

EFFECTOS DE LAS ANOMALÍAS CLIMÁTICAS EN LA COBERTURA DE NIEVE DE LOS GLACIARES CENTRALES DEL PERÚ

EFFECTS OF THE CLIMATIC ANOMALIES IN THE COVERAGE OF SNOW OF THE CENTRAL GLACIERS OF PERU

Jacinto Arroyo Aliaga^{1,2}, Pedro Gurmendi Párraga², Elizabeth Machuca Manrique³

jarrovox@gmail.com

pgurmendi@continental.edu.pe

elizaquis@gmail.com

RESUMEN

El propósito de la investigación fue identificar los efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú. Se ha utilizado el método del índice de precipitación estandarizada (SPI) para el análisis de las anomalías climáticas. El método de la transformada rápida de Fourier para la identificación de la variabilidad climática y el método de geoprocesamiento de imágenes satelitales Landsat mediante la técnica de teledetección a partir del sensor Thematic Mapper (TM) de 1975 hasta 1983 y del sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM) hasta el año 2014 para determinar las áreas de cobertura. Como resultados se identificaron cuatro anomalías negativas que corresponden a los años 1991 (extremadamente seco) y 1986, 2005, 2009 (muy seco) con tres anomalías positivas que corresponden a los años 1985, 2010 (extremadamente lluvioso); 1966 (muy lluvioso) que influyeron en la pérdida y acumulación del manto de nieve del glaciar Huaytapallana. En el glaciar Pariaqaqa se encontró tres anomalías negativas de los años 1991 (Extremadamente seco); 1990, 2013 (muy seco) y tres anomalías positivas de los años 1972 y 2010 (extremadamente lluvioso); 1966 y 2011 (muy lluvioso); que influyeron positivamente en la acumulación del manto de nieve. La serie de tiempo muestra 37 y 33 años con comportamientos normales en función a su normal climática. En consecuencia la pérdida neta corresponde a 5 km² en el glaciar Huaytapallana y 7 km² en el glaciar Pariaqaqa. El incremento del manto de nieve del glaciar Huaytapallana y Pariaqaqa en los ciclos hidrológicos del 2010, 2011 y 2012 se debe a un aumento en las intensidades de las precipitaciones registradas durante estos años por cambios en los patrones de circulación atmosférica por fenómenos de El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

Palabras clave: Anomalías climáticas, desglaciación, glaciares

ABSTRACT

The purpose of the research was identify the effects of climatic anomalies in snow cover central glaciers of Peru. We used the method of standardized precipitation index (SPI) for the analysis of climatic anomalies. The method of fast Fourier transform for the identification of climate variability and method geoprocessing Landsat satellite images using remote sensing technique from Thematic Mapper (TM) sensor of 1975-1983 and sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM) through 2014 to determine coverage areas. The results were four (extremely dry) and 1986 2005.2009 (very dry) negative anomalies corresponding to the year 1991 with three positive anomalies that correspond to the years 1985, 2010 (very rainy) were identified; 1966 (very rainy) that influenced the loss and accumulation of snow glacier Huaytapallana. In the glacier Pariaqaqa three negative anomalies 1991 (Extremely dry) was found; 1990.2013 (very dry) and three positive anomalies of the years 1972 and 2010 (very rainy); 1966 and 2011 (very rainy); positively influencing the accumulation of snow. The time series shows 37 and 33 years with normal behaviors according to their climate average. Accordingly the net loss corresponds to 5 km² on the glacier Huaytapallana and 7 km² in the

¹ Instituto Geofísico del Perú.

² Universidad Continental.

³ Escuela de Post grado de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Pariaqaqa glacier. The increase of snow and glacier Huaytapallana Pariaqaqa in hydrological cycles 2010, 2011 and 2012 is due to an increase in the intensities of rainfall recorded during these years by changes in atmospheric circulation patterns by El Niño Southern Oscillation (ENSO).

