



Terra. Nueva Etapa
ISSN: 1012-7089
ISSN: 2542-3266
vidal.saezsaez@gmail.com
Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Cambios en las áreas nevadas y tendencias en la cobertura de nieve para el 2030 en el sur del Perú

Ibáñez Blancas, Alexis Nicolás; Miranda Corzo, Andrea Ximena; Álvarez Sánchez, Erick
Cambios en las áreas nevadas y tendencias en la cobertura de nieve para el 2030 en el sur del Perú
Terra. Nueva Etapa, vol. XXXVI, núm. 59, 2020
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72166221002>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Cambios en las áreas nevadas y tendencias en la cobertura de nieve para el 2030 en el sur del Perú

Alexis Nicolás Ibáñez Blancas
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú
alexisibanez@lamolina.edu.pe

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72166221002>

Andrea Ximena Miranda Corzo
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú
20151158@lamolina.edu.pe

Erick Álvarez Sánchez
SENMAHI, Perú
20121061@lamolina.edu.pe

Recepción: 05 Noviembre 2019
Aprobación: 09 Marzo 2020

RESUMEN:

El efecto del cambio de temperatura sobre la dinámica de los ecosistemas viene cobrando mayor interés en un contexto de cambio climático. Este efecto puede ser más sensible para los ecosistemas de montaña, sobre todo por el gradiente altitudinal. En los Andes peruanos, tratándose de montañas tropicales, el efecto de la variación de temperatura puede ser más sensible. El presente trabajo plantea describir la dinámica de las áreas de nieve del sur del Perú en el periodo de 1980 a 2014. Asimismo, se busca exponer el posible efecto del cambio de temperatura sobre estas áreas en el rango entre los 4800 y 5400 metros de altitud. A través del uso de imágenes Landsat y ASTER se modeló la variación de las áreas de nieve respecto de la altitud. Los resultados muestran una rápida disminución de las áreas nevadas sobre todo en el periodo de 2002 a 2009. Con información del sistema PISCO (SENAMHI), se describieron las tendencias de aumento de las anomalías de temperaturas máximas y mínimas en un orden de 0.5 °C. Finalmente aplicando el método de Markov se proyectó la superficie de nieve en el año 2030, mostrando una mayor reducción a la observada en el periodo de análisis.

PALABRAS CLAVE: Gradiente altitudinal, anomalía de temperatura, cambio climático, áreas de nieve, cambio de uso de los suelos.

ABSTRACT:

Temperature variation had effect on the dynamics of ecosystems and it has been gaining more interest in a context of climate change. This effect may be more sensitive for mountain ecosystems, especially because of the altitudinal gradient, as we have in the Peruvian Andes, a case of tropical mountains. The present work tries to describe the dynamics of the snow areas of southern Peru from 1980 to 2014. It also seeks to expose the possible effect of temperature variation on these areas in the range between 4800 and 5400 meters of altitude. The variation of snow areas with respect to altitude was modeled using Landsat and ASTER images. The results show a rapid decline of the snow-covered areas, especially in the period from 2002 to 2009. With information from the PISCO database (SENAMHI), the trends of maximum and minimum temperature anomalies were described in an order of 0.5 °C. Finally, the snow surface was projected to 2030, applying the Markov method, showing a greater reduction to that observed in the analysis period.

KEYWORDS: Altitudinal gradient, temperature anomaly, climate change, snow areas, land use change.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de montañas son importantes proveedores de servicios ecosistémicos, como la biodiversidad, provisión de agua y almacenamiento de carbón en el suelo (Rolando *et al.*, 2017), por ejemplo en el caso del agua se han analizado importantes niveles de estrés actuales y futuros para las zonas altas en Suiza (Milano *et al.*, 2015) así como sus implicancias en la sostenibilidad de los ecosistemas. Al mismo tiempo estos experimentan rápidas transformaciones en su paisaje debido a los cambios de uso de las tierras (Ibáñez

y Damman, 2014). Dentro de los paisajes montañosos, los bosques y las áreas de cultivos experimentan grandes transformaciones. En el caso de las áreas de uso agrícolas en montañas se pueden apreciar diversas manifestaciones y procesos de cambio, uno de ellos es la intensificación del uso de las zonas de mayor altura debido a la mayor presión de la población por zonas de cultivo, como fue el caso de Etiopía, donde la cobertura de bosques disminuyó dando lugar a nuevas áreas de explotación agrícola y pecuaria (Tolessa *et al.*, 2017). En el caso de Nepal existen estudios que mostraron un aumento en el bosque de hoja ancha, bosque de coníferas y áreas agrícolas de las zonas bajas cultivadas en invierno y, por el contrario, una disminución en las áreas de matorrales bajos, pastizales y agricultura de zonas de más altura (Gautam *et al.*, 2003).

En las zonas de altura de Perú, los procesos de cambio se han observado también en la ecorregión denominada como Jalca, la cual se ha visto remplazada por la agricultura, especialmente en los Andes altos, en un rango de 3400 a 4000 metros de altitud (Tovar *et al.*, 2013). Similares procesos fueron identificados para la zona denominada Puna en altitudes cercanas a las 4000 msnm en el parque nacional del Manú (Bustamante y Dantas, 2007).

Las zonas de nieve en los Andes

Las montañas andinas concentran la mayor parte (99 %) de los nevados y zonas glaciares tropicales del planeta, encontrándose el resto de ellos en pequeñas formaciones en África y Nueva Guinea (Caser, 1999). Estos glaciares son importantes fuentes de humedad y agua para el consumo humano, la agricultura y las diversas actividades de la sociedad humana. Al mismo tiempo cuentan con una elevada importancia en los planos social, económico y medioambiental. El deshielo de sus cumbres genera el agua potable y de uso industrial para las mayores ciudades de la región andina. De otro lado, una gran proporción de la energía utilizada por las naciones andinas proviene de los glaciares, se estima que cerca del 60% de la capacidad instalada energética y el 70 % de la generación eléctrica de la Comunidad Andina tiene este origen (IRD, 2007).

Con cerca de 2500 km² de extensión los nevados del Perú representan el 71 % de los glaciares de la zona andina y, según el Inventario Nacional de Glaciares, han perdido el 53,56 % lo cual representa 1,248 km. en el período de 1962 a 2016. (INAIGEM, 2018). Este retroceso es una tendencia a nivel global y afectó a todas las áreas glaciares del planeta, aunque en diferentes magnitudes e intensidades (Francou y Vincent, 2007).

Esta pérdida generará cambios drásticos en los ciclos hidrológicos debido a la gran dependencia de los valles de la vertiente del Pacífico del aporte de agua por el deshielo de los nevados, de otro lado, es importante resaltar que los glaciares andinos se interrelacionan con la existencia de ecosistemas de altura, donde se establecen especies únicas y vulnerables que están siendo afectadas y serán impactadas por los cambios de forma sensible (CAN-LA, 2013).

