

Cambios espaciotemporales en la cobertura y uso del suelo, y su efecto en el valor económico de los servicios ecosistémicos de Huaraz e Independencia

Spatiotemporal changes in land cover and use, and their effect on the economic value of the ecosystem services of Huaraz and Independencia

Cristhian Vega Moreno

Xxcristhian.12@gmail.com

Marilu Espinoza Félix

maryespinozasam@gmail.com

RESUMEN

El cambio climático genera un impacto sobre los glaciares y sus ecosistemas asociados. Sumado a ello, los efectos de las actividades antrópicas como el sobrepastoreo, la contaminación y los cambios de uso generan una alteración en el desarrollo normal de las funciones ecológicas de cada bioma. Por tanto, el conocimiento del patrón de cambio en el territorio va a permitir analizar sus efectos en la provisión de servicios ecosistémicos; proporcionando evidencia concreta sobre las prioridades en conservación. En ese sentido, el objetivo de esta investigación es analizar los cambios espaciotemporales y sus efectos sobre el valor económico de los servicios ecosistémicos en el contexto del cambio climático. Se seleccionó los distritos de Huaraz e Independencia como área de estudio. Las estimaciones se llevaron a cabo a partir de la información de cobertura y uso del suelo (CUS) disponible en la plataforma MapBiomias Perú y sobre el desarrollo del método “transferencia de beneficios” para la evaluación económica. En consecuencia, se determinaron 13 clases de CUS y valores monetarios para 21 servicios ecosistémicos. Esta investigación muestra que la cobertura glaciar ha experimentado una reducción del 20,3 %. Asimismo, se ha identificado que los servicios de regulación son los más cotizados; por otro lado, los biomas con mayor valor monetario por hectárea en la provisión de beneficios son aquellos considerados como “ecosistemas frágiles”, que en conjunto representan el 74 % del valor total. Agregado a ello, el valor económico para toda el área de estudio en promedio es de $\$362 \times 10^6$. La variación entre años corresponde principalmente a las pérdidas por transición a coberturas y usos como “infraestructura” y “otras áreas sin vegetación”; y a las ganancias mediante la conversión a lagunas y matorrales debido al mayor valor ecológico que presentan frente a las coberturas precedentes.

Palabras claves: cambio climático, valor económico de los servicios ecosistémicos, cambios espaciotemporales, servicios ecosistémicos, cobertura y uso del suelo, ecosistemas de montaña, retroceso glaciar.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, a nivel mundial, genera un estrés bioclimático sobre los glaciares y sus ecosistemas asociados, lo cual se traduce en la alteración de sus propiedades, su distribución espacial y su participación en los procesos ecológicos. En zonas de alta montaña, por ejemplo, diversos estudios han advertido y advierten que el deshielo de los glaciares por causa del calentamiento global sigue una tendencia de incremento con el pasar de los años. Según el Inventario Nacional de Glaciares, la situación de estos en el Perú muestra que en 54 años (entre 1962 y 2016) se ha perdido 1,284 km² de superficie glaciar, lo cual equivale al 53.56% del área total (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM], 2018a). Un hecho relacionado a ello es el efecto del carbono negro u Hollín. Estudios relativamente recientes mencionan que el carbono negro presenta una gran capacidad de absorción de energía solar; por tanto, su concentración en los glaciares acelera la fusión del hielo. En ese sentido, el INAIGEM (2018b) advierte que el impacto del carbono negro en los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju, nevados ubicados en la cordillera blanca; es nefasto porque contribuye a la rápida pérdida de superficie glaciar. Estos efectos negativos sobre los glaciares se traducen no solo en la disminución de la cobertura glaciar, sino que representan una reducción de su capacidad para prestar servicios ecosistémicos como son los de regulación, aprovisionamiento y los servicios culturales.

Por otro lado, la degradación de los bofedales o pastos altoandinos como resultado del pastoreo o cambio de uso se hace más notorio con el tiempo. En las últimas décadas, áreas ocupadas por ecosistemas de pajonal han sido intercambiadas principalmente por cultivos, pasturas implantadas y forestaciones. Se estima que por año fueron 4 millones de hectáreas de vegetación natural las que se destinaron a la agricultura (INAIGEM, 2018a). En ese sentido, los cambios de cobertura y uso del suelo (CUS) se pueden establecer como problemas ecológicos muy complejos cuando estos cambios radican en eliminar coberturas que ofrecen múltiples servicios ecosistémicos (como la forestal) por otras que se limitan a unas cuantas (como parcelas de cultivos). La alteración de un ecosistema para modificar un servicio ecosistémico (para aumentar la producción de alimentos o madera, por ejemplo) generalmente resultan en la alteración de otros. Por ejemplo, las acciones destinadas a incrementar la producción de alimentos se traducen usualmente en uno o más de los siguientes: uso mayor del recurso hídrico, alteración de la calidad del agua, reducción de la biodiversidad, reducción de la cubierta forestal o liberación de gases de efecto invernadero (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los llamados "servicios ecosistémicos" son aquellos beneficios que los seres humanos obtenemos del funcionamiento de los sistemas ecológicos, sus características o componentes que contribuyen de manera directa o indirecta al bienestar del hombre (Costanza et al., 2011). Como se ha tratado de exponer anteriormente, el cambio climático y las actividades antrópicas en general influyen de manera sustancial en los diferentes ecosistemas de montaña. Si bien su efecto más notorio se da en la distribución espacial de los biomas, la influencia de estos procesos se extiende a la alteración de los ecosistemas como fuente de beneficios ecológicos. En ese sentido, toma importancia el estudio de los cambios de cobertura y uso de la tierra con el fin de identificar y analizar no solo los patrones de cambio, sino también la alteración de las capacidades de los ecosistemas para brindar beneficios; la cual puede estar expresada mediante la valoración económica de los servicios ecosistémicos. Dicha valoración es la expresión monetaria de la contribución de los ecosistemas al bienestar humano, la cual puede tener múltiples usos que van desde la sensibilización hasta el desarrollo de políticas en materia de gestión ambiental como de ordenamiento del territorio (Costanza et al., 2014).

