

CASO PRÁCTICO

Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016

Pauca-Tanco, A. ^{1*}, Ramos-Mamani, C. ¹, Luque-Fernández, C.R. ¹, Talavera-Delgado, C. ^{1,2}, Villasante-Benavides, J.F. ^{1,2}, Quispe-Turpo, J.P. ^{1,3}, Villegas-Paredes, L. ^{1,2}

¹ Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental (ICIGA), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Calle San Agustín 108, Arequipa, Perú.

² Departamento Académico de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Daniel Alcides Carrión s/n La Pampilla, Arequipa, Perú.

³ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica San Pablo. Urb. Campiña Paisajista, Quinta Vivanco s/n, Arequipa, Perú.

Resumen: Los humedales altoandinos son considerados ecosistemas frágiles que proporcionan servicios ecosistémicos para el mantenimiento de la biodiversidad y economía andina, sin embargo, actualmente la amenaza global del cambio climático los pone en grave riesgo, es por ello que el objetivo de este estudio es determinar la variación espacio temporal y climática del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú), durante el periodo 1986-2016. Se obtuvieron escenas Landsat de la temporada seca de los años 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 y mediante técnicas de teledetección se calculó el área y el índice de vegetación (NDVI) de los humedales. Para la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, se realizó un análisis de medias móviles, tendencias lineales y se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall, finalmente mediante correlación y regresión se evaluó la interacción entre las variables. Los resultados muestran que el área de humedal se ha incrementado en razón de 12 ha/año. En cuanto al NDVI, se ha detectado un incremento de los valores promedio para el periodo evaluado, siendo 0,26 el umbral (promedio de valores mínimos). El análisis de los datos climáticos muestra que la precipitación, temperatura máxima y mínima se han incrementado en 32 mm/dec, 0,3 °C/dec y 0,6 °C/dec respectivamente, siendo significativos ($\alpha < 0,05$) la temperatura máxima y mínima. Por último, los análisis de correlación y regresión muestran que la relación área de humedal-precipitación, NDVI-precipitación y área de humedal-NDVI son significativas para $\alpha < 0,01$, en cambio, la relación área de humedal-temperatura y NDVI-temperatura fueron significativas para $\alpha < 0,05$.

Palabras clave: calentamiento global, cambio climático, Landsat, servicios ecosistémicos, teledetección.

Spatio temporal and climatic analysis of the high Andean wetland of Chalhuanca (Peru) during the period 1986-2016

Abstract: The high Andean wetlands are considered fragile ecosystems that provide ecosystem services for the maintenance of Andean biodiversity and economy. However, currently the global threat of climate change puts them at serious risk, which is why the objective of this study is to determine the spatial-temporal and climatic variation of the high Andean wetlands of Chalhuanca (Peru), during the period 1986-2016. Landsat scenes were

To cite this article: Pauca-Tanco, A., Ramos-Mamani, C., Luque-Fernández, C.R., Talavera-Delgado, C., Villasante-Benavides, J.F., Quispe-Turpo, J.P., Villegas-Paredes, L. 2020. Spatio temporal and climatic analysis of the high Andean wetland of Chalhuanca (Peru) during the period 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 55, 105-118. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>

* Corresponding author: gpauca@unsa.edu.pe

obtained during dry season in the years 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016, and using remote sensing techniques the area and vegetation index (NDVI) of the wetlands were calculated. For precipitation, maximum and minimum temperature, an analysis of moving averages, linear trends and the Mann-Kendall non-parametric statistical test was carried out, and finally the interaction between the variables was evaluated by using correlation and regression. The results show that the wetland area has increased by 12 ha/year. As for the NDVI, an increase of the average values for the evaluated period has been detected, being 0.26 the average of minimum values. Analysis of climate data shows that precipitation, maximum and minimum temperature have increased by 32 mm/dec, 0.3 °C/dec and 0.6 °C/dec respectively, with the maximum and minimum temperature being significant ($\alpha < 0.05$). Finally, correlation and regression analyses show that the wetland area-precipitation, NDVI-precipitation and wetland-NDVI relationships are significant for $\alpha < 0.01$, while the wetland-temperature and NDVI-temperature relationships were significant for $\alpha < 0.05$.

Key words: global warming, ecosystem services, climate change, Landsat, remote sensing.

1. Introducción

Los humedales son ecosistemas que sobreviven gracias a un aporte continuo o temporal de agua, pudiendo albergar una gran biodiversidad, entre las cuales se destacan plantas, aves e insectos (Anderson et al., 2011; Maldonado-Fonkén, 2014; Martínez et al., 2014; Jaramillo et al., 2015; Mitsch y Gosselink, 2015). En Perú se puede hallar humedales en sus tres grandes regiones (costa, altos Andes y selva), no obstante, a pesar de su gran importancia biológica, social y económica, no han recibido la atención que se merecen (Maldonado-Fonkén, 2014). Las amenazas generadas por la actividad antrópica como la construcción de infraestructuras, minería, sobrepastoreo y el cambio climático, ponen en grave riesgo su permanencia (Anderson et al., 2011; Dangles et al., 2017).

El cambio climático tiene como evidencias el aumento de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación a nivel planetario, aunque aún se presenta el debate de si este cambio es de origen antrópico o natural (Pérez et al., 2007; Robinson et al., 2007; Oñate-Valdivieso y Bosque, 2011). Para el caso de los Andes tropicales se ha registrado un aumento de 0,11 °C/década para el periodo 1939-1998 y 0,34 °C/década para el periodo 1978-1998 (Vuille y Bradley, 2000; Vuille y Keimig, 2004; Marengo et al., 2012).

Por otro lado, la precipitación no muestra un patrón muy claro. Sin embargo, en el contexto de subregiones, se manifiesta que hacia el norte de los 11°S se presenta un aumento de precipitación, en cambio hacia el sur de esta latitud se observa una disminución. Cabe destacar que las zonas

altas de los Andes serán las más afectadas, pues el calentamiento se presentará con mayor intensidad por encima de los 4000 m s.n.m. (Vuille y Keimig, 2004, Solman et al., 2008; Marengo et al., 2009; Urrutia y Vuille, 2009; Anderson et al., 2011). Lo antes mencionado es preocupante, pues conllevaría a la reducción de los glaciares, disminución de los cuerpos de agua, extinción y migración de algunas especies y en última instancia, se espera la pérdida de los servicios ecosistémicos andinos (Anderson et al., 2011).

