
2. Eastern Cordillera Real Montane Forests
3. Iquitos Varzea

4. Napo Moist Forests
5. Marañón Dry Forests
6. Tumbes-Piura Dry Forests
7. Lake: Neotropic
8. Peruvian Yungas
9. Purus Varzea
10. Solimoes-Japurá Moist Forests
11. Southwest Amazon Moist Forests
12. Ucayali Moist Forests
13. Beni Savanna
14. Central Andean Dry Puna
15. Central Andean Puna
16. Central Andean Wet Puna
17. Cordillera Central Páramo
18. Sechura Desert
19. South American Pacific Mangroves

Seleccion de Ecoregion

Indice Protconn solo en una ecorregión

```
Ecorreg_1 <- Ecorreg[15,]

test <- MK_ProtConn(nodes = APs,
                    region = Ecorreg_1,
                    area_unit = "ha",
                    distance = list(type= "edge", keep = 0.1),
                    distance_thresholds = 10000,
                    probability = 0.5,
                    transboundary = 50000,
                    plot = TRUE,
                    parallel = NULL,
                    protconn_bound = FALSE,
                    delta = FALSE,
                    write = NULL,
                    intern = TRUE)

## Step 1. Reviewing parameters

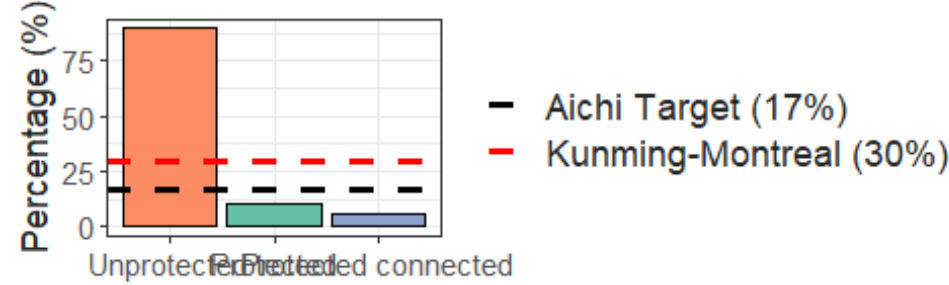
## Step 2. Processing ProtConn metric

## Done!

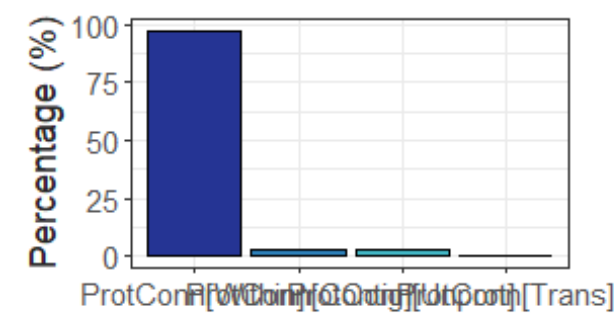
test

## `$Protected Connected (Viewer Panel)`
##
## `$ProtConn Plot`
```

rotConn Indicators: 10000 m



Protected connected fraction



test\$`Protected Connected (Viewer Panel`

Index

Value

ProtConn indicator

Percentage

EC(PC)

405707.55

Prot

10.5744

PC

3.6000e-03

Unprotected

89.4256

Maximum landscape attribute

6737801.05

ProtConn

6.0214

Protected surface

712483.90

ProtUnconn

4.5531

RelConn

56.9427

ProtConn_Prot

97.4647

ProtConn_Trans

0.0676

ProtConn_Unprot

2.4677

ProtConn_Within

97.4647

ProtConn_Contig

2.5353

ProtConn_Within_land

5.8687

ProtConn_Contig_land

0.1527

ProtConn_Unprot_land

0.1486

ProtConn_Trans_land

0.0041

```
as.data.frame(test$`Protected Connected (Viewer Panel`)
```

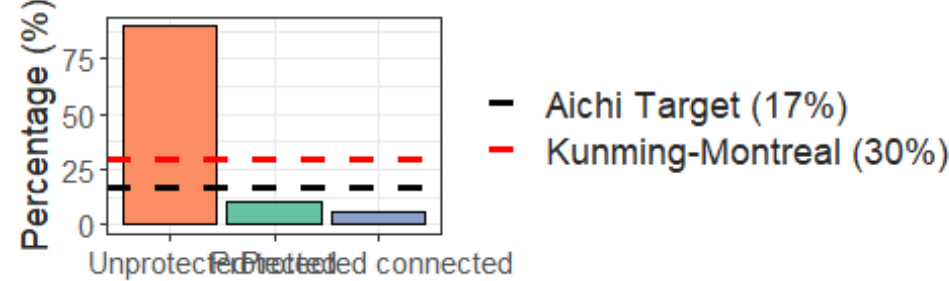
##	Index	Value	ProtConn indicator	Perc
entage				
## 1	EC(PC)	405707.55	Prot	1
0.5744				
## 2	PC	3.6000e-03	Unprotected	8
9.4256				
## 3	Maximum landscape attribute	6737801.05	ProtConn	
6.0214				
## 4	Protected surface	712483.90	ProtUnconn	
4.5531				
## 5			RelConn	5
6.9427				
## 6			ProtConn_Prot	9
7.4647				
## 7			ProtConn_Trans	
0.0676				
## 8			ProtConn_Unprot	
2.4677				
## 9			ProtConn_Within	9
7.4647				
## 10			ProtConn_Contig	
2.5353				
## 11			ProtConn_Within_land	
5.8687				
## 12			ProtConn_Contig_land	
0.1527				
## 13			ProtConn_Unprot_land	
0.1486				
## 14			ProtConn_Trans_land	
0.0041				