El presente estudio se basa en el análisis de los cambios de CUS, y en la valoración económica de los servicios ecosistémicos mediante la técnica "transferencia de beneficios". Para el primer resultado, se usaron los datos de cobertura y uso del suelo del periodo 1985-2022 generados por el proyecto "Mapeo Anual de Cobertura y Uso del Suelo en el Perú" y que están disponibles en la plataforma "MapBiomass

Perú”. Para el segundo resultado se usó la “transferencia de beneficios” que consiste en la revisión de estudios realizados en otros ámbitos territoriales y aplicarlos con alguna modificación al área de estudio a desarrollar (Costanza et al., 2011); en ese sentido, se recopilaron valores monetarios para cada servicio ecosistémico provisionado por las distintas coberturas mapeadas en el área de estudio. Los resultados de este estudio buscan resolver las siguientes interrogantes: 1) ¿Cuáles son las principales tendencias o patrones de cambio y como se relacionan con el cambio climático y las actividades antrópicas? 2) ¿Cómo afectan las modificaciones en la CUS al valor monetario de los servicios ecosistémicos? Luego, discutimos las principales tendencias de cambio y sus efectos en la funcionalidad de los ecosistemas, de sus servicios y de su valor económico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio abarca los distritos de Huaraz e Independencia en la provincia de Huaraz en el departamento de Ancash; cuentan con un área de 423.11 y 345.89 kilómetros cuadrados. Geográficamente, se encuentran entre los 3000 y 6000 msnm, siendo los nevados que constituyen la cordillera blanca las zonas de mayor altitud; en conjunto ambos distritos contienen 7.5 hectáreas de cobertura glaciar, así como numerosas lagunas producto de la fusión de masas glaciares (Figura 1). Hidrográficamente, forman parte de la cuenca hidrográfica del río Santa, y contienen tres de sus principales subcuencas: quebrada Llaca, Quillcay y Pariac. Según el censo 2017, los distritos de Huaraz e Independencia cuentan con 60896 y 76088 habitantes respectivamente, asimismo, integran en conjunto 448 centros poblados. El distrito de Huaraz cuenta con el 91.7 % de población urbana y el 8.3 % de población rural; por otro lado, en el distrito de Independencia el 85% de la población es urbana (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017). Este paisaje presenta áreas dedicadas a la actividad agropecuaria, minera y turística entre las más importantes, las cuales generan un impacto considerable en el territorio. Asimismo, es típico de ecosistemas de montaña, cuenta con pastos naturales, pajonales andinos y bofedales que son usados como forraje para el ganado vacuno principalmente; en las partes altas cuentan con nevados y numerosas lagunas que dan origen a las quebradas que alimentan el río Santa.

2.2. Análisis multitemporal

La información cartográfica principal se obtuvo de la plataforma MapBiomias Perú, donde se encuentran disponibles datos de cobertura y uso del suelo (CUS) para el periodo 1985-2022 obtenidos a partir del análisis de imágenes Landsat. Para el presente estudio se usó la información de CUS de los años 1990, 2000, 2010 y 2022; con lo cual se identificaron 13 clases descritas en la Tabla 1. Agregado a ello, se usó la información de las transiciones en la CUS con el objetivo de observar los principales patrones de cambio en los siguientes periodos: 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2022 (Tabla C1, C2, C3 y C4 del material complementario).

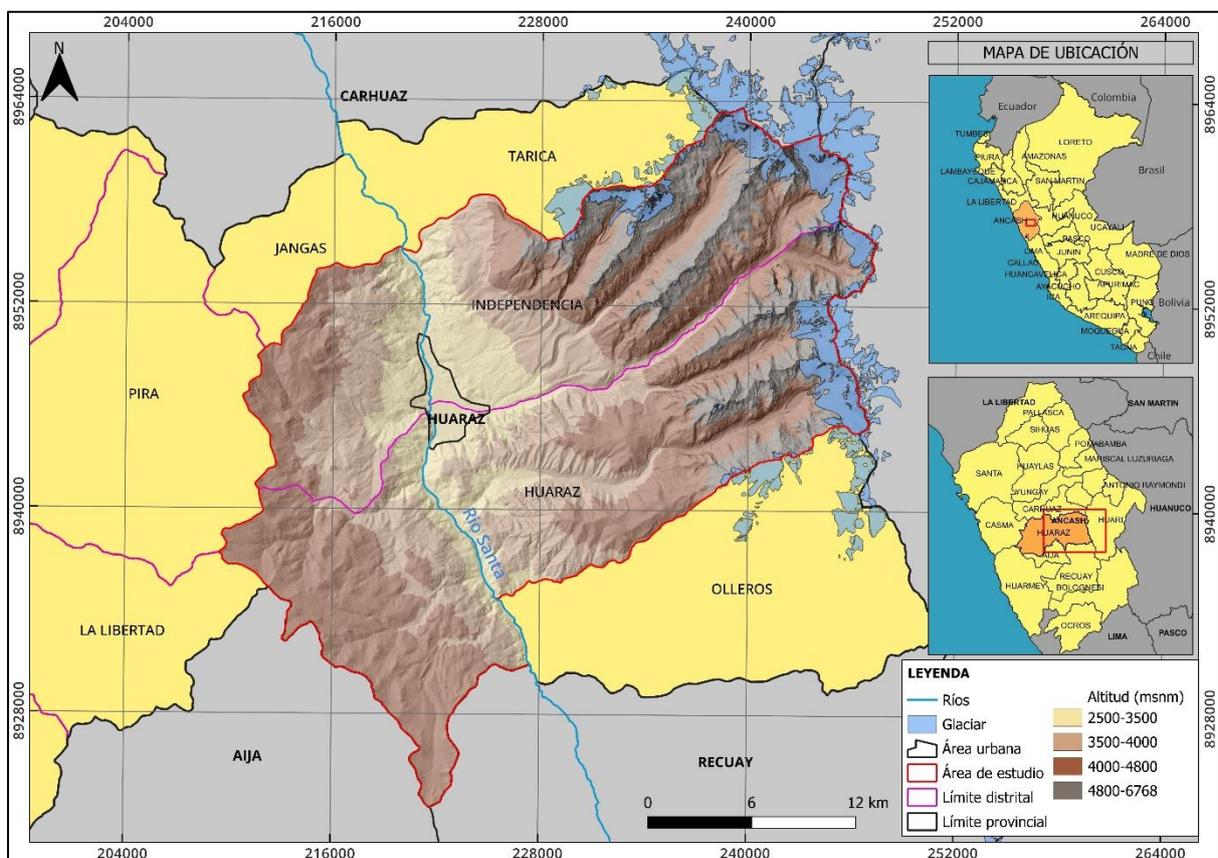
Tabla 1. Clases de cobertura y uso de la tierra identificadas en el área de estudio

Clases CUS MapBiomias Perú	Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015)	Descripción
1.1. Bosque	Bosques relictos	Árboles dispersos, de porte bajo ubicadas en laderas montañosas casi inaccesibles entre los 2800 y 3800 msnm.
2.1. Zona pantanosa o pastizal inundable	Bofedal	Vegetación sobre suelos permanentemente inundados, mal drenaje. Aprox. a los 3800 msnm.
2.2. Pastizal / herbazal	Pajonal andino	Compuestos por gramíneas y césped de puna de poca altura o casi al ras del suelo. Entre 3000 y 4800 msnm.