Nieves y Cambio Climático

La desglaciación a nivel global se ha venido intensificando de manera proporcional con el cambio climático (CC). El CC ha generado cambios en los ecosistemas terrestres, pero donde el impacto es más visible es el retroceso y debilitamiento de los glaciares (Kaser y Osmaston, 2003, Francou y Vincent, 2007) Según el quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la disminución y probable desaparición de los glaciares es un hecho a escala planetaria debido al aumento de la temperatura (IPCC, 2013). En este mismo documento y en otros relacionados a la adaptación y vulnerabilidad de los ecosistemas se señalan con mayor precisión, indicando que un aumento de 4 °C de temperatura a nivel global supondría la desaparición de los nevados (Field *et al.*, 2014).

Para el caso de los Andes, la relación entre temperatura y reducción de áreas nevadas estaría asociada a un incremento de la temperatura promedio de 0.11 °C, por década desde 1950 (Vuille y Bradley, 2000). Haciendo una aproximación más reciente, entre los años 1974 y 1998, varios estudios muestran un incremento aún mayor, del orden de 0.34 °C, triplicando el valor de referencia anterior (Vuille *et al.*, 2003; IRD, 2007).

Investigaciones más reciente han corroborado estas mismas tendencias en el caso peruano en las montañas de Ancash (Rabatel *et al.*, 2013, Schauwecker *et al.*, 2014). Es decir, la pérdida de glaciares se ha venido intensificando en los últimos 20 años, como es el caso del nevado de Ampay en la ciudad de Abancay, capital de la región Apurímac, cuya área de nieves ha perdido 0,56 km², equivalente a 54 % de su área inicial en 46 años (Dávila Roller *et al.*, 2018).

Al mismo tiempo se debe señalar que también se dan condiciones de cambio en las lluvias y en los patrones de precipitación causadas por el Fenómeno de la Oscilación del Niño Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el mismo que ha estado asociado a condiciones de sequía en la zona andina, principalmente en el surandino peruano (Vuille, 2013). Además, el mismo autor señala que la temperatura de superficie en el siglo XX ha mostrado un incremento de 0.68 °C en el período de 1939 a 2006. Motivo por el cual es importante conocer estos procesos no solo para cuantificar el área de pérdida de glaciar por el incremento de temperatura, sino también la proporción de lluvia que se depositará en el glaciar (Vuille *et al.*, 2008).

El efecto de este cambio del clima sobre la vida de la población y sus actividades económicas también es sensible en las zonas de montaña (Young y Leon, 2007), en el caso de Cusco se ha podido apreciar impactos en la salud y en la economía de las familias (Halloy *et al.*, 2005). Finalmente el aumento de la temperatura en las zonas glaciares ha mostrado efectos e impactos en la abundancia y distribución de especie de flora y fauna, por ejemplo se ha documentado el efecto del incremento de la temperatura sobre la distribución de anuros en la región de Cusco, observándose que estos animales se han desplazado cerca de 300 metros de altura en los años de observación siguiendo la elevación de las zonas de nieve (Seimon *et al.*, 2007, 2017).

El presente estudio se realiza en la zona sur del Perú, en la subcuenca del río Oropesa-Vilcabamba, en respuesta a la demanda de los agricultores y personas de esta zona quienes han percibido la rápida reducción de las áreas de nieve en altitudes mayores a 4800 msnm. La zona se caracteriza porque sus comunidades andinas se dedican a la actividad agropecuaria (Ibañez y Damman, 2010), la misma que depende de las lluvias y del agua de las lagunas para la obtención de los cultivos de papa y de maíz, principales fuentes de alimentación. Estas fuentes de agua también son importantes para el suministro de agua potable para la población.

El presente trabajo tiene como finalidad identificar el proceso de retroceso de las áreas de nieve, mediante la determinación de la variación altitudinal de la misma, así como también inferir la proyección de este proceso al 2030.

Área de estudio

La subcuenca del río Oropesa-Vilcabamba es parte de la región Apurímac, y tributaria del río del mismo nombre. Presenta un área de 27,608 km², comprende 14 distritos de la provincia de Grau y el distrito de Oropesa de la provincia de Antabamba, su altitud varía entre los 2300 msnm y los 5400 msnm, el 50 % del territorio se ubica por encima de los 4000 msnm. (Ibañez y Damman, 2014).

De acuerdo al inventario de glaciares del Perú, esta subcuenca es parte de la cordillera glaciar de Huanzo, formando parte de las cordilleras ubicadas en la zona sur del país, al norte de las cordilleras Ampato y Chili (INAIGEM, 2018).

Es un territorio montañoso con clima templado a frío, con temperaturas promedio anuales de 16 °C. La población de la cuenca estimada es de 27,060 habitantes (INEI, 2007). La mayor parte de la población se dedica a las actividades agropecuarias y son fundamentalmente quechua hablantes (INEI). Asimismo el 58

% del territorio de la provincia de Grau está concesionado para explotación minera. Uno de los proyectos mineros más importantes es el de la Mina Las Bambas (Echave, 2012).

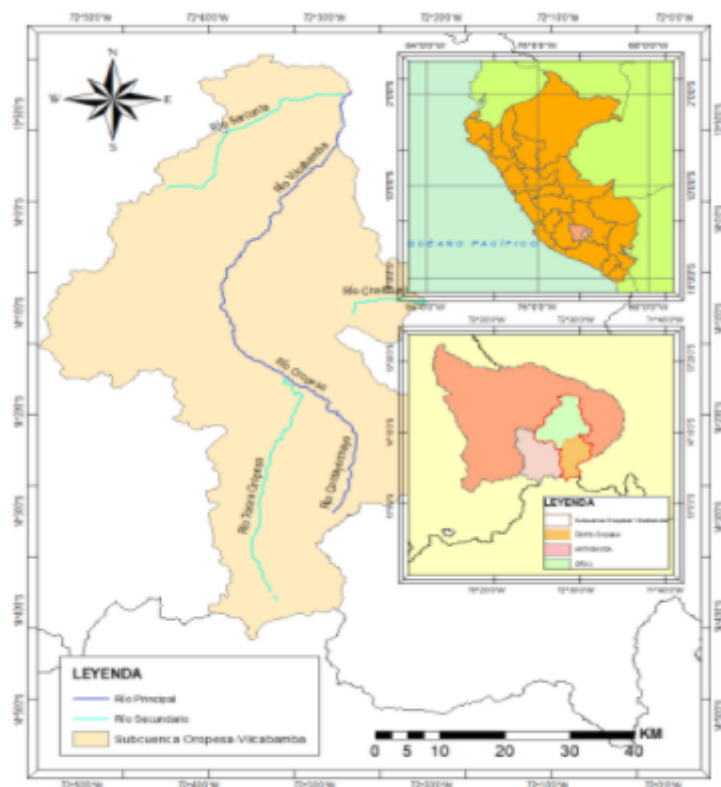


FIGURA 1
Ubicación de la subcuenca Oropesa- Vilcabamba.
Fuente: Elaboración Propia

METODOLOGÍA EMPLEADA

Determinación del retroceso de nieves

El análisis de cambios de cobertura de suelos y la determinación de áreas de nieve se trabajó a partir de las imágenes Landsat para la zona que abarca la subcuenca Oropesa-Vilcabamba, correspondiente a los años 1986, 1994, 2002 y 2009. Se construyeron mapas de cobertura, siguiendo lo señalado por estudios anteriores (Ibañez y Damman 2012, Ibañez y Damman 2014). Se empleó el software Qgis versión 2.18 e Idrisi Taiga versión 16.

