

Quispe - original - artículo.doc.docx

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:533543536

Fecha de entrega

27 nov 2025, 9:52 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

27 nov 2025, 10:01 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Quispe - original - artículo.doc.docx

Tamaño del archivo

2.9 MB

33 páginas

7929 palabras

45.148 caracteres

15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 13% Fuentes de Internet
- 7% Publicaciones
- 6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	storage.googleapis.com	3%
2	Internet	www.scielo.br	2%
3	Internet	www.ace-eco.org	1%
4	Internet	naturalcapitalproject.stanford.edu	<1%
5	Internet	hdl.handle.net	<1%
6	Internet	adaptecca.es	<1%
7	Internet	politica.inaigem.gob.pe	<1%
8	Internet	doczz.es	<1%
9	Internet	www.coursehero.com	<1%
10	Trabajos entregados	Universidad Católica de Santa María on 2023-11-21	<1%
11	Internet	www.mdpi.com	<1%

12	Internet	www.scribd.com	<1%
13	Internet	scielo.sld.cu	<1%
14	Internet	www.researchgate.net	<1%
15	Internet	www.mercosur.int	<1%
16	Trabajos entregados	Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2025-07-14	<1%
17	Internet	riu.ufam.edu.br	<1%
18	Trabajos entregados	ucr on 2023-09-11	<1%
19	Publicación	Joel Hernández Bedolla. "Análisis estocástico de datos climáticos como predictor ...	<1%
20	Publicación	Sugenith Margarita Arteaga Castillo. "Cultivos para el cambio climático: selección...	<1%
21	Internet	scholar.sun.ac.za	<1%
22	Internet	www.semillas.org.co	<1%
23	Publicación	Salas Mercado, Dante. "Modelo geo estadístico del impacto sedimentario por met...	<1%
24	Internet	repository.javeriana.edu.co	<1%
25	Internet	www.inaigem.gob.pe	<1%

26	Publicación	"7 ° Congreso Internacional de Ingeniería Agroindustrial", Corporacion Colombia...	<1%
27	Trabajos entregados	Consorcio CIXUG on 2022-06-06	<1%
28	Publicación	Saavedra, Carlos. "Estimating Spatial Patterns of Soil Erosion and Deposition of th...	<1%
29	Trabajos entregados	Universidad Continental on 2025-06-14	<1%
30	Internet	documentop.com	<1%
31	Internet	idus.us.es	<1%
32	Internet	sepia.org.pe	<1%
33	Internet	sidalc.net	<1%
34	Internet	www.un.org	<1%
35	Publicación	"Perspectivas de desarrollo resiliente: reflexiones teóricas y empíricas para la cos...	<1%
36	Publicación	Cuellar Mayorga, Adriana Paola. "Mecanismos de Gestión Ambiental para la Cons...	<1%
37	Trabajos entregados	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt on 20...	<1%
38	Publicación	Lopez Diez, Abel. "Cambio climatico y fenomenos meteorologicos extremos en la ...	<1%
39	Trabajos entregados	Universidad TecMilenio on 2024-02-02	<1%

40	Internet	documents.mx	<1%
41	Internet	dsiappsdev.semarnat.gob.mx	<1%
42	Internet	es.slideshare.net	<1%
43	Internet	hess.copernicus.org	<1%
44	Internet	magsa.udl.cat	<1%
45	Internet	repositorio.chapingo.edu.mx	<1%
46	Internet	repositorio.udec.cl	<1%
47	Internet	rest-dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
48	Internet	revistasipgh.org	<1%
49	Internet	www.eldiarioexterior.com	<1%
50	Internet	www.forest-trends.org	<1%
51	Internet	www.inia.es	<1%

1 **Impacto del cambio climático en la estabilidad de los servicios**
2 **ecosistémicos frágiles del altiplano peruano**

3 **Impact of Climate Change on the Stability of Fragile Ecosystem**
4 **Services in the Peruvian Altiplano**

5 PEDRO V. QUISPE-APAZA ¹; MÓNICA S. SUCASARA-ADCO ² ALEX R. HUAMAN DE LA CRUZ ³

7 ¹ Universidad Peruana Unión, Perú. ² Universidad Peruana Unión, Perú. ³ Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan
8 Santos Atahualpa, Perú.

10 Pedro V. Quispe: pedro.qa@upeu.edu.pe; Mónica S. Sucasara: monica.sucasara@upeu.edu.pe; Alex R.
11 Huaman: ahuaman@uniscjsa.edu.pe

15

10

6

13 **RESUMEN.** Los servicios ecosistémicos dependen directamente de ecosistemas que presentan alta susceptibilidad **frente al**
14 **cambio climático.** Así, **este estudio** tuvo **como objetivo analizar el impacto del cambio climático en** la estabilidad de los servicios
15 ecosistémicos frágiles del altiplano peruano, mediante un sistema de evaluación. Para ello, se utilizaron herramienta **Valoración**
16 **Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST)**, con escenarios basados **en** periodos temporales **y** rutas de
17 concentración de emisiones (SSP), usando variables climáticas; temperatura y precipitación, modelo HadGEM3-GC31-L,
18 además del uso de tierra y otros factores, empleando los modelos InVEST como; rendimiento hídrico, entrega de sedimentos y
19 exportación de nutrientes. Los resultados indican que los servicios ecosistémicos frágiles; rendimiento de agua disminuye en
20 51.60 mm (escenario 1) a 37.23 mm (escenario 3). Además, la retención de suelo según el transporte de sedimentos, difiere de
21 2049.59 t/pixel (escenario 1) a 9002.47 t/pixel (escenario 3), a su vez la proporción de nutrientes muestra cambios en la
22 exportación de nitrógeno que oscila entre 48003.10 kg/pixel (escenario 1) a 11043.40 kg/pixel (escenario 3) y exportación de
23 fósforo redujo un 850.82 kg/pixel (escenario 1) a 243.65 kg/pixel (escenario 3). Por lo que evidencia las respuestas diferenciadas
24 de estos servicios ante el cambio climático, siendo el recurso hídrico el más afectado, debido a la reducción de sus valores
25 espaciales, lo que resulta significativo observar cómo cada variable respondió de manera diferenciada a estas alteraciones. En
26 conclusión, el modelo genera evidencia crucial para fundamentar **la toma de decisiones en** gestión, mapeo **y** manejo de los
27 servicios ecosistémicos altoandinos.

28

29 [Palabras clave: climatología, escenario climático, InVEST, modelado climático, servicios ecosistémicos frágiles]

30

ABSTRACT. Ecosystem services directly depend on ecosystems that exhibit high susceptibility to climate change. Thus, this study aimed to analyze the impact of climate change on the stability of fragile ecosystem services in the Peruvian highlands through an integrated assessment system. For this purpose, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) tool was applied, using scenarios based on temporal periods and shared socioeconomic pathways (SSPs). Using key climatic variables, including temperature and precipitation from the HadGEM3-GC31-LL model alongside land use data, this study applied the InVEST framework to model water yield, sediment delivery, and nutrient export in the high Andes. Results indicate a significant decline in ecosystem services under climate change scenarios. Water yield decreased from 51,60 mm (scenario 1) to 37,23 mm (scenario 3). Soil retention, measured through sediment transport, showed substantial variation, increasing from 2,049.59 t/pixel to 9,002.47 t/pixel. In contrast, nutrient export exhibited a reduction, with nitrogen falling from 48,003.10 kg/pixel to 11,043.40 kg/pixel and phosphorus from 850.82 kg/pixel to 243.65 kg/pixel. The findings demonstrate the differential vulnerability of ecosystem services to climate change, revealing that water provision is the most critically affected. This analysis provides crucial evidence to support decision-making for the management and conservation of high Andean ecosystems.

[Keywords: climatology, climate scenario, InVEST, climate modeling, fragile ecosystem services]

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos globales en la última década por sus efectos transversales en los sistemas naturales, la economía y la estructura social mundial (Yang *et al.* 2020), por lo que representa la modificación persistente de los patrones ambientales, principalmente por alteraciones en variables como temperatura, precipitación y humedad, dichas transformaciones impactan críticamente los ciclos hidrológicos, la dinámica de los ecosistemas de forma global desde el desarrollo vegetal hasta los eslabones fundamentales de las cadenas tróficas terrestres (Ahmad *et al.* 2022), en las próximas décadas se espera que los fenómenos extremos se intensifiquen, tales como sequias e inundaciones a consecuencia del cambio climático (Ayala García *et al.* 2023).

En cuanto a los ecosistemas de montaña su importancia se basa en los servicios que provee, ya que son cruciales para el sustento humano y la conservación de la biodiversidad, sin contar con las dimensiones ecológicas y socioeconómicas (Iqbal *et al.* 2025), ya que los ecosistemas operan como una infraestructura natural fundamental para la producción de servicios ecosistémicos, constituyendo estos últimos aportes indispensables para el desarrollo humano y la calidad de vida (Bennett *et al.* 2009). De hecho, la evaluación de los ecosistemas del milenio documentó que aproximadamente el 60% de los servicios ecosistémicos a nivel global han experimentado degradación o se encuentran en estado de uso insostenible. (Percy *et al.* 2005). Sin embargo, cerca de 800 millones de personas aprovechan los servicios ecosistémicos que se originan en los ecosistemas de montaña del planeta, las cuales funcionan como pilares hídricos fundamentales para el sustento de miles de millones de personas. (Bai *et al.* 2020).