Los humedales altoandinos, también llamados “bofedales” u “oconales”, se presentan en la zona alto andina, ocupando regiones húmedas o secas. En la región peruana, los humedales andinos localizados hacia el norte se sitúan sobre el páramo (zona húmeda) y hacia el sur sobre la puna (zona árida) (Maldonado-Fonkén, 2014). Los humedales andinos son vulnerables (Squeo et al., 2006; Anderson et al., 2011; Larsen et al., 2011; Young et al., 2011; Maldonado-Fonkén, 2014; Salvador et al., 2014; Mitsch y Gosselink, 2015), considerando al cambio climático como un factor crítico, pues podría producir cambios en la salinidad, pérdida de cobertura vegetal, incremento de emisiones de CO₂ y pérdida de biodiversidad (Anderson et al., 2011).

En la actualidad se cuenta con herramientas que pueden ayudar a interpretar la evolución o dinámica de los ecosistemas a través del tiempo y establecer relaciones con otros factores. El análisis de imágenes satelitales (o teledetección) se ha convertido en una herramienta potente para comprender e interpretar qué está sucediendo con

algunos ecosistemas a través de los años. Con estos datos se pueden realizar clasificaciones de la superficie estudiada, estimar áreas clasificadas, calcular índices que denotan cambios en la salud de la vegetación, determinar la humedad sobre el suelo, la cobertura de glaciares, entre otros. Por todo ello, la teledetección es una herramienta eficaz para detectar cambios, incluyendo los producidos por el cambio climático (Guerra y Ochoa, 2006; Berlanga et al., 2010; Ponce, 2010; Otto et al., 2011; Zorogastúa et al., 2011; García y Lleellish, 2012; Estrada et al., 2013; Mwitwa et al., 2013; Vuille, 2013; Dong et al., 2014; García y Otto, 2015; Aponte-Saravia et al., 2017; Dangles et al., 2017; Polk et al., 2017).

Actualmente los ecosistemas altoandinos están soportando una presión antrópica considerable, por lo que, sumado al cambio climático, su permanencia se ve en riesgo, siendo los humedales uno de los más afectados. Por todo ello, sus servicios ecosistémicos (regulación del flujo hídrico, sumidero de carbono, regulación del microclima) se verían en peligro. A pesar de la importancia de estos ecosistemas, pocos son los estudios en los cuales se explore sus cambios o respuestas frente a eventos de cambio climático, es por ello que esta investigación busca analizar cómo ha sido la

variación espacio temporal y climática del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú), durante el periodo 1986-2016.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El anexo de Chalhuanca se localiza a los 4338 m s.n.m., a los $15^{\circ}43'1,58''S$ - $71^{\circ}19'9,93''O$ (Figura 1) en el distrito de Yanque, provincia de Caylloma, (Arequipa, Perú). Presenta terrenos llanos y pequeñas elevaciones, los cuales se encuentran surcados por pequeñas quebradas. El suelo es un tanto arenoso-limoso, generalmente con afloraciones de rocas volcánicas y en menor cantidad por rocas sedimentarias de origen marino. El paisaje se encuentra dominado por formaciones vegetales de pajonal de puna, tolar y humedal. El clima es típicamente frío y seco, aunque la radiación durante el día puede ser muy alta. Las precipitaciones se presentan marcando la estacionalidad del lugar. La época húmeda se presenta en el verano austral con precipitaciones moderadas y, la época seca, en la cual las lluvias son esporádicas y se registran las temperaturas más bajas, se da durante el resto del año.

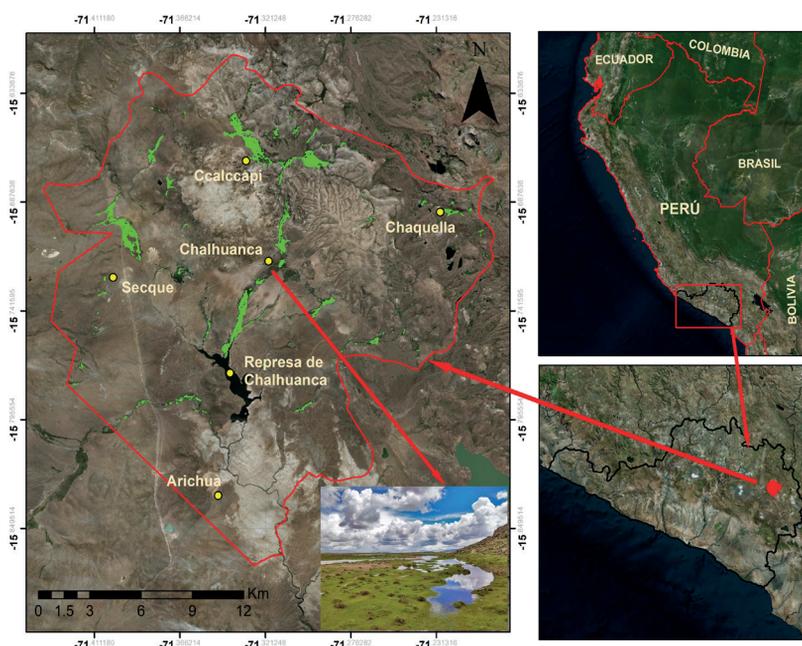


Figura 1. Ubicación de los bofedales del anexo Chalhuanca en el distrito de Yanque, Caylloma.

2.2. Zonas de muestreo

El anexo de Chalhuanca presenta alrededor de 19 bofedales. Para este estudio, fue seleccionado como zona de muestreo el más extenso con aproximadamente 12 km de longitud y 300 m de ancho. Se tomaron 24 áreas de 150×150 m, de las cuales 12 fueron ubicadas sobre el bofedal de manera sistemática, de tal manera que aproximadamente estén separadas por 1 km de distancia. El resto de áreas se situaron visualmente sobre los cuerpos de agua (en este caso la represa de Chalhuanca), debido a la carencia de un medio de transporte adecuado. Para ambos casos (bofedal y cuerpo de agua), de las 12 áreas seleccionadas, se tomaron al azar seis áreas para realizar el entrenamiento (clasificación supervisada) y seis para la validación mediante el índice de Kappa y exactitud global (García y Llellish, 2012; Congalton, 1991). La selección y observación de las áreas se realizó *in situ*, en dos salidas de campo el 3 y 10 de septiembre de 2016.

2.3. Obtención y procesamiento de imágenes satelitales Landsat

Se obtuvieron siete escenas Landsat del servidor United States Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov>), teniendo en cuenta el periodo seco (setiembre-octubre), de los años 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016, con baja cobertura de nubes para la zona (<5%) (Tabla 1). Todas las imágenes fueron corregidas radio y atmosféricamente con el programa ENVI (*ENVI-Environmental for Visualizing Images* v5.1. 2019), utilizando el módulo FLAASH (Aguilar et al., 2014).