Para la determinación del gradiente de altitud, se obtuvo información de las altitudes a partir del Modelo de Elevación Digital del proyecto ASTER (NOAA), con resolución espacial 15 m. Los rangos de altitud fueron calculados cada 25 metros, desde los 4800 msnm hasta los 5430. En este caso se usó esta definición debido a que la resolución espacial de cada celda en los mapas de cobertura de nieve fue de pixel de 15 metros. Se realizaron cruces de las áreas de nieve con las líneas de altitud cada 25 metros empleando el software Idrisi Taiga versión 16.

En este caso la clasificación de la línea de nieve constante se concentró tomando en cuenta aquellas áreas de nieve que estuvieron ubicadas a más de 4800 metros y que tuvieran extensiones mayores a 10 ha. Descartando de esta forma áreas más pequeñas y dispersas. No se aplicó el método de la línea de nieve debido a la falta de certeza del área nival total de la subcuenca.

Proyección Cadenas de Markov y Célula Automata

El análisis del cambio de cobertura del suelo y el método de cadenas de Markov permitió realizar proyecciones sobre el área de las zonas nivales tomando en cuenta el período de 1986 a 2009 analizado. El cambio de cobertura comprende una sucesión de variables aleatorias que evolucionan a través del tiempo, y se puede describir en función de probabilidades (Briceño Valera, 2005). Esta función de probabilidades considera el número de categorías de uso y el período de tiempo para analizar el cambio de las tierras. En el supuesto de que las probabilidades de transición dependen solo del intervalo de tiempo entre el año de inicio y el año final de análisis, se considera que el proceso es temporalmente homogéneo.

Para la aplicación del modelo de Markov se empleó el programa Idrisi Taiga versión 16, aplicando los módulos de Markov y Célula Automata, para proyectar las áreas de nieve al 2030 tomando como punto de partida la cobertura de este tipo de 1986 a 2009 (Bernardi de León, 2005)

El módulo MARKOV trabaja sobre 2 mapas de cobertura, correspondientes al punto de inicio t_1 y el final t_2 . A partir de allí trabaja sobre 3 salidas: una matriz de probabilidad de transición; una matriz de áreas de transición; un grupo de imágenes de probabilidad condicional, uno para cada clase de cobertura terrestre (Soares-Filho *et al.*, 2002). El estimador de la matriz de transición Markoviana tomó como base el año 1986 y el final el 2009. Para la proyección del área estimada de nieve se aplicó el módulo de Célula Automata Markoviana, CA Markov, con un número de iteraciones de CA de 10, así como un filtro de CA de 5. Para validar los resultados se aplicaron dos pruebas: la prueba de regresión simple y el cálculo del Índice de Kappa. Este mide el nivel de consistencia entre una población de datos de referencia y otra proyectada a partir de la primera (Ibañez y Damman, 2014). Se aplicó la proyección general del área de nieve tomando en cuenta el período de 1986 a 2009, logrando la proyección al 2030.

Tendencias de la temperatura.

Para observar el comportamiento de temperatura en la zona de estudio, se utilizaron los datos del sistema Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (PISCO), el mismo que ofrece datos hidroclimáticos entre los años 1981 y 2014, con una resolución de 0.05 grados (Lavado Casimiro *et al.*, 2015, 2016). Se tomaron los datos de los meses de junio, julio, agosto y septiembre para el período señalado calculando las anomalías de temperatura máxima y mínima para la región Apurímac. Además, se realizó una aproximación complementaria con la información de la banda termal de las mismas imágenes Landsat tomadas para la clasificación, para conocer la distribución altitudinal probable de los cambios ocurridos en la temperatura. Se empleó la banda termal de las imágenes Landsat 4 y 5, procesadas con los módulos Image Processing, Thermal, del Software Idrisi Taiga versión 16.

El mismo que permite obtener la temperatura mediante los siguientes algoritmos:

$$L\lambda = \text{constante} + \text{incremento} * DN$$

$$TB = \frac{K2}{\ln\left(\left(\frac{K1}{L\lambda}\right) + 1\right)}$$

En este caso la constante, el aumento, K_1 , K_2 son parámetros definidos, DN es el número digital en la imagen termal y TB es la temperatura del cuerpo negro. El valor K_1 está expresado en watts por metro cuadrado por estereorradián por micras, y K_2 está expresado en grados Kelvin. (National Aeronautics and Space Administration, 2007).

RESULTADOS

Realizada la determinación de las áreas de nieve en la subcuenca Oropesa se puede apreciar en la Figura 2 su ubicación. La zona de mayor concentración se ubica al sur del distrito de Oropesa de la provincia de Antabamba.

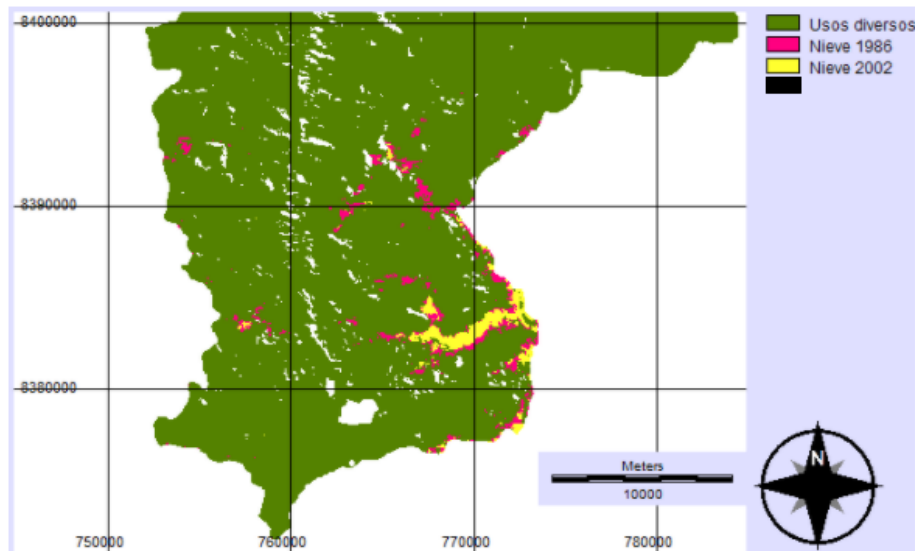


FIGURA 2

Variación del área de nieve entre 1986 y 2002, subcuenca Oropesa-Vilcabamba

Fuente: elaboración propia

El proceso de retroceso de las áreas de nieve continuó en el siguiente período tal como se muestra en la Figura 3, donde se aprecia la variación respecto del año 1986 y 2009. Las áreas de nieve se concentraron en el sureste del distrito de Oropesa como se observa en la Figura 3, sobre los 5,200 metros de altitud, mostrando con claridad la reducción del área nival en este período de 23 años.