A su vez, los servicios ecosistémicos, son muy afectados por el cambio climático y el rápido desarrollo económico (Rosario 2018), lo que incrementa la demanda de los servicios con el crecimiento poblacional y el cambio climático progresivo, que ejercen una presión considerable sobre los ecosistemas (IPCC 2023), por otro lado, los ecosistemas de montaña se ubican entre las regiones más sensibles; sus glaciares y ecosistemas son indicadores fiables de este fenómeno (Palomo 2017),

12 71 dado que los glaciares y nevados constituyen las principales fuentes de suministro hídrico, el recurso
72 es destinado a múltiples usos prioritarios como: consumo poblacional, generación de energía y
73 actividades agrícolas. (Cano and Haller 2018). Además, la interacción entre el cambio de uso de suelo
74 y el cambio climático puede generar procesos acelerados de erosión edáfica y deterioro de la calidad
44 75 hídrica, mediados por el incremento en el transporte de sedimentos y la exportación desbalanceada de
32 76 nutrientes hacia los ríos (Rocca *et al.* 2014), lo que probablemente afectaría la cantidad y la calidad del
77 agua en las vertientes y cabeceras de cuenca (Guo *et al.* 2022).

78 Una amenaza crítica para los servicios ecosistémicos alto andinos reside en la vulnerabilidad de
79 aquellos vinculados al ciclo hidrológico, la seguridad alimentaria, la conservación de biodiversidad y
80 la estabilidad climática regional (Anderson *et al.* 2011; Cepeda-Arias *et al.* 2024), manifestándose a
7 81 través de alteraciones documentadas en el incremento de temperatura y fluctuaciones extremas,
82 cambios en los patrones de precipitación y acelerado derretimiento de los glaciares, eventos extremos
83 más frecuentes y modificaciones en la distribución de especies (Lennox and Gowdy 2014),
84 precisamente al incrementar los servicios de aprovisionamiento, pueden generar una reducción de
85 otros servicios ecosistémicos, y una gestión inadecuada e insostenible socavaría la futura prestación
86 de servicios, por lo que los gestores políticos necesitarían información directa para entender mejor la
87 dinámica del ecosistema y sus servicios, de tal manera que se pueda garantizar, una gestión efectiva de
88 los servicios ecosistémico (Cabral *et al.* 2016; Ma *et al.* 2016).

89 El altiplano peruano enfrentan una presión antropogénica multifacética, donde la minería artesanal,
90 la expansión urbana no planificada y los monocultivos que generan impactos sinérgicos
91 particularmente críticos en los sistemas acuáticos, el vertimiento no controlado metales pesados
92 constituye el vector de contaminación más severo, comprometiendo la integridad ecológica de los
22 93 ecosistema frágiles y representando un riesgo inminente para la salud de la población que dependen
94 de estos recursos hídricos en entornos montañosos de alta vulnerabilidad (Novoa-Villa *et al.* 2022),
95 además las comunidades agro pastoriles enfrentan una doble vulnerabilidad climática, relacionada a

los cambios de sus medios de vida a raíz de los patrones climáticos y el impacto ecológico que causa(Scoville-Simonds 2018).

No obstante, es importante realizar estudios que aborden dichos efectos en los servicios ecosistémicos que promueven y apoyan la innovación tecnológica, para garantizar y proteger la sostenibilidad de los recursos hídricos (Flores *et al.* 2016), a través de la cuantificación, mapeo y la valoración de los servicios ecosistémicos que se están convirtiendo en herramientas importantes para la gestión de ecosistemas y formulación de políticas (Bai *et al.* 2013; Cong *et al.* 2020). Lo que incentiva al desarrollo de principios y mecanismos, que podrían aplicarse de manera más amplia para comprender la provisión de servicios ecosistémicos en diferentes zonas y regiones montañosas (Yu *et al.* 2021).

Sin embargo, son escasas las investigaciones que examinen los resultados potenciales del cambio climático para servicios ecosistémicos altoandinos (Llambí *et al.* 2020), dado que las investigaciones se han centrado más en abordar cambios de coberturas y retroceso glaciar, pero no mediante un análisis integral de los servicios ecosistémicos frente al cambio climático, de esta manera el estudio aborda la brecha de conocimiento existente de los efectos de la variación climática que impactan a los servicios ecosistémicos en las regiones andinas.

Por lo tanto, la investigación tiene como objetivo realizar el análisis del impacto del cambio climático en la estabilidad de los servicios ecosistémicos frágiles del altiplano peruano, a través de la evaluación de servicios ecosistémicos relacionados al recurso hídrico, bajo escenarios climáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cordillera Carabaya se encuentra ubicada en la región andina del sur peruano, políticamente se extiende sobre el territorio del departamento de Puno y Cusco, con una extensión de 11,754 km², delimitada a partir del geo servidor del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM 2023), la cordillera alberga ecosistemas glaciológicos de singular importancia,

donde destaca el nevado AllinCápac, cuya cumbre se eleva a 5804 m.s.n.m., conformando un complejo hidrológico estratégico que integra glaciares, lagunas andinas y sistemas de humedales de alta montaña(ANA 2014) (Figura 1). Dicha área está comprendida por 8 ecosistemas; de glaciar hasta bosques yungas (MINAM 2019).

Información climática

Los datos de registros históricos meteorológicos de precipitación, temperatura máxima y mínima desde el 1970 al 2000 fueron obtenidos de la estación meteorológica Macusani que está bajo la responsabilidad del Servicio Nacional de Meteorología y Climatología (SENHAMI).

Así mismo, para realizar la representación espacial del clima, se utilizó la base de datos histórica (1970 - 2000) de las variables meteorológicas registrados en WorldClim (WC) (Fick and Hijmans 2017), a su vez, WC cuenta con un modelo climático global proyectado HadGEM3-GC31-LL seleccionada por su capacidad de simular adecuadamente la variabilidad climática (Llacza A *et al.* 2021), centrados en los periodos temporales de 2041 – 2060 y 2081-2100, estos datos tienen una resolución espacial de 1 Km, con escenarios climáticos denominados; rutas socioeconómicas compartidas (SSP) que respetan las tendencias socioeconómicas que podrían moldear la sociedad futura respecto a sus emisiones, los seleccionados fueron SSP 2.4.5 una ruta que se basa en el desarrollo continuo de combustible fósil, SSP 58.5 representa un futuro donde se explotan con intensidad los combustibles fósiles, siendo la ruta más extrema (Sayre *et al.* 2025).

Tratamiento y validación de datos climáticos

Se realizó el proceso automático de homogenización, relleno de valores faltantes y control de calidad de la serie de datos con el paquete de R Climatol (Guijarro 2020), a la data histórica de Senhami.

En cuanto a la validación de datos climáticos se realizó mediante el enfoque del método delta, el cual se define como la diferencia entre la media de una variable climática en el futuro y el periodo de referencia (Navarro-Racines *et al.* 2020), que consiste en: 1) cálculo de diferencias entre los datos de referencia y datos de WC, 2) aplicación de correcciones entre los valores proporcionales y sus

diferencias, y 3) validación con métricas para la disminución del sesgo sistemático, lo que se evalúa a través del coeficiente de correlación (r) y el sesgo porcentual (PBIAS) (Yao *et al.* 2022), estas métricas son ampliamente utilizadas para evaluaciones climáticas (Narvaez-Montoya *et al.*, 2022).

Evaluación de los servicios ecosistémicos

Se utilizó el conjunto de herramienta de la Valoración Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST) versión 3.12.1 (Sharp *et al.* 2014). Para la investigación se utilizaron tres modelos como: a) rendimiento de agua (para la retención de agua), b) modelo de proporción de entrega de sedimentos (para la retención de suelo) y c) modelo de purificación de agua (para la exportación de nitrógeno y fósforo), cada modelo requiere datos de entrada (Tabla 1), que fueron geoprocesados en ArcMAP 10.8 (Esri 2022), para cumplir con los requisitos de formato de datos de los modelos. A su vez, atributos mediante la tabla biofísica relacionados a la carga de nutrientes y eficiencia de retención para cada uso de cobertura de suelo.

a) Servicio ecosistémico de retención de agua

El servicio ecosistémico de retención de agua define como la capacidad de los ecosistemas para interceptar o almacenar recursos hídricos provenientes de la precipitación (Bai *et al.* 2011). A su vez, el modelo estima las contribuciones relativas del agua de diferentes partes de un paisaje, ofreciendo información sobre cómo los cambios en los patrones de uso de la tierra afectan el rendimiento anual de agua superficial (Sharp *et al.* 2014). Primero se debe estimar a través del modelo de retención de agua InVEST, luego se debe calcular la retención de agua restando la escorrentía del rendimiento de agua, de acuerdo a la siguiente formula:

$$Y_j = (1 - \frac{AE}{P_i}) \times P_i \quad (1)$$

Donde, “Y_j” es el rendimiento de agua (mm) por píxel; “AET_i” es la real evapotranspiración (mm) por píxel, y “P_i” es la precipitación (mm) por píxel.

b) Servicio ecosistémico de retención de suelo

La erosión y la retención de sedimentos por tierra son procesos naturales que rigen la concentración de sedimentos en las corrientes, su dinámica a escala de la cuenca viene determinada principalmente

por el clima (en particular la intensidad de las lluvias), las propiedades del suelo, la topografía y la vegetación (Sharp et al. 2014). El modelo de entrega de sedimentos InVEST mapea la generación de sedimentos terrestres y la entrega a la corriente. Para cada celda, el modelo permite calcular la cantidad de sedimentos erosionado y luego la tasa de entrega de sedimentos (Sharp et al. 2014). En cuanto a la cantidad de pérdida de suelo por pixel se calcula utilizando la Ecuación universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) como se detalla a seguir.

