

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Análisis de vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña
frente al cambio climático en la Cordillera Apolobamba – Perú**

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en
Ingeniería Ambiental

Autor:

Pedro Victor Quispe Apaza

Asesor:

Mg. Renny Daniel Diaz Aguilar

Juliaca, diciembre del 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Mg. Renny Daniel Diaz Aguilar, de la Facultad de Ingeniería Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulada: **“ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS DE MONTAÑA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CORDILLERA APOLOBAMBA - PERÚ”** constituye la memoria que presenta el estudiante Pedro Victor Quispe Apaza para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 23 días del mes de diciembre del año 2020.



Mg. Renny Daniel Diaz Aguilar

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullunqulani, a... 22 día(s) del mes de *diciembre* del año 2020, siendo las *9:30* horas,

se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, bajo la dirección del (de la)

presidente(a): *Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera* el(la)

secretario(a): *Ing. Miguel Ángel Salcedo Enriquez* y los demás miembros:

Msc. Bernardino Espia Aguilar

..... y el(la) asesor(a) *Ing. Ronny Daniel Díaz Aguilar*

..... con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de

investigación titulado: *evaluación de vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático en la Cordillera Apolobamba - Perú*

..... de los (las) egresados (as): a) *Pedro Víctor Quispe Apaga*

..... b)

..... conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en

Ingeniería Ambiental

Denominación del Grado Académico de Bachiller

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando *al*..... candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por *el*..... candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): *Pedro Víctor Quispe Apaga*

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<i>Aprobado</i>	<i>18</i>	<i>A-</i>	<i>Muy Bueno</i>	<i>Sobresaliente</i>

Candidato/a (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó *al*..... candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

[Firma]

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Análisis de vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático en la Cordillera Apolobamba - Perú

Pedro Victor Quispe Apaza ^{a*} Renny Daniel Diaz Aguilar^{b*}

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

La vulnerabilidad de los ecosistemas se define como el grado en el que un sistema es susceptible frente a sus efectos y esta se debe a su relación con el cambio climático, El estudio tuvo como objetivo realizar el análisis de la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático en la Cordillera Apolobamba, siguiendo la metodología de análisis de componentes principales espaciales (SPCA) apoyado por los sistemas de información geográfica (SIG), que considera diez variables: Ecosistemas, temperatura máxima y precipitación (corresponden al escenario climático CMIP6 ssp3.7.0 y ssp5.8.5.), además de altitud, pendiente, cobertura vegetal, capacidad de uso mayor de suelo, fisiografía, sombra y zonas de vida, todas las variables fueron estandarizadas mediante una normalización de datos, además se propuso índices de vulnerabilidad ecosistémica que van de potencial (P), Alta (A) y Muy Alta (M) de acuerdo al nivel de contribución del modelo. Los resultados muestran que existe vulnerabilidad de ecosistemas a niveles: muy alto y potencial, en los ecosistemas de pajonales andinos, bosque altimontano y zonas periglacial, con un 75 % de área ecosistémica de la Cordillera, asimismo se obtuvo un porcentaje de contribución de 99.7 % del modelo de acuerdo con los tres principales componentes (I,II y II), en conclusión esta herramienta busca cambiar la subjetividad de los datos mejorando así la composición del resultado en temas de cambio climático en ecosistemas de montaña como herramienta de modelamiento.

Palabras clave: Analisis de vulnerabilidad, ecosistemas de montaña, escenarios climaticos.

Abstract

Ecosystem vulnerability is defined as the degree to which a system is susceptible to its effects and this is due to its relationship with climate change. The study aimed to analyze the vulnerability of mountain ecosystems to climate change in the Apolobamba mountain range, following the methodology of spatial principal component analysis (SPCA) supported by geographic information systems (GIS), which considers ten variables: Ecosystems, maximum temperature and precipitation (corresponding to the climate scenario CMIP6 ssp3. 7.0 and ssp5.8.5.), in addition to altitude, slope, vegetation coverage, capacity for greater land use, physiography, shade and life zones, all variables were standardized through data normalization. In addition, ecosystem vulnerability indexes were proposed, ranging from Potential (P), High (A) and Very High (M) according to the model's contribution level. The results show that there is vulnerability of ecosystems at levels: very high and potential, in the ecosystems of Andean grasslands, highland forest and periglacial zones, with 75% of the ecosystem area of the Cordillera, also obtained a percentage of contribution of 99.7% of the model according to the three main components (I, II and II), in conclusion this tool seeks to change the subjectivity of the data thus improving the composition of the result on issues of climate change in mountain ecosystems as a modeling tool.

Keywords: Vulnerability analysis, mountain ecosystems, climate scenarios.

* Autor de correspondencia: Pedro Victor Quispe Apaza
Km. 6 salida Arequipa – Chullunquiani, Juliaca - Puno
Tel.: 957-723-730
E-mail: pedro.qa@upeu.edu.pe

1. Introducción

El cambio climático ocasiona cambios significativos en los diferentes ecosistemas, incrementando la frecuencia y severidad de los fenómenos hidrometeorológicos como inundaciones, sequías y otros eventos que afectan a países en vías de desarrollo (Scarano, 2017), además los limitados sistemas de respuesta, la débil institucionalización de políticas de adaptación y escasas estrategias de mitigación hacen que cada evento se traduzca en numerosas pérdidas humanas y económicas (López Moreno, Fontaneda S, 2014).

En este sentido, la vulnerabilidad de los ecosistemas tiene relación con el cambio climático siendo definida como el grado en el que un sistema es susceptible o no frente a sus efectos (Mayo, 2016), dado que uno de los indicadores del cambio climático es la variabilidad climática a la que está expuesto el sistema, teniendo en cuenta su sensibilidad y su capacidad de adaptación (Lorca et al., 2015), puede ser una naturaleza, una sociedad o un ecosistema (Laura, 2014), por otra parte un indicador particular es la desglaciación de los nevados por los intensos cambios de temperatura que genera un incremento y recarga de acuíferos (Quirós Carrera & Palenque, 2013), sin embargo, a largo plazo este incremento disminuirá, ocasionando una escasez de este recurso generando un problema socio ambiental (WB, 2014).