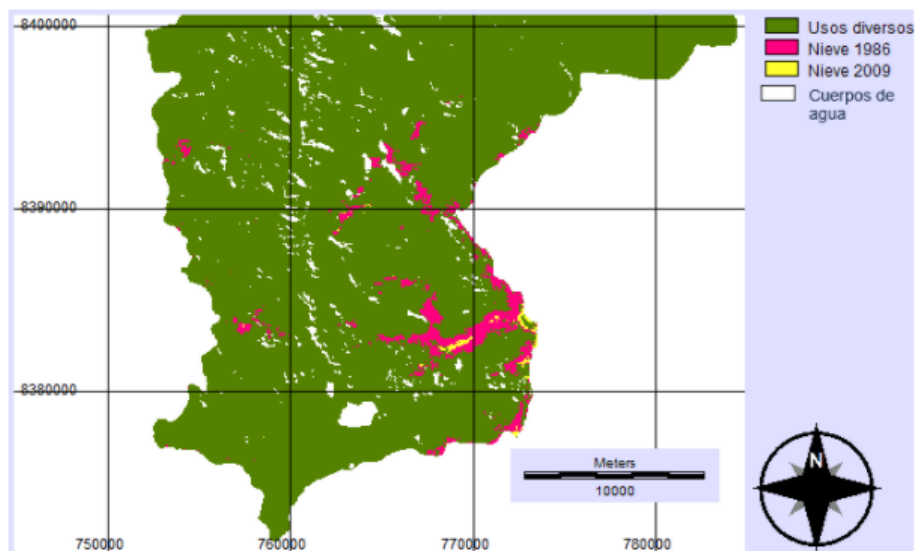


FIGURA 3

Variación del área de nieve entre 1986 y 2009, subcuenca Oropesa-Vilcabamba.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se revisaran los cambios de área de manera cuantitativa determinando que las nieves ocupaban un área dispersa, pero principalmente concentrada al sur de la subcuenca y se ha ido reduciendo de acuerdo a lo que se aprecia en la Tabla 1.

TABLA 1
Superficie de nieves en la subcuenca Oropesa Vilcabamba

| Temas/años | 1986 | 2002 | 2009 |
|--------------------------------|---------|--------|--------|
| Nieves (ha) | 1981,34 | 856,07 | 195,83 |
| % respecto de la subcuenca | 0,60 | 0,26 | 0,06 |
| Tasa de cambio % (por período) | | -56,8 | -77,12 |
| Altitud más baja (msnm) | 4825 | 5000 | 5175 |

Fuente: Elaboración propia.

El área de nieves en la zona pasó de cerca de dos mil hectáreas a doscientas hectáreas en los 23 años de análisis, con tasas muy altas de cambio entre los dos períodos observados, entre 1986 y 2002 la tasa representa una pérdida del 56,8 % del área de nieve y en el segundo período (2002-2009) al ser menos años la pérdida se ve representada con una tasa aproximada del 77,12 % de la superficie. Lo cual muestra una aceleración muy brusca del cambio de cobertura en las zonas de nieve en altitudes superiores a los 4800 msnm.

A nivel de altitud la presencia de nieves fue variando también de manera muy rápida, en 1986 el nivel más bajo de nieve estuvo sobre los 4825 metros, y ya en el 2002 esta línea había cambiado de forma rápida alcanzando los 5000 metros. Para finalmente en el 2009 llegar hasta los 5175 msnm (ver Tabla 3 del Anexo). Es decir, en el primer período el cambio fue de 10 metros por año durante el tramo 1986-2002 y luego un avance de 25 metros por año en el segundo tramo. Lo que estaría mostrando que el proceso de cambio se aceleró en el segundo período de análisis, siendo más del doble que el observado en el primero.

Proyección del área de nieve al 2030.

Tomando en cuenta el período de 23 años analizado, con una tasa constante de disminución del área de nieve, se hizo la proyección al año 2030. Los resultados se aprecian en la Figura 4.

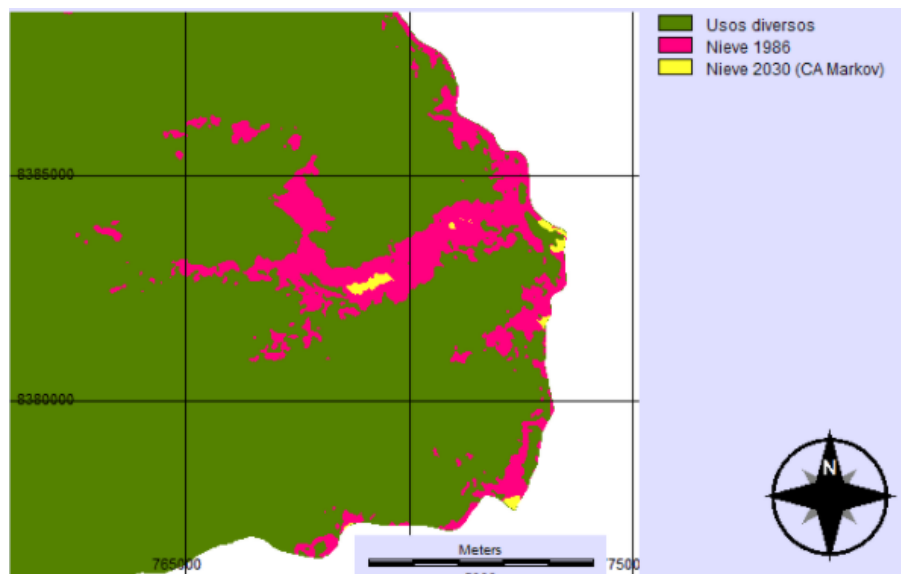


FIGURA 4

Proyección del área de nieve por medio del método de CA de Markov Subcuenca Oropesa-Vilcabamba.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Figura 4 la nieve seguirá reduciendo su presencia hasta alcanzar una extensión de 68 ha, es decir, apenas el 3 % de lo observado en el año 1986. En este caso la hipótesis de cambio supone que las condiciones seguirán, es decir, que la disminución del nevado continuará con una tasa similar a la que ocurrió en el período de análisis.

Análisis de anomalías de temperatura

Tomando en cuenta la información de la aplicación PISCO se realizó un ajuste para la subcuenca tomando en cuenta el período de meses de junio a septiembre de 1981 a 2014. Para visualizar los procesos de cambio se tomaron en cuenta dos etapas, la primera de 1981 a 2003 y la segunda de 2003 a 2014. Como se aprecia en la Figura 5, la anomalía de temperatura mínima ha mantenido una tendencia constante al aumento a lo largo de los dos tramos analizados, variando cerca de 1 °C en el período de referencia para los meses elegidos.