La clasificación supervisada (máxima verosimilitud) de las coberturas de bofedal y cuerpos de agua, se realizó sobre la imagen Landsat 8 (OLI-TIRS) obtenida en el año 2016 con el programa ENVI,

teniendo en cuenta las bandas del rojo, azul, verde e infrarrojo cercano y las seis áreas tomadas en campo. De igual manera, para la validación se usaron las otras seis áreas restantes. Una vez realizada la clasificación supervisada y haber obtenido el coeficiente de Kappa y porcentaje de exactitud global, se extrajeron las estadísticas de la firma espectral para las coberturas evaluadas y, posteriormente, estas fueron usadas para clasificar las imágenes de los años anteriores. Las imágenes clasificadas para cada año fueron convertidos a polígonos, extrayendo la cobertura clasificada como bofedal, con lo que, se realizaron los cálculos de área y se estimó la tasa de variación del área de humedal.

Finalmente, se calculó el NDVI (Rouse et al., 1974; ESRI, 2017) de las escenas estudiadas. El ráster de NDVI obtenido para cada año, fue recortado con su respectivo polígono de bofedal (obtenido en la clasificación) y fueron calculadas sus estadísticas (desviación estándar y promedio/píxel).

2.4. Obtención y procesamiento de datos climáticos

Se obtuvieron datos diarios de precipitación y temperatura de la estación meteorológica Imata (Lat. 15°50'33,56" S Long. 71°5'26,22" O, Alt. 4475 m.s.n.m.), ubicada a 27 km de la localidad de Chalhuanca, a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Se optó por analizar un rango de 36 años (1980-2015), ya que la Organización Meteorológica Mundial, recomienda evaluar un mínimo de 30 años para reflejar la evolución climática de una localidad (Wang et al. 2011).

Para evaluar la tendencia de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, se realizó una suavización de datos utilizando medias móviles con rangos de 4 años y se hizo un

Tabla 1. Características de las imágenes obtenidas.

Año	Sensor	Fecha de adquisición	Elevación del sol (°)	Hora de imagen (GTM)	ID imagen
1986	L5 TM	14/09/1986	47,75495987	14:07:46	LT50030711986257XXX01
1991	L5 TM	14/10/1991	55,10375854	14:11:20	LT50030711991287CUB01
1996	L5 TM	09/09/1996	45,90519623	14:04:36	LT50030711996253XXX02
2001	L7 ETM+	01/10/2001	58,29874295	14:35:30	LE70030712001274CUB01
2006	L5 TM	21/09/2006	56,8829425	14:41:05	LT50030712006264COA01
2011	L5 TM	03/09/2011	50,63781494	14:35:51	LT50030712011246CUB00
2016	L8 OLI-TIRS	16/09/2016	56,99371453	14:47:23	LC80030712016260LGN01

ajuste lineal, de tal manera que la tendencia de la temperatura se expresa en grados centígrados por década (°C/dec), y la precipitación en milímetros por década (mm/dec). En cuanto a la estadística, se aplicó la prueba secuencial no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), utilizando el programa Climap 3.0 (Salvador, 2017), con un valor de significancia de 0,95. Esta prueba es usada con frecuencia en estudios climáticos y, sirve para demostrar si existen cambios significativos en las series de datos (Nourani et al., 2018). Se basa en el cálculo de la estadística t mediante la suma de k_i (Ecuación 1), teniendo que x_i es el rango n de observaciones ordenadas de menor a mayor, de tal manera que los términos precedentes ($j < i$) son inferiores a este ($x_j < x_i$).

$$t = \sum_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

$$E(t_i) = \frac{n^2 - n}{4} \quad (2)$$

Si se tiene un gran número de elementos para n , la distribución de t_i es casi normal bajo la hipótesis nula. El valor de esperanza $E(t_i)$ (expectativa) (Ecuación 2) y su varianza (Var) (Ecuación 3) están dadas por sus ecuaciones:

$$\text{Var}(t_i) = \frac{[n(n-1)(2n+5)]}{72} \quad (3)$$

En ese sentido, la prueba se reduce a la ecuación (4), la cual halla el valor del estadístico $u(t_i)$ mediante una prueba de significancia.

$$u(t_i) = \frac{[t_i - E(t)]}{\sqrt{\text{var } t}} \quad (4)$$

La secuencia $u(t_i)$ es presentada como una sucesión de los datos desde el principio hacia el final. Por otro lado, si se aplica el mismo proceso, pero de manera inversa en cuanto a la sucesión de datos (de atrás hacia delante), será representada por la estadística $u^*(t_i)$. La intersección de estas dos curvas, siempre y cuando se den en la zona de significancia, denotan un cambio importante. Por último, el “Tau” de Kendall es equivalente a la “r” de una regresión lineal, por lo tanto, valores cercanos a 0 indicarían un estado constante de los datos, valores positivos indican una tendencia de aumento y valores negativos a una disminución.

2.5. Relación de las variables NDVI, área de humedal, precipitación y temperatura

Se aplicó la correlación bivariada de Pearson con el programa SPSS (IBM Corp. v.23, 2015) para obtener el grado de asociación entre variables mediante el valor de “r” y el nivel de significancia ($\alpha < 0,01$ y $\alpha < 0,05$). Se elaboraron gráficos de dispersión entre las variables estudiadas y se aplicó un ajuste lineal, calculando el coeficiente de determinación (R^2).

3. Resultados

3.1. Caracterización de la variación climática

Se trabajó con un total de 39.447 datos de la estación meteorológica de Imata. El resultado de las medias móviles muestra un ajuste lineal con pendiente positiva para la precipitación, temperatura máxima y mínima (Figura 2), con incrementos de 32 mm/dec, 0,3 °C/dec y 0,6 °C/dec respectivamente.

La prueba no paramétrica de Mann-Kendall, indica que existe una variación significativa para la temperatura máxima y temperatura mínima, mas no para la precipitación (Figura 3). Por otro lado, las gráficas generadas tras la prueba de Mann-Kendall muestran que la precipitación presenta un incremento después del año 1985 hasta el año 1992, manteniéndose más o menos constante después del año 1995. En el caso de la temperatura máxima, es posible observar un aumento sostenido hasta el año 2003 (significativo a partir del año 1990), presentándose un cambio cerca de 1994. Después de 2003 la temperatura máxima se mantiene relativamente constante. Por otro lado, la temperatura mínima presenta un aumento desde el año 1985, haciéndose significativa a partir del año 1995, se presenta un cambio importante cerca de 2002 y, a partir del 2000, la variación no es muy evidente.