2.4. Matorral y otras formaciones no boscosas	Matorral arbustivo	Cobertura con predominancia de herbáceas y arbustos
3.1. Pasto	Agricultura costera y andina	Áreas de pasto, plantado o natural, vinculadas a la actividad pecuaria.
3.2. Agricultura	Agricultura costera y andina	Áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por cultivos anuales, temporales y perennes. Pueden estar activos o ser tierras en reposo
3.3. Plantación forestal	Plantación forestal	Forestación de especies arbóreas exóticas con fines de uso y/o protección (pinos, eucaliptos, etc.)
3.5. Mosaico agropecuario	Agricultura costera y andina	Áreas de uso agropecuario, en las cuales no fue posible separar las clases agricultura y pasto
4.1. Infraestructura	Área urbana; Infraestructura	Infraestructura urbana y todas aquellas áreas verdes y vías de comunicación asociadas con ellas.
4.2. Minería	Centro minero	Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales de la actividad minera
4.3. Otra área sin vegetación	Área altoandina con escasa y sin vegetación	Contempla áreas de poca o nula vegetación natural
5.1. Río, lago u océano	Lagunas	Extensión de agua encontrada en la superficie terrestre
5.3. Glaciar	Glaciar	Cobertura de hielo y/o nieve

Fuente: Adaptado de MapBiomias Perú

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

2.3. Valoración económica de los servicios ecosistémicos

En cuanto a la valoración económica, como primer paso, se identificaron los servicios ecosistémicos provisionados por cada clase de CUS a partir de la revisión bibliográfica. Se tomó en cuenta, principalmente, las clases y tipos de servicios ecosistémicos desarrollada por Millennium Ecosystem Assessment (2005). En consecuencia, se identificaron 34 servicios ecosistémicos distribuidos en 4 clases: regulación, aprovisionamiento, apoyo y culturales. (Tabla 2).

Tabla 2. Servicios ecosistémicos identificados para el área de estudio

Aprovisionamiento	Regulación	Culturales	Apoyo
Producción de alimentos	Regulación de la calidad de aire	Diversidad cultural	Formación del suelo
Suministro de agua	Regulación del clima	Valores espirituales y religioso	Ciclo de nutrientes
Recursos ornamentales	Regulación del agua	Sistema de conocimientos (formal y tradicional)	Producción primaria
Producción de fibra	Regulación de la erosión	Valores educativos	Fotosíntesis
Recursos genéticos	Depuración de aguas	Inspiración artística	Ciclo del agua
Suministro de bio combustibles.	Tratamiento de residuos	Valores estéticos	Hábitat
Productos bioquímicos, medicinas naturales, farmacéuticos.	Regulación de plagas	Relaciones sociales	
	Polinización	Sentido lugar	
	Regulación de peligros naturales	Valores de patrimonio cultural	
	Regulación de enfermedades	Recreación y ecoturismo	
	Regulación/captura de CO2		

Nota. En negrita se encuentran los servicios ecosistémicos que cuentan con valores monetarios recopilados mediante la revisión literaria. Elaboración propia en base a Millennium Ecosystem Assessment (2005) y Costanza (1997).

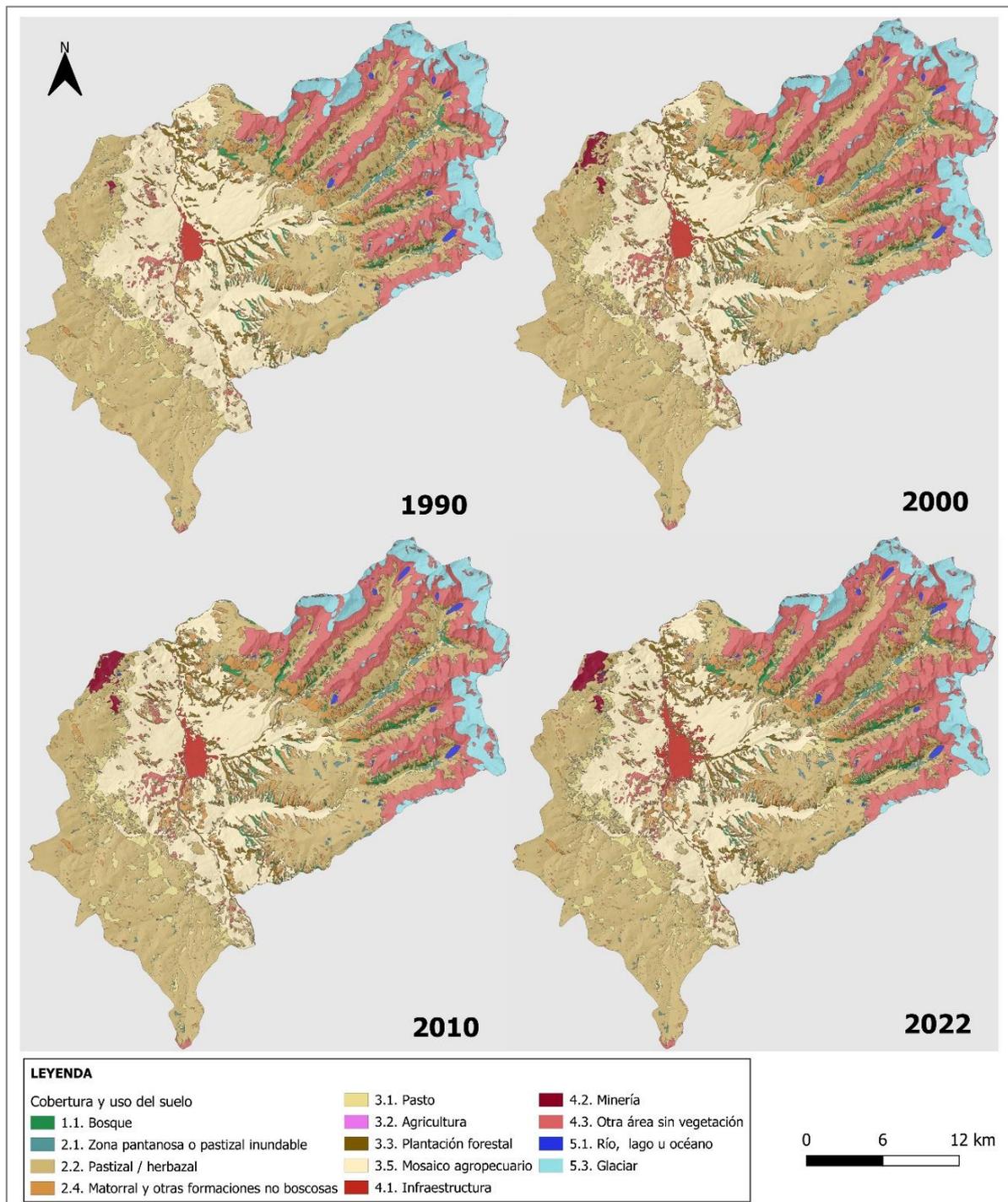
A partir de ello, se usó el método de transferencia de beneficios, obteniendo valores unitarios en dólares estadounidenses por hectárea de cada tipo de servicio para cada CUS (Tabla C5 del material complementario); los cuales fueron extraídos de Costanza et al. (2014), de Groot et al. (2012), Xie et al. (2010) y otros en el ámbito local. Una vez ajustados los valores unitarios recopilados a dólares estadounidenses del año 2020, el valor total de los servicios ecosistémicos por tipo de cobertura y uso de suelo se calcula mediante la sumatoria de los valores monetarios obtenidos a partir de la multiplicación del valor económico de cada beneficio por la superficie que ocupa cada ecosistema que la provee (Costanza et al., 1997).