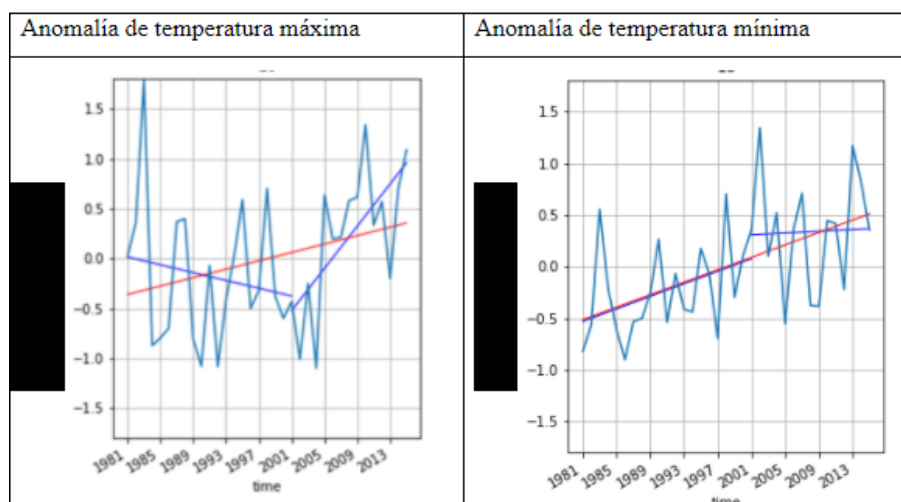


FIGURA 5

anomalía de temperatura máxima y mínima para la Subcuenca Oropesa- Vilcabamba de 1981 a 2014

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la temperatura máxima, si bien la anomalía observada al inicio representó una tendencia negativa, esto cambia drásticamente desde el año 2003, observando una tendencia positiva que alcanza un valor cercano a 1 °C al final del período de análisis. Tendencias similares se observan en las anomalías de temperatura, como se puede apreciar en la Figura 6 (Ver Anexo), que muestran que a nivel superficial y sobre los 4500 metros se han producido incrementos de la anomalía de temperatura en el mismo período de tiempo en la zona sur del Perú.

A partir de la banda termal de las imágenes Landsat empleadas para la ubicación de las coberturas de nieve se realizó una aproximación a las anomalías de temperatura y se les comparó con los rangos de altitud donde se centró el análisis.

TABLA 2

Anomalías de temperatura período de 1986 a 2009 a partir de imágenes Landsat

| Altitudes y anomalías | De 0 a -1 °C | De 0 a 1°C | Más de 1°C | Total general |
|-----------------------|--------------|------------|------------|---------------|
| 4800 a 5000 | 0,99% | 3,08% | 76,66% | 80,72% |
| 5000 a 5200 | 0,10% | 0,33% | 15,81% | 16,25% |
| 5200 a 5400 | 0,00% | 0,10% | 2,91% | 3,01% |
| Más de 5400 | 0,00% | 0,00% | 0,01% | 0,01% |
| % totales | 1,09% | 3,51% | 95,40% | 100,00% |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestra que la anomalía de temperatura mayor a un grado de temperatura comprendió más del 95 % del área analizada. Además, las zonas analizadas tuvieron aumentos mayores a un grado, sobre todo en el rango de 4800 a 5000 metros de altitud. Estos cambios se pueden apreciar con mayor claridad al observar la Figura 7 (Ver Anexo) donde las variaciones de temperatura de la superficie, principalmente mayores a un grado, estuvieron relacionadas al rango señalado en la zona sur de la subcuenca Oropesa.

DISCUSIÓN

La tendencia de reducción del área nivel observada ha coincidido con lo registrado en otros estudios similares, como han sido los casos de los glaciares de Vilcabamba, y nevados en la frontera de Cusco y Apurímac. En

este último caso, el área glaciaria se redujo en un 51 % entre 1991 y 2014, con una tasa de reducción anual de 2.5 %, similar a lo que se obtuvo en la zona analizada en período similar (Guardamino y Drenkhan, 2016). No obstante, estos autores han señalado que luego del año 2010, la tendencia de reducción se ha reducido a 1.8 % en el período 2010-2014. Similar situación se ha observado en el nevado de Ampay (Abancay) donde la cobertura se ha reducido en más del 50 % (Dávila Roller *et al.*, 2018). En el caso de las zonas analizadas en el área de estudio la altitud es menor que la cordillera de Vilcabamba, cuyas cumbres superan los seis mil metros, mientras que las partes altas de la subcuenca Oropesa llegan hasta los 5430 metros. Aun así el proceso de reducción ha sido más fuerte que en el caso del nevado Ampay, cuya cumbre se encuentra sobre cinco mil doscientos metros de altitud.

Respecto de la tendencia a la disminución a futuro, observada a través del modelo de Markov, esta información se corresponde con lo planteado para el nevado de Ampay y en general para la cordillera de Huanzo (Dávila Roller *et al.*, 2018, INAIGEM, 2018). De acuerdo a los autores citados, al haberse perdido más de la mitad de su cobertura de masa glaciaria y por la condición de glaciario temperado el sistema analizado también sería clasificado como un ecosistema vulnerable a los cambios del clima y a los eventos extremos. Al mismo tiempo pueden afectar otros factores como la variación de la precipitación sobre las áreas de nieve, como fue identificado en la cordillera blanca de Perú, donde la reducción de la precipitación tuvo efectos sobre la acumulación de nieve (Mark *et al.*, 2010). En la Figura 8 (Ver Anexo) se puede apreciar que a nivel regional para el período de análisis la anomalía de precipitación ha sido negativa y en la zona sur de Perú mostró una disminución, situación que ha sido corroborada para el surandino peruano (Minvielle y Garreaud, 2011).

Respecto de los cambios de la posición de las áreas de nieve debido a las modificaciones de temperatura, los patrones observados han coincidido con estudios en los andes tropicales, donde se señala que los incrementos de temperatura han sido significativos desde 1939 y sobre todo en el período de 1969 a 1999, con valores de 0,10 °C por década, acumulando un incremento de 0,68 °C desde 1939 (Vuille *et al.*, 2008). Si bien el análisis con información de banda termal es aún parcial, lo que sí se ha podido ver es que las tendencias son las mismas que se encontraron en la zona con los modelos globales (Figuras 6 y 7 de los Anexos) que muestran tendencias al incremento de temperaturas y sobre todo asociadas a los rangos de altitud de 4800 a 5000 metros, donde la nieve prácticamente desapareció después del año 2002. Al mismo tiempo podría haber un efecto combinado de estos aumentos de temperatura con los de precipitación, que para la zona sur del Perú también presentó anomalías en el mismo período observado (Figura 8, Ver Anexo). La desaparición de la nieve tendría efectos sobre el cambio de los caudales de los ríos que provienen de las alturas de Oropesa, de manera similar a lo observado por (Somers *et al.*, 2018) en la cuenca del río Shulcas (Huancayo, Junín). Es así que (Rabatel *et al.*, 2013, Mark *et al.*, 2010), hacen alusión en sus estudios que la aparición de lagunas y nuevos cuerpos de agua en las zonas altas sería otra condición a analizar de cara al futuro, tomando en cuenta lo reportado para la cordillera blanca en los últimos años.