3.2. Variación espacio-temporal de la superficie de los bofedales de Chalhuanca

La exactitud global para la escena Landsat 8 (OLI-TIRS) de 2016, fue de un 95 % y el índice

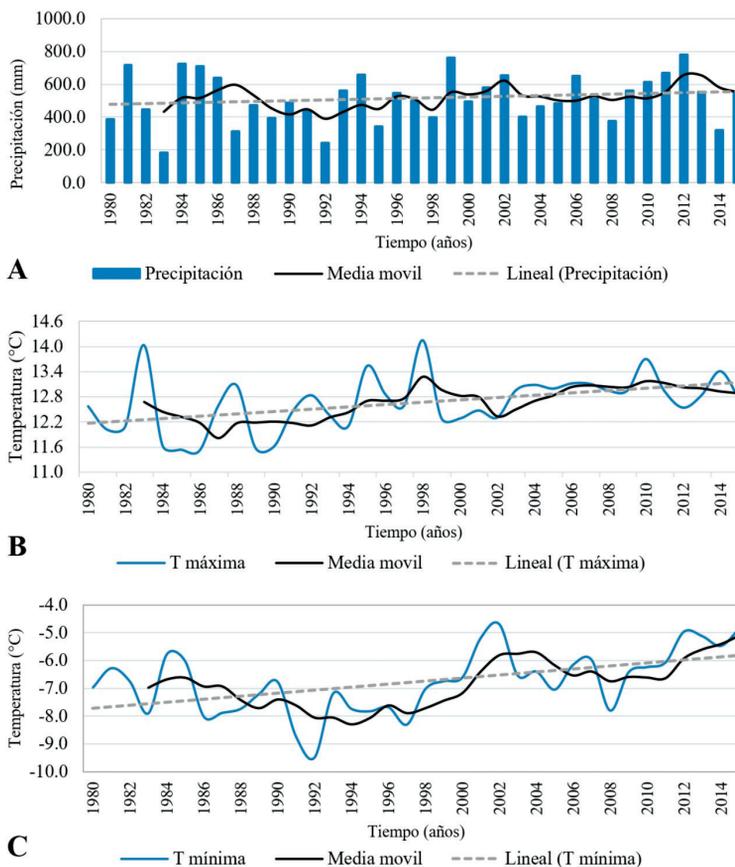


Figura 2. Registros a través del tiempo de, A. Precipitación anual, media móvil y ajuste lineal (1980-2015), B. Temperatura máxima anual, media móvil y ajuste lineal (1980-2015) y C. Temperatura mínima anual, media móvil y ajuste lineal (1980-2015).

Kappa fue de 0,9 (indicando una buena clasificación). Considerando la cobertura clasificada como humedal, se puede indicar que un 2,21 % del área del anexo de Chalhuanca corresponde a bofedal (882,52 ha).

Las áreas de bofedal encontradas para los años de 1986, 1991, 1996, 2001, 2005 y 2011, a través, de la firma espectral extraída de la imagen de 2016, fueron de 781,29; 367,02; 733,86; 1013,58; 946,08 y 940,14 ha respectivamente. Se puede observar que el año con menor área de bofedal corresponde a 1991 (367,02 ha), mientras que el 2001 presentó la mayor extensión (1013,58 ha) (Figura 4).

La tendencia general para el bofedal de Chalhuanca muestra un aumento del área cubierta por humedales para el periodo de evaluación, encontrándose un incremento de 12 ha/año (Figura 5). Por otro lado, la tasa de variación de cambio (Tabla 2) muestra que en el periodo 1986-1991 se presenta una disminución de 53,02 %, durante el segundo y tercero existe un incremento de 138,07 %, ya hacia los últimos tres periodos (2001-2016) se presentó una disminución del 13,42 %.

3.3. Variación del NDVI en los bofedales

El ajuste lineal para los datos de NDVI promedio muestra un incremento de los valores a través de

Tabla 2. Tasa de cambio de la superficie ocupada por los bofedales de Chalhuanca durante los periodos evaluados.

Periodos	1986-1991	1991-1996	1996-2001	2001-2006	2006-2011	2011-2016
% de tasa cambio	-53,02	99,95	38,12	-6,66	-0,63	-6,13

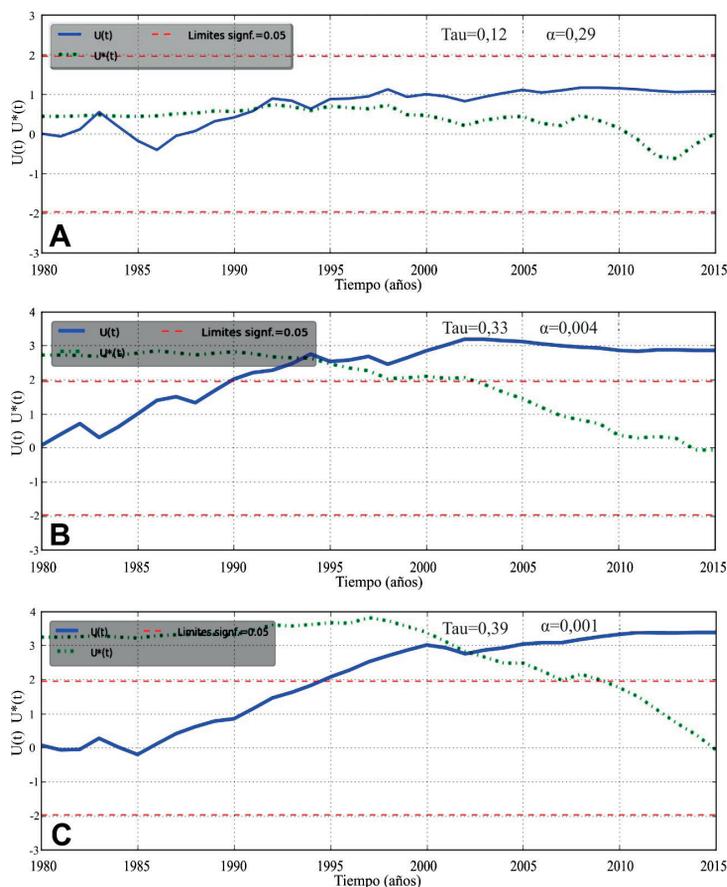


Figura 3. A. Prueba secuencial de Mann-Kendall para la precipitación, B. Prueba secuencial de Mann-Kendall para la temperatura máxima y C. Prueba secuencial de Mann-Kendall para la temperatura mínima.

los años estudiados (Figura 4). Los valores mínimos de NDVI se mantuvieron entre los 0,26-0,29, siendo el valor umbral en promedio 0,26. En general, los valores del NDVI muestran resultados variables entre distintos periodos, es así que, entre los años 1986-1991 se produce una disminución en el valor promedio del NDVI. Luego en el periodo 1991-2001 muestra un aumento, entre los años 2001-2011 un descenso y, por último, hacia el 2016 se vuelve a producir un incremento.