3. RESULTADOS

3.1. Cuantificación de los cambios de cobertura y uso de la tierra

La Figura 2 muestra la distribución espacial de los tipos de cobertura y uso de la tierra para los años 1990, 2000, 2010 y 2022 del área de estudio. La Tabla 3 precisa el área de cada clase de CUS señalando ciertas variaciones y tendencias generales. Los pastizales o herbazales que coinciden con los pajonales andinos representan valores cercanos al 40 % en todos los años de estudio. La clase identificada como mosaico agropecuario que integra pastos y suelo dedicado a la actividad agrícola cubre una superficie cercana al 20%.

Figura 2. Mapas de cobertura y uso de la tierra de los distritos de Huaraz e Independencia para los años 1990, 2000, 2010, 2022.



Fuente: Elaborado a partir de la información en formato ráster de la plataforma Mapbiomas Perú.

Como es común en toda zona con influencia glaciar, el área de escasa vegetación cubre una superficie importante en el área de estudio (14%); y se encuentra relacionado principalmente a afloramientos rocosos colindantes con la masa glaciar. Los bofedales, considerados como ecosistemas frágiles (Ley General del Ambiente, 2005), representan el 0.8 % del territorio y se encuentran distribuidos en mayor proporción sobre la cordillera blanca en zonas con baja pendiente. En cuanto al recurso forestal, se encuentran dos coberturas: bosques (2%) y plantaciones forestales (2.5 %); la primera, que coincide

con los bosques relictos, forma parte de los valles fluvioglaciares (sobre los 3800 msnm) y se encuentran en zonas inclinadas principalmente. Las plantaciones forestales, por su parte, están emplazadas en zonas de menor altitud y baja pendiente.

Tabla 3. Área (ha) por clases de CUS para cada año de estudio

Clases	Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015)	1990		2000		2010		2022	
		%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
1.1. Bosque	Bosques relictos	1.9	1439	1.9	1495	2.1	1599	2.3	1743
2.1. Zona pantanosa o pastizal inundable	Bofedal	0.8	622	0.8	578	0.8	613	0.8	605
2.2. Pastizal / herbazal	Pajonal andino	39.4	30317	40.8	31400	39.6	30484	37.8	29074
2.4. Matorral y otras formaciones no boscosas	Matorral arbustivo	5.4	4187	6.3	4852	6.8	5230	6.3	4846
3.1. Pasto	Agricultura costera y andina	4.6	3551	4.0	3112	4.9	3749	5.3	4093
3.2. Agricultura	Agricultura costera y andina	0.01	7	0.0	4	0.0	4	0.01	8
3.3. Plantación forestal	Plantación forestal	2.3	1791	2.4	1825	2.6	2009	2.8	2161
3.5. Mosaico agropecuario	Agricultura costera y andina	23.1	17741	20.2	15568	20.0	15404	20.6	15850
4.1. Infraestructura	Área urbana; Infraestructura	0.6	463	0.7	566	0.9	673	1.4	1101
4.2. Minería	Centro minero	0.0	27	0.4	317	0.7	507	0.7	525
4.3. Otra área sin vegetación	Área altoandina con escasa y sin vegetación	14.7	11289	15.7	12091	15.2	11695	16.1	12396
5.1. Río, lago u océano	Lagunas	0.3	193	0.3	214	0.4	275	0.4	275
5.3. Glaciar	Glaciar	6.8	5194	6.2	4798	6.0	4579	5.4	4144

Fuente: Elaboración propia en base a la información de MapBiomias Perú

3.1.1. Análisis de las tendencias generales

Una de las cuestiones que se ha ido tratando líneas anteriores y que se extiende a todos los ecosistemas de montaña son los efectos del cambio climático sobre los glaciares. Esta cobertura presenta una trayectoria negativa que se traduce en la pérdida de 1050 hectáreas (20.2%) de masa glaciar para el periodo 1990-2022. Esta dinámica ha sido constante en los últimos 30 años, para el primer periodo (1990-2000) la variación de la cobertura glaciar fue de 7%; para el tramo 2000-2010 hubo una menor variación con respecto al primero, la cual fue de 4.5 %. Por último, para el 2010-2020 la pérdida glaciar significó casi el 10 % de la masa glaciar. Otras tendencias relacionadas a los glaciares son el aumento de lagunas de origen glaciar y del volumen de agua que almacenan, así también influyen en la expansión de las áreas sin vegetación (afloramientos rocosos). Las lagunas han experimentado un crecimiento en el periodo de 1990-2010, siendo en los últimos 10 años constante. La Figura 2 muestra que para el tramo 1990-2000 el incremento del volumen de agua se da principalmente en la laguna Tullparaju; para el año 2010 se puede observar un aumento considerable en la laguna Palcacocha respecto al año 2000. En cuanto a la cobertura forestal (bosques y plantaciones forestales) han presentado un incremento constante en los últimos 30 años. El área clasificada como infraestructura, que corresponde al área urbana, se ha incrementado a lo largo del tiempo; este incremento está representado por el 237 % en el año 2022 respecto a 1990, ocurriendo la mayor variación (163%) en el último periodo. De la misma forma, la porción de territorio destinada a la minería ha tenido una trayectoria positiva; siendo el periodo de 1990-2010 el de mayor variación, esto debido al cierre de la mina Pierina en el 2013.

