

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1030>

Variabilidad climática y cambios de cobertura de la tierra en los caudales de cabecera de Cuenca del río Cabanillas

Climatic variability and land cover changes in the headwater flows of the Cabanillas river basin

Teófilo Chirinos

tchirinos@unap.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-5681-384X>

Universidad Nacional del Altiplano

Puno – Perú

Artículo recibido: 09 de agosto de 2023. Aceptado para publicación: 23 de agosto de 2023.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue determinar la incidencia de la variabilidad climática y los cambios de cobertura de la tierra en la disponibilidad de los caudales naturales de la cabecera de la cuenca del río Cabanillas. Para ello, se consideró como área de estudio las subcuencas de los ríos Verde e Ichocollo, afluentes del río Cabanillas; donde se determinó el efecto de El Niño Oscilación Sur (ENOS) en la precipitación, temperatura y caudales mensuales por el método de las anomalías, a partir de datos de 1964-2016 del SENAMHI; así también, se analizó los cambios de cobertura de la tierra desde mapas generados en el ArcGis a partir de imágenes satelitales; y finalmente, se determinó el efecto de las variaciones de la cobertura de la tierra en los caudales naturales con el modelo hidrológico SWAT, utilizando imágenes satelitales sobre tipo de suelo de la FAO y de cobertura de la tierra del 2001 y 2016 del Servicio Geológico de Estados Unidos. Los resultados nos indican que el ENOS influye en la disminución de la precipitación y de los caudales naturales, así como en la variabilidad de las temperaturas; asimismo, no se observaron variaciones importantes en la cobertura de los suelos, y el efecto del cambio de cobertura de la tierra en los caudales naturales es poco relevante. Por lo que concluimos, que la presencia de ENOS afecta las condiciones de clima y disponibilidad hídrica de la cabecera de la cuenca del río Cabanillas.

Palabras clave: caudales naturales, cobertura de la tierra, el niño oscilación sur (enos), indicadores de alteración hidrológica (iha), swat, variabilidad climática


Abstract

The objective of this research was to determine the impact of climate variability and land cover changes on the availability of natural streamflow in the headwaters of the Cabanillas River basin. The study area included the sub-basins of the Verde and Ichocollo rivers, which are tributaries of the Cabanillas River. The research focused on assessing the effect of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on precipitation, temperature, and monthly streamflow using anomaly analysis based on data from 1964 to 2016 provided by SENAMHI. Additionally, changes in land cover were analyzed using maps generated with ArcGIS from satellite imagery. Finally, the SWAT hydrological model was used to determine the impact of land cover variations on natural

streamflow, using satellite images of soil types from the FAO and land cover data from 2001 and 2016 provided by the United States Geological Survey.

The results indicate that ENSO influences a decrease in precipitation and natural streamflow, as well as temperature variability. However, no significant variations in land cover were observed, and the effect of land cover changes on natural streamflow was found to be insignificant. Therefore, it can be concluded that the presence of ENSO affects the climate conditions and water availability in the headwaters of the Cabanillas River basin.

Keywords: natural flows, land cover, el niño southern oscillation (enso), indicators of hydrological alteration (iha), swat, climate variability

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons . 

Como citar: Chirinos, T. (2023). Variabilidad climática y cambios de cobertura de la tierra en los caudales de cabecera de Cuenca del Río Cabanillas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 4(2), 6004–6024. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1030>

INTRODUCCIÓN

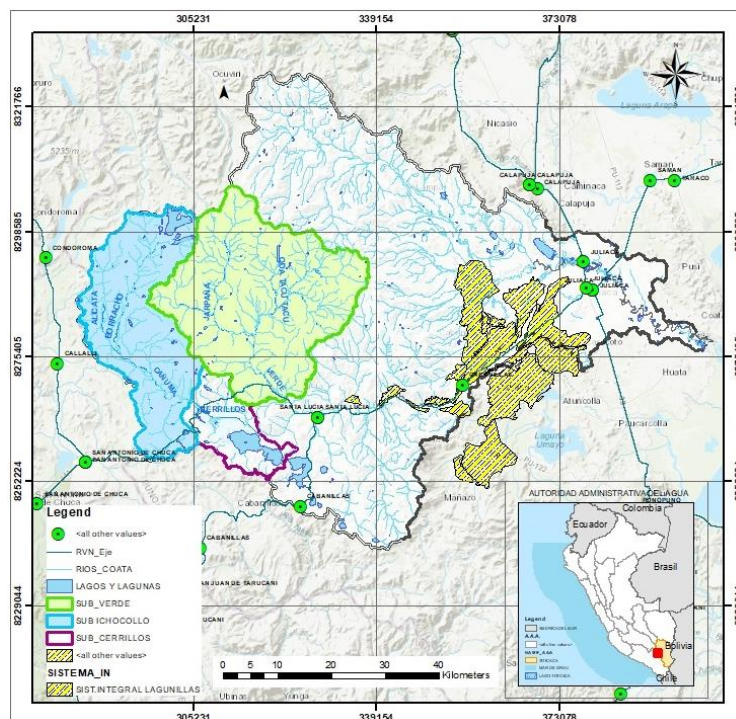
En base a Alba et al. (2016), consideramos que la mayoría de los ríos presentan algún grado de deterioro en la calidad y cantidad de sus aguas, debido a factores climáticos, físicos y antrópicos (Valdivieso, 2023), que generan consecuencias sociales y ecológicas negativas en su entorno (Alba et al., 2016). En relación a los factores climáticos, Valencia et al. (2014) y la Autoridad Nacional del Agua (2021) señalan que el cambio climático y la variabilidad climática afectan la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas; mientras que, sobre los factores físicos Ochoa-Tocachi et al. (2016) señalan que los cambios en la cobertura y uso actual de la tierra son la principal causa de la alteración hidrológica en los Andes tropicales. Por lo tanto, es necesario establecer el grado de afectación o deterioro en cada situación específica y desarrollar estrategias adecuadas (Bedoya et al., 2010), previa identificación y cuantificación de los factores involucrados.

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones de los componentes climáticos de una región a lo largo del tiempo, debido a factores naturales y antrópicos. Según Bedoya et al. (2010) uno de los factores naturales más importantes de la variabilidad climática y de los recursos hídricos es El Niño Oscilación Sur (ENOS); cuya ocurrencia en el altiplano peruano ha sido confirmada por Lavado-Casimiro et al. (2014). En vista de ello, en forma preliminar y con datos hidrometeorológicos de 1964-2016 del área de estudio, se determinó que el caudal natural del río Verde y la precipitación mostraron una alta variabilidad y una tendencia decreciente; mientras que, la temperatura máxima una tendencia creciente, similar a los hallazgos de Herrera (2015) y Arizaca (2013) respectivamente. Además, se reportaron cambios en la cobertura y uso de la tierra en 18,431 ha. de la cuenca del río Coata (Velásquez, 2019). Por lo tanto, es necesario determinar si el fenómeno ENOS y los cambios en la cobertura de la tierra en la cabecera de la cuenca del río Cabanillas influyen en la disponibilidad de los caudales naturales de los ríos Verde e Ichocollo, tributarios de dicha cuenca. Esto proporcionará información complementaria para fortalecer las estrategias destinadas a garantizar la seguridad hídrica en las 30,844 ha. de riego del Sistema Integral Lagunillas y el abastecimiento poblacional de las ciudades de Puno, Juliaca y Lampa, que dependen de dicho subsistema hidrográfico (MINAGRI/PEBLT, 2014).