Así mismo los ecosistemas de montaña ocupan aproximadamente cerca de 30 millones de hectáreas, que representa el 20% de la superficie del Perú, en estos territorios se reconocen principalmente, cinco tipos de ecosistemas: bofedales, bosques andinos relictos, bosques montanos, pajonales o pastizales andinos y matorrales arbustivos (INAIGEM, 2018), dichos ecosistemas permiten el mantenimiento de la biodiversidad andina, así como la provisión de importantes servicios ecosistémicos para pobladores locales como para los pobladores de las zonas bajas, los ecosistemas de montaña son vulnerables debido al grado de susceptibilidad frente a los efectos adversos del cambio climático y en particular a la variabilidad climática (Reyes, 2014).

Además mencionar que hay una diferencia entre vulnerabilidad social ante el cambio climático y vulnerabilidad de un ecosistema, puesto que una vulnerabilidad social tiene una estrecha relación con la comunidad que depende de los servicios ambientales que será en la medida que este servicio sea afectado, en cambio una vulnerabilidad biofísica o ecosistémica es el grado de susceptibilidad del sistema frente a una amenaza natural de acuerdo con el nivel de exposición y sensibilidad (Cardenas & Tobón, 2016).

Por otra parte, para tener una mayor comprensión del cambio climático, se debe considerar los escenarios climáticos derivados del proceso que se lleva a cabo en la tierra, puesto que estos afectan al medio ambiente, los aspectos socio climáticos con el paso del tiempo han desarrollado diferentes escenarios climáticos; según la magnitud de forzamiento radiactivo que aportan al sistema natural del clima, en la actualidad se cuenta con el proyecto de intercomparación de modelos acoplados de sexta generación (CMIP6) (Gidden et al., 2019).

Puesto que el modelo climático global que se acopla mejor a la demografía altiplánica peruana es el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima versión 5 (MIROC5) tal como lo sugiere (Lujano Laura et al., 2016), precisamente por ello la versión actualizada del modelo sería MIROC6 que simulan adecuadamente el ciclo estacional de la precipitación futura, de acuerdo con los cambios de precipitaciones para rutas de concentración representativas o escenario socioeconómico compartidas (SSP).

Un tema clave al construir una evaluación de vulnerabilidad es determinar cómo convertir diferentes tipos de información obtenida en un índice de vulnerabilidad integrado, se han sugerido varios métodos, como el método de ponderación de pesos o análisis multicriterio y el proceso de jerarquía analítica (AHP) (Moreno, 2002). Sin embargo, estos métodos dependen de la evaluación de los expertos al calificar la importancia de los factores, por lo que al haber una existencia abundante de información, generan ruido o repeticiones en los procesamientos, en cambio el análisis de componentes principales (PCA) tiene ventajas para utilizar un método de evaluación de la vulnerabilidad al ser capaz de procesar diferentes tipos de datos generando un resultado realmente objetivo a través de un geoprocésamiento (Li et al., 2007).

El presente artículo tuvo como objetivo realizar el análisis de la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático en la cordillera Apolobamba, a través de una propuesta metodología que ayuda a la evaluación de ecosistemas de manera representativa e integrada.

2. Materiales y Métodos

La aplicación del componente principal espacial (SPCA), en el análisis de la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña, se realizó a través de información espacial, cabe mencionar que toda la información está integrada por un sistema de información geográfica (SIG), utilizando el programa ArcGIS 10.4 para el procesamiento de datos.

2.1. Ubicación de área de estudio

El área de estudio es la cordillera Apolobamba, se encuentra localizada en los andes centrales y sur del país, en el departamento de Puno, ubicada en las coordenadas UTM WGS84: Norte 458941.028 Este: 8392207.342, que se extiende con una longitud aproximada de 40 km desde la frontera con la república de Bolivia hasta el límite con la cordillera Carabaya (INAIGEM, 2019), así mismo el nevado más alto es el Sorapata con 5 959 m.s.n.m.(ANA, 2014).

Además, la cordillera Apolobamba cuenta con cinco ecosistemas representativos como bofedales, bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano, bosques de montaña montano, pajonal andino y zona peri glaciar, identificados por el mapa de ecosistemas del ministerio del ambiente (MINAM, 2019b).