Keywords: climatic anomalies, deglaciation, glaciers

INTRODUCCIÓN

Investigaciones realizadas por Vuille (1) y Thompson (2) sobre el destino de los glaciares tropicales de Sudamérica confirman un proceso de deglaciación que se ha observado en glaciares de varios países. En el Perú, donde se concentra el 78% de los glaciares tropicales, existe la misma tendencia, como lo reportan Francou et al. (3). La reducción monitoreada en los principales glaciares tropicales fue más del 20% durante los años 1970 a 1997, Bury et al, (4). Pero en los Andes el proceso de disminución de los glaciares empezó desde el final de la pequeña edad de hielo en 1850, Georges (5), Francou et al. (6). Pero el proceso de retiro se ha acelerado en las últimas décadas del siglo 20 como lo reportan Kaser y Georges (7).

Vuille y Bradley (8), Kaser y Osmaston (9), Racoviteanu (10), Mark y Seltzer (11) y Brandley et al. (12), asocian la pérdida acelerada de glaciares al aumento de la temperatura del aire en toda la región de Sudamérica. El aumento de la temperatura del aire influye en la transferencia de calor de la masa glaciar que aumenta la presión de vapor de saturación, causando un aumento en la humedad específica y relativa, Chevalier et al. (13). La fusión que conlleva un aumento de la disminución de masa glaciar es producto del flujo del calor latente por sublimación que es consumido en la pérdida de dicha masa, Sicart et al. (14).

Los glaciares de la cordillera Huaytapallana se reporta en los estudios de Zubieta y Lagos (15), quienes indican que hubo una pérdida neta superior al 50% con respecto a 1956. Las anomalías negativas producto del fenómeno del niño aceleran la disminución de los glaciares y que tiene como consecuencia el enfriamiento del sistema que ocasiona anomalías positivas y genera un aumento de la masa glaciar temporal, López et al. (16).

La disminución de las masas glaciares en el tiempo ha conducido el nacimiento de nuevas lagunas consideradas como pro glaciares y esto a la vez ha generado el aumento en la superficie y el volumen de muchas lagunas existentes Ames (17). También ha aumentado el número de avalanchas y derrumbes de glaciares de las zonas de acumulación, Fraser (18). Los peligros de una disminución de los flujos de agua que se vierten a los ríos es reportado por Mark y Seltzer (19), y las inundaciones que puedan ocasionarse en las temporadas de lluvia aumentarían su frecuencia por la pérdida de la masa de nieve que produce un efecto amortiguador.

Los glaciares tienen importancia ambiental, porque regulan los procesos climáticos, pero también tienen importancia económica y social por que proveen agua a las poblaciones de ciudades. Estas características importantes son abordadas por Viulle (1) y Rabatel (20). En el Perú los glaciares como problema han sido reportados por Portocarrero (21), quien informa que los grandes desastres naturales por aludes y riadas se han producido en el Callejón Huaylas matando a 25 000 personas. Pero los glaciares de montaña de la parte central del Perú aún no han sido abordados. Por lo que constituye la razón de investigación.

El estudio de las anomalías climáticas reportado por Arroyo (22), manifiesta que hay fenómenos que influyen en las precipitaciones. Lagos (23), manifiesta que son las anomalías climáticas derivadas del ENSO (El Niño Oscilación del Sur) que generan una deficiencia de precipitaciones, cuando se encuentra en la fase cálida y precipitaciones en exceso en la fase fría esta última conocida como la Niña.