3.4. Análisis de correlación de variables

El análisis entre las variables área de bofedal, precipitación y temperatura media, muestra que existe una correlación significativa y alto coeficiente de determinación entre área de bofedal y precipitación ($r=0,92$; $\alpha=0,002$; $R^2=0,85$). En cambio, la correlación entre el área de bofedal y temperatura media apenas es significativa, siendo

el coeficiente de determinación más bajo ($r=0,68$; $\alpha=0,047$; $R^2=0,46$) (Figura 7). Por otro lado, el NDVI promedio en relación a la precipitación fue significativa y presentó un coeficiente de determinación alto ($r=0,89$; $\alpha=0,003$; $R^2=0,80$) y la relación entre NDVI promedio y temperatura media solo fue significativa a nivel de $\alpha<0,05$, con un bajo coeficiente de determinación ($r=0,74$; $\alpha=0,028$; $R^2=0,48$) (Figura 8). Por último, la relación entre área de bofedal y NDVI promedio muestran una correlación significativa y alto coeficiente de determinación ($r=0,96$; $\alpha=0,001$; $R^2=0,94$) (Figura 9).

4. Discusión

Los resultados de la clasificación de la cobertura vegetal parecen ser óptimos, ya que, los valores de exactitud global e índice de Kappa son aceptables. Trabajos como los de García y Llellish

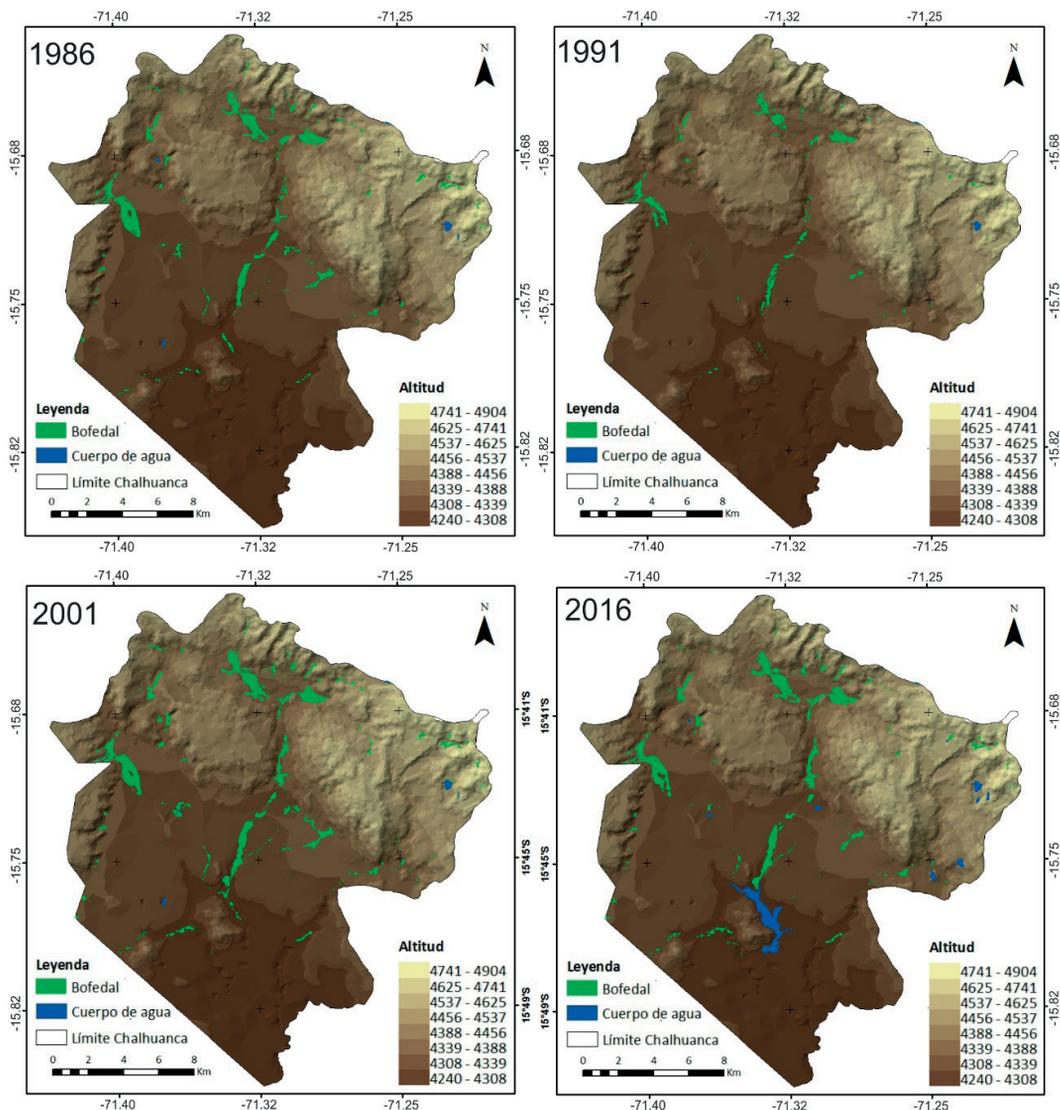


Figura 4. Mapas mostrando los bofedales (verde) y cuerpos de agua (azul) en el anexo de Chalhuanca para los años 1986, 1991, 2001 y 2016.

(2012), García y Otto (2015) y Parra et al. (2010), también encuentran valores aceptables al analizar humedales altoandinos, no obstante, la exactitud de la clasificación parece estar influenciada por la singular firma espectral de la vegetación de humedal (Ozemesi y Bauer, 2002), nivel de resolución y características de las bandas de los sensores. Por ejemplo, Jara et al. (2019) al realizar una comparación entre imágenes satelitales de libre acceso como Landsat, (30 m de resolución) y Sentinel-2 (10 m), evidenciaron que la cuantificación e identificación de coberturas en imágenes Sentinel-2 son más eficientes, no obstante, el uso

de imágenes Landsat para análisis multi-temporales resulta ventajoso gracias a sus series lanzadas desde 1972 (Sentinel-2 presenta imágenes desde 2015). En otras palabras, es factible analizar imágenes satelitales con aproximadamente 45 años de antigüedad.