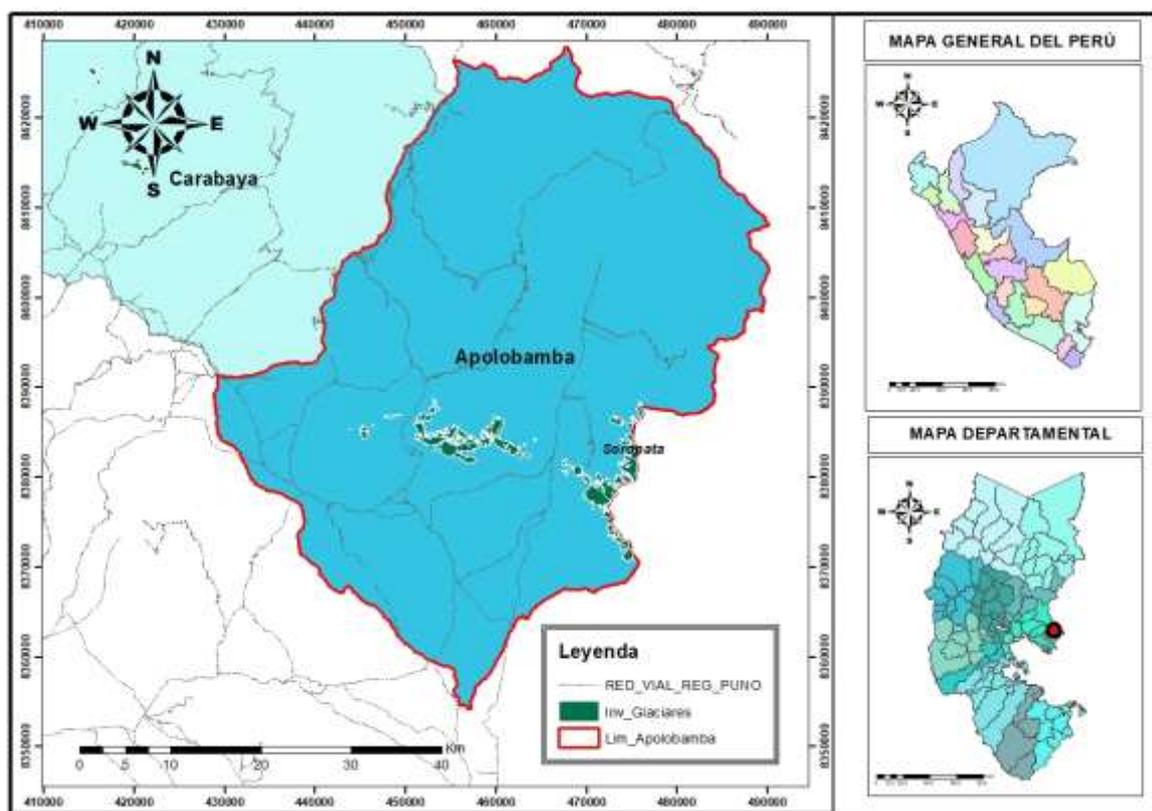


Figura 1 Ubicación de área de estudio

2.2. Datos para el procesamiento

En este estudio se utilizaron modelos digital de elevación (MDE), corregido de Alos Palsar (SRTM, 2013), con el cual se obtuvo datos de pendiente, altitud y sombra, también datos meteorológicos como temperatura máxima anual (Tmax) y precipitación anual acumulada (Pr) que se obtuvo a través de un ráster de la página de WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), que nos muestra datos históricos y proyectados a partir de modelos climáticos globales, para fines del estudio se considera el modelo acoplado CMIP6, con el modelo climático MIROC6 en los escenarios futuros que corresponde a SSP3.7.0 y SSP5.8.5 que representan la información crítica del modelo a través de su descripción y cuantificación tanto del cambio de uso del suelo como de las trayectorias de emisiones de la población total, políticas de adaptación, la concentración de gases de efecto invernadero y los forzamientos radiactivos, en condiciones optimista y realista global (Gidden et al., 2019), utilizados en diferentes estudios debidamente corregidos, así mismo datos físicos como, fisiografía, cobertura vegetal, capacidad de uso mayor de tierras, zonas de vida obtenidos de la zonificación ecológica y económica de Puno ZZE – Puno, además de datos de ecosistemas del geoportal del MINAM, todos estos datos fueron uniformizados en un solo formato ráster para su procesamiento.

Tabla 1

Variables para la investigación

Variable	Unidad	Formato original de datos	Fuente
Temperatura Maxima	°C	Raster	WorldClim
Precipitación	mm	Raster	WorldClim
Altitud	m	Raster	Alos Palsar
Fisiografía	km	Shape	ZZE
Pendiente	°	Raster	Alos Palsar
Sombra	km	Raster	Alos Palsar
Uso mayor de tierras	Km	Shape	ZZE
Cobertura Vegetal	km	Shape	MINAM 2018
Zonas de Vida	km	Shape	ZZE
Ecosistemas	Km	Shape	MINAM 2018

2.3. Principios e indicadores de evaluación

De acuerdo con las consideraciones que se tiene de vulnerabilidad hace referencia a como los sistemas lidian con los cambios externos como las condiciones climáticas, en donde reconoce que la vulnerabilidad contextual se caracteriza en social y ecológica generados por diversos procesos y factores (O'Brien, 2007). Además de la diversidad de conceptos relacionados a la vulnerabilidad, que lo agrupan en términos asociados como resiliencia, sensibilidad, exposición (IPCC, 2001), precisamente al hacer uso de los indicadores pensados desde una perspectiva socioeconómica no se utiliza una evaluación de vulnerabilidad ecosistémica si no un estudio de impacto de fenómenos, por lo que no permite una toma de decisiones puntuales referidos a ecosistemas.

Como se describió inicialmente, la evaluación debe realizarse como vulnerabilidad biofísica de los ecosistemas, en la medida que determinen el nivel de sostenibilidad de la población, es decir el grado en que el sistema es susceptible a una amenaza natural y la capacidad de resiliencia (Agudelo, 2007), precisamente los sistemas naturales hacen referencia a aquellos que soportan los procesos biofísicos, en cambio los sistemas sociales se basan en reglas e instituciones que miden el uso humano de los recursos, así como el sistema de

conocimientos y la pericia que interpreta los sistemas naturales hacia un enfoque antropocéntrico (Adger, 2006).

En definitiva realizar una evaluación de ecosistemas desde el punto de vista de vulnerabilidad biofísica nos permitirá tener un mejor criterio al momento de determinar el índice de vulnerabilidad ecosistémica, por lo tanto se plantea los indicadores para el estudio de acuerdo al comportamiento del sistema en un enfoque integrado que enfatizan en la interacción de los ecosistemas de montaña (Cardenas & Tobón, 2016), los indicadores elegidos no solo deben ser representativos, sino también simples y prácticos que permitan un procesamiento conveniente como la exposición que abarca la composición del terreno, variaciones climáticas (escenarios climáticos), así mismo la sensibilidad la altitud, variables físicas que interfieren con los ecosistemas.

Sobre la base de estas descripciones se establece un sistema de evaluación integrado con los diez factores que representan íntegramente el comportamiento de los ecosistemas.

Tabla 2
sistema de indicadores para la evaluación ecosistémica

Análisis	Capa estándar	Variable
Vulnerabilidad ecosistémica	Exposición	Temperatura máxima, Precipitación, Altitud, Fisiografía, Pendiente, Sombra, Uso mayor de tierras, Cobertura, Vegetal, Zonas de vida
	Sensibilidad	Ecosistemas

Puesto que según los criterios justificados la vulnerabilidad de los ecosistemas se clasificó de acuerdo con la contribución que tiene cada modelo y los niveles resultantes, es por ello que se propuso tres niveles: potencial (P), Alta (A), Muy Alta (M).