CONCLUSIONES

En el período de análisis de 1986 a 2009, la reducción del área de nieve en el área de estudio ha sido constante, con tasas de disminución que siguen la tendencia de lo reportado en otras zonas del Perú.

De acuerdo a lo analizado, tomando como base el modelo de Markov CA, la tendencia a la disminución de las zonas de nieve continuará y en el año 2030 se esperaría un área reducida en 0,3 % en comparación con el área reportada en el año 2009.

Las anomalías de temperatura indican aumentos de temperatura, principalmente en la máxima, en el período posterior al año 2003, lo cual coincide con la mayor disminución y es similar a lo observado con otras fuentes de información como el modelo NCP CAR y la temperatura de superficie de las imágenes Landsat.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Gregory Damman que colaboró en el diseño de la investigación inicial. Al Arq. Jorge Corcuera quien apoyó las acciones previas a la investigación en la provincia de Grau. A la Asociación para el Desarrollo Rural de Apurímac, (AEDRA), que colaboró en el recojo y las visitas de campo para la información inicial del trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- BERNARDI DE LEÓN, R.E. (2005). Modeling from below: The social dynamics of land use change in the buffer zone of Cordillera Azul National Park, Peru. *Tropical Resources Bulletin* 24: 49-58.
- BRICEÑO, F. (2005). Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra. *Revista Geográfica Venezolana* 46(1): 35-45. [Documento en línea]. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24635>. [Consulta: 2019, setiembre 20]
- BUSTAMANTE, J., DANTAS, M. (2007). Ecological zoning of an Andean grasslands (puna) at the Manu Biosphere Reserve, Peru. *International Journal of Environment and Sustainable Development* 6(4):357-372. DOI: 10.1504/IJESD.2007.016240.
- CAN-LA. (2013). Glaciares andinos: La necesidad de una agenda transversal. [Documento en línea]. Disponible en: http://cambioclimaticochile.cl/wp-content/uploads/2014/12/Glaciares_Andinos_final.pdf. [Consulta: 2019, julio 15]
- CASER, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change* 22(1-4): 93-103.
- DÁVILA, L., ROSALES, J., VILCA, O., URIBE, V. (2018). Glaciares en extinción diagnóstico de la situación actual del nevado Ampay – cordillera Vilcabamba departamento de Apurímac. Disponible en: <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/05/INFORME-T%C3%89CNICO-N%C2%B0-20-NEVADO-AMPAY.pdf>. [Consulta: 2019, julio 15]
- ECHAVE, J. (2012). De Apurímac, la gestión del territorio y minería. *Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de Las Casas, CooperAcción, GRET*. [Documento en línea]. Disponible en: <http://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2017/03/00179.pdf> [Consulta: 2019, julio 20]
- FIELD, C., BARROS, V., MACH, K., MASTRANDREA, M. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report-Technical Summary.
- FRANCOU, B., VINCENT, C. (2007). Les glaciers à l'épreuve du climat. Nueva edición: 150 . DOI: 10.4000/books.irdeditions.9972
- GAUTAM, A., WEBB, E., SHIVAKOTI, G., ZOEBISCH, M. (2003). Land use dynamics and landscape change pattern in a mountain watershed in Nepal. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99(1):83-96. DOI: 10.1016/S0167-8809(03)00148-8.
- GUARDAMINO, L., DRENKHAN, F. (2016). Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en La Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991-2014. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montana*, Vol 1: 21-36. [Documento en línea]. Disponible en <http://revista.inaigem.gob.pe/index.php/RGEM/article/view/3/4>. [Consulta: 2019, agosto 20]
- IBÁÑEZ, N., DAMMAN, G. (2012). Modelos de relación de paisaje y variables socioeconómicas para la región Apurímac. Escenarios territoriales de desertificación. In Asensio, RH; Eguren, F; Ruiz, M (eds.). Lima, Peru, *SEPIA*. p. 502-528.
- IBÁÑEZ, N., DAMMAN, G. (2010). Indicadores de desertificación en Apurímac: relaciones espaciales entre degradación de suelos y presiones antrópicas. *Zonas Áridas* 14:214-229.
- IBÁÑEZ, N., DAMMAN, G. (2014). Cambios de la cobertura de los suelos para la elaboración de escenarios territoriales en la región Apurímac. *Zonas Áridas* 15(1):48-67. DOI: 10.21704/za.v15i1.108.

- INAIGEM. (2016). Glaciares en extinción: Diagnóstico de la situación actual en la cordillera Huanzo. [Documento en línea]. Disponible en: <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/05/INFORME-T%C3%89CNICO-N%C2%B0-24-CORDILLERA-HUANZO.pdf> [Consulta: 2019, junio 4]
- INAIGEM. (2018). Inventario Nacional de Glaciares, Las cordilleras del Perú. [Documento en línea]. Disponible en: <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/04/INVENTARIO-NACIONAL-DE-GLACIARES-LAS-CORDILLERAS-GLACIARES-DEL-PER%C3%A9.pdf> [Consulta: 2019, junio 4]
- INEI. (2007). Censos de Población y Vivienda 2007. N°1: 240. Disponible en <http://ineidw.inei.gob.pe/ineidw/>. [Consultado: 2019, setiembre 15]
- INEI. Disponible en: <https://systems.inei.gob.pe/SIRTOD/> [Consultado: 2019, julio 15]
- IPCC. (2013). Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions. 222 p. DOI: 10.1038/446727a.
- IRD. (2007). ¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina. *Comunidad Andina, AECID*. Disponible en: http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/libro_fin_cumbres_nevadas.pdf. [Consulta: 2019, junio 4]
- KASER, G., OSMASTON, H. (2003). *Tropical glaciers. Journal of Glaciology* 49(165):323-323. DOI: 10.3189/172756503781830782.
- LAVADO, W., FERNANDEZ, C., AYBAR, C., CAYCHO *et al.*, (2016). PISCO: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations. Precipitation N° 1: 1-5.
- LAVADO, W., FERNANDEZ, C., VEGA, F., CAYCHO, T. *et al.*, (2015). PISCO: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations. Precipitation N°1: 1-4.
- MARK, BG., BURY, J., MCKENZIE, JM., FRENCH, A., BARAER, M. (2010). Climate change and tropical Andean Glacier recession: Evaluating hydrologic changes and livelihood vulnerability in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers* 100(4):794-805. DOI: 10.1080/00045608.2010.497369.
- MILANO, M., REYNARD, E., KÖPLIN, N., WEINGARTNER, R. (2015). Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress. *Science of The Total Environment* 536:12-24. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.049.
- MINVIELLE, M., GARREAUD, R. (2011). Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 24(17): 4577-4583. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00051.1.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. (2007). Landsat 7 Science Data Users Handbook. Disponible en: <https://glovis.usgs.gov/app>. [Consultado: 2019, junio 15]
- NOAA. Disponible en: <https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?projectId=4886365875>. DOI:10.5067/ASTER/AST14DMO.003. [Consultado: 2019, mayo 10]
- NOAA. Disponibles en: <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl> [Consultado: 2019, junio 2]
- RABATEL, A., FRANCOU, B., SORUCO, A., GOMEZ, J., CÁCERES, B. *et al.*, (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7:81-102. DOI: 10.5194/tc-7-81-2013.
- ROLANDO, J., TURIN, C., RAMÍREZ, DA., MARES, V., MONERRIS, J., QUIROZ, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236:221-233. DOI: 10.1016/j.agee.2016.12.010.
- SCHAUWECKER, S., ROHRER, M., ACUÑA, D., COCHACHIN, A., DÁVILA, L. *et al.*, (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change* 119:85-97. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.05.005.
- SEIMON, T., SEIMON, A., DASZAK, P., HALLOY, SRP., SCHLOEGEL, LM. *et al.*, (2007). Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology* 13(1):288-299. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01278.x.