Versión corregida o ProtConn bound

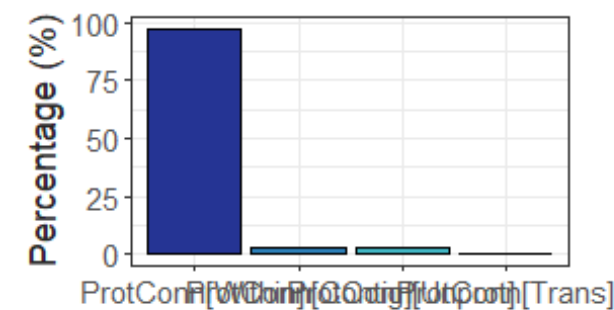
```
test2 <- MK_ProtConn(nodes = APs,  
  region = Ecorreg_1,  
  area_unit = "ha",  
  distance = list(type= "edge", keep = 0.1),  
  distance_thresholds = 10000,  
  probability = 0.5,  
  transboundary = 50000,  
  plot = TRUE,  
  parallel = NULL,
```

```
protconn_bound = TRUE,  
delta = FALSE,  
write = NULL,  
intern = TRUE)  
  
## Step 1. Reviewing parameters  
  
## Step 2. Processing ProtConn metric  
  
## Done!  
  
test2  
  
## `$Protected Connected (Viewer Panel)`  
##  
## `$ProtConn Plot`
```

rotConn Indicators: 10000 m



Protected connected fraction



```
test2$`Protected Connected (Viewer Panel)`  
  
Index  
Value  
ProtConn indicator  
Percentage  
EC(PC)  
405704.98  
Prot
```

10.5744

PC

3.6000e-03

Unprotected

89.4256

Maximum landscape attribute

6737801.05

ProtConn

6.0213

Protected surface

712483.90

ProtUnconn

4.5531

ProtUnconn_Design

4.5531

ProtConn_Bound

6.0213

RelConn

56.9423

ProtConn_Prot

97.4653

ProtConn_Trans

0.0675

ProtConn_Unprot

2.4671

ProtConn_Within

97.4654

ProtConn_Contig

2.5346

ProtConn_Within_land

5.8687

ProtConn_Contig_land

0.1526

ProtConn_Unprot_land

0.1486

ProtConn_Trans_land

0.0041

Contribución individual de cada AP en la ecorregión

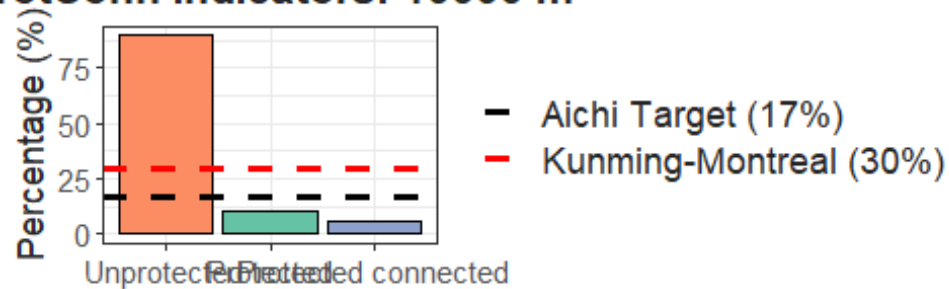
```
test3 <- MK_ProtConn(nodes = APs,  
  region = Ecorreg_1,  
  area_unit = "ha",  
  distance = list(type= "edge", keep = 0.1),  
  distance_thresholds = 10000,  
  probability = 0.5,  
  transboundary = 50000,  
  plot = TRUE,  
  parallel = NULL,  
  protconn_bound = FALSE,  
  delta = TRUE,  
  write = NULL,  
  intern = TRUE)
```

```
## Step 1. Reviewing parameters
## Step 2. Processing ProtConn metric
## Step 3. Processing Delta ProtConn
## Done!

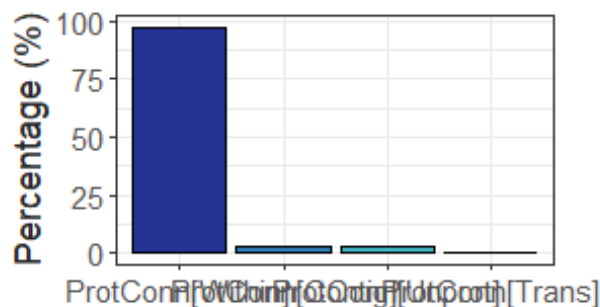
test3

## `$Protected Connected (Viewer Panel)`
##
## `$ProtConn Plot`
```