Las variaciones en la superficie de los bofedales muestran una tendencia al incremento, lo que concuerda con otros estudios como los de Aponte-Saravia et al. (2017), Polk et al. (2017), Dangles et al. (2017) y Pekel et al. (2016). Los resultados muestran una correlación significativa entre la

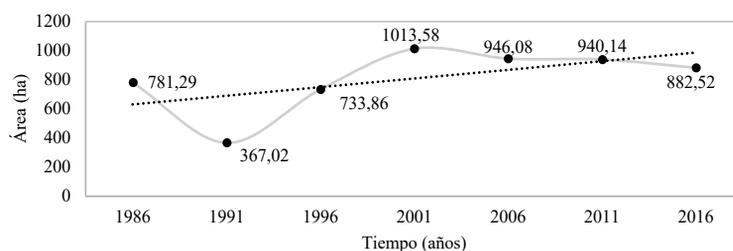


Figura 5. Variación del área de los bofedales de Chalhuanca, desde 1986 a 2016.

precipitación y el área de bofedal, asumiendo la existencia de una relación directa entre ambas variables, no obstante, la correlación estrictamente no indica causalidad, y es que, según el análisis realizado, la precipitación no muestra un incremento estadístico significativo, por lo que se podría pensar opcionalmente en otras variables, que de alguna manera se relacionan con el aumento del área y más aún en la época seca (Dangles et al., 2017; Polk et al., 2017; García y Otto, 2015; Vuille, 2013).

La temperatura y el área de bofedal no muestran una relación muy clara estadísticamente ($\alpha=0,047$), no obstante, existen algunos patrones, por ejemplo, se puede observar que, hacia el año 1991, el incremento de temperatura máxima es significativo ($\alpha<0,05$ o $0,01$) y luego sigue incrementándose hasta el 2001 y a partir de este año comienza a descender. Por otro lado, el área de bofedal hacia 1991 es mínima y se incrementa notablemente hasta el año 2001, donde después comienza a descender ligeramente. En este caso, es posible que la temperatura esté influyendo de alguna manera en el aumento de la dotación de agua causado por un incremento en la desglaciación (Seehaus et al., 2019; Dangles et al., 2017; Polk et al., 2017; Medina y Mejía, 2014; Rabatel et al., 2013; Baraer et al., 2012).

Posiblemente la desglaciación en la zona de estudio se ha venido produciendo desde años anteriores a esta evaluación, pero puede que desde el año 1991, se haya intensificado generando un aumento en la disponibilidad del recurso hídrico en la época seca, considerando lo afirmado por García y Otto (2015), que los humedales durante la época seca son dependientes de los glaciares. Cabe mencionar que aún es necesario realizar más investigaciones para validar estos supuestos, sin embargo, ya se han realizado algunos estudios en los cuales se remarca la relación entre glaciares y humedales altoandinos (Dangles et al., 2017; Polk et al., 2017; Pekel et al., 2016; García y Otto, 2015; Benavides et al., 2013).

El NDVI puede ser usado para clasificar ciertos tipos de vegetación. En este caso, los bofedales pueden ser diferenciados fácilmente, ya que, al encontrarse en zonas inundadas, sus umbrales destacan sobre los otros tipos de vegetación circundantes (Aponte-Saravia et al., 2017; Mazzarino y Finn, 2015). En nuestro estudio se ha encontrado un umbral promedio de 0,26, coincidiendo con Aponte-Saravia et al. (2017) y parcialmente con Mazzarino y Finn (2015) y Otto y et al. (2011).

El ajuste lineal para los datos de NDVI promedio muestra un incremento con los años, y su

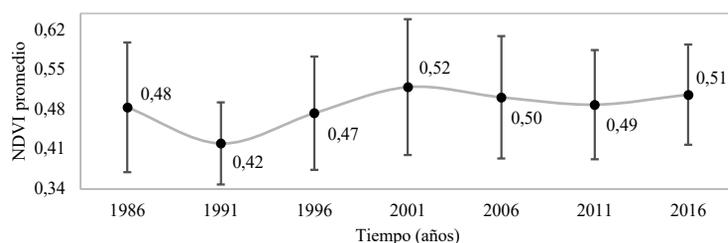


Figura 6. Valores de NDVI promedio/píxel y barras de desviación estándar para el periodo de estudio.

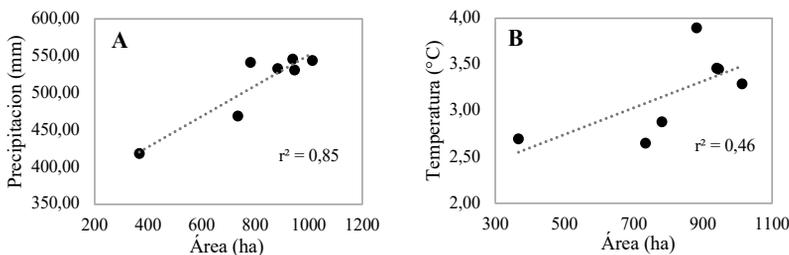


Figura 7. Gráficos de dispersión entre las variables A. Precipitación y área de humedal, y B. Temperatura y área de humedal.

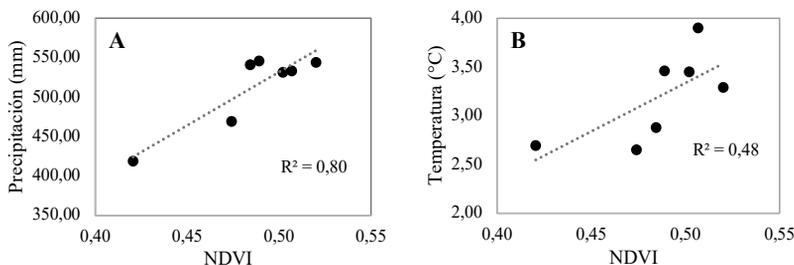


Figura 8. Gráficos de dispersión entre las variables A. Precipitación y NDVI promedio, y B. Temperatura media y NDVI promedio.

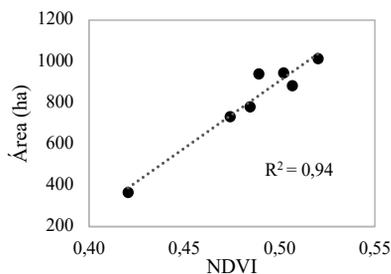


Figura 9. Gráfico de dispersión entre las variables área de humedal y NDVI promedio.

correlación con la precipitación es significativa ($\alpha < 0,01$), no obstante, de acuerdo a Mazzarino y Finn (2016), al no presentarse un incremento estadísticamente significativo en la precipitación, no es posible explicar el incremento de NDVI promedio con esta variable. Por otro lado, está claro que el NDVI depende de la cantidad de recurso hídrico disponible para la vegetación (Aponte-Saravia, 2017; Mazzarino y Finn, 2016; García y Otto, 2015; Otto et al., 2011), por lo que de alguna manera, la dotación hídrica hacia los bofedales se debe estar incrementando, de hecho, se observa que el NDVI promedio guarda una relación estrecha con la variación del área de bofedal, por lo que, posiblemente este índice esté respondiendo a la dotación hídrica recibida, tal como reportan las investigaciones de Dangles et al. (2017) y García y

Otto (2015). Aún faltan estudios para comprender mejor la interacción entre la variación del NDVI y el cambio climático.