Sin embargo, los cambios de algunas regiones montañosas cercanas a los glaciares aún no se han estudiado en detalle en el Perú. Las variaciones en la cobertura de nieve de la Cordillera Huaytapallana (región Junín, centro de Perú), y la Cordillera de Pariaqaqa (Límite entre Junín y Lima) que tienen montañas superiores a 5.000 msnm, responden a estas anomalías. Las variaciones y fluctuaciones que se han presentado durante los últimos años han estado conectadas a los

fenómenos ENSO, el niño influye en la pérdida de masa glaciar, mientras que la niña genera una anomalía positiva como muestran las observaciones satelitales. Los glaciares de la cordillera Huaytapallana han mostrado recuperación de sus niveles de masa glaciar durante los ciclos hidrológicos de los años 2010-2013. ¿Cuáles son las causas de este incremento de masa glaciar? ¿Tiene alguna relación el aumento observado en los glaciares con el cambio de comportamiento de las intensidades de las precipitaciones? ¿A qué área equivale la recuperación de la masa glaciar del nevado del Huaytapallana con respecto al año 2010?

El propósito de la investigación fue determinar de qué manera las anomalías climáticas influyen en la estructura de nieve de los glaciares centrales del Perú. Relacionándolo con el régimen de precipitaciones, que puedan explicar las causas del incremento. Los cambios en el régimen de las precipitaciones son los factores que inciden en el incremento o disminución de la masa de nieve de los glaciares y cuyo comportamiento responde principalmente a condiciones atmosféricas regionales y locales conocidos como anomalías.

MATERIAL Y MÉTODOS

La cordillera Huaytapallana y la cordillera Pariaqaqa, están ubicada en la cordillera oriental y occidental de los Andes centrales del Perú, la cordillera Huaytapallana forma parte del límite de las cuencas hidrográficas de los ríos Mantaro y Perené en la región Junín, es un sistema de glaciares de circo, caracterizado por la presencia de lagunas debido a la fusión de las masas de nieve y al retroceso glaciar que ha formado depresiones en donde se ha depositado el agua; entre ellas Chuspicocha, Lasuntay y Cochagrande, las cuales están retenidas por un dique morrénico. El represamiento del Chuspicocha y Lasuntay es el principal aporte directo de descargas en los meses de estiaje al río Shullcas, principal abastecedor de agua a la ciudad de Huancayo, capital de la región Junín. La cordillera de Pariaqaqa forma parte de los límites de Junín y Lima y abastece a varias lagunas de la zona occidental.

Se analizó las imágenes satelitales disponibles del sensor Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM +) de los archivos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, <http://landsat.usgs.gov/>). Se consideró los datos de Landsat ETM + y radiometría TM para comparar. Las imágenes del sensor MSS, a partir del año 1975 hasta el año 1983 y a partir del año 1984 se utilizará TM. Un total de 30 imágenes se procesaron para el análisis de las áreas cubiertas de hielo y las ubicaciones de los límites de nieve desde el mismo periodo. Además se tomaron las imágenes en invierno por ser considerado seco (junio -setiembre), y porque la nubosidad es baja, además de presentar una cobertura mínima de nieve durante la temporada. Estos procesos redujeron los errores de clasificación de las áreas cubiertas de hielo y proporcionaron la clasificación de los límites de nieves.

Las imágenes proporcionadas por el USGS se procesaron para realizar una corrección estándar del terreno (nivel 1 T), que nos proporciona el índice radiométrico sistemático y de precisión geométrica. Mediante la incorporación de puntos de control, de un modelo de elevación digital (DEM). Después de la corrección geométrica, la cobertura de sombras de nubes fue manualmente digitalizada y eliminadas.

En el tratamiento de las imágenes satelitales se ha utilizado el método de cálculo de NDSI (Normalized Difference Snow Index), que es un índice análogo al NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual ajusta al límite de cobertura glaciar diferenciándola de la roca. Mediante las reflectancias de las bandas 2 (espectro visible) y las bandas 5 (SWIR), y tiene la siguiente ecuación.

$$NDSI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5}$$

El valor umbral mínimo tomado a partir del cual se considera la transición de nieve a hielo, ha sido el elegido por el proyecto MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) cifrado en 0,4 como lo reporta McFadden et al. (24), seleccionándose las imágenes de los meses de junio, por ser un mes donde el grado de perpetuidad de la masa glaciar es mayor, debido a las bajas temperaturas y ausencia precipitaciones, como por la ausencia de nubes.