- SEIMON, T., SEIMON, A., YAGER, K., REIDER, K., DELGADO, A., SOWELL, P. *et al.* (2017). Long-term monitoring of tropical alpine habitat change, Andean anurans, and chytrid fungus in the Cordillera Vilcanota, Peru: Results from a decade of study. *Ecology and Evolution* 7(5):1527-1540. DOI: 10.1002/ece3.2779.
- SOARES-FILHO, B., CERQUEIRA, G., PENNACHIN, C. (2002). DINAMICA - A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154(3):217-235. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5.
- SOMERS, L., MCKENZIE, J., ZIPPER, S., MARK, B., LAGOS, P., BARAER, M. (2018). Does hillslope trenching enhance groundwater recharge and baseflow in the Peruvian Andes? In *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.11423.
- TOLESSA, T., SENBETA, F., KIDANE, M. 2017. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services* 23:47-54. DOI: 10.1016/j.ecoser.2016.11.010.
- TOVAR, C., SEIJMONSBERGEN, A., DUIVENVOORDEN, J. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning* 112(1):40-49. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.12.003.
- VUILLE, M. (2013). Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes. DOI: 10.1007/s00382-014-2114-8.
- VUILLE, M., BRADLEY, R. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27(23):3885-3888. DOI: 10.1029/2000GL011871.
- VUILLE, M., BRADLEY, RS., WERNER, M., KEIMIG, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change* 59(1-2):75-99. DOI: 10.1023/A:1024406427519.
- VUILLE, M., FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B., BRADLEY, R. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89(3-4):79-96. DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.04.002.
- YAGER, KARINA; SEIMON, ANTON; TUPAYACHI, ALFREDO; HALLOY, STEPHAN. (2006). Multidimensional (Climatic, Biodiversity, Socioeconomic), Changes in Land Use in the Vilcanota Watershed, Peru. DOI: 10.1201/9781420002874.ch24.
- YOUNG, K., LEON, B. (2007). Tree-line changes along the Andes: implications of spatial patterns and dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* 362(1478):263-272. DOI: 10.1098/rstb.2006.1986.

ANEXOS

TABLA 3
Variación de las áreas de nieve para la subcuenca Oropesa-Vilcabamba cada 25 metros en ha.

| Límite Inferior (msnm) | Límite Superior (msnm) | 1986 | 2002 | 2009 |
|------------------------|------------------------|----------------|---------------|---------------|
| 4800 | 4800 | 1.71 | 5.22 | 13.05 |
| 4825 | 4825 | 5.94 | 1.62 | 3.33 |
| 4850 | 4850 | 13.68 | 3.42 | 4.14 |
| 4875 | 4875 | 24.48 | 1.89 | 3.24 |
| 4900 | 4900 | 41.04 | 2.25 | 4.95 |
| 4925 | 4925 | 69.30 | 1.17 | 2.79 |
| 4950 | 4950 | 110.52 | 3.87 | 4.23 |
| 4975 | 4975 | 130.95 | 4.95 | 5.49 |
| 5000 | 5000 | 121.95 | 6.57 | 3.87 |
| 5025 | 5025 | 118.98 | 10.89 | 1.08 |
| 5050 | 5050 | 109.35 | 10.89 | 1.89 |
| 5075 | 5075 | 99.27 | 12.15 | 2.34 |
| 5100 | 5100 | 120.24 | 39.87 | 5.04 |
| 5125 | 5125 | 187.83 | 100.44 | 3.51 |
| 5150 | 5150 | 188.91 | 117.09 | 2.61 |
| 5175 | 5175 | 176.76 | 139.05 | 5.49 |
| 5200 | 5200 | 140.76 | 116.55 | 10.62 |
| 5225 | 5225 | 106.65 | 90.27 | 21.24 |
| 5250 | 5250 | 91.53 | 80.73 | 33.75 |
| 5275 | 5275 | 58.59 | 54.72 | 26.55 |
| 5300 | 5300 | 34.56 | 28.80 | 17.37 |
| 5325 | 5325 | 14.49 | 10.26 | 10.62 |
| 5350 | 5350 | 7.92 | 6.21 | 5.49 |
| 5375 | 5375 | 4.05 | 3.78 | 2.52 |
| 5400 | 5400 | 0.90 | 1.35 | 0.36 |
| 5425 | 5425 | 0.90 | 1.80 | 0.27 |
| 5431 | 5431 | 0.09 | 0.27 | |
| Total general | | 1981.34 | 856.08 | 195.84 |

Fuente: Elaboración propia.