La cabecera de la cuenca del río Cabanillas tiene una extensión de 1568.09 km², e incluye las subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde, que forman el río Cabanillas, afluente principal del río Coata, que a su vez desemboca en el Lago Titicaca. Políticamente se localiza en los distritos de Paratía y Santa Lucía, provincia de Lampa, en la Región Puno, Figura 1. La altitud del área de estudio varía desde los 4,137 a 5,504 m.s.n.m, y presenta un clima semifrío lluvioso (SENAMHI, 2019), con una precipitación mensual de 59 mm y temperaturas que fluctúan entre -10.5 y 19.1°C. En cuanto a la capacidad mayor de uso de la tierra, la mayor parte de la superficie corresponde a tierras de protección (75%), seguida a tierras aptas para la producción de pastos de baja calidad agrostológica y bofedales (19%), cuerpos de agua (4%) y tierras desnudas (2%). En ella se encuentran 47 pequeños asentamientos humanos, con una población total de 3,857 habitantes (INEI, 2018).

Figura 1

Localización de las Subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde



Entre los antecedentes tenemos el estudio de Bedoya et al. (2010), que en el marco del Estudio Nacional del Agua 2010, evaluaron las alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático de Colombia, debido a la alta incidencia de El Niño Oscilación del Sur en los eventos hidrológicos extremos y la oferta hídrica. Este estudio, actualizado al 2022, ha permitido el desarrollo de políticas y estrategias de gestión y adaptación compatibles con la variabilidad climática local. En esta misma línea, Delgado (2011) llevó a cabo un estudio en la cabecera del río Llobregat (NE España), donde evaluó el efecto de la variabilidad climática y los cambios de cubierta del suelo en el balance hidrológico de sus subcuencas de cabecera, encontrando que el aumento de la cobertura forestal trajo consigo la disminución de la escorrentía superficial. Además, tenemos los estudios de Hernández-Bedolla et al. (2019), Beltrán (2018) y Escobar (2019), quienes basados en registros hidroclimáticos y el uso de modelos hidrológicos (HBV, WEAP y SWAT), tratan de explicar el efecto de la variabilidad climática en los caudales naturales.

Entre de las investigaciones nacionales, Bello (2019) se propuso caracterizar y cuantificar los cambios hidrológicos antes y después de la construcción de la presa de almacenamiento Sibinacocha en el río Vilcanota, utilizando los métodos de Ecoflujo e Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA). Así también, Jiménez (2021) analizó la disponibilidad hídrica en diferentes pisos altitudinales de la cuenca del río Tambo con el modelo hidrológico SWAT, previo análisis de la variabilidad climática del período 1976–2015 con el R-Climdex. Finalmente, SENAMHI (2014) evaluó las variaciones de los caudales del río Rímac del período 1920–1960, utilizando los métodos de Ecoflujo e Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA).

Por lo tanto, es necesario estudiar la influencia de El Niño Oscilación Sur y la variación de la cobertura de la tierra sobre la disponibilidad de los caudales naturales en la cabecera de cuenca del río Cabanillas. Para esto, luego de un análisis de variabilidad de los datos del parámetro hidrometeorológico, se debe generar ocho subseries de datos (01 con los no afectados al ENSO,

04 con los afectos a El Niño y 03 con los afectos a La Niña) con objeto de establecer si las medias de los no afectos son estadísticamente iguales o no con los afectos a El ENOS, y definir la incidencia del ENOS sobre al parámetro climático analizado. Posteriormente, se evaluará la variación de la cobertura de la tierra, contrastando mapas de cobertura de la tierra de diferentes fechas, generados a partir de imágenes satelitales. Finalmente, se generarán modelos hidrológicos SWAT, a partir de modelos de elevación digital, imágenes de tipos de suelos, imágenes de cobertura de suelos y datos de las condiciones climáticas locales, que luego de calibrados, validados y evaluados, permitirá generar series hidrológicas, que permitirán definir el efecto de la variación de la cobertura del suelo en los caudales naturales de cada subcuenca.

METODOLOGÍA

Diseño, enfoque y nivel de la investigación

La investigación es no experimental; de enfoque cuantitativo; de tipo longitudinal, retrospectivo y analítico; y de nivel explicativo

Población y muestra

La población estuvo constituida por todos los datos hidrometeorológicos diarios de las estaciones que están dentro y el entorno del área de estudio, así como por las imágenes satelitales correspondientes. Para determinar el tamaño de la muestra, se siguieron las directivas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017), que establece que los estudios hidrometeorológicos deben basarse en registros de datos con períodos no menor a treinta años. Es por ello, que se utilizaron registros diarios de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y caudales del SENAMHI del período 1964–2016. Para el análisis de la variación de cobertura de suelos se consideró imágenes satelitales del Landsat 7 de los años 1985, 1990, 1995, 2005, 2010 y 2015, y para la evaluación de la influencia de la cobertura de la tierra en los caudales naturales se utilizaron imágenes de cobertura de los años 2001 y 2016.

Variables e instrumentos de recolección de datos

La variable dependiente es el caudal mensual de cabecera de cuenca, mientras que las variables independientes son variabilidad climática y cobertura de la tierra. La variabilidad climática tiene como dimensión El Niño Oscilación Sur, como subdimensiones las fases El Niño y La Niña y como indicadores de cada subdimensión, la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima mensuales. La cobertura de la tierra tiene como indicadores, las categorías del sistema clasificación de cobertura y uso actual de la tierra Corine Land Cover

Para el recojo de los datos hidrometeorológicos, se diseñó fichas de registro de datos; de igual forma, para la consolidación del mapeo de las imágenes sobre la cobertura de la tierra y los tipos de suelos.

Procedimientos

Análisis de la variabilidad

Para el análisis de variabilidad climática y de caudales; en primer lugar, se seleccionó las estaciones meteorológicas e hidrométricas que se detallan en la Tabla 1 y que se encuentran dentro o en el entorno del área de estudio.

Tabla 1

Estaciones meteorológicas e hidrométricas

Estaciones Meteorológicas	Tipo	Departamento	Provincia	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Período Registro
Crucero Alto	AUT	Puno	Lampa	Santa Lucía	15°45'52.12"	70°54'39.59"	4511	1966-2013
Imata	AUT	Arequipa	Caylloma	San Antonio de Chuca	15°50'33.56"	71°5'26.22"	4475	1962-2015
Lagunillas (1)	CO	Puno	Lampa	Santa Lucía	15°43'12"	70°41'58"	4300	2003-2016
Lagunillas (2)	CO	Puno	Lampa	Santa Lucía	15°46'4.80"	70°39'40.68"	4251	1970-2003
Pampahuta	CO	Puno	Lampa	Paratía	15°29'00.7"	70°40'32.8"	4400	1962-2016
Paratía	PLU	Puno	Lampa	Paratía	15°27'	70°36'	4300	1966-1992
Porpera	CO	Arequipa	Caylloma	Tisco	15°18'51.11"	71°18'23.01"	4395	1963-2014
Quillisani	PLU	Puno	Lampa	Paratía	15°23'	70°45'	4600	1966-1988
Santa Lucía	CO	Puno	Lampa	Santa Lucía	15°42'02.1"	70°36'32.4"	3970	1979-2010
Estaciones hidrométricas	Tipo	Vertiente	Río	Unidad hidrográfica	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Período Registro
Lampa	CON	Titicaca	Lampa	Lampa	15°26'37.37"	70°12'33.3"	3835	1994-1996
Lagunillas	CON	Titicaca	Cerrillos	Cerrillos	15°25'12"	70°25'12"	4200	1964-1985
Verde	CON	Titicaca	Verde	Río Verde	15°41'3.38"	70°36'0.06"	4364	1964-1997
Ichocollo	CON	Titicaca	Ichocollo	Río Ichocollo	15°40'0.29"	70°49'22.63"	4325	--
Puente Huancané	CON	Titicaca	Huancané	Huancané	15°12'57.24"	69°42'9.36"	3821	1964-2002

Nota: * (1): Estación meteorológica del Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca. (2) Estación meteorológica del SENAMHI; CO: Climatológica ordinaria; AUT: Automática Meteorológica; PLU: Pluvial; CON: Convencional Hidrológica; --: Estación hidrométrica autorizada por la Autoridad Nacional del Agua – ANA no operativa.