$$SR=R \times K \times LS \times (1-C \times P) \quad (2)$$

Donde, "SR" es la retención del suelo (tn/ha), "R" es la lluvia erosividad factor (mm / ha), "K" es el suelo erodibilidad factor (tn-ha/ ha-mm), "LS" es el factor de longitud de pendiente y pendiente, "C" es la cubierta vegetal y el factor de manejo, y "P" es el factor de medida de retención del suelo.

c) Servicio ecosistémico de purificación del agua

El servicio de exportación de nutrientes bajo un enfoque simple de equilibrio de masas, describiendo el movimiento de una masa de nutrientes a través del espacio, a diferencia de los modelos de nutrientes más sofisticados, el modelo no representa los detalles del ciclo de los nutrientes, sino que representa el flujo de nutrientes a largo plazo y en estado estacionario mediante relaciones empíricas (Sharp et al. 2014). El modelo InVEST Nutrient Delivery Ratio (NDR), mapea las fuentes de nutrientes de las cuencas y el transporte de nutrientes a la corriente (Sharp et al. 2014), a través de la formula:

$$NDR_i = NDR_{0,i} (1 + \exp \left(\frac{IC_0 - IC_i}{k} \right))^{-1} \quad (3)$$

Donde, "IC₀" y "k" son parámetros de calibración, "IC" es un índice topográfico, y "NDR_{0,i}" es la proporción de nutrientes que no son retenidos por los píxeles pendiente abajo (independientemente de la posición del píxel en el paisaje).

Análisis de escenarios

Para realizar el adecuado análisis de cambio climático se plantearon escenarios de cambio y efectos sobre los servicios ecosistémicos (Anderson et al. 2011), identificados en el ámbito de estudio, para ello se tomaron los datos base de WC, con una base de 30 años de 1970 al 2000 como escenario 1 y en periodos temporales; escenarios 2 de 2041-2060 (SSP – 2.4.5. y 5.8.5) y un escenario 3 de 2081-2100 (SSP

– 2.4.5. y 5.8.5), respectivamente para los escenarios proyectados. También incluimos el cambio de cobertura de suelo base del año 2000 y actual del 2024 como variable de entrada para cada modelo según el periodo temporal correspondiente. Este enfoque ayudará a determinar cuál de los factores climáticos, temperatura y precipitación, que tiene mayor influencia sobre el servicio ecosistémico evaluado.

RESULTADOS

Cambio de la climatología

Los datos climáticos de WC presentaron una alta correlación con los datos observados de precipitación y temperatura del aire (máxima y mínima) con coeficientes de correlación (r) de 0.97, 0.80 y 0.99, un PBIAS de -34.13%, -4.34% y -26.35% y desviaciones estándar de 13.09 mm, 0.64°C y 0.47°C respectivamente, espacialmente también hay variaciones (Figura 2). Estas diferencias posiblemente se deban a la alta variabilidad espacial de las variables climáticas en zonas de alta montaña (Díaz et al. 2023).

Servicios ecosistémicos bajo escenarios

Rendimiento anual de agua

El modelo de rendimiento anual de agua para los escenarios climáticos (Figura 3), muestra una distribución espacial en los valores con cambios significativos. Sin embargo, la reducción es notable ya que el rendimiento de agua disminuyó 51.60 mm a 43.02 mm espacialmente del escenario 1 al escenario 2 (2041-2060), lo que indica una disminución del rendimiento de agua.

A su vez, del escenario 2 al escenario 3 (2081-2100) redujo 43.03 mm a 37.23 mm, manifestando una transición crítica hacia condiciones de estrés hídrico, dicha tendencia responde a la modificación en los patrones de precipitación caracterizada por una mayor intensidad, pero con menor frecuencia, a su vez, a distribución espacial de estas pérdidas, probablemente acentuada en zonas de cabecera de cuenca, compromete tanto la disponibilidad estacional como la resiliencia del sistema hidrológico. la variación porcentual total de los tres escenarios sería del 61.80%, lo cual indica que los escenarios al

223 tener una relación directa con el cambio climático generen mayores efectos de disminución que son
224 atribuidos a la temperatura y precipitación.

225 Retención de suelo

1 226 El modelo de tasa de suministro de sedimentos (SDR) (Figura 4), muestra una diferencia entre el
227 escenario 1 (1970-2000) de 2049.59 tn/pixel de sedimentos a 5607.00 tn/pixel del escenario 2 (2041-
228 2060), evidenciando una pérdida acelerada de suelo particularmente en fondos de valle aluviales y
229 laderas pronunciadas, donde la combinación de factores climáticos y características topográficas
230 favorece procesos de escorrentía concentrada. Sin embargo, en comparación con el escenario 3 (2081-
231 2100) muestran cambios significativos con un incremento del 9002.47 tn/pixel, sugiere la posible
232 superación de umbrales de estabilidad del suelo en ciertas áreas, dicho patrón responde a la
233 intensificación de eventos de precipitación extrema, que incrementan la energía cinética para el
234 desprendimiento y transporte de partículas (arena, limo, arcilla), mientras que la reducción de
29 235 cobertura vegetal asociada a cambios en el uso de suelo-disminuye la protección superficial, La
236 variación total del 80.67% entre escenarios refleja así una progresiva pérdida de capacidad de
237 retención sedimentaria en la cuenca, con implicancias directas para la colmatación de cuerpos de agua,
238 reducción de la calidad hídrica.

4 239 Purificación de agua

240 El modelo de purificación de agua, basado en la exportación de fósforo (Figura 5) y nitrógeno
241 (Figura 6), en general presentaron patrones de cambio. En el escenario (2041-2060) y futuro (2081-
242 2100), las cantidades de exportación de nitrógeno varían entre 48,003.10 kg/pixel a 11,043.40 kg/pixel y
243 fósforo redujeron de un 850.82 kg/pixel a 243.65 kg/pixel espacialmente en las zonas del área de
244 estudio, la disminución porcentual en 70.55 % para exportación de nitrógeno y un 80.80% para
245 exportación de fósforo, los valores sugieren una alteración significativa en los procesos
246 biogeoquímicos de nitrógeno, lo que espacialmente se traduce en valores mínimos en zonas altas de
247 escasa cobertura vegetal, indica una posible limitación en los procesos de mineralización y
248 nitrificación asociada a condiciones de estrés hídrico y térmico, así como a la reducción de materia

orgánica edáfica. Por otro lado, el patrón de cambio del fósforo en valles aluviales, humedales y zonas agrícolas refleja su dinámica diferencial como nutriente menos móvil, donde la disminución podría relacionarse con cambios en los mecanismos de adsorción-desorción en suelos, alteración en los ciclos de retención en humedales, y posiblemente modificaciones en las prácticas agrícolas bajo los nuevos regímenes climáticos.

Variabilidad de los servicios

La comprensión de los servicios ecosistémicos se da en la distribución espacial en sus valores (Tabla 2), que varían en rangos altos y bajos respectivamente, de los siguientes servicios: rendimiento de agua, retención de suelo, purificación de agua basada en transporte de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Cada servicio ecosistémico muestra valores espaciales con disminuciones en los periodos temporales y escenarios climáticos con los que fueron evaluados, de acuerdo al resultado respecto al servicio ecosistémico de rendimiento de agua del escenario 1 al escenario 3, existe una reducción porcentual significativa, lo cual indica una alta pérdida de capacidad de retención, a su vez el modelo de rendimiento de suelo basado en transporte de sedimento mostró una reducción respecto al escenario 1. En relación al modelo de purificación de agua basado en nutrientes, el valor de transporte de nitrógeno tiene patrones de cambio, con una disminución porcentual para exportación de nitrógeno y exportación de fósforo, respecto al escenario 1 a escenario 3.

Variaciones de los servicios sobre los escenarios climáticos

La variación sobre el cambio en los diversos servicios ecosistémicos evaluados respecto a los escenarios están en función a la tasa de variación y el cambio de cobertura de usos de suelo a través del cuadro resumen (Tabla 3) respectivamente, de acuerdo con la variabilidad sobre el servicio ecosistémico de rendimiento de agua, para un periodo (2041-2060 SSP-5.8.5), que tendrían menor capacidad de retención de agua sería las tierras de uso agrícolas con 25.40 mm y humedales con 25.16 mm, por otra parte bajo un escenario futuro extremo (2081-2100 SSP-5.8.5) las tierras de uso agrícola disminuyen a un 19.26 mm y humedales a 21.53 mm., lo que muestra la mayor susceptibilidad debido a la compactación del suelo y reducción de la infiltración, agravado por prácticas de manejo

inadecuadas, en caso de los humedales aunque mantienen mejor capacidad de retención que las áreas agrícolas, experimentan una progresiva pérdida de funcionalidad hidrológica por alteración de sus regímenes hídricos naturales, Porcentualmente inferimos en una tasa total de reducción de los escenario evaluados en un 61.80%, espacialmente los valores sugiere que la sinergia entre cambios de uso de suelo y extremos climáticos está reconfigurando la provisión hídrica en la cordillera.