3.1.2. Transiciones de cobertura y uso de la tierra

Las Tablas C1, C2 y C3 del material complementario muestran las matrices de transición para los periodos 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2022 respectivamente. La superficie total transformada para cada periodo es de 3329 (4.3%), 2076 (2.7%) y 3167 ha (4.1%) en ese orden. Para cada tramo de análisis se pueden identificar ciertas transiciones generales producto de la expansión del área urbana, minería y lagunas, así también como la reducción del área glaciar. La expansión de la clase infraestructura en los tres periodos de análisis corresponde principalmente a la transformación de mosaico agropecuario (90, 75 y 393 ha respectivamente). El crecimiento del área minera consiste esencialmente en la modificación de pastizales o herbazales (pajonal andino), siendo 221, 171 y 70 ha el área transformada en cada tramo. La trayectoria positiva en lagunas está determinada por la conversión de zonas clasificadas como “otras áreas sin vegetación” (afloramientos rocosos) y por el cambio en la masa glaciar. Por último, la modificación de glaciares ha generado un aumento del material rocoso (307, 175 y 347 ha) y, en menor grado, de lagunas (en promedio 0.6 ha para los dos primeros periodos, ya que, para el ultimo no hay transición).

Para el periodo completo (1990-2022), la superficie total modificada es de 6809 ha; presentando tres transiciones fundamentales. La primera consiste en la transición de 2585 ha de pajonal andino hacia diferentes tipos de CUS (Tabla C4), siendo las coberturas de pasto (33%), matorrales (17.9 %) y minería (16 %) las que representan los cambios más importantes. La segunda transición consiste en la alteración de 1844 ha del mosaico agropecuario hacia coberturas como pajonales andinos (42 %) e infraestructura (32 %). Por último, el área glaciar modificada es de 978 ha, en donde, el 99 % fueron convertidas a afloramientos rocosos.

3.2. Cálculo del valor económico de los servicios ecosistémicos

La Tabla C5 del material complementario muestra los valores unitarios de dólares estadounidenses por hectárea al año 2020 (USD ha) para cada tipo de servicio ecosistémico. Como resultado, los servicios de regulación fueron aquellos que presentaron mayores valores unitarios (119178 USD ha), siendo el servicio de regulación de agua el más cotizado con un valor de 72834 USD ha; siguiéndole la regulación de CO₂ y del clima con valores de 12176 y 10695 USD ha respectivamente. Los servicios de aprovisionamiento, apoyo y culturales presentan valores unitarios de 18067, 13338 y 7359 USD ha en ese mismo orden. En cuanto a los ecosistemas con mayor valor monetario debido a su capacidad para proveer beneficios; las lagunas cuentan con los valores más altos (69169 USD ha), esto corresponde a su capacidad para proveer servicios de regulación y culturales. A esta clase le siguen los bofedales y bosques con 26959 y 15850 USD ha respectivamente, que corresponden a la facultad de ambos ecosistemas para abastecer múltiples servicios. En los bofedales, la regulación del agua, la captación de CO₂ y el servicio de estos como hábitat son los más cotizados (2971, 6263 y 3069 USD ha respectivamente). Para los bosques, los beneficios con mayor valor son la regulación del clima, del agua y de CO₂ que precisan valores de 2762, 5760 y 2074 USD ha en ese orden.

La Tabla 4 muestra los valores monetarios en millones de dólares ($\times 10^6$) obtenidos a partir del resultado del valor unitario por hectárea de cada servicio ecosistémico multiplicado por el área de cada ecosistema que lo provee. De este modo, ciertas tendencias en los valores monetarios de los servicios se ven influenciados por las variaciones espaciotemporales. Cabe resaltar que las variaciones en el valor económico de los servicios ecosistémicos para cada año presentadas en la Tabla 4 están condicionadas principalmente por los ecosistemas que representan mayor área, aunque estos no sean quienes proporcionan múltiples servicios o los que precisan mayores valores unitarios por beneficio ecológico. Como se observa, los valores totales para cada año no son tan distantes, específicamente en el año 2000 se tiene el valor más bajo, lo cual corresponde a la transición de mosaico agropecuario y glaciares hacia coberturas y usos como infraestructura y “otras áreas sin vegetación” que no presentan valores monetarios por beneficios ecológicos. Para el año 2010 hay un aumento de casi \$ 9×10^6 respecto al año

2000 que radica en el aumento de la cubierta forestal en general, de los matorrales y de las lagunas de origen glaciar.

Tabla 4. Valoración económica de los servicios ecosistémicos en los distritos de Independencia y Huaraz para los años 1990, 2000, 2010 y 2022 (millones de dólares).

Clases CUS	Valoración económica de los servicios ecosistémicos (10 ⁶ \$)				Variación 1990-2022 (10 ⁶ \$)	Tendencia
	1990	2000	2010	2022		
1.1. Bosque	22.82	23.69	25.35	27.63	4.82	+
2.1. Zona pantanosa o pastizal inundable	16.78	15.57	16.53	16.31	-0.47	+
2.2. Pastizal / herbazal	99.90	103.47	100.46	95.81	-4.10	-
2.4. Matorral y otras formaciones no boscosas	43.11	49.95	53.84	49.89	6.78	+
3.1. Pasto	7.05	6.18	7.45	8.13	1.08	+
3.2. Agricultura	0.05	0.02	0.03	0.06	0.01	SCC
3.3. Plantación forestal	21.33	21.74	23.92	25.74	4.41	+
3.5. Mosaico agropecuario	109.35	95.96	94.95	97.70	-11.65	-
4.1. Infraestructura						SV
4.2. Minería						SV
4.3. Otra área sin vegetación						SV
5.1. Río, lago u océano	13.35	14.83	18.99	19.03	5.68	+
5.3. Glaciar	28.10	25.96	24.77	22.42	-5.68	-
Valor total	361.84	357.39	366.29	362.73	0.89	-

Nota. SCC=sin cambios considerables, SV= sin valores, (+) = tendencia positiva y (-) = tendencia negativa. Elaboración propia