En segundo lugar, se determinó la homogeneidad climatológica de las estaciones meteorológicas seleccionadas con el software Hydraccess; luego se realizó el análisis exploratorio de los datos con el software Climatol; posteriormente se llevó a cabo el análisis de consistencia, completación y extensión de datos en una planilla de cálculos de Excel. Por último, se procedió a determinar la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima media areal para cada subcuenca con el software Hydraccess. En cuanto a los caudales, se trabajó con los datos históricos del río Verde, los cuales fueron sometidos a un proceso de consistencialización y completación en una planilla de cálculos de Excel, y finalmente fueron calibrados, validados y extendidos hasta el 2016 con el modelo hidrológico integrado GR4J. El modelo hidrológico generado para el río Verde, permitió establecer los caudales diarios en la estación hidrométrica del río Ichocollo

El análisis de variabilidad climática de cada parámetro hidrometeorológico se realizó para cada subcuenca, con las medias de los promedios areales y con el método de las anomalías. Donde la anomalía climática es la desviación de un elemento climático respecto a la Normal Climatológica Estándar¹ de una serie climática (Accostupa, 2017), que se determina mediante la ecuación 1. Estas anomalías son normales, si se encuentra dentro del intervalo: $NCE \pm DSNCE^2$; caso contrario son anomalías por encima o debajo de lo normal.

¹ Media de datos climatológicos consecutivos de 30 años disponibles, contabilizados a partir de un año que empieza en 1 (OMM, 2007)

² DS_{NCE} : Desviación estándar de los datos utilizados para definir la Normal Climatológica Estándar.

ANi=Vi-NCE

1

Donde:

ANi: Anomalía del instante de tiempo i de un parámetro; i : Instante del tiempo³; NCE: Normal Climatológica Estándar (1981-2010)

Una vez definidas las anomalías, los datos se relacionaron con la fecha de ocurrencia de los diferentes eventos de El ENOS, que se pueden visualizar en la Página Web del Instituto Geofísico del Perú (2023), con el objeto generar subseries de datos para cada una de las categorías de las fases El Niño y la Niña⁴. Estas subseries, son independientes y desbalanceados⁵, por lo que fueron sometidas a las pruebas de homogeneidad de varianzas con el estadístico de Levene, de igualdad de medias con el estadístico Welch y de post hoc de Games–Howell con el Software SPSS, con el objeto de establecer la influencia de El ENOS en el comportamiento de los elementos climáticos analizados.

Con relación a los caudales, además de la detección de anomalías, se llevó a cabo un análisis de tendencias de las características de su régimen hidrológico, con el método de los Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) (The Nature Conservancy, 2011). Estas tendencias se sustentan en la pendiente de la ecuación de regresión que se generan para cada uno de los 33 indicadores de alteración hidrológica que considera el Software, a partir de los datos históricos. Para ello se estableció como puntos de análisis, la ubicación de las estaciones hidrométricas de ambas subcuencas (Tabla 1); asimismo, se evaluó previamente la existencia de estructuras de derivación o embalsamiento aguas arriba, con fines de naturalización de caudales.

Análisis de variación de cobertura

Con el propósito de analizar los cambios de cobertura de suelos, se descargó imágenes del Satélite Landsat 7 con una resolución espacial de 30x30 m. de la Pagina Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos, correspondiente a los años 1985, 1990, 1995, 2005, 2010 y 2015. Esto con el objeto de generar mapas de cobertura de suelos con el ArcGis, previa composición de bandas y categorización de los suelos según la escala de clasificación de Corine Land Cover. Por último, se realizó un mapeo de las áreas correspondientes a cada categoría, para identificar las tendencias en la variación de cobertura de suelos.

Modelamiento hidrológico con el SWAT

Se utilizó el modelo SWAT para llevar a cabo la simulación hidrológica en cada una de las subcuencas y para los escenarios de cobertura del 2001 y 2016. Para cada subcuenca y escenario de suelos, se subió al ArcSwat, el Modelo de elevación Digital de Alos Palsar de 30x30 m de resolución, la imagen Aster de uso de suelo de 500x500 m. de resolución, las imágenes de tipo de suelo de la FAO de 90x90 m de resolución, con el objeto de delimitar las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU); las cuales, junto con los parámetros climáticos locales permitieron crear un modelo hidrológico específico, que luego de calibrado y validado con los caudales naturales, permitieron generar series hidrológicas para el periodo 1967 – 2016. Las series hidrológicas generadas para cada escenario, fueron contrastados estadísticamente entre sí, para determinar si los cambios de cobertura afectaron el régimen hidrológico de los ríos en su área de influencia.

³ Puede ser 1, 2...n y la escala temporal: diaria, mensual, trimestral, semestral, anual, etc.

⁴ Las categorías de las fases de El Niño y La Niña, son: El Niño Débil; El Niño Moderado; El Niño Fuerte; El Niño Extraordinario; La Niña Débil; La Niña Moderada; La Niña Fuerte.

⁵ Las subseries son desbalanceadas cuando el número de datos de ellas no son iguales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

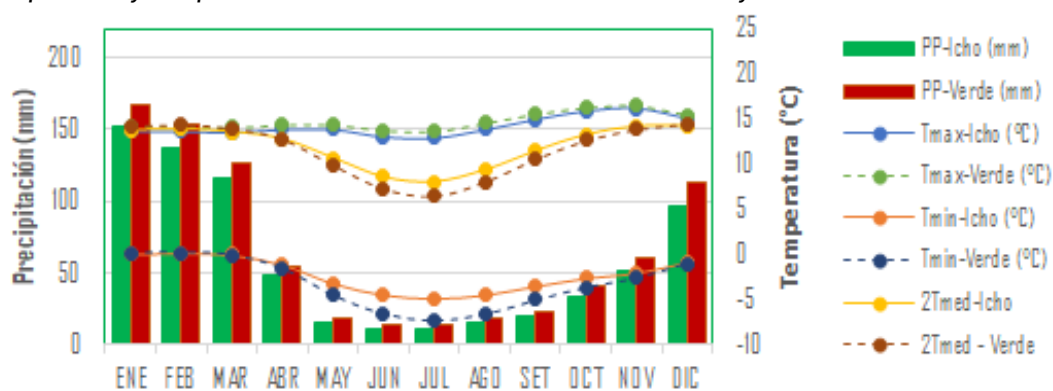
Variabilidad climática

Variabilidad climática mensual e interanual

Las variaciones mensuales de la precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media en las subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde, para el período 1964-2016 se muestran en la Figura 2. En ella se observa, que la precipitación y las temperaturas tienen un comportamiento similar en ambas subcuencas; con la particularidad, de que la precipitación y la temperatura máxima son mayores en la subcuenca del río Verde, y la temperatura mínima en la subcuenca del río Ichocollo. Por otra parte; ninguna de las subcuencas tiene períodos secos, debido a que la precipitación supera el doble de la temperatura media, durante todo el año.