2.4. Método de normalización de datos

Existe una diferencia entre las distintas unidades de valores para cada variable utilizada, por lo tanto, las variables no pueden ser usadas directamente para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas, puesto que sus valores deben estandarizarse para reflejar un sistema de medición uniforme para cada uno de los factores involucrados en la evaluación que permitan evaluar correctamente (Olaya, 2014), dichos valores originales se estandarizan con la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{min j}}{X_{max j} - X_{min j}} \times 10 \tag{1}$$

Donde Y_{ij} es el valor estandarizado del factor j de la cuadrícula i , variando de 0 a 10; X_{ij} es el valor original del factor j de la cuadrícula i ; $X_{max j}$ y $X_{min j}$, son los valores máximo y mínimo de factor j de la cuadrícula i , respectivamente.

De esta forma se realiza la estandarización de datos para cada variable, a fin de que el rango en el que este normalizado sea de 1 a 10 se realiza la multiplicación por 10, de esta forma los resultados mostrarán un solo nivel de unidades.

2.5. Método de modelación

En este estudio se busca lograr un método de evaluación capaz de procesar una cantidad de datos diferentes y que sea capaz de generar resultados relativamente objetivos, dado que el análisis de componentes principales espaciales (SPCA), que es un enfoque de PCA modificado tiene ventajas para ser usado como método de evaluación de vulnerabilidad (Li et al., 2007), se desarrolló un modelo de evaluación de los ecosistemas de montaña utilizando el método PCA, la fórmula para la evaluación es la siguiente:

$$E = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2 + \dots + \alpha_n Y_n \quad (2)$$

Donde E es un índice de evaluación de vulnerabilidad integrado, Y_i es el i-ésimo componente principal, y α_i es su correspondiente contribución.

El proceso de evaluación de la vulnerabilidad ecosistémica utilizando el método SPCA, se explica con los siguientes pasos que desarrolla el programa:

- 1) los datos originales son estandarizado
- 2) se establece una matriz de covarianza M para cada variable
- 3) un valor propio λ_i de matriz M y su correspondiente se calculan los auto vectores α_i
- 4) agrupar α_i por combinación lineal y se producen “n” componentes principales.

En el entorno de software del módulo Spatial Analyst en ArcGIS, la función de componentes principales se utiliza para transformar los datos en una pila del atributo multivariante de entrada espacio a un nuevo espacio de atributos, donde los ejes son girados con respecto al espacio original y los ejes en los nuevos espacios no están correlacionados (Yang et al., 2015). Según la acumulativa contribución de los componentes principales, el número de componentes se afirma como 3 para casos del estudio y se cumple SPCA.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis de la contribución del PCA

Los resultados correspondientes al análisis de componente principal (PCA) que se enuncian en Tabla 2, muestran el peso de cada componente y la pila generada de contribución, donde nos indica las contribuciones de cada escenario dentro de todo el modelo.

Tabla 3

Resultados del análisis de componentes principales realizado en este estudio

Componentes principales PCA	Contexto Actual		2021 - 2040		2041 - 2060		Contribución ec. (2)
	λ_1	Contribución (%)	λ_1	Contribución (%)	λ_1	Contribución (%)	
I	4.60	46.21	5.98	44.57	5.99	44.55	Cont. Actual 99.5%
II	3.11	31.20	4.39	32.72	4.40	32.68	2021 – 2040 99.8%
III	2.23	22.40	3.04	22.69	3.06	22.77	2041 – 2060 99.9%

La tabla 3 nos muestra los resultados numéricos que nos da el análisis de componente principal a partir de diez datos espaciales iniciales evaluados en diferentes escenarios tanto como en el contexto actual y los

escenario climáticos globales futuros SSP 3.7.0 del 2021 – 2040 y SSP 5.8.5 del 2041 – 2060, mostrándonos el porcentaje de contribución de los componentes al modelo general de cada periodo, para el contexto actual tenemos una contribución de 99.5 %, que nos indica una baja pérdida de información de un 0.05%, en el periodo del 2021 – 2040 tenemos una contribución de 99.8 % nos indica una pérdida muy baja de 0.02%, en el periodo de 2041 – 2060 tenemos una contribución de 99.9 % sin pérdida de información espacializada, lo cual nos indica que es altamente confiable la elección de factores por el método PCA, sin embargo existen pérdidas en las evaluaciones iniciales que son bajas, lo cual mostraría que una mínima cantidad de funciones tiene relativamente independencia dentro de la evaluación.

3.2. Modelamiento de vulnerabilidad ecosistémica actual

A través del procesamiento de datos en el programa ArcGis 10.4, con la herramienta de componente principal espacial (SPCA), se realizó el análisis de la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña, en contexto actual estimado nos muestra:

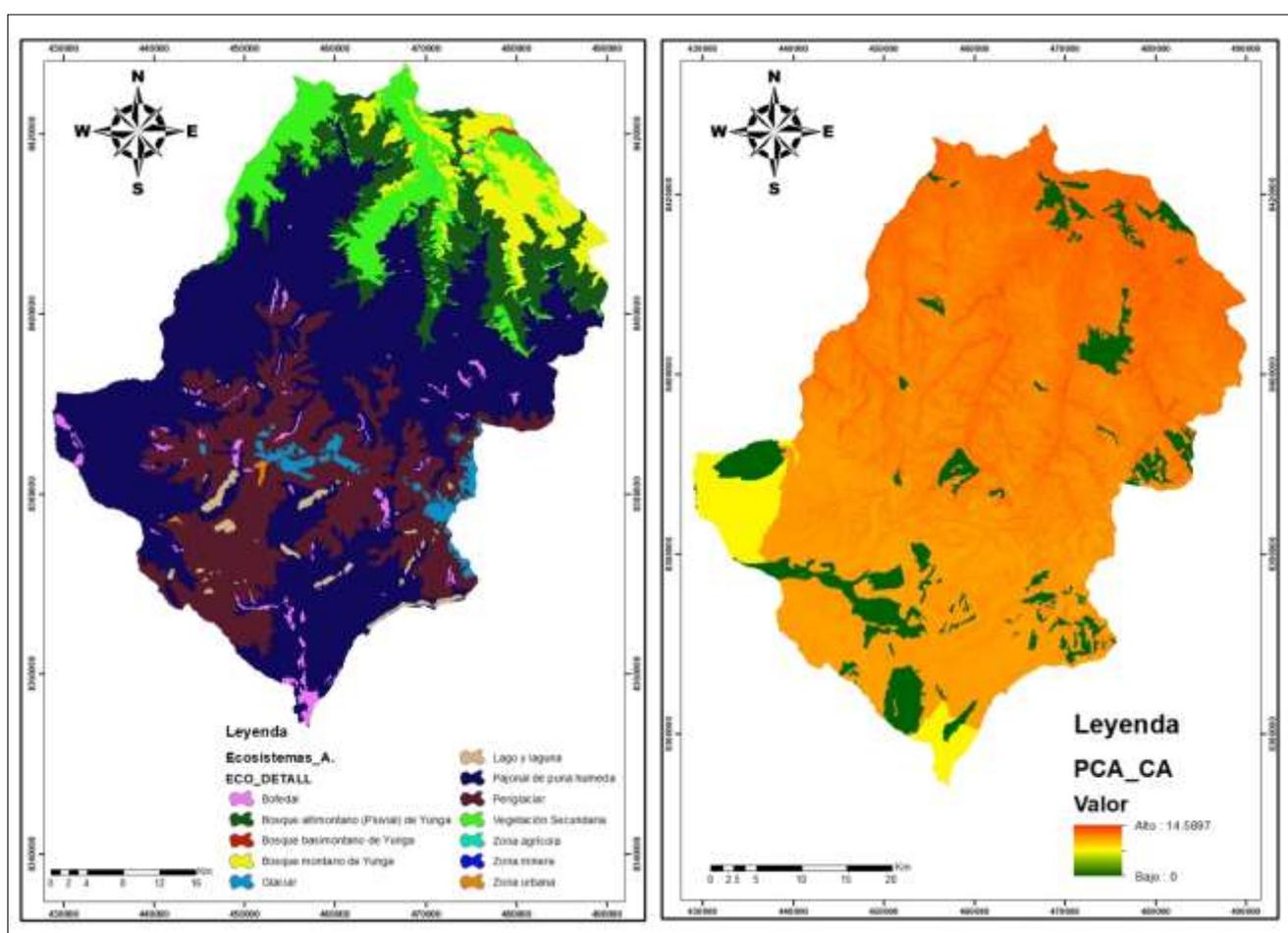


Figura 2 Resultado de modelamiento de vulnerabilidad en el contexto actual

Según el resultado obtenido por el análisis de componente principal, se obtuvo una aproximación de los niveles de vulnerabilidad de ecosistemas en el contexto actual como muestra la figura 2 clasificados en valores propuestos de vulnerabilidad según niveles resultantes tenemos; potencial (P), Alta (A), Muy Alta (M), también nos muestran que el 85 % de los ecosistemas conformados por bofedales, bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano, bosques de montaña montano, pajonal andino y zona peri glaciár son muy vulnerables (M), así mismo el 10 % de los ecosistemas de montaña conformados por zona glaciár, peri glaciár, pajonal andino, bofedales son altamente vulnerables (A), además un 5 % de los ecosistemas conformados por pajonal andino y bofedales son potencialmente vulnerables (P).

3.3. Modelamiento de vulnerabilidad ecosistémica escenario SSP 3.7.0.

Los resultados para el análisis y procesamiento de datos para escenarios proyectados de 2021 - 2040 de acuerdo con CMIP6, usando el modelo MIROC6, en el escenario SSP 3.7.0 aplicado a la cordillera Apolobamba.