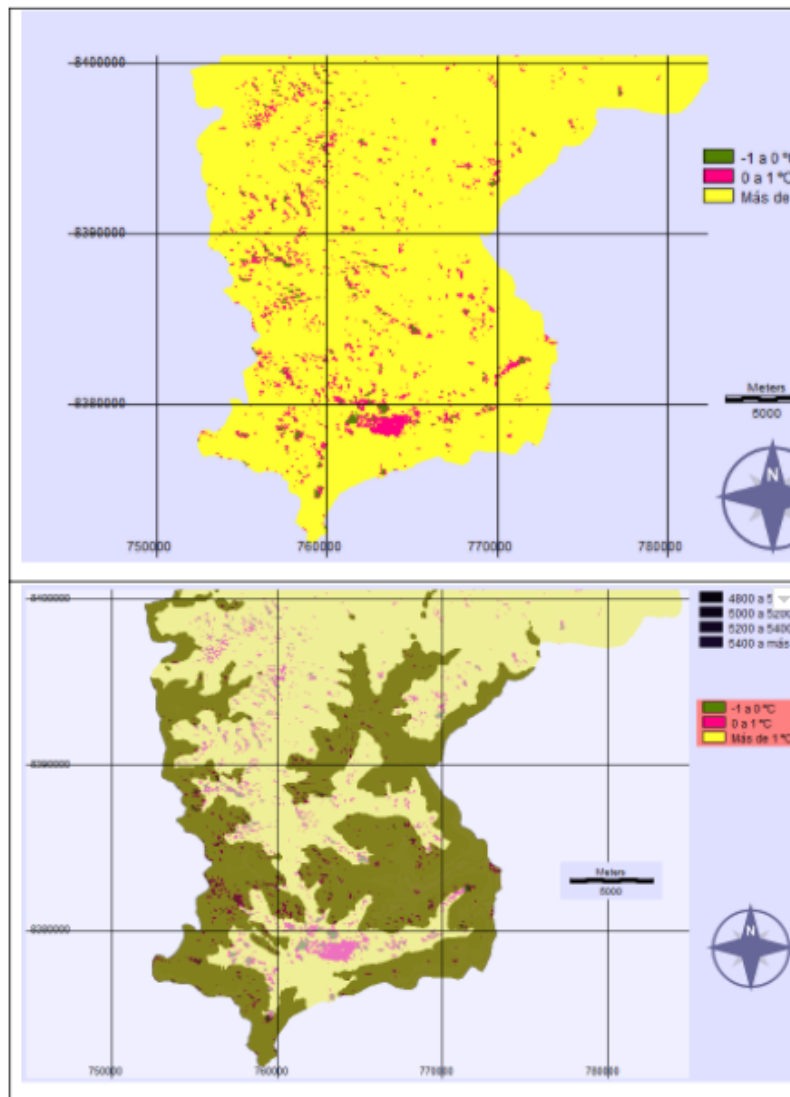


FIGURA 6

Anomalías de temperatura de la superficie Subcuenca Oropesa-Vilcabamba a partir de imágenes Landsat de 1986 a 2009, versus rangos altitudinales.

Fuente: Elaboración propia.

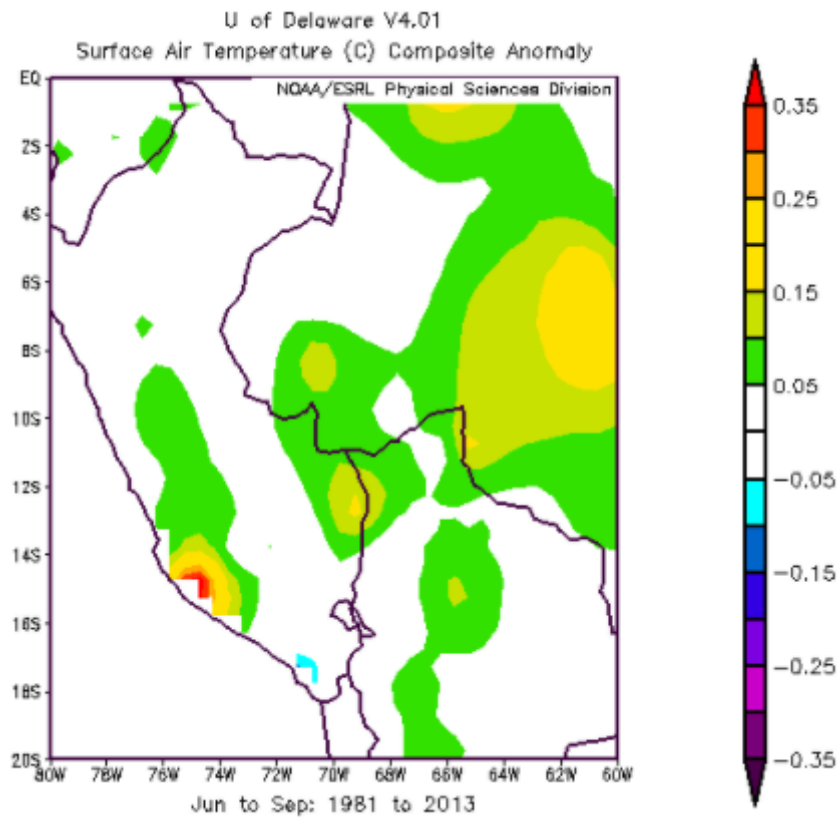


FIGURA 7

Anomalías de temperatura del aire en superficie para el área de influencia del Perú

Fuente:(NOAA)

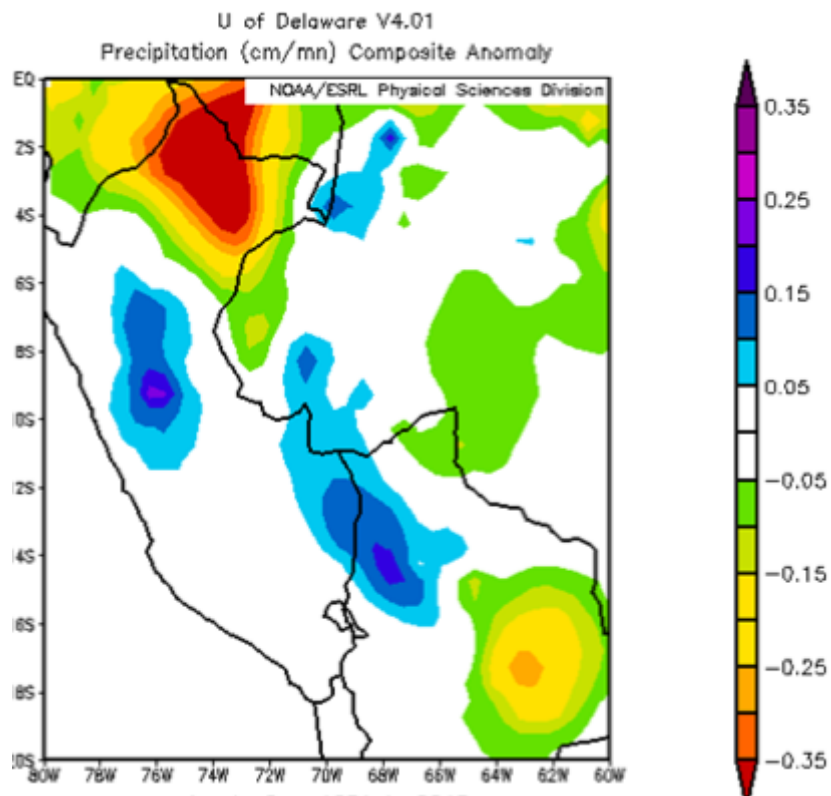


FIGURA 8
Anomalías de precipitación en superficie para el área de influencia del Perú
Fuente:(NOAA)