Figura 2

Precipitación y temperatura mensual - subcuencas río Ichocollo y río Verde 1964-2016



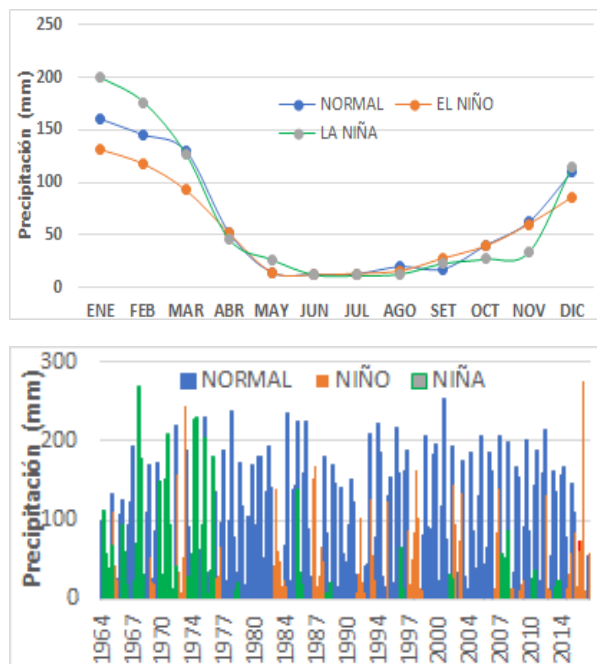
Nota: * PP: Precipitación; Tmax: Temperatura máxima; Tmin: Temperatura mínima; Tmed: Temperatura media; Icho: Ichocollo; 2Tmed: Dos veces la Temperatura media.

Variabilidad de la precipitación

Las anomalías climáticas de la precipitación se determinaron con los datos de precipitación del período 1964-2016, que se grafican en la Figura 3 a), siendo su Normal Climatológica Estándar: 71.90 mm y DSNCE:61.85, con los cuales se encontró que 401 meses (63.05%) tuvieron variaciones precipitaciones por debajo de lo normal, 29 meses (4.56%) variaciones dentro del rango normal y 206 meses (32.29%) variaciones por encima de lo normal; por lo que, el promedio de las anomalías de la precipitación fue de -0.48, que significa que las precipitaciones en promedio han tenido una alta variabilidad por debajo de lo normal.

Figura 3

a). Precipitación mensual 1964-2016; b). Precipitación promedio mensual 1964-2016



El análisis estadístico de las subseries generadas para cada una de las categorías de El Niño Oscilación Sur, nos dice que hay diferencias significativas entre la media de la precipitación normal (75.57 mm) y las medias de la precipitación de El Niño Débil (45.37 mm), El Niño Moderado (43.43 mm), La Niña Débil (17.09 mm) y La Niña Moderada (44.21 mm); mientras que con las medias de El Niño Fuerte (55.01 mm) y La Niña Fuerte (51mm) no existen diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95%.

La Figura 3 b) grafica el desenvolvimiento de la precipitación a lo largo del año, observándose que durante El Niño la precipitación es menor que la precipitación normal durante todo el año, llegando a disminuir hasta en un 28% en el mes marzo; en cambio, durante La Niña la precipitación es mayor que la precipitación normal de diciembre a febrero y ligeramente menor el resto del año, llegando a incrementar hasta en 25% en el mes de enero.

Los resultados nos indican que la precipitación se caracteriza por tener una alta variabilidad por debajo de lo normal, la misma que va acompañada con una disminución significativa en presencia de cualquiera de las fases del Niño Oscilación Sur, siendo muy leves solamente durante El Niño Fuerte y La Niña fuerte. Estos resultados son parcialmente consistentes con los de Lavado-Casimiro et al. (2014; 2012), quienes en un estudio de alcance nacional determinaron que en la Vertiente del Titicaca las precipitaciones disminuyen durante El Niño. Así también, con los resultados de Vega-Jácome (2016), que, en un estudio realizado a nivel del sur del país, estableció que el área de estudio se encuentra en una zona de peligro alto a la ocurrencia de sequías.

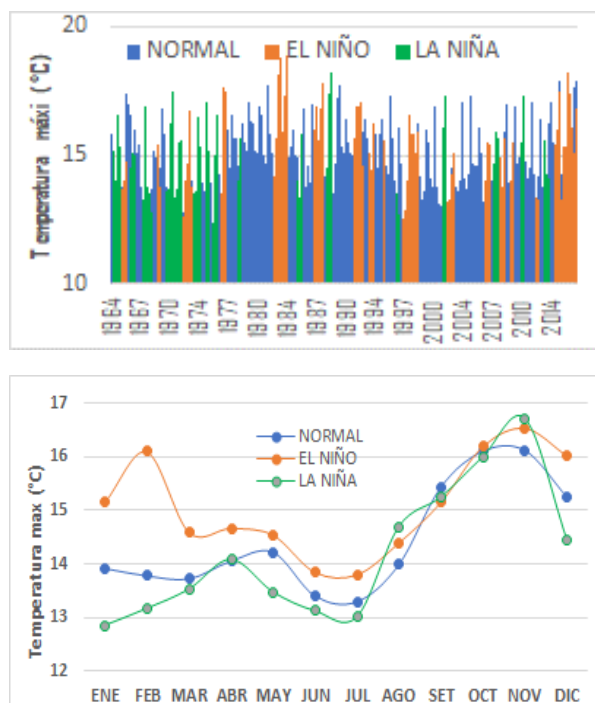
Variabilidad de la temperatura máxima

Las anomalías de la temperatura máxima se estimaron a partir de la información que se utilizó para elaborar la Figura 4 a), teniendo como Normal Climatológica Estándar: 14.55°C y DSNCE: 1.45, con los cuales se tiene que 436 meses (68.55%) tuvieron variaciones de temperatura máxima dentro del rango normal, 104 meses (16.35%) variaciones por encima de lo normal y 96

meses (15.09%) variaciones por debajo de lo normal; por lo que, el promedio de las anomalías de la temperatura máxima fue de 14.5°C, que indica que la variabilidad de la temperatura máxima está dentro del rango de variabilidad normal.

Figura 4

a) *Temperatura máxima mensual 1964-2016*, b) *Temperatura máxima promedio mensual 1964-2016*



En base al análisis estadístico de las subseries generadas para cada una de las categorías de El Niño Oscilación Sur, tenemos que no existen diferencias significativas entre la media de la temperatura máxima normal (14.45 °C) y las medias de las temperaturas máxima de El Niño Débil (14.35 °C), El Niño Moderado (14.91 °C), El Niño Fuerte (15.59 °C), El Niño Extraordinario (15.28 °C), La Niña Débil (15.17 °C), La Niña Moderada (14.61 °C) y La Niña Fuerte (14.04 °C) para un nivel de confianza del 95%.

La Figura 4 b) grafica el comportamiento de la temperatura máxima promedio mensual durante un año, en ella se observa que durante El Niño la temperatura máxima promedio mensual es ligeramente mayor que la temperatura máxima normal todo el año, llegando a incrementar hasta en un 17% en el mes de febrero; mientras que, durante la Niña la temperatura máxima tiende a ser ligeramente menor que la temperatura normal casi todo el año, llegando a disminuir hasta en 8% en el mes de febrero.

Los resultados nos indican que la variabilidad de la temperatura máxima se encuentra dentro del rango variabilidad normal, lo cual se traduce en que estadísticamente El Niño oscilación Sur no tiene una influencia significativa en la variación de la temperatura máxima; pero sin embargo, si observamos la Figura b); vemos que durante El Niño la temperatura máxima es levemente mayor que la temperatura máxima normal, así también, que durante La Niña la temperatura máxima es levemente menor que la temperatura normal. Estos resultados son parcialmente compatibles con los obtenidos por Accostupa (2017), quien en un estudio realizado para evaluar

la relación de la fase El Niño con la variabilidad climática en la estación meteorológica Kayra del Cuzco (3,241 m.s.n.m.), encontró que la fase de El Niño tiene influencia significativa en el incremento de la temperatura máxima de dicha estación.