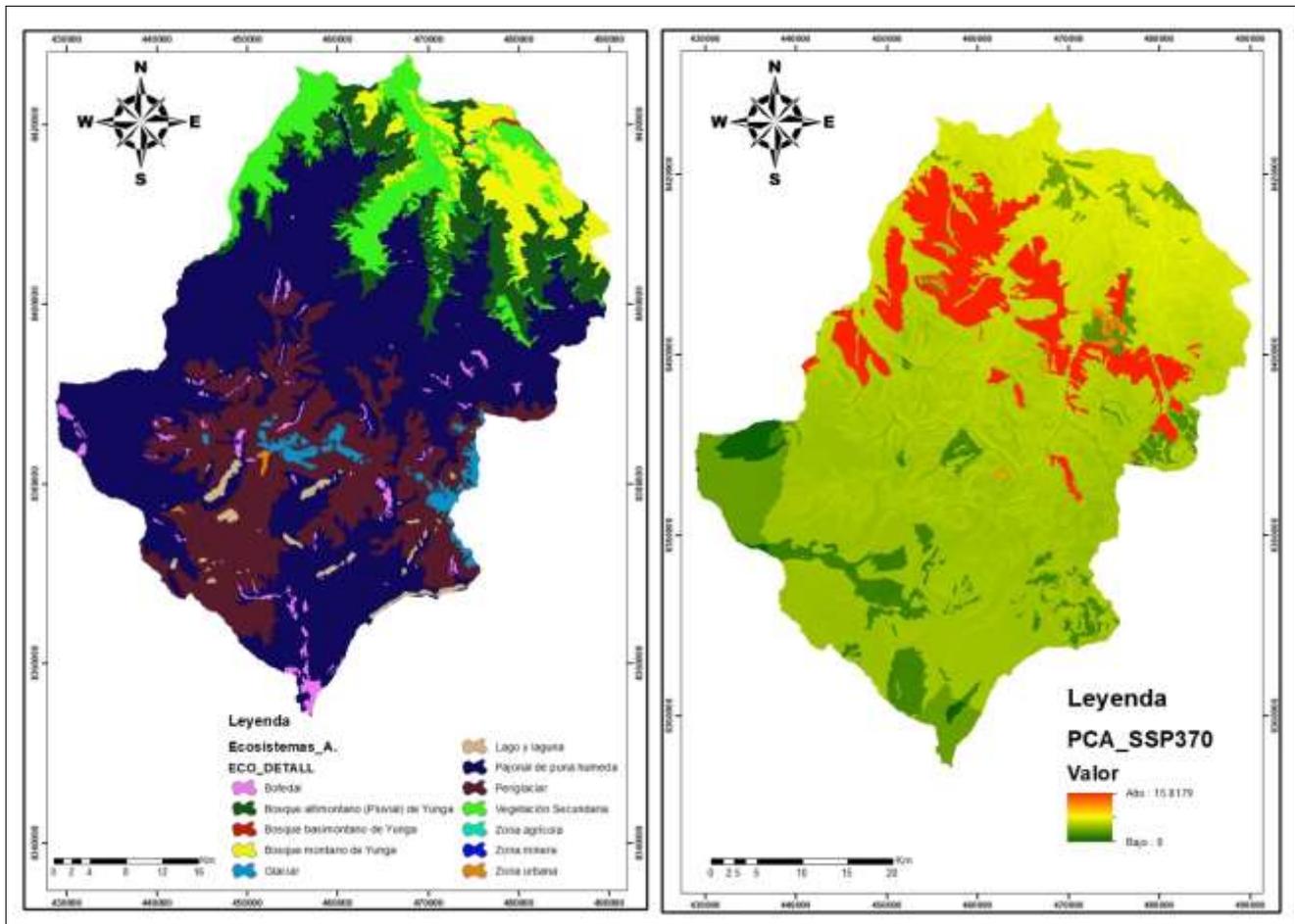


Figura 3 Vulnerabilidad ecosistémica de la cordillera Apolobamba – CMIP6 – ssp3.7.0.

Según el resultado obtenido por el análisis de componente principal, se obtuvo una aproximación de los niveles de vulnerabilidad de ecosistemas en el contexto actual como muestra la figura 3 clasificados en valores propuestos de vulnerabilidad según niveles resultantes tenemos; potencial (P), Alta (A), Muy Alta (M), nos muestra que la vulnerabilidad ecosistémica frente al escenario climático SPP 5.8.5. con un 73 % del área de la cordillera es potencialmente vulnerable (P) de los ecosistemas conformados por pajonal andino, bofedales, zona periglacial y bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano con tendencia alta, debido a la correlación del resultado gráfico, así mismo con un 6% de los ecosistemas conformados por bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano son altamente vulnerables (A), además con un 21 % de los ecosistemas conformados por pajonal andino de puna, bosque basimontano y parte de las zonas periglacial son muy altamente vulnerables (M).

3.4. Modelamiento de vulnerabilidad ecosistémica escenario SSP 5.8.5.

Los resultados para el análisis y procesamiento de datos para escenarios proyectados de 2041 - 2060 de acuerdo con CMIP6, usando el modelo MIROC6, en el escenario SSP 5.8.5 aplicado a la cordillera Apolobamba.