rotConn Indicators: 10000 m



Protected connected fraction



```
##
## $ProtConn_Delta
## Simple feature collection with 8 features and 6 fields
## Geometry type: GEOMETRY
## Dimension: XY
## Bounding box: xmin: 553110.6 ymin: 8048403 xmax: 1136717 ymax: 8527472
## Projected CRS: PROJCRS["unknown",
##   BASEGEOGCRS["unknown",
##     DATUM["World Geodetic System 1984",
##       ELLIPSOID["WGS 84",6378137,298.257223563,
##         LENGTHUNIT["metre",1]],
##       ID["EPSG",6326]],
##     PRIMEM["Greenwich",0,
##       ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##       ID["EPSG",8901]]],
##     CONVERSION["UTM zone 18S",
##       METHOD["Transverse Mercator",
```

```

##          ID["EPSG",9807]],
##          PARAMETER["Latitude of natural origin",0,
##                    ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##                    ID["EPSG",8801]],
##          PARAMETER["Longitude of natural origin",-75,
##                    ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##                    ID["EPSG",8802]],
##          PARAMETER["Scale factor at natural origin",0.9996,
##                    SCALEUNIT["unity",1],
##                    ID["EPSG",8805]],
##          PARAMETER["False easting",500000,
##                    LENGTHUNIT["metre",1],
##                    ID["EPSG",8806]],
##          PARAMETER["False northing",10000000,
##                    LENGTHUNIT["metre",1],
##                    ID["EPSG",8807]],
##          ID["EPSG",16118]],
##        CS[Cartesian,2],
##          AXIS["(E)",east,
##              ORDER[1],
##              LENGTHUNIT["metre",1,
##                          ID["EPSG",9001]]],
##          AXIS["(N)",north,
##              ORDER[2],
##              LENGTHUNIT["metre",1,
##                          ID["EPSG",9001]]]]
##
##                                     NAME_AP  Type      ESCALA
_2
## 1          Reserva Paisajística Cerro Khapia    ZR Subnacion
al
## 4          Tres Cañones    ACR Subnacion
al
## 5          Vilacota Maure    ACR Subnacion
al
## 6          Checca    ACP Subnacion
al
## 7          Totorabamba    ACP Subnacion
al
## 8          Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca    ANP      Nacion
al
## 10 Reserva Nacional Pampa Galeras Barbara D' Achille    ANP      Nacion
al
## 11          Reserva Paisajistica Subcuenca del Cotahuasi    ANP      Nacion
al
##          dProt      dProtConn  varProtConn      geom
etry
## 1      2.59546296 1.041380e-01 6.281904e-03 POLYGON ((1124576 8189791,
...
## 4      3.76300850 4.604872e-01 2.777792e-02 MULTIPOLYGON (((873610.3 8
3...
## 5      15.75444647 3.907867e+00 2.357338e-01 POLYGON ((1021687 8113636,
...
## 6      0.07890767 4.382194e-03 2.643467e-04 POLYGON ((1055866 8126615,
...

```

```
## 7 0.05789471 5.156270e-05 3.110411e-06 POLYGON ((557033.9 8526782
,...
## 8 40.93163585 3.046539e+01 1.837760e+00 POLYGON ((877379.9 8256041
,...
## 10 0.88456882 1.215956e-02 7.334998e-04 POLYGON ((570207 8379556,
5...
## 11 35.93407503 2.259777e+01 1.363163e+00 POLYGON ((744222.7 8379448
,...
```

```
test3$ProtConn_Delta
```

```
## Simple feature collection with 8 features and 6 fields
## Geometry type: GEOMETRY
## Dimension: XY
## Bounding box: xmin: 553110.6 ymin: 8048403 xmax: 1136717 ymax: 852
7472
## Projected CRS: PROJCRS["unknown",
## BASEGEOGCRS["unknown",
## DATUM["World Geodetic System 1984",
## ELLIPSOID["WGS 84",6378137,298.257223563,
## LENGTHUNIT["metre",1]],
## ID["EPSG",6326]],
## PRIMEM["Greenwich",0,
## ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
## ID["EPSG",8901]]],
## CONVERSION["UTM zone 18S",
## METHOD["Transverse Mercator",
## ID["EPSG",9807]],
## PARAMETER["Latitude of natural origin",0,
## ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
## ID["EPSG",8801]],
## PARAMETER["Longitude of natural origin",-75,
## ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
## ID["EPSG",8802]],
## PARAMETER["Scale factor at natural origin",0.9996,
## SCALEUNIT["unity",1],
## ID["EPSG",8805]],
## PARAMETER["False easting",500000,
## LENGTHUNIT["metre",1],
## ID["EPSG",8806]],
## PARAMETER["False northing",10000000,
## LENGTHUNIT["metre",1],
## ID["EPSG",8807]],
## ID["EPSG",16118]],
## CS[Cartesian,2],
## AXIS["(E)",east,
## ORDER[1],
## LENGTHUNIT["metre",1,
## ID["EPSG",9001]]],
## AXIS["(N)",north,
## ORDER[2],
## LENGTHUNIT["metre",1,
## ID["EPSG",9001]]]]
##
## NAME_AP Type ESCALA
```



```

_2
## 1          Reserva Paisajística Cerro Khapia    ZR Subnacion
al
## 4          Tres Cañones    ACR Subnacion
al
## 5          Vilacota Maure    ACR Subnacion
al
## 6          Checca    ACP Subnacion
al
## 7          Totorabamba    ACP Subnacion
al
## 8          Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca    ANP    Nacion
al
## 10 Reserva Nacional Pampa Galeras Barbara D' Achille    ANP    Nacion
al
## 11          Reserva Paisajistica Subcuenca del Cotahuasi    ANP    Nacion
al
##          dProt    dProtConn    varProtConn          geom
etry
## 1    2.59546296 1.041380e-01 6.281904e-03 POLYGON ((1124576 8189791,
...
## 4    3.76300850 4.604872e-01 2.777792e-02 MULTIPOLYGON (((873610.3 8
3...
## 5    15.75444647 3.907867e+00 2.357338e-01 POLYGON ((1021687 8113636,
...
## 6    0.07890767 4.382194e-03 2.643467e-04 POLYGON ((1055866 8126615,
...
## 7    0.05789471 5.156270e-05 3.110411e-06 POLYGON ((557033.9 8526782
,...
## 8    40.93163585 3.046539e+01 1.837760e+00 POLYGON ((877379.9 8256041
,...
## 10   0.88456882 1.215956e-02 7.334998e-04 POLYGON ((570207 8379556,
5...
## 11   35.93407503 2.259777e+01 1.363163e+00 POLYGON ((744222.7 8379448
,...