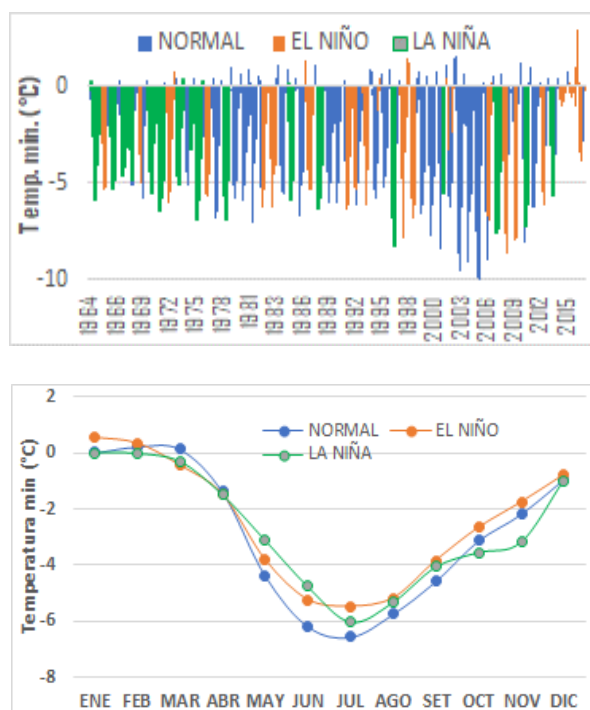
Variabilidad de la temperatura mínima

Las anomalías de la temperatura mínima se calcularon a partir de los datos utilizados para elaborar la Figura 5 a), teniendo como Normal Climatológica Estándar: -2.73°C y DSNCE: 2.55, con los que se tiene que 281 meses (44.18%) tuvieron variaciones de la temperatura mínima dentro del rango normal, 342 meses (53.77%) variaciones por encima de lo normal y 13 meses (2.04%) variaciones por debajo de lo normal; por lo que, el promedio de las anomalías de las temperaturas mínimas fue de 0.004°C , que indica que la variabilidad de la temperatura mínima está por encima de lo normal.

El análisis estadístico de las subseries generadas para cada una de las categorías de El Niño Oscilación Sur, nos indica que no existe diferencia significativa entre la media de la temperatura mínima normal (-2.41°C) y las medias de El Niño Débil (-3.26°C), El Niño Moderado (-3.21°C), El Niño Extraordinario (-3.32°C) y La Niña Fuerte (-3.1°C); mientras que, con las medias de El Niño Fuerte ($+0.55^{\circ}\text{C}$), La Niña Débil (-5.07°C) y La Niña Moderada (-3.61°C) existen diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95%.

Figura 5

a) *Temperatura mínima mensual 1964-2016*, b) *Temperatura promedio mínima mensual 1964-2016*



La Figura 5 b) ilustra el comportamiento de la Temperatura mínima promedio mensual durante el año, donde se observa que entre mayo y setiembre la temperatura mínima normal es menor que las temperaturas mínimas correspondientes a las fases El Niño y La Niña. Asimismo, que entre octubre y febrero la temperatura mínima durante la fase El Niño es mayor que las temperaturas mínimas normal y de la fase La Niña.

Los resultados nos muestran que la mayor parte del tiempo la temperatura mínima está bajo cero y que incluso puede llegar hasta -10°C en condiciones normales; así también, El Niño Fuerte incide significativamente en el incremento de la temperatura mínima; en cambio, La Niña Débil y la Niña Moderada influyen significativamente en su disminución. Estos resultados, son en alguna medida consistente con los obtenidos por Accostupa (2017), quien encontró que la temperatura mínima de la estación Kayra del Cuzco, aumentó significativamente durante la fase de El Niño.

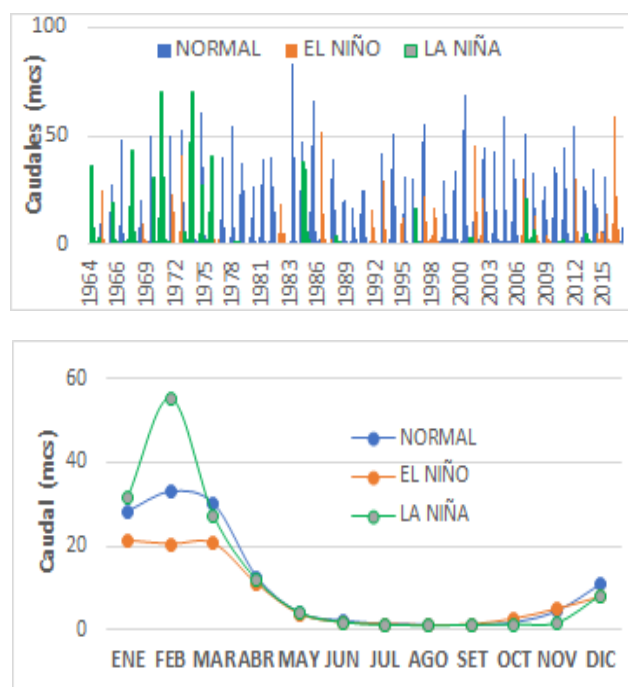
Análisis de la variabilidad de los caudales

Las anomalías de los caudales del río Verde, se determinaron con los datos de caudales de 1964-2016 de dicho cauce, que permitieron elaborar la Figura 6 a). Para dicha serie, la Normal Climatológica Estándar: $10.51 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y DSNCE: 14.40 , con los cuales se tiene que 540 meses (84.91%) tuvieron variaciones del caudal dentro del rango normal y 96 meses (15.09%) variaciones por encima de lo normal; asimismo, que el promedio de las anomalías para los caudales del río Verde fue de -0.10 , que corresponde a una condición de variabilidad normal de los caudales

En base al análisis estadístico de las subseries generadas para cada una de las categorías de El Niño Oscilación Sur, tenemos que existen diferencias significativa entre la media del caudal normal ($13.01 \text{ m}^3/\text{seg.}$) y las medias del caudal con presencia de El Niño Débil ($7.31 \text{ m}^3/\text{seg.}$), El Niño Moderado ($5.78 \text{ m}^3/\text{seg.}$), El Niño Extraordinario ($4.59 \text{ m}^3/\text{seg.}$), La Niña Débil ($1.441 \text{ m}^3/\text{seg.}$) y La Niña Fuerte ($7.24 \text{ m}^3/\text{seg.}$); mientras que, con las medias de El Niño Fuerte ($10.81 \text{ m}^3/\text{seg.}$) y La Niña Moderada ($8.08 \text{ m}^3/\text{seg.}$) se encontró que no existe diferencias significativas para un nivel de confianza del 95%.

Figura 6

a) Caudales mensuales del río Verde 1964-2016, b) Caudal promedio mensual 1964-2016



La Figura 6 b) ilustra el comportamiento de los caudales promedio durante un año y la Tabla 2 presenta dichos datos, así como el porcentaje de incremento o disminución de los caudales durante las fases El Niño y La Niña respecto a los caudales normales. En esta Tabla, observamos

que durante la fase El Niño los caudales disminuyen a lo largo de nueve meses, siendo el más crítico febrero con 37.60%. En cambio, durante La Niña los caudales incrementan en enero y febrero, siendo el mes crítico febrero con 68.35%; mientras que, en el resto del año se produce una disminución de los caudales, siendo el mes más crítico noviembre con - 62.17%.