3.2.1. Valoración económica y ecosistemas frágiles

Las coberturas con mayor superficie (pastizales y mosaicos agropecuarios) presentan valores monetarios altos, aún sin poseer la gran aptitud para proveer servicios como en el caso de los bosques, bofedales o lagunas que son los biomas con las más altas cotizaciones por sus beneficios ecológicos. Por tanto, es prescindible analizar los ecosistemas frágiles, puesto que, coinciden precisamente con los biomas de mayor valor ecosistémico. De manera general, los ecosistemas frágiles participan en la valoración económica del área de estudio con cantidades importantes, no por la gran área que ocupan en el territorio, sino porque proveen una variedad de servicios ecológicos, dotan servicios con valores unitarios muy altos o bien ambos (Tabla C5 material suplementario). El aporte de los bosques en la evaluación monetaria supera los $\$20 \times 10^6$ para cada año de estudio (Tabla 4); asimismo, presenta una tendencia positiva producto del crecimiento del bioma que se traduce en más de $\$10 \times 10^6$ ganados en el año 2022 con respecto a 1990. Los bofedales aportan más de $\$15 \times 10^6$ en cada año, su variación es imperfecta (con pérdidas y ganancias de área) la misma que radica en su dinámica compleja que está condicionada por variables climáticas, hidrológicas y actividades antrópicas. Las lagunas, por su parte, son las coberturas que ocupan menor superficie entre los ecosistemas frágiles (Tabla 3); sin embargo, su aporte es considerable yendo de $\$13 \times 10^6$ en 1990 a $\$19 \times 10^6$ en 2022 debido a su gran aptitud ecológica, fundamentalmente por la regulación del agua. Los glaciares, con fuerte incidencia en los ecosistemas de montaña, representan aportes económicos que van de los $\$28 \times 10^6$ en 1990 a $\$22.4 \times 10^6$ en 2022; teniendo una pérdida de $\$5.6 \times 10^6$.

3.2.2. Evaluación económica y las transiciones espaciotemporales de los ecosistemas

Con fines prácticos entendemos como pérdida la transición de ecosistemas con valores unitarios por servicios a otros sin valores monetarios. Esto se base en que, para el área de estudio, los afloramientos rocosos y la infraestructura presentan valores bajos o nulos con respecto a los demás tipos de CUS. En el caso de la infraestructura, su posible aporte ecológico está relacionado con su asociación con la cobertura forestal u otra cubierta. En el caso de la minería, no se han tomado valores debido al cierre de la mina Pierina; sin embargo, la conversión de ciertos biomas hacia áreas de uso minero, como ocurrió en el periodo 1990-2010, generaría ganancias equivalentes al valor monetario de la producción total por año de la mina. Asimismo, también son pérdidas aquellas transiciones que consisten en la conversión de los sistemas ecológicos mejor cotizados por otros de menor valor. Por el contrario, son ganancias los cambios que consisten en coberturas de nulo o bajo valor económico por otras de mayor beneficio.

La Tabla C6 del material complementario muestra las ganancias y pérdidas ($\times 10^3$ \$) del valor de servicios ecosistémicos producto de la variación espaciotemporal de los ecosistemas. Las pérdidas más importantes radican en la transición hacia “otras áreas sin vegetación” e “infraestructura”. La primera corresponde principalmente a la modificación de la superficie nival, la cual representa una pérdida de $\$5.2 \times 10^6$. La segunda transición consiste en la conversión de mosaico agropecuario por áreas de infraestructura que representan pérdidas de $\$3.6 \times 10^6$. Estas dinámicas adquieren importancia en el análisis debido a su ocurrencia global y creciente con el tiempo. En cuanto a las ganancias, las más importantes corresponden a la conversión de “otras áreas sin vegetación” por cuerpos de agua (4.6×10^6) y la transición de pajonales andinos por matorrales (3.2×10^6).

4. DISCUSIÓN

4.1. Los cambios en la cobertura y el uso del suelo y sus implicaciones en el territorio

Los glaciares tropicales, siendo los más sensibles a los efectos del cambio climático, presentaron una tendencia negativa continua; su reducción representó el 20.3 % en el 2022 con respecto a 1990. Esta dinámica coincide con todas las áreas geográficas del país y otras regiones pertenecientes a la cordillera de los andes. En Madrigal et al. (2022), el retroceso glaciar del distrito de Marangani precisa una pérdida del 85 % para el periodo 1986-2019, lo que representa una no muy lejana desaparición de los glaciares en Marangani. Alva y Meléndez (2009) informan que la reducción de los glaciares en Huaraz e Independencia para el periodo 1989-2005 es del 25 %, asimismo, presentan una proyección para el 2014 que precisa un deshielo de mayor intensidad con el paso de los años tal y como se muestra en la Tabla 3. El desarrollo de esta dinámica glaciar no solo advierte una crisis por la reducción de reservas de agua, y con ello, de problemas socioeconómicos aguas abajo; sino que está muy relacionada con la variabilidad espacial de otros ecosistemas de montaña. Castillo (2022) determina que existe una correlación inversa muy buena entre el área glaciar y las lagunas de la subcuenca del río Quillcay; y buena para el caso de los bofedales. Esto queda contrastado primero por el proceso de formación de lagunas de origen glaciar. Segundo, la Figura 2 muestra el crecimiento de la laguna Tullparaju (15.8 ha aproximadamente) para el año 2000; asimismo, para el año 2010 se observa un aumento considerable en la superficie de la laguna Palcacocha (32 ha con respecto al año 2000). Tercero, la transición de masa glaciar a lagunas (Tabla C1 y C2 del material complementario) fueron de 0.53 y 0.8 ha para los periodos 1990-2000 y 2000-2010 respectivamente. En cuanto a los bofedales, la tabla 2 muestra una variación compleja (de incremento y pérdida) la cual está determinada no solo por factores climáticos e hidrológicos (pérdida de masas glaciares, la descarga media anual de quebradas o la variación de la precipitación producto de fenómenos de la Niña o Niño), sino que se extiende a las consecuencias de actividades antrópicas como la deforestación, quema de pastos, apertura de tierras de cultivo o el sobrepastoreo como en Quillcayhuanca (INAIGEM, 2015; Castillo, 2022; Shoobridge, 2005). El crecimiento de la cobertura forestal, por su parte, implica un cambio beneficioso debido a la variedad de servicios ecosistémicos que ofrece. La cual participa en la captura y almacenamiento de carbono, que adquiere gran importancia debido al contexto del cambio climático; asimismo contribuye a la

regulación de la erosión y a la reducción de daños por fenómenos naturales precisamente por su acción limitante en la escorrentía (Llerena et al., 2014; Cruz, 2020). En consecuencia, se ha establecido un interés en cuanto a la conservación de cobertura vegetal, reforestación y forestación con el objetivo de estabilizar los taludes.