```

Delta protegido:

```

library(classInt)
library(dplyr)

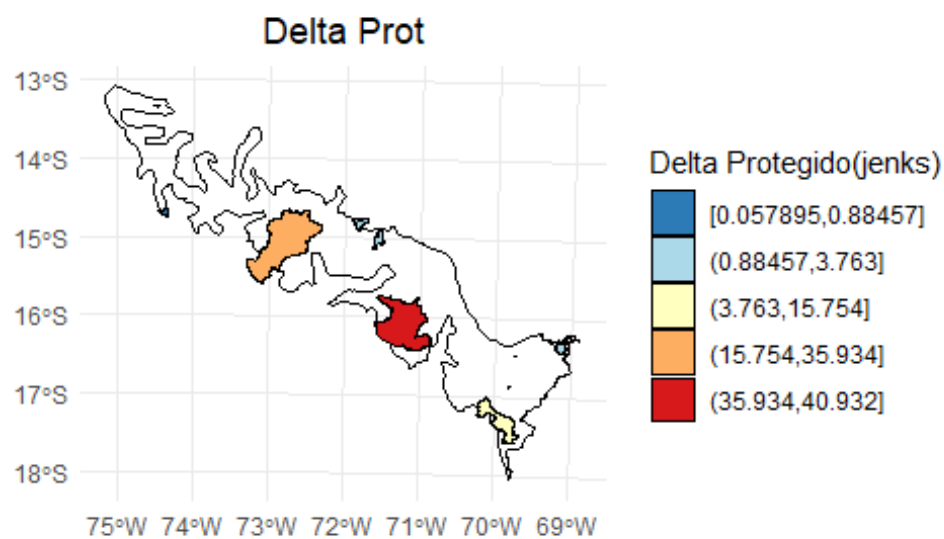
dProtConn <- test3$ProtConn_Delta
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$dProt, n = 5, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProt_q = cut(dProt,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

```

```
#st_write(dProtConn2, dsn = "dProtConn2.shp", driver = "ESRI Shapefile")

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProt_q), color = "black", size = 0.01) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlBu", direction = -1, name = "Delta Protegido(jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Delta Prot",
    fill = "Delta Prot"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```



```
library(sf)
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(classInt)
library(patchwork)

# ----- CLASIFICACIÓN (tu código) -----
dProtConn <- test3$ProtConn_Delta
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$dProt, n = 5, style = "jenks")
```

```

dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProt_q = cut(dProt,
                        breaks = breaks$brks,
                        include.lowest = TRUE,
                        dig.lab = 5))
dprot_lvls <- levels(dProtConn2$dProt_q)

# ----- ASEGURAR CRS EN GRADOS -----
target_crs <- 4326
Ecorreg_1_ll <- st_transform(Ecorreg_1, target_crs)
dProtConn2_ll <- st_transform(dProtConn2, target_crs)

# Rango de Longitudes para ambos mapas
#Lon_lims <- as.numeric(st_bbox(Ecorreg_1_ll)[c("xmin", "xmax")])

make_plot <- function(ymin, ymax, titulo){
  ggplot() +
    geom_sf(data = Ecorreg_1_ll, fill = NA, color = "black") +
    geom_sf(data = dProtConn2_ll, aes(fill = dProt_q), color = "black",
    , size = 0.1) +
    scale_fill_brewer(palette = "RdYlBu", direction = -1,
                      name = "Delta Protegido (jenks)",
                      limits = dprot_lvls, drop = FALSE) +
    coord_sf(ylim = c(ymin, ymax),
              expand = FALSE, crs = st_crs(Ecorreg_1_ll),
              default_crs = st_crs(4326)) +
    theme_minimal() +
    labs(title = titulo) +
    theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5),
          legend.position = "right")
}

# 8-14°S (latitudes negativas: -14 a -8)
p_8_11 <- make_plot(-11, -8, "Delta Prot - 11°S-8°S")
# 8-14°S (latitudes negativas: -14 a -8)
p_11_14 <- make_plot(-14, -11, "Delta Prot - 14°S-11°S")
# 14-20°S (-20 a -14)
p_14_17 <- make_plot(-17, -14, "Delta Prot - 17°S-14°S")
# 14-20°S (-20 a -14)
p_17_20 <- make_plot(-20, -17, "Delta Prot - 20°S-17°S")
# Mostrar lado a lado con leyenda compartida
(p_8_11 + p_11_14)/(p_14_17 + p_17_20) + plot_layout(guides = "collect") &
  theme(legend.position = "right")

# Guardar si quieres:
# ggsave("DeltaProt_dos_paneles.png", width = 14, height = 7, dpi = 300)

```

Delta ProtConn:

```

dProtConn <- test3$ProtConn_Delta
# Calcular Los intervalos de Jenks para strength

```

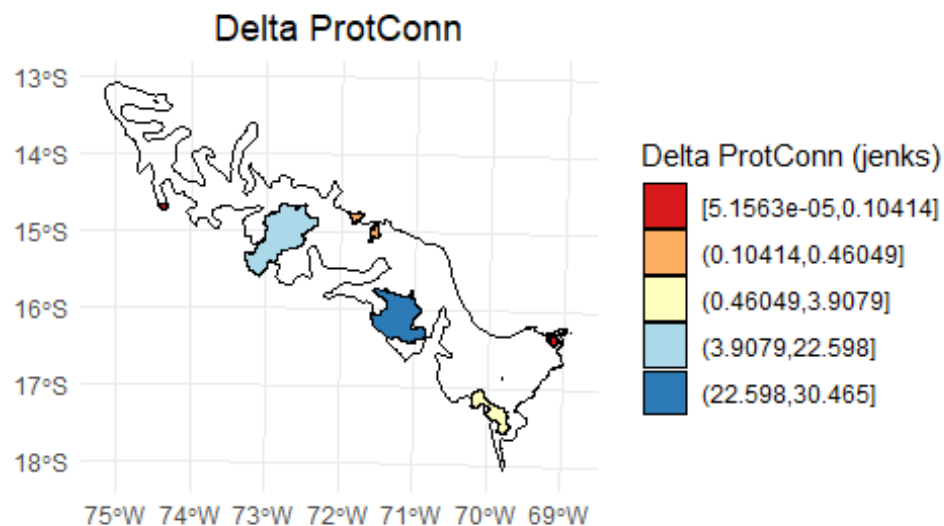
```

breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$dProtConn, n = 5, style =
"jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(dProtConn,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlBu", direction = 1, name = "Delta P
rotConn (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Delta ProtConn",
    fill = "Delta ProtConn"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

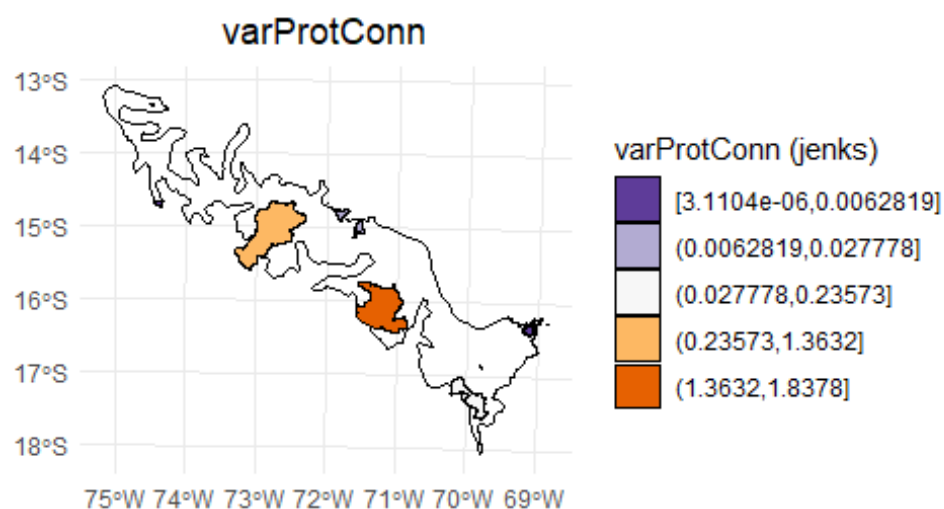


Variación absoluta del ProtConn:

```
dProtConn <- test3$ProtConn_Delta
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$varProtConn, n = 5, style
= "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(varProtConn_q = cut(varProtConn,
                             breaks = breaks$brks,
                             include.lowest = TRUE,
                             dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = varProtConn_q), color = "black",
  size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "PuOr", direction = -1, name = "varProtC
onn (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "varProtConn",
    fill = "varProtConn"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```



SEGUNDA PARTE

```
test <- MK_ProtConnMult(nodes = APs,
                        regions = Ecorreg,
                        area_unit = "ha",
                        distance = list(type= "edge", keep = 0.1),
                        distance_thresholds = 10000,
                        probability = 0.5,
                        transboundary = 50000,
                        plot = TRUE,
                        parallel = FALSE,
                        protconn_bound = FALSE,
                        delta = FALSE,
                        CI = "all",
                        write = NULL,
                        intern = FALSE)

## Warning message: No nodes found in the region, transboundary 50000

test$ProtConn_10000$ProtConn_overall10000
```

ProtConn indicator

Values (%)

SD

SEM

normal.lower

normal.upper

basic.lower

basic.upper

percent.lower

percent.upper

bca.lower

bca.upper

3

Prot

17.902

21.237

4.872

8.354

27.182

7.153

25.086

10.718

28.652

11.776

32.696

4

Unprotected

82.098

21.237

4.872

72.818

91.646

74.914

92.847

71.348

89.282

67.304

88.224

5

ProtConn

15.049

21.691

4.976

5.319

24.561

3.958

22.308

7.790

26.140

8.859

30.151

6

ProtUnconn

2.853

2.701

0.620

1.643

4.013

1.592

4.011

1.694

4.113

1.690

4.100

7

RelConn

55.808

34.449

7.903

40.743

70.373

40.757

69.885

41.732

70.860

40.821

69.671

8

ProtConn_Prot

85.086

23.655

5.427

74.737

95.328

76.386

96.684

73.487

93.786

67.208

92.286

9

ProtConn_Trans

4.625

8.797

2.018

0.798

8.473

0.354

8.071

1.179

8.897

1.856

10.308

10

ProtConn_Unprot

5.026

6.355

1.458

2.248

7.836

1.938

7.535

2.517

8.114

3.002

8.965

11

ProtConn_Within

77.161

25.771

5.912

65.989

88.334

66.897

89.543

64.779

87.424

62.543

86.141

12

ProtConn_Contig

17.576

18.252

4.187

9.583

25.514

9.487

25.564

9.588

25.665

10.407

26.418

13

ProtConn_Within_land

11.863

20.972

4.811

2.407

21.116

0.639

18.700

5.027

23.087

6.011

27.596

14

ProtConn_Contig_land

2.535

3.577

0.821

0.968

4.076

0.744

3.873

1.197

4.326

1.440

5.020

15

ProtConn_Unprot_land

0.583

0.669

0.154

0.278

0.884

0.268

0.858

0.308

0.898

0.326

0.966

16

ProtConn_Trans_land

0.777

1.747

0.401

0.010

1.557

0.000

1.374

0.179

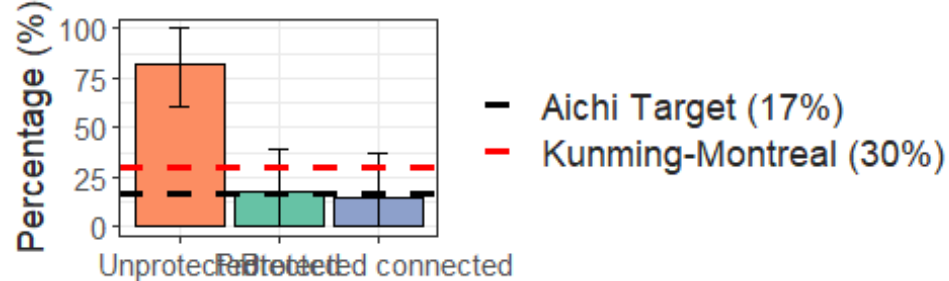
1.702

0.321

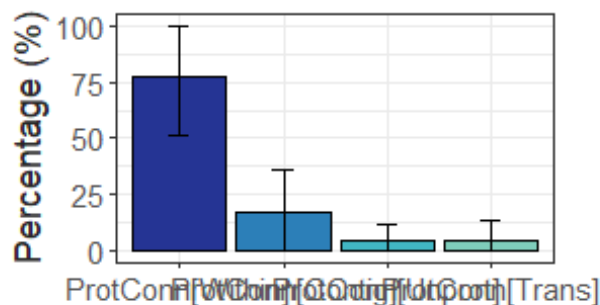
2.680