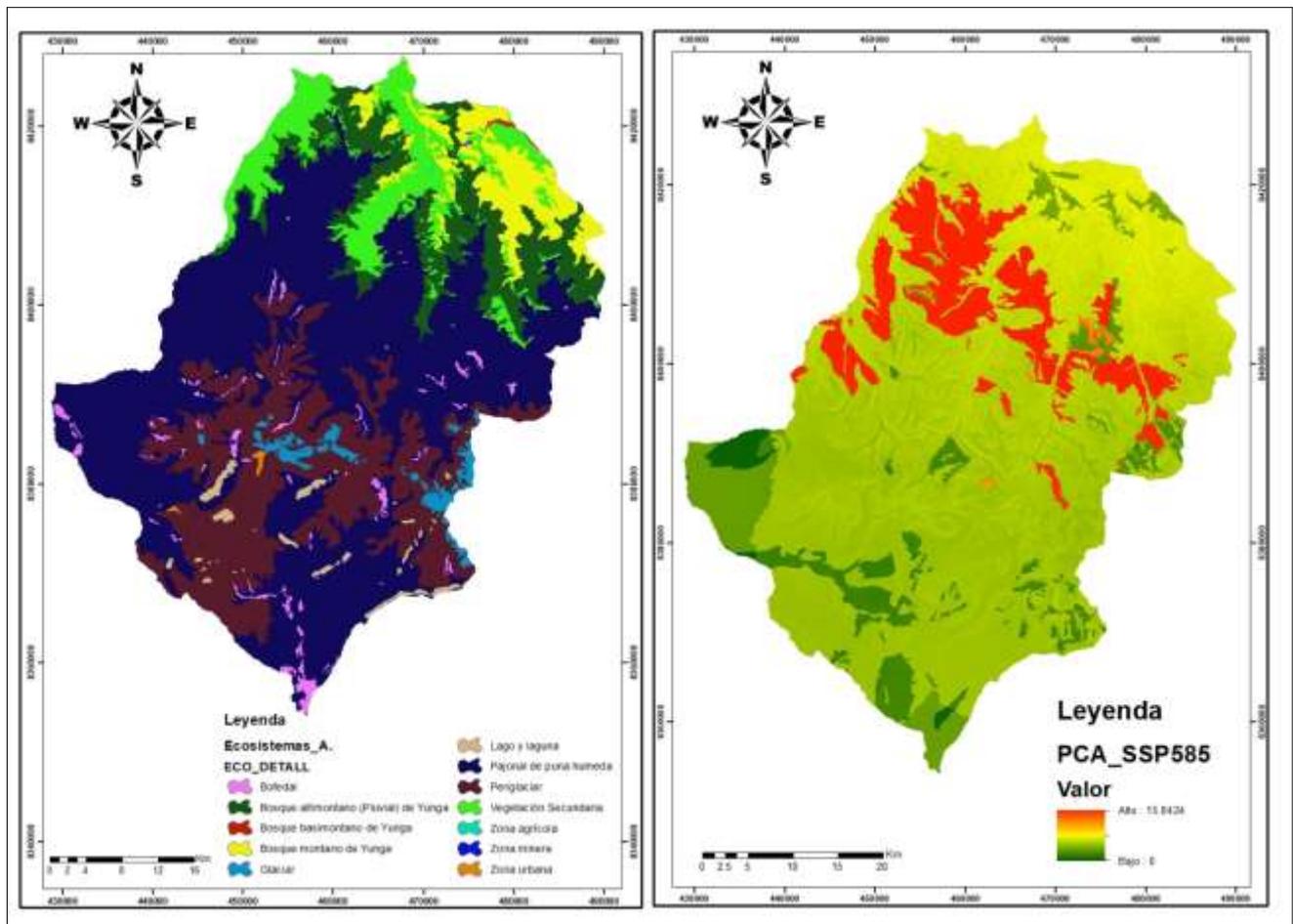


Figura 4 Vulnerabilidad ecosistémica de la cordillera Apolobamba – CMIP6 – ssp5.8.5.

Según el resultado obtenido por el análisis de componente principal, se obtuvo una aproximación de los niveles de vulnerabilidad de ecosistemas en el contexto actual como muestra la figura 4 clasificados en valores propuestos de vulnerabilidad según niveles resultantes tenemos; potencial (P), Alta (A), Muy Alta (M), nos muestra que la vulnerabilidad ecosistémica frente al escenario climático SPP 5.8.5. con un 75 % del área de la cordillera es potencialmente vulnerable (P) de los ecosistemas conformados por pajonal andino, bofedales, zona periglacial y bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano con tendencia alta, debido a la correlación del resultado gráfico, así mismo con un 5% de los ecosistemas conformados por bosques de montaña altimontano, boques de montaña basimontano son altamente vulnerables (A), además con un 20 % de los ecosistemas conformados por pajonal andino de puna, bosque altimontano y parte de las zonas periglacial son muy altamente vulnerables (M).

Los análisis de componente principal muestran una clara vulnerabilidad en los ecosistemas de montaña conformador por; los pajonales andinos, bofedales, bosque altimontano y zonas peri glaciares, los cuales presentan una mayor vulnerabilidad en los tres modelos, esto se debe a las variaciones climáticas y a los tres componentes principales, por otro lado los resultados se contrastan con otro estudio donde indica que el impacto del incremento de la temperatura no es proporcional en todas las zonas de los ecosistemas debido a la regulación de la altura y otros factores que inciden en el modelo (Devenish et al., 2012),precisamente explicaría el por qué en ecosistemas con una variación altitudinal alta no llegan a ser muy vulnerables, de la

misma forma la sensibilidad que tiene los ecosistemas se debe a sus características ecológicas, como la composición y estructura a lo largo de los gradientes altitudinales a través de las regiones elevadas dando como resultado ecosistemas de menor tamaño que son afectados severamente por el cambio climático (Naranjo & Suárez, 2010), además el uso que se le da a las tierras varía en las zonas, desplazando la vegetación endémica alterando así los ecosistemas y la conservación de biodiversidad en las montañas (Martínez, 2003).

Por otro lado la pérdida de glaciares de zonas andinas que son fuentes de vida de otros ecosistemas como los bofedales, que tiene la función de amortiguamiento de fluctuaciones naturales, está estrechamente relacionado con la vulnerabilidad presente (Ndl, 2008), es por ello que el estudio muestra que hay vulnerabilidad en las zonas peri glaciarias, precisamente por los retrocesos glaciares por el incremento de la temperatura en los últimos treinta años induciendo un forzamiento adicional (Bulege Gutiérrez & Custodio, 2020), Así mismo los bosques altimontano presentan una vulnerabilidad apoyándonos en (Reyes, 2014), que indica que los bosques andinos son vulnerables por diversos factores pero principalmente por los efectos climáticos correspondientes a los escenarios climáticos, esto afectaría a la demanda hídrica en las montañas,

Además, la importancia de los bofedales radica en la provisión y reserva de agua, así como su alta diversidad de especies silvestres endémicas que es afectada por las variaciones climáticas (MINAM, 2019a), en cambio las zonas de vida presentan cambios en los ecosistemas que a través del tiempo van disminuyendo e incrementando su área, debido a los efectos del cambio climático (Serrano & Calderón, 2017), por otro lado los glaciares con los cambios de cobertura de hielo, podría afectar severamente a los demás, disminuyendo los suministros de agua, afectando a la población que depende del servicio ecosistémico (Kohler et al., 2014).

Sin embargo los niveles de vulnerabilidad son medianos en cuanto a nivel potencial, y cambios complejos en los niveles muy altos, además en los escenarios climáticos a futuro expresan que los ecosistemas conformados por pajonal andino y bosques altimontano son los más susceptibles a una vulnerabilidad esto se debe a la extensión de algunos ecosistemas por el grado de pendiente y los cambios climáticos que contribuyen al modelo (Füssel, 2005), manifestado lo anterior el método empleado busca dejar de la lado la subjetividad de los datos mejorando así la composición de resultados en temas de cambio climático, refiriéndose a un nuevo método de evaluación de ecosistemas de montaña como herramienta de modelamiento.

4. Conclusiones

En conclusión, al realizar el análisis de la vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático en la Cordillera Apolobamba, a través de la metodología de análisis de componentes principales se encuentra que existe vulnerabilidad de ecosistemas a nivel muy alto y potencial en los ecosistemas de montaña como; pajonales andinos, bosque altimontano y zonas peri glaciares que nos muestra un 75 % de la vulnerabilidad estimada, en el contexto actual y en el modelo climático global MIROC6 correspondientes a los escenarios SSP 3.7.0. y 5.8.5, con un porcentaje de contribución de 99.7 % de forma integral a nivel de todo el modelamiento, de acuerdo con los tres principales componentes que explican su comportamiento ecosistémico frente al cambio climático, la herramienta busca dejar de lado la subjetividad de los datos mejorando así la composición de resultados en temas de cambio climático, refiriéndose a un nuevo método de evaluación de ecosistemas de montaña como herramienta de modelamiento integral.