En general, la cobertura vegetal altoandina tiene una influencia importante en el ciclo hidrológico, especialmente en el desarrollo de la escorrentía y en la recarga de acuíferos (Cervantes et al., 2021). Por tanto, cambios en estas coberturas generarían la alteración de la evapotranspiración (en el caso de transiciones de bosques a pastos), en el almacenamiento de agua (bofedales por pastos o degradación de estos por pastoreo) y en los efectos de la erosión hídrica (Tobón, 2009).

El crecimiento urbano presentó la modificación de la cobertura “mosaico agropecuario” (Tabla C4 material complementario), lo que significa la pérdida de los servicios de producción de alimentos y de forraje principalmente. Por su parte, la operación de la mina Pierina (1998-2013) generó la conversión de pastizales, pastos y bofedales; que proveen de servicios ecosistémicos de gran importancia. Actualmente la mina se encuentra en la fase de cierre, lo que implica establecer acciones con el objetivo de rehabilitar el área alterada y poder controlar los efectos adversos generados en el ambiente producto de esta actividad económica.

4.2. El valor económico de los servicios ecosistémicos en el contexto de cambio climático

Las pérdidas monetarias y la forma en cómo se va compensando el valor económico total producto de los cambios espaciotemporales (Tabla C6 material complementario) permiten observar, grosso modo, las transiciones prioritarias a manejar o gestionar. Primero, los cambios que radican en la conversión a “otra área sin vegetación” implican de por sí una pérdida del valor monetario; la cual está relacionada con la degradación de pastizales y de la cobertura glaciar. Los procesos que influyen en la alteración de estas dos coberturas son el cambio climático y las actividades antrópicas (quema de pastizales, sobrepastoreo, etc.). Por tanto, es necesario establecer medidas de adaptación al cambio climático, manejo de pastizales u otra acción que permita preservar los ecosistemas y sus servicios. Segundo, la degradación de servicios no solo determina una pérdida monetaria directa, sino que, para los casos de regulación de la erosión y de eventos extremos, pueden traducirse en pérdidas materiales y económicas de comunidades ubicadas aguas abajo (Madrigal et al., 2020). La conversión de bofedales a pastizales (pajonales andinos) o a pastos generan una reducción considerable en la provisión de servicios de regulación de agua y de captura de CO₂; y de su valor económico. Por otro lado, los bofedales por su aporte en la mejora de la calidad de agua representan una necesidad de conservación en los cursos de agua afectados por el drenaje ácido de roca como es el caso de la quebrada Quillcayhuanca en Huaraz, la cual puede generar pérdidas de ganado por consumo de aguas contaminadas (INAIGEM, 2015).

El control de las lagunas de origen glaciar, como en el caso de la laguna Palcacocha, es otro de los manejos de gran interés; debido a antecedentes de procesos aluviónicos que afectaron la ciudad de Huaraz (Alva y Melendez, 2005). Obras de infraestructura en conjunto con medidas no estructurales en quebradas asociadas a lagunas de origen glaciar permitirán reducir los daños materiales y económicos aguas abajo. La degradación de la cobertura vegetal en general tiene implicaciones en la agricultura y, por ende, en la seguridad alimentaria de la población; lo cual está relacionado a su capacidad para reducir los efectos de la erosión hídrica y del lavado del suelo. Por tanto, el control de cambios en la masa vegetal es prioritaria no solo como parte de la preservación de sus beneficios directos, sino de aquellos que se desprenden de los mismos.

Por último, aquellos valores económicos obtenidos en el área de estudio serán reducidos con el tiempo debido a los efectos de las actividades antrópicas y el cambio climático que se encuentran en crecimiento. Hay que tener en cuenta que cualquier servicio depende de las funciones ecológicas del sistema para su provisión, en consecuencia, la alteración de estas condiciones mínimas resultante de la

quema de pastos, sobrepastoreo, contaminación de agua y suelos u otros van a resultar en la pérdida de los ecosistemas, de sus beneficios y de su valor económico. Más aún en los ecosistemas de montaña, que son fuertemente impactados por el cambio climático, las acciones en materia de gestión ambiental deben orientarse a mejorar la resiliencia de los ecosistemas ante las temperaturas más altas, periodos de sequía más frecuentes u otra alteración generada por las variaciones en el clima (Schirpke et al., 2017).

4.3. Limitaciones metodológicas del estudio

Las estimaciones presentadas deben entenderse como el uso de los mejores datos existentes con una validez aceptable. Sin embargo, debido a la escasez de estudios de valoración económica con metodologías consistentes en los ecosistemas de montaña del Perú, se ha recurrido al uso de estudios de escala global, lo que reduce la precisión en cuanto al valor monetario de cada servicio ecosistémico. Asimismo, debido a la resolución espacial de las imágenes Landsat y a los filtros utilizados en el proyecto “Mapeo Anual de Cobertura y Uso del Suelo en el Perú” de MapBiomás Perú, los análisis de cobertura que se desprenden de dicha información representan una aproximación a la realidad estadísticamente validada, pero que puede mejorarse con el uso de imágenes de alta resolución, aunque la temporalidad de estas sea otra limitante.

5. CONCLUSIONES

Los procesos de cambio de cobertura y uso de la tierra provocados por las actividades antrópicas y los efectos cada vez más críticos del cambio climático generan no solo modificaciones en la distribución espacial de los ecosistemas, sino que su influencia se extiende a la degradación de los servicios ecosistémicos que proveen, los mismos que resultan de la perturbación en el desarrollo normal de las funciones ecológicas de los biomas.

Al igual que otras áreas de montaña, los distritos de Huaraz e Independencia presentan una reducción del 20 % de la masa glaciaria en el periodo 1990-2022; la cual ha sido constante y con una mayor variación en los últimos 10 años. Las áreas sin vegetación y las lagunas han presentado un aumento como resultado del derretimiento de los glaciares; el cual ha generado la presencia de afloramientos rocosos y el aumento del volumen de agua de las lagunas Palcacocha y Tullparaju principalmente. La cobertura bofedal no ha presentado cambios considerables, sin embargo, procesos de sobrepastoreo u otros fenómenos hidrometeorológicos podrían afectar su distribución espacial. Asimismo, las coberturas forestales (bosques y plantaciones forestales) han presenciado un incremento constante en los 32 años de estudio. Por otro lado, los procesos de expansión urbana y de la actividad minera han consistido en la modificación de las clases de mosaico agropecuario y pastizales respectivamente.