```
test$ProtConn_10000$`ProtConn Plot`
```

ProtConn Indicators: 10000



Protected connected fractions



Vector con valores para cada ecorregión

```
test$ProtConn_10000$ProtConn_10000

## Simple feature collection with 19 features and 17 fields
## Geometry type: GEOMETRY
## Dimension:      XY
## Bounding box:   xmin: -203080.9 ymin: 7965043 xmax: 1190991 ymax: 99
95733
## Projected CRS: PROJCRS["unknown",
##   BASEGEOGCRS["unknown",
##     DATUM["World Geodetic System 1984",
##       ELLIPSOID["WGS 84",6378137,298.257223563,
##         LENGTHUNIT["metre",1]],
##       ID["EPSG",6326]],
##     PRIMEM["Greenwich",0,
##       ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##       ID["EPSG",8901]],
##     CONVERSION["UTM zone 18S",
##       METHOD["Transverse Mercator",
##         ID["EPSG",9807]],
##       PARAMETER["Latitude of natural origin",0,
##         ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##         ID["EPSG",8801]],
```

```

##      PARAMETER["Longitude of natural origin",-75,
##              ANGLEUNIT["degree",0.0174532925199433],
##              ID["EPSG",8802]],
##      PARAMETER["Scale factor at natural origin",0.9996,
##              SCALEUNIT["unity",1],
##              ID["EPSG",8805]],
##      PARAMETER["False easting",500000,
##              LENGTHUNIT["metre",1],
##              ID["EPSG",8806]],
##      PARAMETER["False northing",10000000,
##              LENGTHUNIT["metre",1],
##              ID["EPSG",8807]],
##      ID["EPSG",16118]],
##      CS[Cartesian,2],
##          AXIS["(E)",east,
##              ORDER[1],
##              LENGTHUNIT["metre",1,
##                  ID["EPSG",9001]]],
##          AXIS["(N)",north,
##              ORDER[2],
##              LENGTHUNIT["metre",1,
##                  ID["EPSG",9001]]]]
## First 10 features:
##
##              ECO_NAME      EC(PC)      PC
Prot
## 1              Bolivian Yungas  131392.28 7.6400e-02 27
.6383
## 2 Eastern Cordillera Real Montane Forests 180820.84 4.9000e-03 12
.8947
## 3              Iquitos Varzeá 1949567.24 5.5000e-02 25
.2892
## 4              Napo Moist Forests 1753200.62 1.5700e-02 18
.6736
## 5              Marañón Dry Forests 47847.65 1.8000e-03 7
.0195
## 6              Tumbes-Piura Dry Forests 193040.08 2.5000e-03 7
.6004
## 7              Lake: Neotropic 47.02 5.8669e-08 0
.1661
## 8              Peruvian Yungas 1561993.14 7.0000e-03 16
.3545
## 9              Purus Varzeá 20692.65 2.4712e-07 7
.1509
## 10 Solimoes-Japurá Moist Forests 1668762.84 8.0300e-02 28
.3959
##      Unprotected ProtConn ProtUnconn RelConn ProtConn_Prot ProtConn_
Trans
## 1      72.3617 27.6383 0.0000 100.0000 91.0216 1
.1637
## 2      87.1053 6.9659 5.9288 54.0216 68.9524 6
.4611
## 3      74.7108 23.4502 1.8390 92.7282 98.7035 0
.2705
## 4      81.3264 12.5268 6.1468 67.0831 96.7289 2

```