Los cambios en los patrones de precipitación y aumento de la temperatura se presentan como una tendencia general, lo cual es evidenciado con pruebas estadísticas (Oñate-Valdivieso y Bosque, 2011; Vuille et al., 2003). En lo común, las tendencias de precipitación y temperatura, estudiadas por distintos autores, apuntan a que se están produciendo cambios. Específicamente, para los Andes tropicales se señala que están experimentando un calentamiento con incrementos significativos (Vuille y Bradley, 2000; Vuille y Keimig, 2004; Marengo et al., 2011; Medina y Mejía, 2014; Vuille et al., 2015).

Esta investigación, ha encontrado que la precipitación ha incrementado, aunque no con un aumento significativo. Vuille et al., (2018) indica que las tendencias de precipitación en los Andes no son muy evidentes, por otro lado, Haylock et al. (2006) menciona que se está presentando un aumento de la precipitación hacia el norte de Perú y una disminución hacia el sur. No obstante, Skansi et al. (2013), Castino et al. (2017) y Vuille et al. (2018), manifiestan que las variaciones de precipitación están ocurriendo en la periodicidad y presencia, cada vez mayor, de eventos extremos, pues en los últimos años se ha observado que la precipitación, que normalmente se presentaba distribuida en los meses de verano, se está restringiendo a periodos más cortos, según los datos de la estación meteorológica de Imata.

Con relación a la temperatura máxima y mínima, este estudio muestra una tendencia hacia el aumento y a la vez significativa estadísticamente, con un aumento de 0,3 °C/dec para la temperatura máxima y 0,6 °C/dec para la temperatura mínima. Aunque se manifiesta un aumento de 0,34 °C/dec en general para los Andes durante los últimos 20 años (Vuille y Bradley 2000; Marengo et al., 2011), los valores hallados son relativamente parecidos. No obstante, se tiene que tener en cuenta que los análisis de otros autores presentan el análisis de más de 10 estaciones meteorológicas, donde algunas presentaban tendencias negativas, incluso los eventos del Niño-Oscilación del Sur (ENOS), los cuales generan una menor precipitación y aumento de temperatura en la zona altoandina (Garreaud, 2009), puede influir en los valores finales de tendencia. También, se puede mencionar que al igual que Vuille y Bradley (2000), Marengo et al. (2011) y Anderson et al. (2011), la serie de temperaturas mínimas son las que están presentando un incremento más pronunciado.

El calentamiento global es evidente y ya está mostrando sus efectos negativos hacia la biodiversidad (Báez et al., 2015; Anderson et al., 2011; Larsen et al., 2011), y como se predice, las zonas más altas de los Andes tropicales serán las más afectadas, por lo que, en el caso de los humedales, se espera una pérdida en su cobertura, biodiversidad y sus servicios ecosistémicos. En la actualidad, es probable que el incremento del área de estos ecosistemas responda a una mayor dotación de agua recibida debido a la desglaciación (Dangles

et al., 2017) provocado por el aumento de la temperatura, sin embargo, tras agotarse la fuente de agua proveniente de estos glaciales, los bofedales tenderán a disminuir y desaparecer, con la consecuente pérdida de todos los recursos y servicios ecosistémicos que estos ofrecen.

5. Conclusiones

Para el periodo 1986-2016, el área de bofedal del anexo de Chalhuanca presenta un incremento de 12 ha/año, donde la tasa de mayor crecimiento (138,07 %) se presentó en el periodo 1991-2001. Los valores de NDVI promedio muestran un aumento para el periodo evaluado, y también se estableció que el valor umbral para determinar bofedales en la zona corresponde a 0,26. Las variables climáticas estudiadas para el periodo evaluado, presentan un incremento, siendo significativas solo la temperatura máxima y mínima. Se ha encontrado que la precipitación presenta un aumento de 32 mm/dec, mientras que la temperatura máxima y mínima presentan un aumento de 0,3 °C/dec y 0,6 °C/dec, respectivamente. Los análisis de correlación y determinación muestran una estrecha relación entre las variables área de bofedal-precipitación ($r=0,92$; $R^2=0,85$), NDVI-precipitación ($r=0,89$; $R^2=0,80$) y NDVI-área de bofedal ($r=0,96$; $R^2=0,94$). Por otro lado, la relación área bofedal-temperatura y NDVI-temperatura fueron solo significativas, no obstante, al no ser estadísticamente significativo el aumento de la precipitación, no se puede establecer una relación clara si no que probablemente, el aumento de la dotación de agua para los bofedales durante le época seca sea debido a un proceso de desglaciación asociado al aumento de la temperatura. Aún es necesario estudiar algunas variables complementarias para establecer una relación de causalidad más consolidada

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) por contrato N° 047-2016-UNSA dentro del proyecto: “Servicios ecosistémicos de los humedales altoandinos y su contribución en la mitigación de los efectos del cambio climático: estudio de caso”, según contrato de subvención, también, se agradece al Tambo Chalhuanca (Programa Nacional

PAIS – Midis), a los pobladores de la localidad de Chalhuanca y a la jefatura de la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca (Res. Jef. RNSyAB 002-2018-SERNANP-DGANP-JEF).

Referencias

- Aguilar, H., Mora, R., Vargas, C. 2014. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39-59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Anderson, E., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E., Ruiz, D. 2011. Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes tropicales. En Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P. y Tiessen, H. (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp 1-22). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Aponte-Saravia, J., Ospina, J.E., Posada, E. 2017. Caracterización y modelamiento espacial de patrones en humedales alto andinos, Perú, mediante algoritmos, periodo 1985-2016. *Revista Geográfica*, 158, 149-170.
- Báez, S., Jaramillo, L., Cuesta, F., Donoso, D. 2015. Effects of climate change on Andean biodiversity: a synthesis of studies published until 2015. *Neotropical Biodiversity*, 1(2), 181-194. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1248710>
- Baraer, M., Mark, B., MacKenzie, J., Comdon, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C., Gomez, J., Rathay, S. 2012. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Benavides, J., Vitt, D., Wierder, K. 2013. The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of *Distichia muscoides* cushion bogs in the high-elevation tropical Andes of Colombia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1627-1635. <https://doi.org/10.1002/2013JG002419>
- Berlanga, C., García, R., López, J., Ruiz, A. 2010. Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas*, 72, 7-22.
- Castino, F., Bookhagen, B., Strecker, M. R. 2017. Rainfall variability and trends of the past six decades (1950–2014) in the subtropical NW Argentine Andes. *Climate Dynamics*, 48(3-4), 1049-1067. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3127-2>
- Congalton R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zevallos, G., Soruco, A., Jacobsen, D., Anthelme, M. 2017. Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes. *Plos One*, 12(5). e0175814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175814>
- Dong, Z., Wang, Z., Liu, D., Song, K., Li, L., Jia, M., Ding, Z. 2014. Mapping Wetland Areas Using Landsat-Derived NDVI and LSWI: A Case Study of West Songnen Plain, Northeast China. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(3), 569-576. <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0357-1>
- ENVI - Environment for Visualizing Images v5.3. 2019. Harris Geospatial Solutions. Recuperado en setiembre de 2019, disponible en: <https://www.harrisgeospatial.com/>
- Estrada, F., Barba, E., Ramos, R. 2013. Cobertura Temporal de los Humedales en la Cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 29(2), 141-151.
- García, E., Llellish, M. 2012. Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. *Revista de Teledetección*, 38, 92-118. Recuperado en septiembre de 2019, disponible en: http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_09.pdf
- García, E., Otto, M. 2015. Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de Cuenca del Río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 115-125. <https://doi.org/10.21704/rea.v14i1-2.88>
- Guerra, V., Ochoa, S. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geográficas*, 59, 7-25.
- Haylock, M., Peterson, T., Alves, L., Ambrizzi, T., Anunciacao, M., Baez, J., ... Vincent, L. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19, 1490-1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>
- IBM Corp. Released 2015. IBM SPSS Statistics for Windows, v23.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Jara, C., Delegido, J., Ayala, J., Lozano, P., Armas, A., Flores, V. 2019. Estudio de bofedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2. *Revista de teledetección*, 53, 45-57. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11715>