Recomendaciones

Se recomienda hacer un análisis de vulnerabilidad de ecosistemas por separado para tener una percepción enfocada y ver su comportamiento, a fin de tener un análisis crítico más profundo en cada ecosistema de montaña. Así mismo utilizar diversos modelos climáticos globales en diferentes escenarios, para determinar la fiabilidad de los mismos y tener estimaciones más integradas.

Referencias

- Adger, N. (2006). vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, pp.268–281.
www.elsevier.com/locate/gloenvcha.
- Agudelo, L. C. (2007). Sostenibilidad ecológica urbana. Lo global y lo local-regional. In *Conferencia LLa Globalización Neoliberal y La Planeación Urbanoregional, Perspectivas para América Latina*. ANA. (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. Minagri.
- Bulege Gutiérrez, W., & Custodio, M. (2020). Climate change and glacier retreat in the huaytapallana mountain range, Peru. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 229–261. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-06>
- Cardenas, M. F., & Tobón, C. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático: una aproximación conceptual y metodológica. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 166–178.
- Devenish, C., Hofstede, R., & Saravia, M. (2012). Las montañas en nuestro lugar: La importancia de las montañas para el desarrollo sostenible antes y después de Río+20. *Revista Virtual REDEMESA*, 6(MRJ/CONDESAN.), 1-8 p.
- Füssel, H. M. (2005). Vulnerability in Climate Change Research: A Comprehensive Conceptual Framework. *University of California International and Area Studies*, 6.
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., van den Berg, M., Feng, L., Klein, D., Calvin, K., Doelman, J. C., Frank, S., Fricko, O., Harmsen, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Hilaire, J., Hoesly, R., ... Takahashi, K. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1443–1475. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>
- INAIGEM. (2018). *Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña en el Perú* (Instituto). Ministerio del Ambiente.
- INAIGEM. (2019). Caracterización geomorfológica, hidrométrica, vigilancia y monitoreo de calidad de agua de la subcuenca Huari Huari. In *Expedición científica Apolobamba* (Vol. 72, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2018.07.003>
- IPCC, W. G. (2001). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas*. 2. <http://www.ipcc.ch/%0Apdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/%0Asynthesis-spm-es.pdf>.
- Kohler, T., Wehrli, A., & Jurek, M. (2014). *Las Montañas y el Cambio Climático. Una preocupación mundial*. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/mountain_partnership/docs/SP_LOW_fullversion_Mountain_CC.pdf
- Laura, A. (2014). Vulnerabilidad al cambio climático en los ecosistemas de montaña. *Unc*, 423. http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/423/T_K10_R456_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Li, Z. Q., Shen, Y.-P., & Wang, F. (2007). Response of glacier melting to climate change at Urumqi Glacier. *Chinese*, 1, 29.
- López Moreno, Fontaneda S, B. J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- Lorca, P., R., S., & Sotillo, B. (2015). *Diagnóstico e identificación de los servicios ecosistémicos en el municipio de Santa Rosa Cauca y San Juan Nepomuceno, Colombia*.
- Lujano Laura, E., Hidalgo Sanchez, L. S., Tapia Aguilar, B., & Lujano Laura, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 18(2), 195–204. <https://doi.org/10.18271/ria.2016.200>
- Martínez, J. P. R. (2003). *Ecología de montaña* (Issue Octubre 2002, pp. 8–15).
- Mayo, A. (2016). Pérdida de glaciares por cambio climático en Perú. *Gestión Ambiental*. <http://ambiental.net/2016/08/perdida-de-glaciares-por-cambio-climatico-en-peru/>

- MINAM. (2019a). *Diversidad biológica* (Sexta).
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/360831/La_Biodiversidad_en_Cifras_final.pdf
- MINAM. (2019b). Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria Descriptiva. *Ministerio Del Ambiente*, 1–119. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- Moreno, J. (2002). El Proceso Análítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodologías y aplicaciones. *Recta Monográfico*, 1, 21–53.
- Naranjo, L. G., & Suárez, F. C. (2010). Determinación de la vulnerabilidad de ecosistemas andinos al cambio climático: ¿quién es vulnerable a qué? *WWF Colombia, August*, 4–6.
- Ndl, R. M. (2008). Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. *Analysis and Synthesis*, 198(Ecological Studies), 37–41.
- O'Brien, K. (2007). Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy*, 7(1), pp.73–88.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Informacion Geografica*.
<http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Quirós Carrera, T., & Palenque, J. Ú. (2013). Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa (Perú). *Guías de Espeleología Montaña, Doctor*, 51.
<https://cryoperu.files.wordpress.com/2014/12/quirc3b3s-2013-tfg-pariaqaqa.pdf>
- Reyes, A. M. L. D. (2014). *Vulnerabilidad al cambio climático en los ecosistemas de montaña* [Univercidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/423>
- Scarano, F. R. (2017). Ecosystem-based adaptation to climate change: concept, scalability and a role for conservation science. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(2), 65–73.
<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.05.003>
- Serrano, P., & Calderón, M. F. (2017). *Análisis geoespacial del cambio de las zonas de vida de Holdridge en la provincia del Guayas. February 2017*. <https://doi.org/10.18687/laccei2016.1.1.185>
- SRTM. (2013). huttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography. *NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global ,Distributed by OpenTopography*.
<https://doi.org/10.5069/G9445JDF> Accessed: 2020-11-04
- WB. (2014). World development indicators. *World Bank*. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0382-6_world_development_indicators%0A
- Yang, J. P., Ding, Y. J., Liu, S. Y., & Tan, C. P. (2015). Vulnerability of mountain glaciers in China to climate change. *Advances in Climate Change Research*, 6(3–4), 171–180.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.11.003>