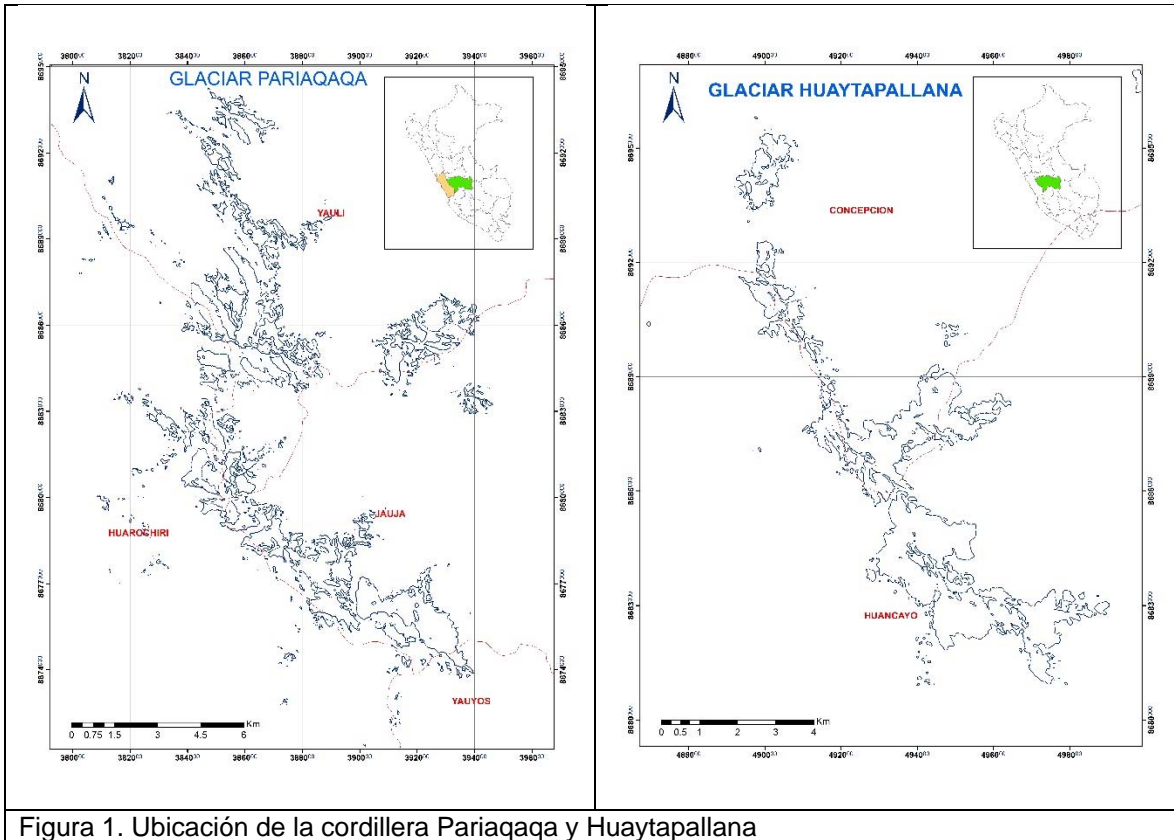


Figura 1. Ubicación de la cordillera Pariaqqa y Huaytapallana

También se realizó el análisis comparativo de cobertura glaciar de las imágenes de visualización libre, proporcionado por Google Earth que corresponde a las imágenes de Digital Globe de junio del año 1969 hasta el año 2014. Para el análisis del régimen de precipitación se han empleado los registros climáticos de dos estaciones meteorológicas de propiedad de ELECTROPERÚ (25), los cuales son más cercanos a la cordillera Huaytapallana y Pariaqqa. También se han utilizado la técnica de conversión de nieve granular a mm equivalente de precipitación para diferenciar la acumulación neta de nieve.