```

.6791
## 5      92.9805    4.2149      2.8047    60.0449      84.2312      0
.6225
## 6      92.3996    5.0324      2.5680    66.2126      90.2557      0
.3560
## 7      99.8339    0.1661      0.0000      NA      100.0000
NA
## 8      83.6455    8.3913      7.9631    51.3091      67.9311      22
.0762
## 9      92.8491    7.1509      0.0000      NA      100.0000
NA
## 10     71.6041   28.3307      0.0652    99.7702      98.6172      0
.1783
##      ProtConn_Unprot ProtConn_Within ProtConn_Contig ProtConn_Within_
land
## 1      7.8147      91.0217      8.9783      25.
1568
## 2      24.5865      63.1196      36.8804      4.
3969
## 3      1.0260      98.7034      1.2966      23.
1461
## 4      0.5919      69.2532      30.7468      8.
6752
## 5      15.1463      68.5239      31.4761      2.
8882
## 6      9.3883      65.6962      34.3038      3.
3061
## 7      NA      100.0000      NA
NA
## 8      9.9927      52.5887      47.4113      4.
4129
## 9      NA      100.0000      NA
NA
## 10     1.2044      61.8050      38.1950      17.
5098
##      ProtConn_Contig_land ProtConn_Unprot_land ProtConn_Trans_land
## 1      2.4814      2.1598      0.3216
## 2      2.5691      1.7127      0.4501
## 3      0.3041      0.2406      0.0634
## 4      3.8516      0.0742      0.3356
## 5      1.3267      0.6384      0.0262
## 6      1.7263      0.4725      0.0179
## 7      NA      NA      NA
## 8      3.9784      0.8385      1.8525
## 9      NA      NA      NA
## 10     10.8209      0.3412      0.0505
##      geometry
## 1 MULTIPOLYGON (((1132435 848...
## 2 MULTIPOLYGON (((172501.7 96...
## 3 MULTIPOLYGON (((1053615 953...
## 4 POLYGON ((527600.3 9972805,...
## 5 POLYGON ((142366.2 9433068,...
## 6 MULTIPOLYGON (((-82935.65 9...
## 7 MULTIPOLYGON (((1153821 819...

```

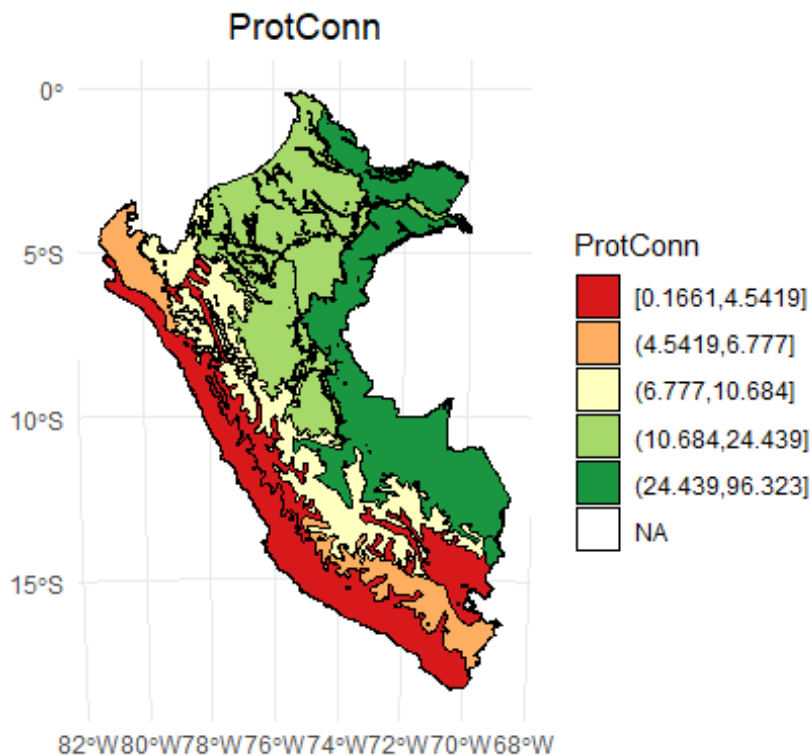
```
## 8 MULTIPOLYGON (((331755.3 90...
## 9 MULTIPOLYGON (((1048635 969...
## 10 MULTIPOLYGON (((1049503 954...
```

PLOT

```
dProtConn <- test$ProtConn_10000$ProtConn_10000
# Calcular Los intervalos
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$ProtConn, n = 5, style =
"quantile")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(ProtConn,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "ProtCon
n") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "ProtConn",
    fill = "ProtConn"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```