Mediante el método de transferencia de beneficios, se ha observado que los servicios de regulación son los más cotizados, resaltando entre ellos los de regulación de agua, captura de CO₂ y regulación del clima. Asimismo, los ecosistemas considerados como “frágiles” son los que influyen en gran manera en el valor económico total de los servicios ecosistémicos, aún sin representar áreas extensas. La variación en los valores totales de los servicios para los 4 años de estudio está condicionada por la conversión a áreas como infraestructura y afloramiento rocoso principalmente; lo que implica una pérdida irreparable de los servicios ecosistémicos. Asimismo, existen compensaciones producto de la conversión de coberturas con menor cotización ecosistémica por otras de mayor valor que generan cierto equilibrio en los valores económicos para los 4 años y que está determinada por la transición de “otras áreas sin vegetación” por cuerpos de agua y por el cambio de pajonales andinos a matorrales.

6. RECOMENDACIONES

Las estimaciones desarrolladas en la presente investigación buscan servir de concientización sobre la importancia de los ecosistemas y sus servicios, así como de la situación en la que se encuentran. Por otro lado, buscan ser de orientación para el desarrollo acciones en materia de conservación y

mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos (MERESE). Sin embargo, debido al uso del método “transferencia de beneficios”, la evaluación económica representa solo una aproximación por lo que es necesario desarrollar estudios específicos aplicados a las características fisiográficas, climáticas e hidrológicas de nuestro territorio. Puesto que, la metodología usada se basa en una forma de interpolación, en donde, el resultado depende de la similitud en las áreas de estudio.

De manera similar, la información utilizada en el análisis de cambios de CUS se basa en la clasificación de imágenes Landsat, por lo que, cualquier interpretación de las coberturas analizadas debe tener en cuenta la resolución espacial de este tipo de imágenes de satélite.

Por último, se recomienda desarrollar más estudios sobre el análisis de patrones de cambio en la cobertura y uso de la tierra, así como de valoración económica de los beneficios ecológicos en ecosistemas de montaña debido a la situación crítica que atraviesan producto del cambio climático.

7. MATERIAL COMPLEMENTARIO

Las tablas C1, C2, C3, C4 y C5 mencionadas en el artículo se encuentran disponibles en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1RA6nwz6EwSEb88WFwuFVvExAPc9wmQWO?usp=drive_1ink

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alva, M. y Meléndez, J. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciaria en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71-83.

Castillo, F. (2022). *Análisis multitemporal de la dinámica glaciaria y su influencia sobre lagunas y humedales altoandinos en la Cordillera Blanca - Perú, periodo 1989-2019* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5053>

Cervantes, R., Sánchez, J., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., Locatelli, B. y Bonnesoeur, V. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2). <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P. y van den Belt, M. (1997). The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *nature*, 387, 253–260. <https://www.nature.com/articles/387253a0>

Costanza, R., Kubiszewski, I., Ervin, D., Bluffstone, R., Boyd, J., Brown, D., Chang, H., Granek, E., Shandas, V., Yeakley, A., Polasky y S., Dujon, V. (2011). Valuing Ecological Systems and Services. *F1000 Biology Reports*, 3(14). https://www.researchgate.net/publication/51604647_Valuing_Ecological_Systems_and_Services

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S., Kubiszewski, I., Farber, S. y Turner, K. (2014). Changes in the global value of ecosystem service. *EI SEVIER, Global Environmental Changes*, 26, 152–158. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378014000685>

Crispin, M. (2015). Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca, Buanca Velica, Perú [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1584>

Cruz, F. (2020). *Los peligros naturales y la gestión del riesgo de desastres en el distrito de Olleros, Huaraz – Ancash* [Tesis para optar el grado académico de doctor, Universidad Nacional Federico Villarreal]. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/4509>

de Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L., ten Brink, P. y van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *ELSEVIER, Ecosystem Services*, 1, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Ancash. Resultados Definitivos*. Tomo 1. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1552/

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2018a). *Inventario nacional de glaciares. Las cordilleras glaciares del Perú*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña Biblioteca y Publicaciones. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/57>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (23 de mayo de 2018b). *Impacto del carbono negro en los glaciares de la Cordillera Blanca*. <https://www.inaigem.gob.pe/2018/05/23/impacto-del-carbono-negro-en-los-glaciares-de-la-cordillera-blanca/>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2015). *Informe de inspección. Identificación y georreferenciación de áreas de investigación en la microcuenca Quillcayhuanca*. Dirección General de Investigación en Ecosistemas de Montaña

Jururo, M. (2018). *Valorización económica de los servicios ecosistémicos de almacenamiento de agua y carbono en los bosques de queñua (polylepis) del distrito de Chiguata de la provincia de Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5fb6eaf3-d95f-4319-b712-a03294af49d7>

Ley N° 28611. Ley General del Ambiente (15 de octubre de 2005). Normas Legales, N.º 9252. Diario Oficial El Peruano.

Llerena, C., Yalle, S. y Silvestre, E. (2014). Los bosques y el cambio climático en el Perú: situación y perspectivas. FAO (pp. 13).

Madrigal, S., Puga R., Bustínza, V. y Vilca, O. (2022). Spatiotemporal Changes in Land Use and Ecosystem Service Values Under the Influence of Glacier Retreat in a High-Andean Environment. *Frontiers*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.941887>

Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.html>

Proyecto MapBiomias Perú – Colección [2] de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo del Perú, consultada el [30 de mayo del 2024] a través del enlace: <https://plataforma.peru.mapbiomas.org/>

Schirpke, U., Kholer, M., Leitinger, G., Fontana, V., Tasser, E. y Tappeiner, U. (2017). Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. *ELSEVIER, Ecosystem Service*, 26, 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.008>

Shoobridge, D. (2005). *Huascarán National Park*. ParksWatch. https://www.researchgate.net/publication/281296619_Los_bosques_y_el_cambio_climatico_en_Peru_situacion_y_perspectivas

Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización (4). <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/bosques-andinos-agua-0>

Xie, G., Zhang, C., Zhen, L., y Zhang, L. (2017). Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *ELSEVIER, Ecosystem Services*, 26 (A), 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.010>