Las anomalías climáticas fueron obtenidas a partir de la utilización del método del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), que consiste en usar registros históricos de climatología, como base de comparación para una escala de tiempo dada. Propuesto por Nuñez et al. (26) y consiste en obtener la diferencia de precipitación a partir de la media dividido entre la desviación estándar, el cual modifica la serie de precipitación para convertirlo en una distribución normal.

Para la interpretación del SPI se adopta valores negativos y positivos consecutivos, alcanzando una intensidad de -1 o menor para la clasificación de sequía y de valores positivos superiores a 1 para periodos húmedos. Una vez que la distribución de anomalías de precipitación de una serie se ha transformado a una distribución normal, permite la obtención de valores válidos y comparables entre

distintas estaciones meteorológicas. La expresión de valores se consigue en términos de probabilidad de ocurrencia de las anomalías.

Tabla 1. Clasificación por el Método PSI

Categoría	Valores SPI
Extremadamente seco	Inferiores a -2
Muy seco	-1.5 a -1.99
Moderadamente seco	-1.0 a -1.49
Normal	-0.99 a 0.99
Moderadamente lluvioso	1.00 a 1.49
Muy lluvioso	1.50 a 1.99
Extremadamente lluvioso	Mayores a 2

Fuente: NCAR (National Center for Atmospheric Research)



Figura 2. Perforaciones para determinar el volumen de masa acumulada.

Para determinar la variabilidad mensual, estacional y decadal de las precipitaciones se utilizó el método matemático de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que transforma una función del tiempo en una función de la frecuencia. Su utilidad se expresa en la determinación de la variabilidad climática porque son fenómenos dependientes del tiempo.

$$f(t) = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$$

RESULTADOS

Anomalías climáticas

Las anomalías climáticas del glaciar Pariaqaqa y Huaytapallana se presenta en la figura 3 (a y b). La frecuencia de eventos que corresponde al glaciar Pariaqaqa se distribuye en 37 años normales, un año extremadamente seco (1991), un año categorizado como muy seco (1990) y tres años moderadamente seco (1965, 1967, 2013). De igual manera se observa dos años extremadamente lluviosos (1972 y 2010), dos años muy lluviosos (1966 y 2011) y tres años moderadamente lluviosos (1966, 1973 y 2009).

La distribución de eventos para el glaciar Huaytapallana, corresponde a 33 años con precipitaciones normales un año extremadamente seco (1991), tres años muy secos (1986, 2005 y 2009) y tres años

moderadamente secos (1976, 1989 y 2013). Para eventos húmedos se registraron dos años extremadamente lluviosos (1985 y 2010), un año muy lluvioso (1966) y seis años moderadamente lluviosos (1981, 1983, 1987, 1993, 2002 y 2008).

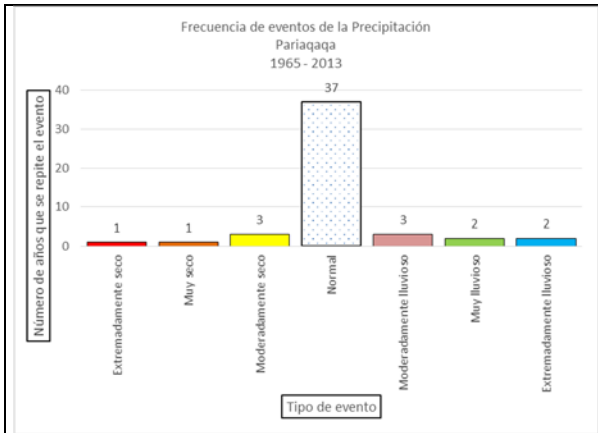


Figura 3a. distribución de frecuencia de eventos del glaciar Pariaqqa.