- Jaramillo, U., Cortés, J., Flórez, C. 2015. *Colombia Anfibia. Un país de humedales*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humbolt.
- Kendall, M.G. 1975. *Kendall Rank Correlation Methods*. London: Griffin.
- Larsen, T., Brehm, G., Navarrete, H., Franco, P., Gómez, H., Mena, J., Morales, V., Argollo, J., Blacutt, L., Canhos, V. 2011. Desplazamientos de los rangos de distribución y extinciones impulsados por el cambio climático en los Andes tropicales: síntesis y orientaciones. En Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P. y Tiessen, H. (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp. 57-82). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Mann, H.B. 1945. Non parametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Maldonado-Fonkén, M. 2014. An introduction to the bofedales of the peruvian high Andes. *Mires and Peat*, 15(4), 1-13.
- Marengo, J., Pabón, J., Díaz, A., Rosas, G., Avalos, G., Montealegre, E., Villacis M., Solman S. M., Rojas, M. 2011. Cambio climático: evidencias y futuros escenarios en la región andina. En Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P. y Tiessen, H. (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp. 131-150). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Martínez, A., Rodríguez, J., Cabrera, A. 2014. Los paisajes de humedales, marco conceptual y aspectos metodológicos para su estudio y ordenamiento. *Mercator (Fortaleza)*, 13(2), 169-161. <https://doi.org/10.4215/RM2014.1302.0012>
- Mazzarino, M., Finn, J. T. 2015. An NDVI analysis of vegetation trends in an Andean watershed. *Wetlands Ecology and Management*, 24, 623-640. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9492-0>
- Medina, G., Mejía, A. 2014. Análisis multitemporal y multifractal de la desglaciación de la cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecología Aplicada*, 13(1), 35-42. <https://doi.org/10.21704/rea.v13i1-2.452>
- Mitsch, W., Gosselink, J. 2015. *Wetlands*. New Jersey: John Wiley y Sons, Inc.
- Mwita, E., Menz, G., Misana, S., Becker, M., Kisanga, D., Boehme, B. 2013. Mapping small wetlands of Kenya and Tanzania using remote sensing techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.010>
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque, J. 2011. Estudio de tendencias climáticas y generación de escenarios regionales de cambio climático en una cuenca hidrográfica binacional en América del Sur. *Estudios Geográficos*, 270(27), 147-172. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201107>
- Otto, M., Schreder, D., Richters, J. 2011. Hydrology differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology Earth System Science*, 15, 1713-1727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>
- Ozesmi, S.L., Bauer, M.E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetland Ecology and Management*, 10(5), 381-402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Parra, A. Hernández, T., Francisco, L. 2010. Identificación y delimitación de humedales lénticos en el valle alto del río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 78-88.
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pérez, M., Llorca, J., Sanz, J. 2007. Evolución de la temperatura superficial desde el siglo XVIII. *Nimbus*, 19-20, 233-272.
- Polk, M., Young, K., Baraer, M., Mark, B., McKenzie, J., Bury, J., Carey, M. 2017. Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Ponce, B. 2010. *Detección y análisis del cambio de uso del suelo en la zona centro - norte de la provincia de Capitán Prat, XI Región periodo 1984-2003* (Tesis de grado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J., ... Wagnon, P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7, 81-102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

- Robinson, A. B., Robinson, N. E., Soon, W. 2007. Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 12, 79-90.
- Salvador, F., Moneris, J., Rochefort, L. 2014. Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15(3), 1-17.
- Salvador, M. 2017. Climap–aplicativo para análise de dados climáticos-versão 3.0. *Revista Brasileira de Climatologia*, 13(20), 349-374. <https://doi.org/10.5380/abclima.v20i0.46351>
- Skansi, M.M., Brunet, J., Sigró, E., Aguilar, J., Groening, O., Bentancur, Y., ... Jones, P. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>
- Solman, S., Nunez, M., Cabre, M.F. 2008. Regional climate change experiments over southern South America. I: Present Climate. *Climate Dynamics*, 30, 533-552. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0304-3>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lipp, S., Cochachin, A., Braun, M. 2019. Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13, 2537-2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Squeo, F., Warner, B., Aravena, R., Espinoza, D. 2006. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79, 245-255. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010>
- Urrutia, R., Vuille, M. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, 114, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>
- Young, B., Young, K., Josse, C. 2011. Vulnerabilidad de los ecosistemas de los Andes tropicales al cambio climático. En Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P. y Tiessen, H. (Eds.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp. 195-208). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Vuille, M., Bradley, R.S. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27, 3885-3888. <https://doi.org/10.1029/2000GL011871>
- Vuille, M., Bradley, R., Werner, M., Keimig, F. 2003. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, 59, 75-99. <https://doi.org/10.1023/A:1024406427519>
- Vuille, M., Keimig, F. 2004. Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. *Journal of Climatology*, 17, 3334-3348. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C3334:IVOSC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C3334:IVOSC%3E2.0.CO;2)
- Vuille, M. 2013. *Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes*. Banco Interamericano de Desarrollo Unidad de Salvaguardias Ambientales. Nota técnica: No. IDB-TN-515.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Casimiro, W., Cáceres, B. 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 3745-3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... Sicart, J. 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth Sciences Review*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Zorogastúa, P., Quiroz, R., Garatuza, J. 2011. Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con Imágenes de satélite en Piura-Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1), 13-22. <https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.409>