Tabla 2

Caudales mensuales normales, de El Niño y La Niña, y el incremento/disminución de los caudales de El Niño y La Niña respecto a los caudales normales

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Q-Normal (m3/seg)	28.09	32.79	29.89	12.53	3.97	2.07	1.37	1.10	1.05	1.64	4.44	10.74
Q-El Niño (m3/seg)	21.33	20.46	20.55	10.95	3.66	1.70	1.27	0.94	1.17	2.54	4.93	7.79
Q-La Niña (m3/seg)	31.58	55.21	27.09	11.89	4.05	1.77	1.14	0.93	1.12	1.31	1.68	8.22
Increment/Dism-El Niño (%)	-24.05	-37.60	-31.23	-12.58	-7.68	-17.84	-7.15	-14.41	11.19	54.81	11.00	-27.42
Increment/Dism-La Niña (%)	12.41	68.35	-9.35	-5.12	2.11	-14.33	-16.27	-15.60	7.05	-19.90	-62.17	-23.43

Nota: * Q: caudal; Q-El Niño: Caudales de la fase El Niño; Q-La Niña: Caudales de la fase La Niña; Increment/Dism: Porcentaje del caudal de El Niño o La Niña incrementado o disminuido respecto al caudal normal

En base a los resultados, se tiene que los caudales se caracterizan por tener una variabilidad que se encuentra dentro del rango normal, pero que disminuye significativamente durante la mayoría de las categorías de la fase El Niño y una de las categorías de La Niña, siendo muy leves durante El Niño Fuerte y La Niña Moderada. Estos resultados, que prácticamente son compatibles con la disminución de la precipitación, son parcialmente consistentes con los hallazgos de Lavado-Casimiro et al. (2014), quienes determinaron, en un estudio a nivel nacional, que en la Vertiente del Titicaca el caudal disminuye durante los eventos de El Niño

Análisis de las tendencias de las características del régimen hidrológico

Las tendencias de caracterización del régimen hidrológico de los ríos Ichocollo y Verde, se presentan en la Tabla 3.

⁶ Porcentaje de incremento/disminución= $(Q_{\text{NIÑO Ó NIÑA}} - Q_{\text{NORMAL}}) * 100 / Q_{\text{NORMAL}}$

Tabla 3

Indicadores de Alteración Hidrológica de los caudales de los ríos Verde e Ichocollo

GRUPO DE INDICADORES	RIO ICHOCOLLO	RIO VERDE
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales		
Enero	0.009	0.079
Febrero	0.137	-0.039
Marzo	-0.013	-0.031
Abril	0.067	0.161
Mayo	0.003	0.054
Junio	-0.004	0.027
Julio	0.001	0.022
Agosto	-0.003	0.013
Setiembre	-0.008	0.008
Octubre	-0.002	0.016
Noviembre	0.006	0.028
Diciembre	0.001	0.053
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales		
1-día mínimo	0.000	0.010
3-días mínimo	0.000	0.010
7-días mínimo	0.000	0.009
30-días mínimo	0.000	0.010
90-días mínimo	-0.001	0.011
1-día máximo	0.280	-0.178
3-días máximo	0.275	-0.010
7-días máximo	0.231	-0.052
30-días máximo	0.090	-0.076
90-días máximo	0.050	0.018
Núm días cero caudal	0.000	0.000
Índice caudal base	0.000	0.001
3. Momento de las condiciones extremas anuales		
Fecha de caudal mín	0.096	1.324
Fecha de caudal máx	0.035	0.655
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos		
Conteo pulsos bajos	0.003	-0.079
Duración pulsos bajo	0.096	0.129
Conteo pulsos altos	0.016	-0.028
Duración pulsos alto	0.043	0.049
5 Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas.		
Tasa de subida	0.010	-0.022
Tasa de bajada	-0.002	0.035
Número de reversas	0.050	-0.924

En la Tabla 3, se aprecia que los caudales de enero, febrero, abril, mayo, julio, noviembre y diciembre tienden a aumentar en el tiempo, siendo febrero el mes con mayor incremento; por otro lado, los caudales de marzo, junio, agosto setiembre y octubre presentan una tendencia decreciente, siendo marzo el más crítico. En cuanto a la intensidad y duración de las condiciones extremas anuales, solo la correspondiente a los máximos tiende a aumentar. No se observó ninguna tendencia respecto al número de días de caudal cero, porque en los registros históricos, ningún mes tiene caudal cero. En cuanto al momento de ocurrencia de las condiciones extremas, se observa que estas tienden a desfasarse en el tiempo; así también se observa que existe una tendencia creciente en el número y duración de los caudales máximos y mínimos a lo largo del año.

Análisis de la variación de la cobertura del suelo 1985 - 2015

La información sobre la variación de la cobertura de suelos en las subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde del período 1985-2015, se presentan en la Tabla 4 y se obtuvieron a partir de los mapas de uso de suelo generados a partir de las imágenes del satélite Landsat 7.

Tabla 4

Cobertura de suelos para las subcuencas de los ríos Verde e Ichocollo

COBERTURA (Km ²)	SUBCUENCA RIO VERDE						SUBCUENCA RIO ICHOCOLLO					
	1985	1990	1995	2005	2010	2015	1985	1990	1995	2005	2010	2015
Afloramiento rocoso	486.1	486.1	486.1	486.1	486.1	486.1	293.8	293.8	293.8	293.8	293.8	293.8
Tierras desnudas parte alta	241.9	281.9	15.0	0.0	280.4	15.5	193.7	175.7	0.0	31.6	170.9	19.8
Vegetación arbustiva baja	16.0	5.3	13.5	70.9	24.9	10.3	36.2	6.3	31.7	63.0	27.8	20.1
Glaciares	60.4	17.9	4.2	3.7	0.1	0.0	15.0	1.1	0.2	0.1	0.0	0.0
Herbazal	7.1	25.3	12.4	16.0	10.2	19.8	16.2	57.0	31.4	27.1	30.0	38.4
Cuerpos de agua	11.1	27.5	16.1	51.1	3.7	47.3	17.1	26.2	25.2	50.9	14.5	16.1
Tierras desnudas	42.9	46.2	32.0	18.9	1.8	0.1	28.6	27.8	23.5	10.0	1.0	0.4
Bofedales	12.8	28.9	0.5	7.5	24.8	45.8	24.0	37.1	7.3	16.5	34.3	40.6
Pastos	54.6	5.2	311.2	273.1	99.2	307.6	6.3	3.7	184.8	133.4	56.3	200.6
Vegetación arbustiva densa	2.1	10.7	44.1	7.7	4.0	2.5	2.1	4.3	35.0	6.6	4.2	3.1
	935	935	935	935	935	935	633	633	633	633	633	633
TASA CAMBIO (%/Año)	85-90	90-95	95-05	05-10	10-15	85-15	85-90	90-95	95-05	05-10	10-15	85-15
Afloramiento rocoso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tierras desnudas parte alta	3.31	-18.93	-10	-18.89	-3.12	-1.86	-20			-17.68	-2.99	
Vegetación arbustiva baja	-13.38	31.29	42.34	-12.97	-11.7	-1.17	-16.5	80.3	9.87	-11.18	-5.55	-1.48
Glaciares	-14.09	-15.25	-1.35	-19.59	-20	-3.33	-18.48	-16.41	-5.98	-11.54	-20	-3.33
Herbazal	51.46	-10.18	2.87	-7.23	18.92	6.01	50.47	-9	-1.35	2.11	5.56	4.57
Cuerpos de agua	29.57	-8.32	21.82	-18.56	237.86	10.88	10.57	-0.72	10.18	-14.31	2.27	-0.19
Tierras desnudas	1.56	-6.16	-4.08	-18.07	-18.81	-3.32	-0.56	-3.12	-5.75	-17.95	-11.28	-3.28
Bofedales	25.18	-19.68	153.85	45.96	16.99	8.59	10.91	-16.04	12.45	21.63	3.69	2.31
Pastos	-18.11		-1.22	-12.73	42.01	15.44	-8.19	979.78	-2.78	-11.55	51.2	103.4
Vegetación arbustiva densa	81.03	62.08	-8.25	-9.71	-7.23	0.63	20.01	144.51	-8.12	-7.14	-5.41	1.51

Nota: * 85-90: Períodos de comparación 1985 y 1990.

En cuanto a la cobertura de suelos, se identificaron tres grandes grupos. El primer grupo incluye el área de afloramientos rocosos que representan el 46.42% (293 Km²) y 51.99% (486.1 Km²) del área total de dichas subcuencas, sobre las cuales pueden presentarse según las condiciones climáticas: herbazales, glaciares, tierras desnudas y/o vegetación arbustiva baja, cubriendo con ello el 71.4% y 70.70 % del área de ambas subcuencas. En este grupo debemos agregar la vegetación arbustiva densa, constituida por pequeños bosquetes aislados, que abarcan el 1.46 y 1.27% de la superficie de dichas subcuencas.