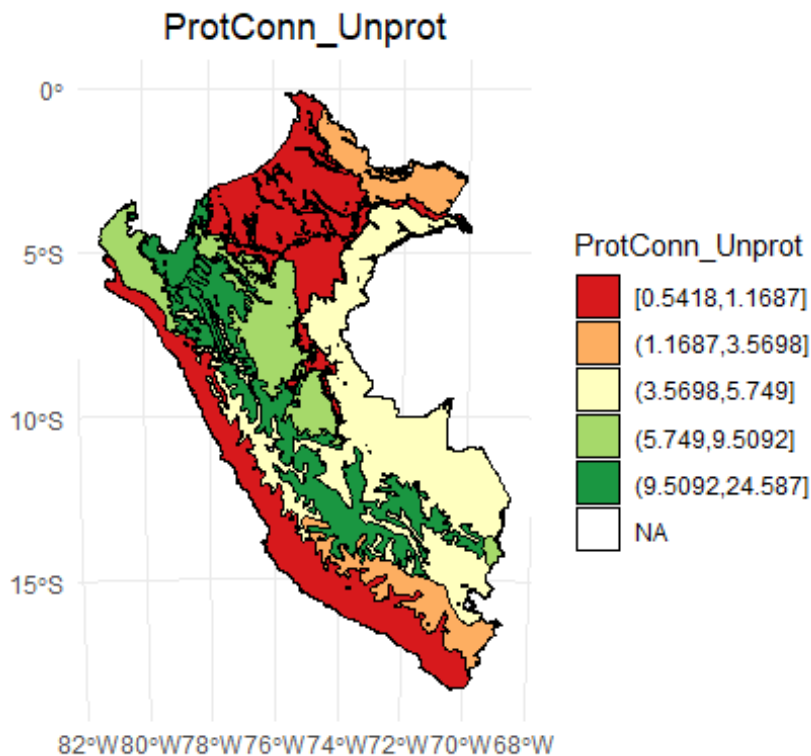


ProtConn_Unprot:

```
dProtConn <- test$ProtConn_10000$ProtConn_10000
# Calcular Los intervalos
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$ProtConn_Unprot, n = 5, s
tyle = "quantile")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(ProtConn_Unprot,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "ProtCon
n_Unprot") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "ProtConn_Unprot",
    fill = "ProtConn_Unprot"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```

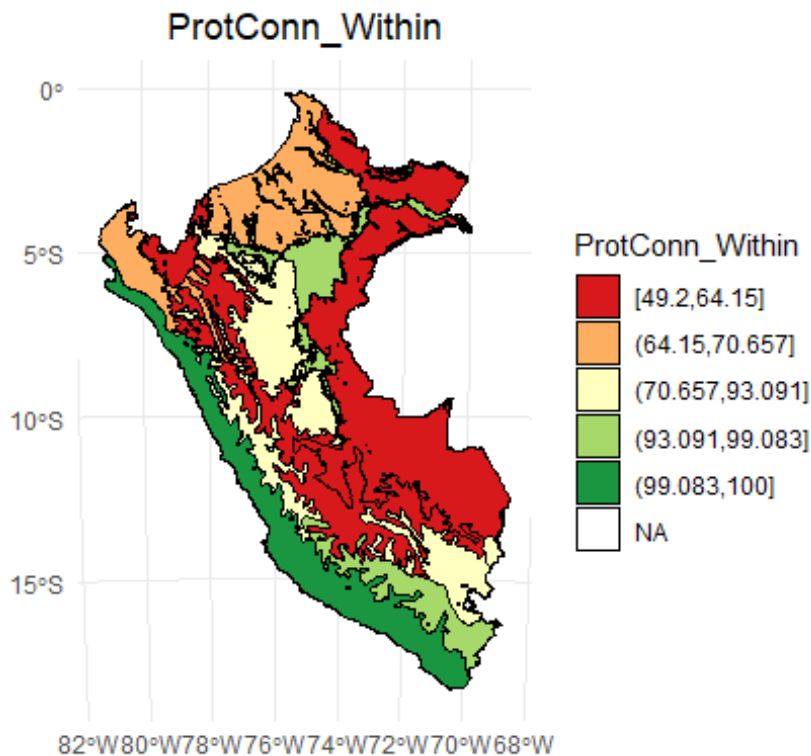


ProtConn_Within:

```
dProtConn <- test$ProtConn_10000$ProtConn_10000
# Calcular los intervalos
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$ProtConn_Within, n = 5, s
tyle = "quantile")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(ProtConn_Within,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "ProtCon
n_Within") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "ProtConn_Within",
    fill = "ProtConn_Within"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```

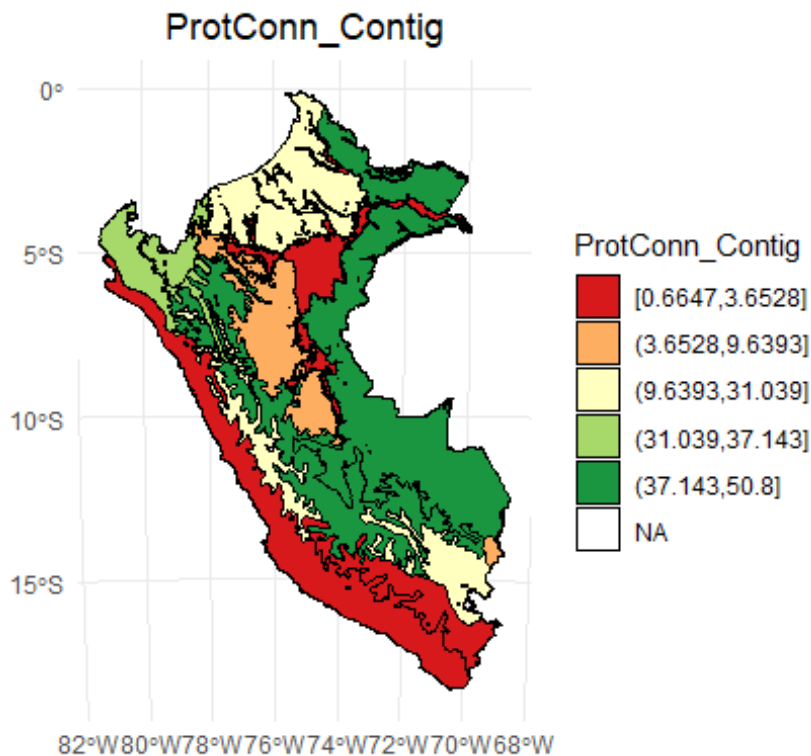


ProtConn_Contig:

```
dProtConn <- test$ProtConn_10000$ProtConn_10000
# Calcular Los intervalos
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$ProtConn_Contig, n = 5, s
tyle = "quantile")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(ProtConn_Contig,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "ProtCon
n_Contig") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "ProtConn_Contig",
    fill = "ProtConn_Contig"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```



ProtConn_Trans:

```
dProtConn <- test$ProtConn_10000$ProtConn_10000
# Calcular Los intervalos
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$ProtConn_Trans, n = 5, style = "quantile")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(ProtConn_Trans,
                           breaks = breaks$brks,
                           include.lowest = TRUE,
                           dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black",
          size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "ProtConn_Trans") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "ProtConn_Trans",
    fill = "ProtConn_Trans"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )
```