En cuanto al servicio de retención de suelo (Tabla 4), para un el escenario 2 (2041-2060 SSP-5.8.5), los que tendrían menor capacidad de retención de suelo respecto a la exportación de sedimentos serían los humedales con una capacidad de retención de 3.70 t/ha, pasturas y terreno desnudo con 23.49 t/ha y área natural y forestales con 2.33 t/ha, evidencian que las zonas degradadas actúan como fuentes críticas de sedimentos, mientras que los ecosistemas conservados mantienen aún funciones de regulación efectivas. Por otra parte, bajo un escenario 3 futuro (2081-2100 SSP5.8.5) muestran un incremento en humedales con una capacidad de retención de 4.277 t/ha, pasturas y terreno desnudo con 25.92 t/km² y área natural y forestales con 2.52 t/ha, que refleja una intensificación de los procesos erosivos en la cordillera con una tasa de incremento total de 80.67% respecto a todos los escenarios evaluados, esta tendencia proyecta impactos cascada sobre la calidad del agua, aunque los humedales muestran la mayor mejora relativa, ven comprometida su capacidad de retención a largo plazo, y las áreas naturales comienzan a mostrar signos de saturación en sus mecanismos de regulación.

Acerca del servicio de purificación de agua respecto a la exportación de nutrientes, para un periodo actual escenario 2 (2041-2060 SSP-5.8.5), los que tendrían menor exportación de nitrógeno (Tabla 5), serian: humedales con 84.82 kg/ha, área cultivada con 97.52 kg/ha. A su vez, en un escenario futuro extremo escenario 3 (2081-2100 SSP-5.8.5) muestran un descenso en humedales con -37.12 kg/ha. Además, área cultivada 54.23 kg/ha, lo que sugiere una alteración profunda en el ciclo de nutrientes, particularmente el valor negativo en humedales, señala un punto de inflexión en la funcionalidad de estos ecosistemas, además de la disminución generalizada en la exportación refleja una perturbación en los mecanismos naturales de purificación, donde podrían estar perdiendo su capacidad para

procesar eficientemente las cargas de nutrientes, lo que conlleva una tasa reducción total del nitrógeno equivalente al 70.55% entre los escenarios comparados.

En relación con el servicio de purificación de agua respecto al fósforo, para un escenario 2 (2041-2060 SSP-5.8.5), los que tendrían menor exportación de fósforo (Tabla 6), serían: pasturas y terreno desnudo con 0.09 kg/ha, humedales con 2.54 kg/km². A su vez, en un escenario 3 (2081-2100 SSP-5.8.5) muestran una leve reducción en; pasturas y terreno desnudo con 0.05 kg/ha, humedales con 1.29/ha, reflejan patrones contrastantes de baja exportación asociada a su limitada capacidad de retención hídrica, los humedales pierden su capacidad buffer lo que indica una saturación progresiva de los mecanismos de retención de fósforo, posiblemente relacionada con cambios en los niveles freáticos, por otro lado las condiciones climáticas proyectadas podrían favorecer la precipitación de fosfatos o su inmovilización en formas menos biodisponibles, traducéndose a una tasa reducción total del fósforo equivalente al 80.80% entre los escenarios comparados. Sin embargo, las reducciones en los escenarios evaluados en la exportación de fósforo proyectan implicancias significativas para la productividad primaria de los ecosistemas, pudiendo generar limitación por fósforo que afecte las cadenas tróficas y los servicios ecosistémicos.

DISCUSIÓN

Los resultados del modelo InVEST, correspondientes al modelo de rendimiento de agua y retención de suelo, son los que más se ven influenciados por el cambio climático (Gao et al. 2017). En el escenario 2 representado por el escenario 2041-2060, el rendimiento de agua disminuye continuamente, en tierras agrícolas, pasturas y humedales, especialmente del escenario 1 al escenario 2 que precisa la disminución más grande. En contraste con Fu et al. (2017) evidencio una tendencia regresiva en los primeros 20 años de análisis, a su vez que otro factor de influencia es el uso de suelo identificado por diversos autores (Gong et al. 2019), como un impulsor de las alteraciones en los ecosistemas y sus servicios, al modificar sustancialmente las dinámicas ecológicas (Ahmed 2002).

30

324 Precisamente (Weatherhead and Knox 2000), indica que los efectos del cambio climático sean más
325 presentes en el servicio ecosistémico a una escala local, y global (Döll 2002), en modelos de suministro
326 de agua. Además, el modelo muestra una tendencia general decreciente, respecto a los tres escenarios
327 evaluados, con una tasa de disminución total 61.80%, Sin embargo, la disminución hídrica no significa
328 que el uso del agua sea más eficiente (Fu *et al.* 2017), por otro lado, los cambios en la retención de
329 agua, están ligados a la variación de las coberturas de suelo que generan cambios en la dinámica de
330 los ecosistemas lo que provoca un desequilibrio natural (Chen *et al.* 2019).

51

331 Respecto a la retención de suelo, los resultados indican un incremento general progresivo en los
332 valores., En el escenario 1 al escenario 2, con un incremento de 80.67%, principalmente en tierras de
333 usos agrícolas, pasturas, humedales y cuerpos de agua en un incremento leve, lo que indica un aporte
334 poco significativo a la purificación de agua. Si bien, el modelo muestra una distribución espacial con
335 tendencia a incremento, se observan reducciones en zonas específicas analizadas (Qiaoyu J. Wang *et*
336 *al.* 2023), debido a que la conversiones tierras no agrícolas a tierras de cultivo, provoca un mayor
337 transporte de sedimento que son removidos del suelo junto con la escorrentía superficial (Kandel *et al.*
338 2023), Sin embargo, la retención del suelo es sensible a las lluvias, según el modelo RUSLE (Lavorel *et*
339 *al.* 2019), con respecto a los cambios en el factor producción de agua y retención del suelo se vieron
340 influenciados por las alteraciones en las precipitaciones (Guo *et al.* 2022), además las alteraciones en
341 los regímenes pluviométricos comprometen el aporte hídrico hacia las zonas bajas de cuenca,
342 afectando directamente los procesos fundamentales del sistema hidrológico(Zhu *et al.* 2022).

12

343 Las variaciones en geomorfología, gradientes altitudinales, densidad de drenaje, condiciones
344 climáticas, propiedades edáficas, características geológicas y patrones de uso de suelo interactúan de
345 manera compleja según la escala de la cuenca, explicando las diferencias observadas en lo valores
346 obtenidos (Tikuye *et al.* 2023), cabe señalar que los procesos de sedimentación y erosión se ven
347 afectados por el cambio climático (Qiao *et al.* 2023) y se desarrollan en zonas con bajos niveles de
348 pendientes (Jha *et al.* 2022). Es preciso destacar que la capacidad de regulación de la erosión hídrica,

20

mediante el control de sedimentos que alcanzan la red fluvial, constituye un servicio ecosistémico crucial para mantener la calidad edáfica, la integridad de los recursos hídricos y la eficiencia operativa de las infraestructuras de embalse (Qiao et al. 2023).

En cuanto al servicio de purificación de agua, basado en exportación de nitrógeno y fósforo, presentan valores disminuyen espacialmente, respecto al escenario 1 frente al escenario 2, lo que indica una captación general ascendente en retención de nutrientes, en usos de tierra como; pasturas y humedales, puesto que la retención es más probable en zonas cercanas a corrientes fluviales con pendientes pronunciadas. No obstante, para un escenario 3, a variación evidencia una transición hacia patrones de cambio definidos, mostrando consistencia con las proyecciones de modelación reportadas por (Qiaoyu J. Wang *et al.* 2023), la exporta de nitratos hacia sistemas fluviales en suelos con humedad tengan una mejor trayectoria hacia los cuses hídricos, donde la conectividad hidrológica mediante trayectorias de flujo preferencial reduce el tiempo de residencia y limita los procesos de desnitrificación (Ma *et al.* 2022).

Al mismo tiempo, los factores de exportación de nutrientes influyen dentro de un tipo de uso de la tierra, la densidad de uso de pastoreo (particularmente importante para el nitrógeno), topología, tipo de suelo y precipitaciones (Sharps *et al.* 2017), por lo que la expansión de la superficie agrícola genera una intensificación los procesos de exportación de nutrientes, lo que deteriora significativamente la calidad hídrica en sus principales afluentes, esta dinámica se manifiesta principalmente en suelos como (Bosques, pasturas, matorrales), que solo retiene bajas cargas de nutrientes(Mereta *et al.* 2020).

Además, que los nutrientes se retengan en cuencas en periodos secos y se exporten en corrientes durante periodos húmedos (Qiaoyu J. Wang *et al.* 2023), también dentro de los factores que afectan a los servicios ecosistémicos, se ve reflejado en el cambio climático ya que al cambiar las concentraciones de CO₂ representados en las rutas de concentraciones de emisiones SSP (Gidden *et al.* 2019), reduzcan la producción de agua, producción primaria neta y retención de suelo (Li *et al.* 2020).

En relación al impacto del uso de la tierra, su composición, intensidad y patrones, son un factor muy influyente en los servicios ecosistémicos (Tammi *et al.* 2017). Las zonas de cambio de impacto de uso de la tierra suelen ser más pequeñas en comparación con las zonas que permanecen sin cambios (Xu *et al.* 2017), y las zonas donde este no cambia, son afectados por la variabilidad climática. Por ello, la producción de agua, purificación de agua y la retención del suelo, estén afectadas directamente por el cambio climático (Cong *et al.* 2020), dado que en diversos estudios han confirmado que los ecosistemas en relación con los factores climáticos también se influyen entre sí, la interacción más significativa es la precipitación y la temperatura que muestran una fluctuación de cambios más presente (Rongyao Wang *et al.* 2023).