El segundo grupo está compuesto por tierras ocupadas por lagunas, lagos y cursos de agua de los ríos, que representan en promedio el 3.95 y 2.8% del área total de ambas subcuencas respectivamente y que juegan un papel importante en el almacenamiento, infiltración y drenaje de las aguas de lluvia. Así también; tenemos a los bofedales, que representan el 4.2 y 2.15% de la superficie total, y que no solo coadyuvan a la retención e infiltración del agua de lluvia, sino también son el soporte de la actividad pecuaria orientada a la crianza de camélidos sudamericanos, que es una actividad económica muy importante en el área de estudio. El tercer grupo incluye áreas cubiertas con pastos, que abarcan el 17 y 19% del área de estudio y cuya extensión varía según la pluviosidad local a costa de las tierras desnudas, que aproximadamente abarcan el 2.4 y 2.53% del área total de dichas subcuencas.

El análisis de variación de cobertura se realizó utilizando la Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)⁷ (López & Peña, 2013), cuyos resultados se presentan en la sección Tasa de cambio (%/año) de la Tabla 3. Esta tabla muestra que ninguna

⁷ TCDC= ((SCT₂ - SCT₁) *100/ SCT₁)/(T₂-T₁) Donde:

TCDC: (%/año); SCT₂: Superficie con el tipo de cobertura del instante de tiempo T₂; SCT₁: Superficie con el tipo de cobertura del instante de tiempo T₁; T₁ y T₂: Instantes de tiempo referido al inicio y final del período de análisis.

de las categorías de cobertura presenta una tasa sostenida en el tiempo y en algunos casos se presentan tasas excepcionales de crecimiento que no corresponden a una estrategia de desarrollo del territorio. Si consideramos el período de análisis 1985-2015, se observa una disminución en el área tierras desnudas de las partes altas, vegetación arbustiva baja y glaciares en favor de los herbazales; de igual manera, el área de cuerpos de agua ha tenido diferente comportamiento en ambas subcuencas; mientras que el área de pastos y bofedales se ha incrementado en base a la reducción de las áreas desnudas.

La irregularidad en el comportamiento de la cobertura vegetal, se debe principalmente al manejo individual y aislado del territorio, debido a las condiciones climáticas extremas, las limitaciones de la capacidad de uso mayor de la tierra y a la configuración topográfica del área de estudio; por lo tanto, la cobertura está en función de las condiciones de pluviosidad y temperaturas locales, imperantes en cada período de tiempo. Estos resultados difieren de los obtenidos por Cabana (2017), quien al evaluar el cambio de la cobertura del suelo en el Distrito de Paratía, que incluye aproximadamente al 60% de la subcuenca del río Verde, encontró que entre 1988 y 2016 la cobertura vegetal y los cuerpos de agua disminuyeron en un 0.43 y 1.4%/año respectivamente, lo cual atribuye a la preferencia de los pobladores por la actividad minera. Por otro lado, los resultados obtenidos no pueden compatibilizarse con los de Velásquez (2019), debido a que este no se precisa en qué lugares específicos sucedieron los cambios de cobertura y uso de suelos que se dieron en la cuenca del río Coata, entre el 2003 y 2018.

Modelamiento hidrológico con el SWAT

La Tabla 5 muestra los tipos de suelo presentes en el área de estudio, que se obtuvieron de los mapas de tipo de suelos generados a partir de imágenes satelitales con una resolución espacial de 90X90, de la base de datos de la FAO.

Tabla 5

Tipos de suelo en las subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde

Tipo de suelo	Río Ichocollo (Km2)	Río Verde (Km2)
I-Bh-Tv-c	575.46	861.73
GL	8.98	73.38
I-Tv-c	48.54	
Total	632.98	935.11

Nota: * I-Bh-Tv-c: Litosol – Cambisoles húmicos -Andosoles vítricos; GL: Glaciar; I-Tv-c: Litosol – Andosol Vítrico (fuertemente socavado a montañoso)

Nota: * Base datos de suelos de la FAO

La Tabla 6 contiene la cobertura de suelos para los escenarios 2001 y 2006, generados a partir de imágenes satelitales con una resolución espacial de 500x500 m. En dicha tabla, se observa que el tipo de cobertura predominante son los pastizales y de que ésta no varía significativamente para los escenarios considerados.

Tabla 6

Uso de suelos en las subcuencas de los ríos Ichocollo y Verde, Escenarios: 2001 y 2016

Tipo de cobertura	ESCENARIO DEL AÑO 2001		ESCENARIO DEL AÑO 2016	
	Río Ichocollo (Km2)	Río Verde (Km2)	Río Ichocollo (Km2)	Río Verde (Km2)
Cuerpo de agua	4.13	63.25	3.66	46.52
Pastizales	603.00	871.86	612.23	888.59
Sabanas	0.64		0.03	
Tierras sin vegetación	25.21		17.06	
Total	632.98	935.11	632.98	935.11

Nota: * Cuerpos de agua: Al menos el 60% del área está cubierto por cuerpos de agua; Pastizales: Herbáceas anuales (<2 m.); Tierras sin vegetación: Al menos 60% de la superficie es sin vegetación estéril (arenas, roca, suelo) o nieve permanente y hielo con vegetación menos del 10%; Sábanas: Cubierta de árboles entre 10-60% (> 2 m.)

El modelamiento hidrológico, permitió generar siete Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU) para la subcuenca del río Ichocollo y 9 para la subcuenca del río Verde. El proceso de calibración y validación de los modelos hidrológicos, se realizó considerando como período de calentamiento los años 1964 – 1966, de calibración 1967 – 1985 y de validación 1986 – 1997, teniendo como resultado los estadísticos de evaluación que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Estadísticos de evaluación de los modelos hidrológicos generados

CONCEPTO	ESCENARIO 2001		ESCENARIO 2016	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
I. Río Verde				
R ²	0.7	0.56	0.81	0.61
NS	0.69	0.52	0.78	0.57
Promedio Mod(obs)	9.07(10.76)	6.84(9.43)	11.16(10.76)	9.53(9.43)
DS Mod (obs)	14.55(18.22)	10.52(17.20)	19.35(18.22)	16.82(17.20)
II. Río Ichocollo				
R ²	0.81	0.83	0.8	0.62
NS	0.78	0.67	0.78	0.47
Promedio Mod(obs)	7.53(6.15)	7.81(5.46)	7.32(6.15)	8.04(5.46)
DS Mod (obs)	9.06(9.10)	10.07(8.45)	8.88(9.10)	8.63(8.45)

Nota: *Mod: Datos generados por el modelo; Obs: Datos observados subidos al SWAT

Nota: *NS: Nash Sutcliffe; R²: Coeficiente de determinación; DS: Desviación Estándar

Las series hidrológicas generadas con el SWAT para ambas subcuencas y cada escenario, fueron contrastadas estadísticamente con los caudales naturales observados del río Verde e Ichocollo, mediante pruebas de homogeneidad de varianzas, igualdad de medias y post hoc con el complemento Xrealstats de Excel, cuyos sus resultados se resumen en la Tabla 7.

Tabla 8

Estadísticos de los caudales observados y generados con el SWAT (m3/seg)

		SUBCUENCA RIO VERDE			SUBC RIO ICHOCOLLO		
Grupo1	Grupo2	Med _{G1}	Med _{G2}	P_valor	Med _{G1}	Med _{G2}	P_valor
Q _{OBS}	Q ₂₀₀₁	10.48	12.45	3.7E-15	6.08	8.21	3.8E-15
Q _{OBS}	Q ₂₀₁₆	10.48	12.81	3.8E-15	6.08	8.18	3.8E-15
Q ₂₀₀₁	Q ₂₀₁₆	12.45	12.81	0.175	8.21	8.18	0.970

Nota: * QOBS: Caudal observado; Q2001: Caudal para el escenario de cobertura de suelos 2001; Q2016: Caudal para el escenario de cobertura de suelos 2016; G1: Grupo 1; G2: Grupo 2; Med: Media; SUBC: Subcuenca

En base a los p-valor de la Tabla 8, encontramos que en ambas subcuencas los caudales generados con el SWAT para los escenarios del 2001 y 2016 son estadísticamente iguales entre sí para un nivel de confianza del 95%, debido a que no ha habido una variación significativa de la cobertura de suelos para los escenarios 2001 y 2016 en ambas subcuencas; asimismo, que los caudales generados para los escenarios 2001 y 2016 son estadísticamente mayores que los caudales observados, lo cual puede deberse a que el modelo incorpora elementos de gestión del territorio que no necesariamente corresponden al área de estudio y que influyen en la respuesta hidrológica del territorio. Por otro lado, una mayor discretización de la cobertura de suelos, podría no incidir significativamente en los caudales generados, dada las características físicas, económicas y sociales del área de estudio que no permiten generar grandes variaciones en la cobertura total; tal como se evidencia en el estudio realizado por Cruz-Arévalo et al. (2021), quienes al evaluar el efecto de las variaciones de la cobertura de la tierra en el escurrimiento y sedimentos de la Cuenca del río Chapingo con el modelo SWAT para el período 1999-2015, a partir de mapas de uso suelo generados de imágenes satelitales con una resolución 15*15 m., encontraron que no existen diferencias significativas entre las esorrentías generadas para los escenarios de 1999 y 2015. Sin embargo, Delgado (2011) determinó en las subcuencas de los embalses de Sant Ponc y La Baells ubicadas en la cabecera del río Llobregat – España con el modelo hidrológico Hyluc, que el incremento del área de bosques densos en 50 años y en un 40 y 30% del área total respectivamente, generó una reducción de los caudales naturales de los ríos de dichas subcuencas.

CONCLUSIONES

Las diferentes categorías de El Niño Oscilación Oscilación Sur (ENOS) generan cambios en la disponibilidad hídrica y las condiciones climáticas del área de estudio.

La serie de caudales naturales presenta tendencias en cuanto a su comportamiento mensual, así como en la ocurrencia y duración de los eventos extremos.

Los cambios en la cobertura del suelo son consistentes con las limitaciones impuestas por las condiciones físicas y climáticas del área de estudio y no mostraron una tendencia sostenida en el tiempo.

Los cambios en la cobertura de los suelos no fueron significativos durante el período de estudio, por lo que no fueron trascendentes para la variación del caudal natural de las subcuencas de los ríos Verde e Ichollo.

REFERENCIAS

Accostupa, Y. M. (2017). Fenomeno El Niño y su relación con la variabilidad climática en la provincia de Cusco, período 1964 – 2014 [Tesis Doctoral en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidad Andina de Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/1312>

Alba, P., Olguín, H., & Castro, A. (2016). Alteraciones del régimen hidrológico fluvial y consideraciones sobre caudales ambientales. *Revista Jurídica de Buenos Aires*, 1(9), 91–123.

Arizaca Oblitas, J. E. (2013). Efectos del cambio climático en la producción de cultivos en la vertiente del Lago Titicaca [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/249>

Autoridad Nacional del Agua. (2021). Marco Metodológico - Criterios técnicos para la identificación, delimitación y zonificación de cabeceras de cuenca. https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4893/ANA0003400_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bedoya, M., Contreras, C., & Ruiz, F. (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y Cambio Climático. In M. y E. A. IDEAM - Instituto de Hidrología (Ed.), *Estudio Nacional del agua 2010* (pp. 281–321). https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2010.compressed.pdf

Beltrán, L. E. (2018). Efecto de las variables climáticas y de uso de suelo sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Gachaneca (Boyacá - Colombia), como escenario para la gestión integral del recurso hídrico [Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.]. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/991>

Bello, C. E. (2019). Cuantificación de la alteración hidrológica en la cuenca del río Vilcanota para el período 1965-2016 [Tesis de Maestría en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, Universidad Nacional Agraria - La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3999>

Cabana, W. E. (2017). Dinámica de cambio de cobertura/uso del suelo, caso distrito de Paratía-Puno, Período (1988 - 2016) [Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/3896>

Cruz-Arévalo, B., Gavi-Reyes, F., Martínez-Menez, M., & Juárez-Méndez, J. (2021). Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(2), 157–206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-04>

Delgado, M. J. (2011). Efecto de la variabilidad climática y de los cambios en las cubiertas del suelo sobre el balance hidrológico en la cabecera del río Llobregat [Universidad Autónoma de Barcelona].

Escobar, D. A. (2019). Evaluación hidrológica del cambio de cobertura y su incidencia en los caudales mensuales de la cuenca hidrográfica del río Jamundi [Tesis de Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/14736?locale-attribute=es>

Hernández-Bedolla, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., & Roblero-Escobar, C. X. (2019). Análisis del cambio en las aportaciones hidrológicas en la cuenca del río Júcar a partir de 1980 y sus causas. *Ingeniería Del Agua*, 23(2), 141. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10582>

Herrera, J. (2015). Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M, en la cuenca del río Coata (Vol. 0, Issue 0) [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://tesis.unap.edu.pe/handle/UNAP/5508>

<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=Yj3z1KpuBYc%3D>

INEI. (2018). Directorio Nacional de Centros Poblados - Censos Nacionales 2007 - XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm

Instituto Geofísico del Perú. (2023). Eventos de El Niño y La Niña costeros. <Http://Met.Igp.Gob.Pe/>. http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html

Jiménez, A. J. (2021). Simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo [Tesis de Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional Agraria - La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5312>

Lavado-Casimiro, W. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>

Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965 - 2007). *Revista Brasileira de Meteorología*, 2, 171–182. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/97/Lavado-casimiro-2014-Impactos-de-el-nino-y-la-nina-en-la.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, M. O., & Peña, V. (2013). Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC) (Hoja Metodológica versión 1.00). http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/55-5.02_HM_Tasa_cambio_coberturas_3_Fl.pdf/88d72e1e-026b-4947-a2c0-0f81d2f4b8ff

MINAGRI/PEBLT. (2014). Estudio Hidrológico del Sistema Integral Lagunillas.

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

OMM. (2007). Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4549

OMM. (2017). Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4167

SENAMHI. (2014). Indicadores de alteración hidrológica del río Rimac. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-66.pdf>

SENAMHI. (2019). Clasificación climática del Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

The Nature Conservancy. (2011). Indicadores de alteración hidrológica Versión 7.1: Manual del usuario. <https://www.conservationgateway.org/Files/Pages/indicadores-de-alteraci%C3%B3n.aspx>

Valdivieso, A. (2023). Régimen fluvial de un río. Iagua. <https://www.iagua.es/respuestas/regimen-fluvial-rio#:~:text=El%20r%C3%A9gimen%20fluvial%20de%20un%20r%C3%ADo%20es%20el%20conjunto%20de,construcci%C3%B3n%20de%20presas%20y%20canales>.

Valencia, M. P., Figueroa, A., Ruiz, D. M., Otero, J. D., Martínez, J. P., Ceballos, V. E., Joaquín, S. C., & Gonzáles, D. (2014). Metodología para el análisis de vulnerabilidad en cuencas abastecedoras de agua ante la variabilidad climática. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 29–43. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n25/v13n25a03.pdf>

Vega-Jácome, F. (2016). Análisis del riesgo sequías en el sur del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/108>

Velásquez, J. J. (2019). Análisis de los cambios de cobertura y uso actual de la tierra de la Cuenca del río Coata mediante imágenes satelitales, período 2003-2018. Universidad Nacional del Altiplano.

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) 