En conclusión, los servicios ecosistémicos analizados evidencian la respuesta diferencial de estos servicios ante el cambio climático, manifestada mediante fluctuaciones espaciales, siendo el recurso hídrico el más afectado, debido a la reducción de los valores espaciales resulta significativo observar cómo cada variable respondió de manera diferenciada a estas alteraciones, generando evidencia crucial para fundamentar la toma de decisiones en la gestión y manejo adaptativo de los servicios ecosistémicos altoandinos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Nacional de Meteorología y Climatología del Perú por proporcionar los datos climáticos de precipitación temperaturas de la estación meteorológica del ámbito de estudio y WorldClim por poner a disposición los datos climáticos globales bases y proyectados en alta resolución espacial

REFERENCIAS

- Ahmad H., Zafar S. A., Naeem M. K. *et al.* (2022) Impact of Pre-Anthesis Drought Stress on Physiology, Yield-Related Traits, and Drought-Responsive Genes in Green Super Rice. *Front Genet* doi: 10.3389/fgene.2022.832542.
- Ahmed M. T. (2002) Millennium ecosystem assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 9, 219–220. [online]. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF02987493>.
- ANA (2014) *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. Autoridad Nacional del Agua, Perú.
- Anderson E., Marengo J., Villalba R., Halloy S., Young B. & Cordero D. (2011) Consecuencias del cambio climático para los ecosistemas y servicios ecosistémicos en los Andes tropicales. *Cambio*

- 402 *Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio*
403 *Global (IAI) y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).*
- 404 Ayala García J., Dall'erba S. & Ridley W. C. (2023) The impact and externalities of natural disasters on
405 local tax revenue in Colombia. *Reg Stud* **57** , 857–867.
- 406 Bai Y., Chen Y., Alatalo J. M., Yang Z. & Jiang B. (2020) Scale effects on the relationships between land
407 characteristics and ecosystem services- a case study in Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total*
408 *Environment* doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137083.
- 409 Bai Y., Zheng H., Ouyang Z., Zhuang C. & Jiang B. (2013) Modeling hydrological ecosystem services
410 and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China. *Environ Earth Sci* **70** , 709–718.
- 411 Bai Y., Zhuang C., Ouyang Z., Zheng H. & Jiang B. (2011) Spatial characteristics between biodiversity
412 and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity* **8** , 177–183. [online].
413 Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.01.007>.
- 414 Bennett E. M., Peterson G. D. & Gordon L. J. (2009) Understanding relationships among multiple
415 ecosystem services. *Ecol Lett* **12** , 1394–1404.
- 416 Cabral P., Feger C., Levrel H., Chambolle M. & Basque D. (2016) Assessing the impact of land-cover
417 changes on ecosystem services: A first step toward integrative planning in Bordeaux, France. *Ecosyst*
418 *Serv* doi: 10.1016/j.ecoser.2016.08.005.
- 419 Cano D. & Haller A. (2018) Los servicios ecosistémicos hidrológicos: entre la urbanización y el cambio
420 climático. Percepción campesina y experta en la subcuenca del río Shullcas, Perú. *Espacio y Desarrollo* ,
421 7–32.
- 422 Cepeda-Arias E., Cañón Barriga J. & Mario Mendiando E. (2024) Impact of rapid anthropogenic
423 environmental change on water security in a tropical Andean basin. *Water Secur* doi:
424 10.1016/j.wasec.2024.100175.
- 425 Chen W., Chi G. & Li J. (2019) The spatial association of ecosystem services with land use and land
426 cover change at the county level in China, 1995–2015. *Science of the Total Environment* doi:
427 10.1016/j.scitotenv.2019.03.139.
- 428 Cong W., Sun X., Guo H. & Shan R. (2020) Comparison of the SWAT and InVEST models to determine
429 hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecol Indic*
430 doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106089.
- 431 Diaz R. D., Machaca A. D., Belizario G. & Lujano E. (2023) Efectos del Cambio Climático Sobre los
432 Ecosistemas de Montaña en la Cordillera Carabaya - Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia* doi:
433 10.1590/0102-778638230088.
- 434 Döll P. (2002) Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: A Global
435 Perspective. *Clim Change* **54** , 269–293.
- 436 Esri Inc. (2022) ArcGIS Desktop: Release 10.8.1. *Environmental Systems Research Institute, Inc., California.*
- 437 Fick S. E. & Hijmans R. J. (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global
438 land areas. *International Journal of Climatology* **37** , 4302–4315.
- 439 Flores L. F., Galaitis S. E., Escobar M. & Purkey D. (2016) Modeling of Andean páramo ecosystems'
440 hydrological response to environmental change. *Water (Switzerland)* **8**.
- 441 Fu Q., Li B., Hou Y., Bi X. & Zhang X. (2017) Effects of land use and climate change on ecosystem
442 services in Central Asia's arid regions: A case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total*
443 *Environment* doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.241.
- 444 Gao J., Li F., Gao H., Zhou C. & Zhang X. (2017) The impact of land-use change on water-related
445 ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *J Clean Prod* doi:
446 10.1016/j.jclepro.2016.01.049.
- 447 Gidden M. J., Riahi K., Smith S. J. *et al.* (2019) Global emissions pathways under different
448 socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the
449 end of the century. *Geosci Model Dev* **12** , 1443–1475. [online]. Available from:
450 <https://gmd.copernicus.org/articles/12/1443/2019/> [Accessed July 7, 2020].

- 451 Gong J., Liu D., Zhang J., Xie Y., Cao E. & Li H. (2019) Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem
452 services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China. *Ecol Indic* doi:
453 10.1016/j.ecolind.2018.12.027.
- 454 Guijarro J. . A. (2020) Manual de Usuario de Paquete Climatol versión 4.0.0. *Nota Técnica*.
- 455 Guo S., Wu C., Wang Y. *et al.* (2022) Threshold effect of ecosystem services in response to climate
456 change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China. *Ecol*
457 *Indic* doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108603. [online]. Available from:
458 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108603>.
- 459 INAIGEM (2023) *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023*. Huaraz. [online].
460 Available from: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/7029db53-5118-4e93-8b2a-71e6e26db5f6>.
- 461 IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth*
462 *Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza.
- 463 Iqbal S., Ali A., Umer M. & Zhongjun W. (2025) Integrated assessment of tourism driven ecological
464 stressors in mountain ecosystems of Swat Valley Pakistan. *J Clean Prod.* **521**.
- 465 Jha S. K., Negi A. K. & Alatalo J. M. (2022) Quantification of ecosystem services providing socio-
466 economic benefits to customary owners of natural resources in Pauri, western Himalaya. *Current*
467 *Research in Environmental Sustainability* doi: 10.1016/j.crsust.2021.100121.
- 468 Kandel S., Gyawali B., Shrestha S. *et al.* (2023) Estimation of Runoff and Sediment Yield in Response to
469 Temporal Land Cover Change in Kentucky, USA. *Land (Basel)* **12**.
- 470 Lavorel S., Colloff M. J., Locatelli B. *et al.* (2019) Mustering the power of ecosystems for adaptation to
471 climate change. *Environ Sci Policy* doi: 10.1016/j.envsci.2018.11.010.
- 472 Lennox E. & Gowdy J. (2014) Ecosystem governance in a highland village in Peru: Facing the
473 challenges of globalization and climate change. *Ecosyst Serv* doi: 10.1016/j.ecoser.2014.08.007.
- 474 Li J., Chen H. & Zhang C. (2020) Impacts of climate change on key soil ecosystem services and
475 interactions in Central Asia. *Ecol Indic* doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106490.
- 476 Llacza A., Acuña D., Jácome D *et al.* (2021) *Escenarios Climáticos para el Perú al 2050 Resumen Ejecutivo*.
477 [online]. Available from: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>.
- 478 Llambi L. D., Becerra M. T., Peralvo M., Avella A., Baruffol M. & Flores L. J. (2020) Monitoring
479 Biodiversity and Ecosystem Services in Colombia's High Andean Ecosystems: Toward an Integrated
480 Strategy. *Mt Res Dev* **39** , A8–A20.
- 481 Ma S., Duggan J. M., Eichelberger B. A. *et al.* (2016) Valuation of ecosystem services to inform
482 management of multiple-use landscapes. *Ecosyst Serv* doi: 10.1016/j.ecoser.2016.03.005.
- 483 Ma S., Li Y., Zhang Y., Wang L. J., Jiang J. & Zhang J. (2022) Distinguishing the relative contributions
484 of climate and land use/cover changes to ecosystem services from a geospatial perspective. *Ecol Indic*
485 doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108645.
- 486 Mereta S. T., De Meester L., Lemmens P., Legesse W., Goethals P. L. M. & Boets P. (2020) Sediment
487 and Nutrient Retention Capacity of Natural Riverine Wetlands in Southwest Ethiopia. *Front Environ*
488 *Sci* doi: 10.3389/fenvs.2020.00122.
- 489 MINAM (2019) Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria Descriptiva. *Ministerio del*
490 *Ambiente*. [online]. Available from: [https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-](https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru)
491 [peru](https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru).
- 492 Narvaez Montoya C., Torres Martínez J. A., Pino Vargas E., Cabrera Olivera F., Loge F. J. &
493 Mahlknecht J. (2022) Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the
494 Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of the Total Environment* doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150386.
- 495 Navarro-Racines C., Tarapues J., Thornton P., Jarvis A. & Ramirez-Villegas J. (2020) High-resolution
496 and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Sci Data* **7**.
- 497 Novoa-Villa H. H., Arizaca Ávalos A. & Huisa Mamani F. (2022) Efectos en los ecosistemas por
498 presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. *Revista de*
499 *Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research* **24** , 182–189.

- 500 Palomo I. (2017) Climate Change Impacts on Ecosystem Services in High Mountain Areas: A
501 Literature Review. *Mt Res Dev* **37** , 179–187.
- 502 Percy S., Lubchenco J., Almeida F. *et al.* (2005) *Millennium Ecosystem Assessment Business and Industry*
503 *Synthesis Team Synthesis Team Members Synthesis Team Co-chairs Business Council for Sustainable*
504 *Development-Brazil World Business Council for Sustainable Development A Report of the Millennium*
505 *Ecosystem Assessment*.
- 506 Qiao X., Li Z., Lin J., Wang H., Zheng S. & Yang S. (2023) Assessing current and future soil erosion
507 under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China.
508 *International Soil and Water Conservation Research* doi: 10.1016/j.iswcr.2023.07.001.
- 509 Rocca M. E., Brown P. M., MacDonald L. H. & Carrico C. M. (2014) Climate change impacts on fire
510 regimes and key ecosystem services in Rocky Mountain forests. *For Ecol Manage* doi:
511 10.1016/j.foreco.2014.04.005.
- 512 Rosario A. M. G. (2018) Recuperación de Servicios Ecosistémicos de Áreas Afectadas por el Aluvión
513 de 2012 en la Microcuenca Santa Cruz, Huaylas, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*.
- 514 Sayre R., Frye C., Breyer S. *et al.* (2025) Potential 2050 distributions of World Terrestrial Ecosystems
515 from projections of changes in World Climate Regions and Global Land Cover. *Glob Ecol Conserv* doi:
516 10.1016/j.gecco.2024.e03370.
- 517 Scoville-Simonds M. (2018) Climate, the Earth, and God – Entangled narratives of cultural and
518 climatic change in the Peruvian Andes. *World Dev* doi: 10.1016/j.worlddev.2018.06.012.
- 519 Sharp R., Tallis H. T., Ricketts T. *et al.* (2014) InVEST user's guide. The Natural Capital Project.
520 *Stanford, CA, USA*.
- 521 Sharps K., Masante D., Thomas A. *et al.* (2017) Comparing strengths and weaknesses of three
522 ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of The Total Environment*
523 doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.160.
- 524 Tammi I., Mustajärvi K. & Rasinmäki J. (2017) Integrating spatial valuation of ecosystem services into
525 regional planning and development. *Ecosyst Serv* doi: 10.1016/j.ecoser.2016.11.008.
- 526 Tikuye B. G., Gill L., Rusnak M. & Manjunatha B. R. (2023) Modelling the impacts of changing land
527 use and climate on sediment and nutrient retention in Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin,
528 Ethiopia. *Ecol Modell* doi: 10.1016/j.ecolmodel.2023.110383.
- 529 Wang Qiaoyu J., Yang J., Heidbüchel I., Yu X. & Lu C. (2023) Flow paths and wetness conditions
530 explain spatiotemporal variation of nitrogen retention for a temperate, humid catchment. *J Hydrol*
531 *(Amst)* doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130024.
- 532 Wang Rongyao, Zhao J., Lin Y. *et al.* (2023) Study on the response and prediction of SDGs based on
533 different climate change scenarios: The case of the urban agglomeration in central Yunnan. *Ecol Indic*
534 doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111076.
- 535 Weatherhead E. K. & Knox J. W. (2000) Predicting and mapping the future demand for irrigation
536 water in England and Wales. *Agric Water Manag* **43** , 203–218.
- 537 Xu S., Liu Y., Wang X. & Zhang G. (2017) Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and
538 associations among them in semi-arid area: A case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China.
539 *Science of the Total Environment* doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.009.
- 540 Yang L., Feng Q., Adamowski J. F. *et al.* (2020) Causality of climate, food production and conflict over
541 the last two millennia in the Hexi Corridor, China. *Science of the Total Environment* doi:
542 10.1016/j.scitotenv.2020.136587.
- 543 Yao J., Chen Y., Guan X., Zhao Y., Chen J. & Mao W. (2022) Recent climate and hydrological changes
544 in a mountain–basin system in Xinjiang, China. *Earth Sci Rev*. **226**.
- 545 Yu Y., Li J., Zhou Z., Ma X. & Zhang X. (2021) Response of multiple mountain ecosystem services on
546 environmental gradients: How to respond, and where should be priority conservation? *J Clean Prod*
547 doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123264.

548 Zhu Z., Wang K., Lei M. *et al.* (2022) Identification of priority areas for water ecosystem services by a
549 techno-economic, social and climate change modeling framework. *Water Res* doi:
550 10.1016/j.watres.2022.118766.
551

552 **Tabla 1.** Fuentes de datos para los modelos de Servicios ecosistémicos.

553 **Table 1.** Data sources for Ecosystem Services models.

554

Variable	Unidad	Formato original de datos	Fuente
Temperatura media	°C	Raster	WorldClim
Precipitación media	mm	Raster	WorldClim
Evapotranspiración	mm	Raster	WorldClim (Apartir de Temperatura)
DEM	m	Raster	Alos Palsar
Contenido de agua en el suelo	mm	Raster	Soil World
Profundidad de raíz	-	Raster	Soil World
Cobertura de suelo	Km	Raster	EarthExplorer
Erosionabilidad de suelo	Km	Shape	RUSLE
Erodabilidad de suelo	Km	Raster	RUSLE

555

556 **Tabla 2.** Valores espaciales de los servicios ecosistémicos.

557 **Table 2.** Spatial values of ecosystem services.

558

Servicios ecosistémicos		1970-2000	2041-2060		2081-2100	
			SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.	SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.
Rendimiento de agua mm	Alto	51.60	53.75	43.02	43.64	37.23
	Bajo	0	0	0	0	0
Retención de suelo tn/pixel	Alto	2049.59	5907	5607	8275	9002.47
	Bajo	0	0	0	0	0
Transporte de nutriente - Nitrógeno kg/pixel	Alto	48003.10	29699.90	30373.01	21679.20	11043.40
	Bajo	0.0065	0.0081	0.0061	0.0045	0.0027
Transporte de nutriente - Fosforo kg/pixel	Alto	850.820	651.747	524.449	404.173	243.650
	Bajo	0.0093	0.012	0.0091	0.0066	0.0041

559

560 **Tabla 3.** Variación del ESV Rendimiento de agua.

561 **Table 3.** Variation of ESV Water yield.

562

LUCL	Área Base	Área Actual	2000	Variación del ESV - Rendimiento de agua mm			
	Ha	Ha		2041-2060		2081-2100	
				SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.	SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.
Cuerpos de Agua	13,000.1	13,717.1	118.09	115.54	114.89	115.88	117.00
Glaciar	3543.81	2512.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tierras Agrícolas	740100	78,036	27.92	68.94	25.40	26.66	19.26
Pasturas y terreno desnudo	10,9326	58890.9	74.45	72.05	28.17	74.63	29.07
Humedales	1,184.7	2937.19	26.91	56.25	25.16	26.36	21.53
Área cultivada	698.742	1129.66	75.31	30.18	69.53	71.02	30.93
Área Urbana	2701.14	3350.61	37.89	45.45	45.22	78.09	45.72
Área natural y forestal	298482	304284	98.80	80.00	79.18	77.71	81.14

563

564 **Tabla 4.** Variación del ESV Retención de suelo.

565 **Table 4.** Variation of ESV Soil retention.

566

LUCL	Área Base	Área Actual	Variación del ESV - Sedimentos t/ha				
	Ha	Ha	2000	2041-2060		2081-2100	
				SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.	SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.
Cuerpos de Agua	13000.1	13717.1	0.018	0.099	0.104	0.100	0.111
Glaciar	3543.81	2512.43	0.227	0.277	0.291	0.314	0.353
Tierras Agrícolas	740100	784036	0.022	17.829	19.158	18.807	21.279
Pasturas y terreno desnudo	109326	58890.9	17.477	21.950	23.490	22.834	25.925
Humedales	1184.7	2937.19	0.433	3.388	3.705	3.748	4.277
Área cultivada	698.742	1129.66	5.124	10.079	10.663	10.529	11.718
Área Urbana	2701.14	3350.61	3.138	4.111	4.462	4.472	5.081
Área natural y forestal	298482	304284	1.859	2.176	2.338	2.314	2.526

567

568 **Tabla 5.** Variación del ESV – nitrógeno.

569 **Table 5.** ESV variation – nitrogen.

570

LUCL	Área Base	Área Actual	Variación del ESV - nutrientes - N - kg/ha				
	ha	ha	2000	2041-2060		2081-2100	
				SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.	SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.
Cuerpos de Agua	13000.1	13717.1	6.88	3.93	21.05	15.77	1.33
Glaciar	3543.81	2512.43	2.71	2.54	4.58	3.41	0.91
Tierras Agrícolas	740100	784036	248.08	129.21	101.35	77.92	47.02
Pasturas y terreno desnudo	109326	58890.9	257.74	200.85	161.48	120.41	66.54
Humedales	1184.7	2937.19	77.55	99.95	84.82	66.06	37.12
Área cultivada	698.742	1129.66	265.11	153.76	97.52	74.85	54.23
Área Urbana	2701.14	3350.61	84.23	72.75	71.57	55.26	26.03
Área natural y forestal	298482	304284	176.40	150.13	104.25	80.85	52.86

571

572 **Tabla 6.** Variación del ESV – fosforo.

573 **Table 6.** Variation of ESV – phosphorus.

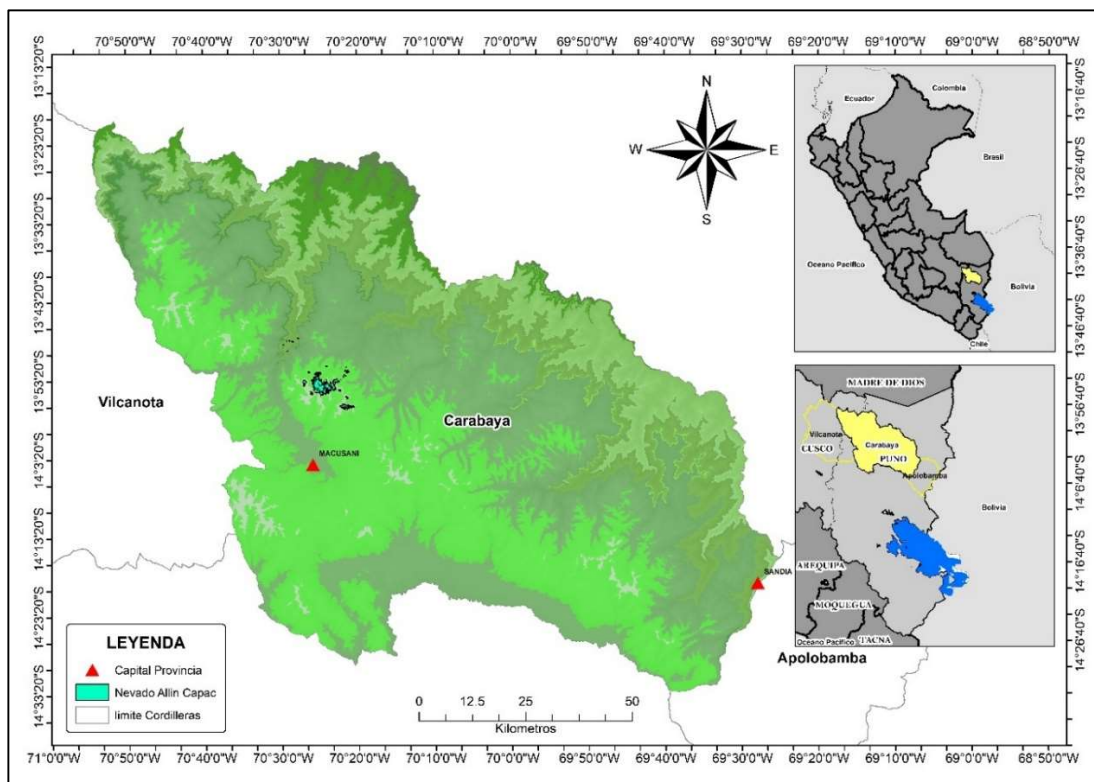
574

LUCL	Área Base	Área Actual	Variación del ESV - nutrientes - P - kg/ha				
	ha	ha	2000	2041-2060		2081-2100	
				SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.	SSP-2.4.5.	SSP-5.8.5.
Cuerpos de Agua	13000.1	13,717.1	0.356	0.265	0.819	0.615	0.090
Glaciar	3543.81	2512.43	0.186	0.113	0.087	0.067	0.040
Tierras Agrícolas	740100	784036	5.071	3.777	2.767	2.147	1.401
Pasturas y terreno desnudo	109326	58890.9	5.466	0.165	0.096	0.073	0.059
Humedales	1184.7	2937.19	4.998	3.239	2.549	2.003	1.229
Área cultivada	698.742	1129.66	0.205	0.150	2.094	1.619	0.054
Área Urbana	2701.14	3350.61	1.138	0.991	1.770	1.368	0.358
Área natural y forestal	298482	304284	11.659	9.884	6.548	5.071	3.456

575

Figura 1. Área de estudio de la Cordillera Carabaya – Perú.

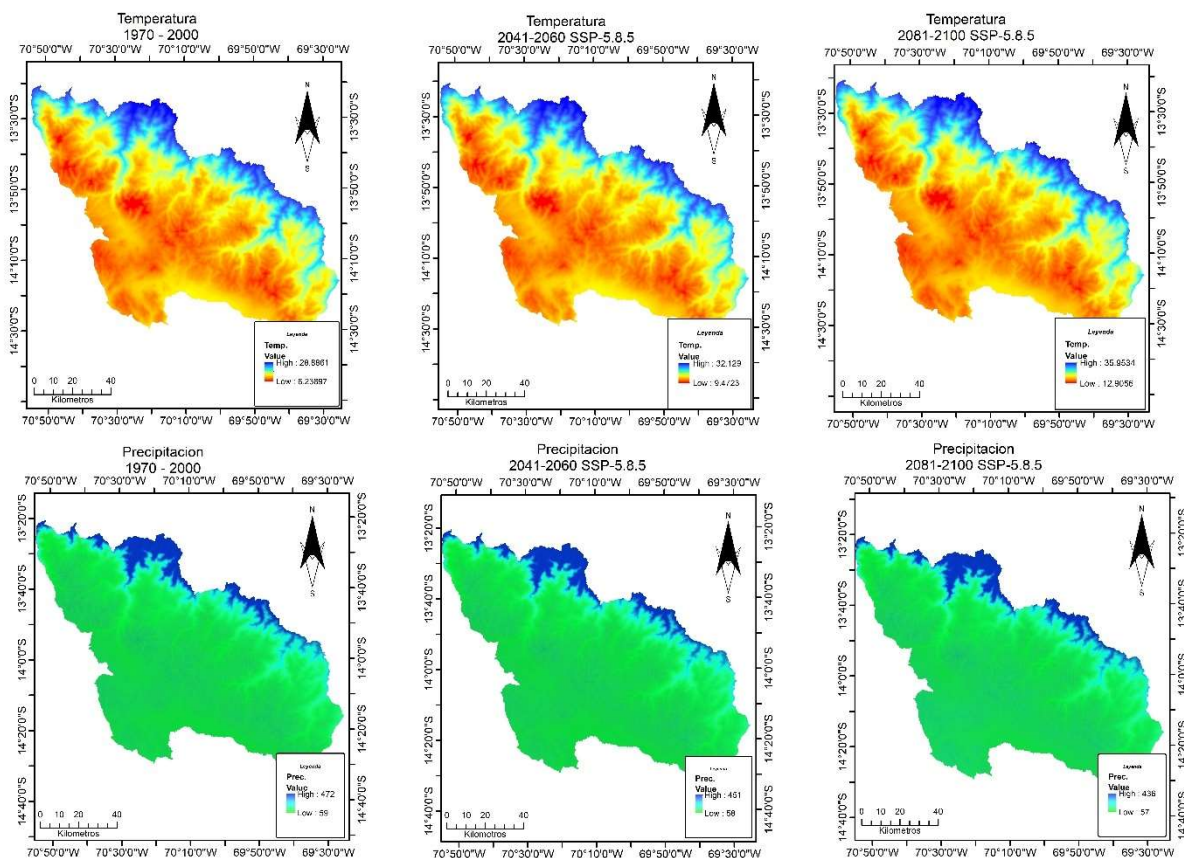
Figure 1. Study area of the Carabaya – Perú mountain range.



580 **Figura 2.** Mapa de cambio de la variabilidad climática bajo escenarios.

581 **Figure 2.** Climate variability change map under scenarios.

582

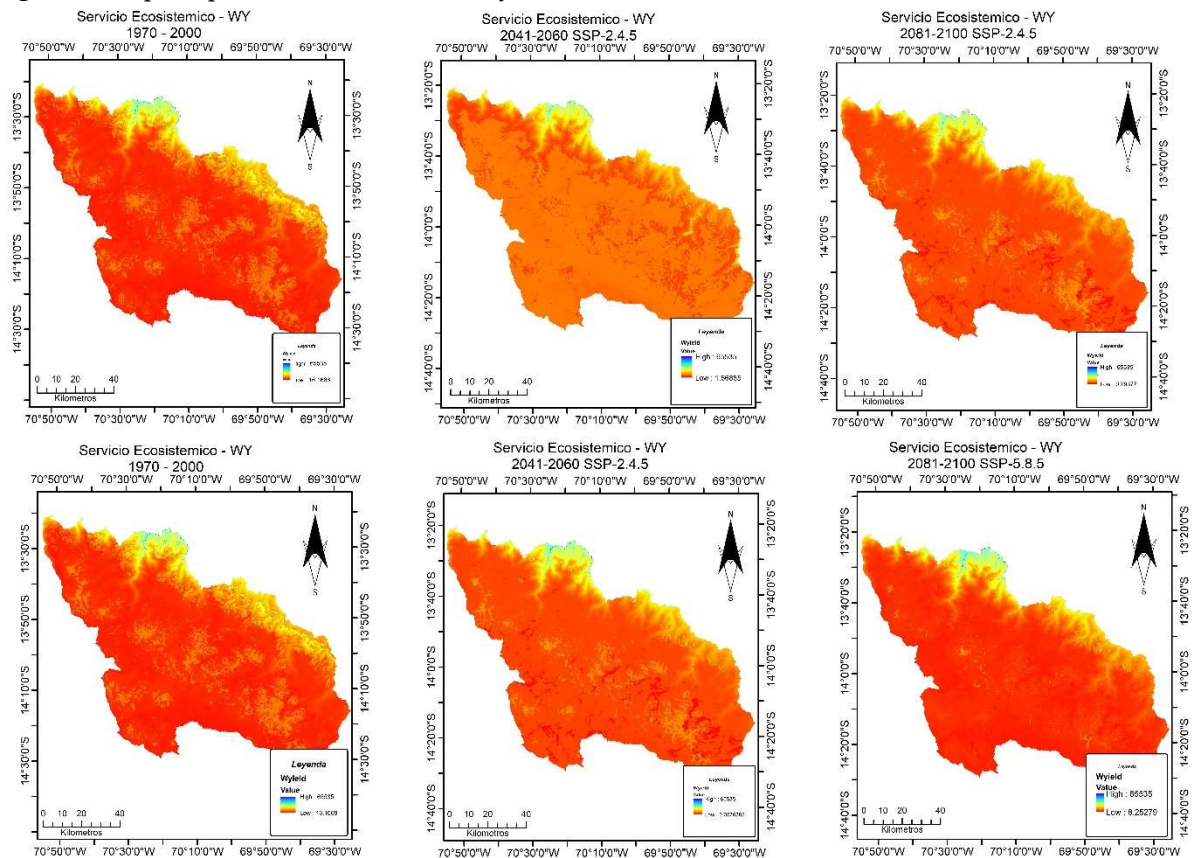


583

39

584 **Figura 3. Mapa de variación espacial del servicio de rendimiento de agua bajo escenarios climáticos.**

585 **Figure 3. Map of spatial variation of water yield service under climate scenarios.**

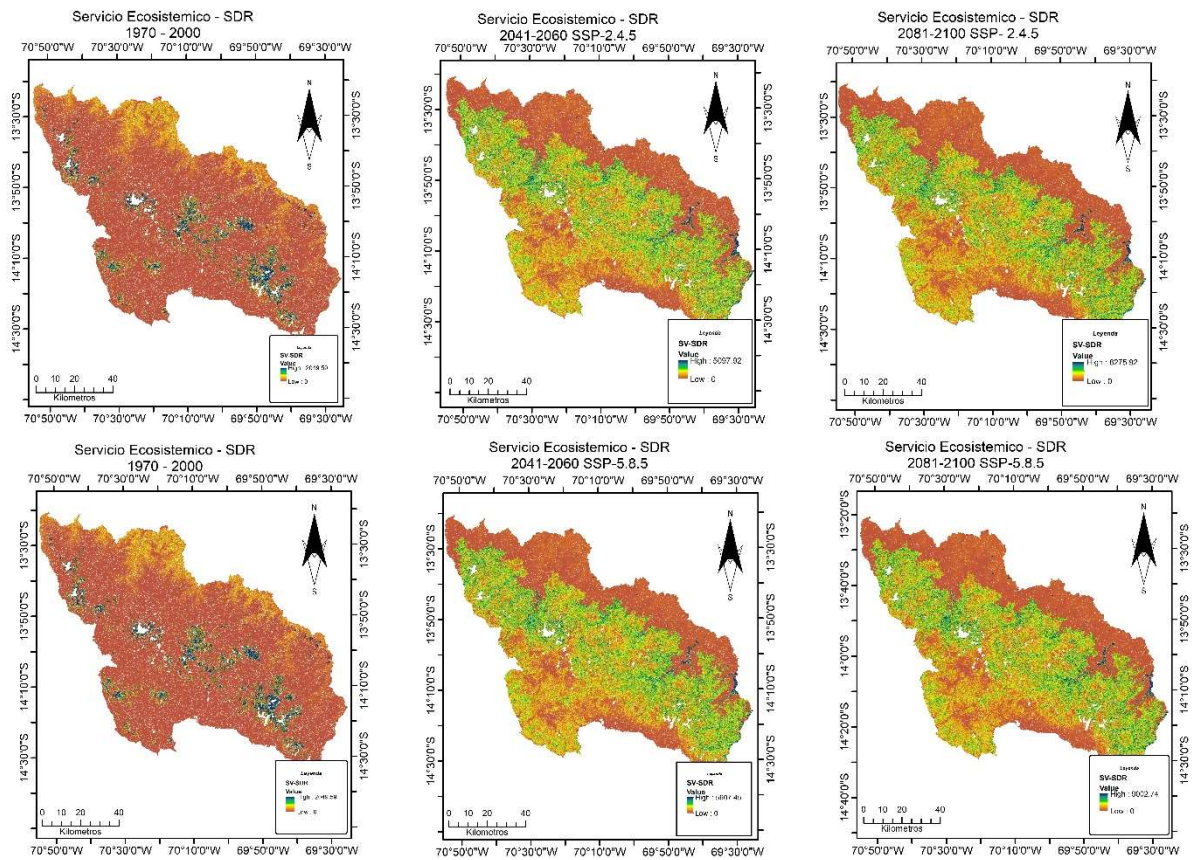


586

587 **Figura 4.** Mapa de variación espacial del servicio de retención de suelo bajo escenarios climáticos.

588 **Figure 4.** Map of spatial variation of the soil retention service under climate scenarios.

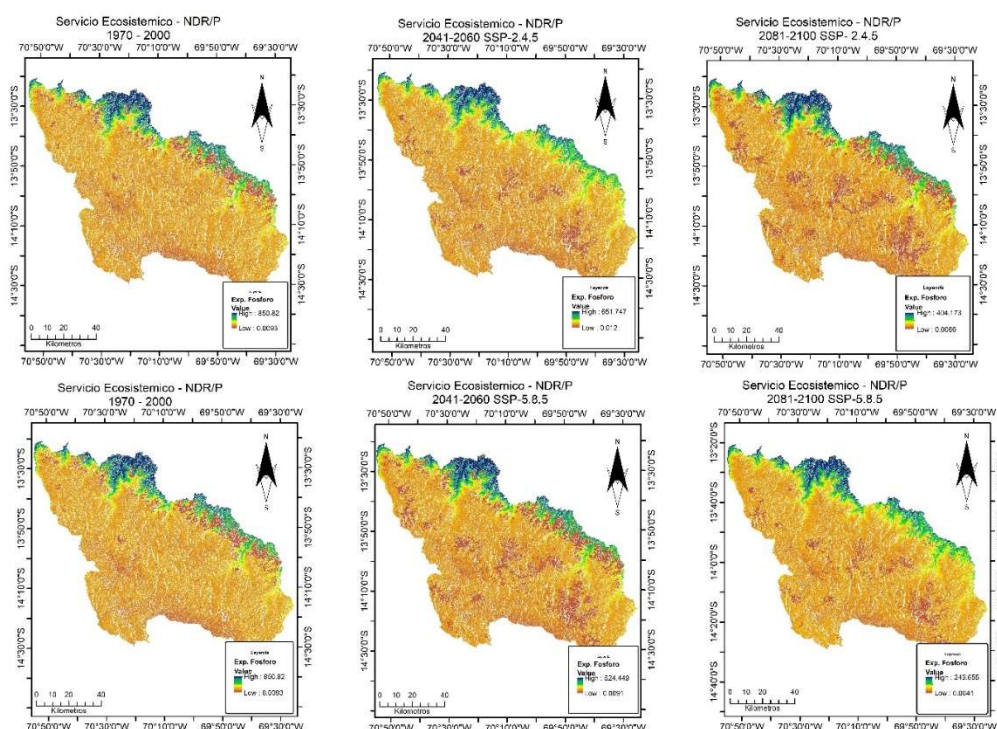
589



590

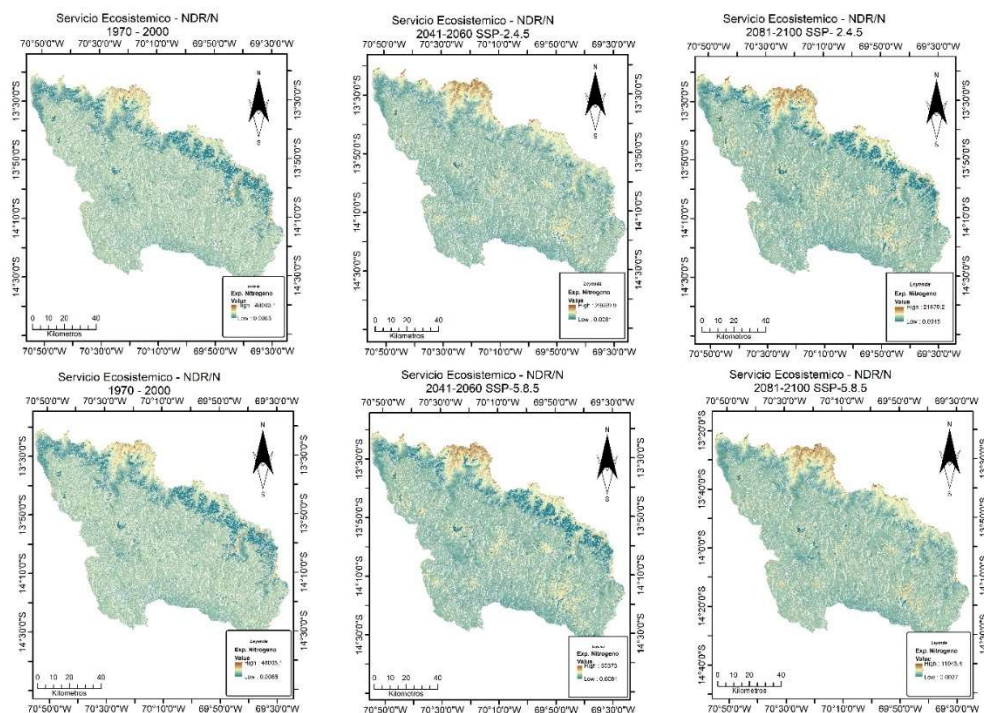
591 **Figura 5.** Mapa de variación espacial del servicio de exportación de nutrientes- P, bajo escenarios
592 climáticos.

593 **Figure 5.** Map of spatial variation of the nutrient-P export service, under climate scenarios.
594



596 **Figura 6.** Mapa de variación espacial del servicio de exportación de nutrientes- N, bajo escenarios
597 climáticos.

598 **Figure 6.** Map of spatial variation of the nutrient-N export service, under climate scenarios.
599



600