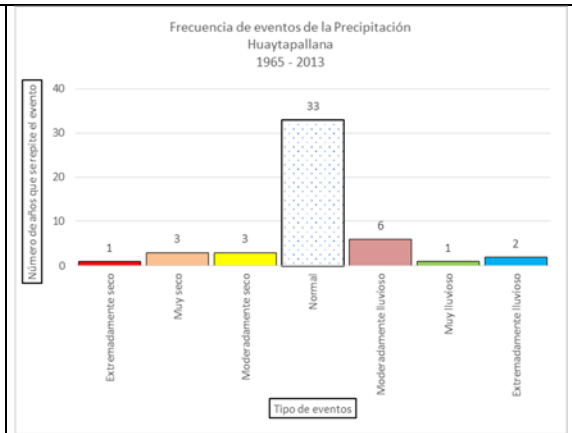


Figura 3b. Distribución de frecuencia del glaciar Huaytapallana.

La figura 4 (a y b) presentan las anomalías registradas en la acumulación de mantos de nieve del glaciar Pariaqqa y Huaytapallana. El año 1991 muestra una anomalía extremadamente seca para ambos glaciares y coincidentemente el año 2010 se presenta un evento extremadamente húmedo que permite acumular mantos de nieve muy significativamente. Las diferencias en los sistemas de acumulación muestran comportamientos que distinguen a ambos glaciares. Sin embargo es el glaciar Huaytapallana que muestra mayores anomalías en la acumulación de nieve.

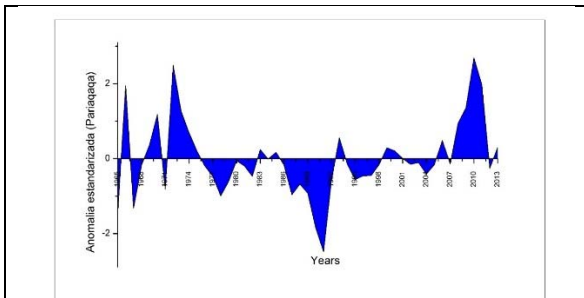


Figura 4a. Anomalia de acumulación de mantos de nieve del glaciar Pariaqqa.

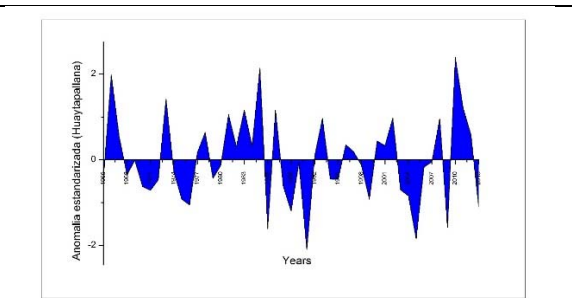


Figura 4b. Anomalia de acumulación de mantos de nieve del glaciar Huaytapallana.

Variabilidad climática

La figura 5 (a y b), muestra la variabilidad climática de las cordilleras Pariaqqa y Huaytapallana. A partir del comportamiento mensual de precipitación acumulada se encontró las siguientes variaciones. La cordillera Pariaqqa presenta variaciones anuales con mayor frecuencia e interanuales cada cuatro y seis meses. También presenta variaciones estacionales cada tres meses y variaciones intraestacionales cada dos meses. La cordillera del Huaytapallana presenta dos variaciones. Una variabilidad anual y una variabilidad interanual cada seis meses.

La variabilidad anual es el evento que se repite con mayor frecuencia con amplitudes de 60mm en ambos cordilleras. Luego se encuentra la variabilidad interanual de seis meses con una amplitud de 18mm. Este tipo de variabilidad interanual define dos periodos para la cordillera Huaytapallana, un periodo húmedo y un periodo seco (estiaje). Para la cordillera Pariaqqa, también existe una

variabilidad estacional cada 3 meses con una amplitud de 10mm. Esta variabilidad define las influencias estacionales del verano, otoño, invierno y primavera. Además se observa una variabilidad intraestacional cada dos y cuatro meses con amplitudes de 5mm.

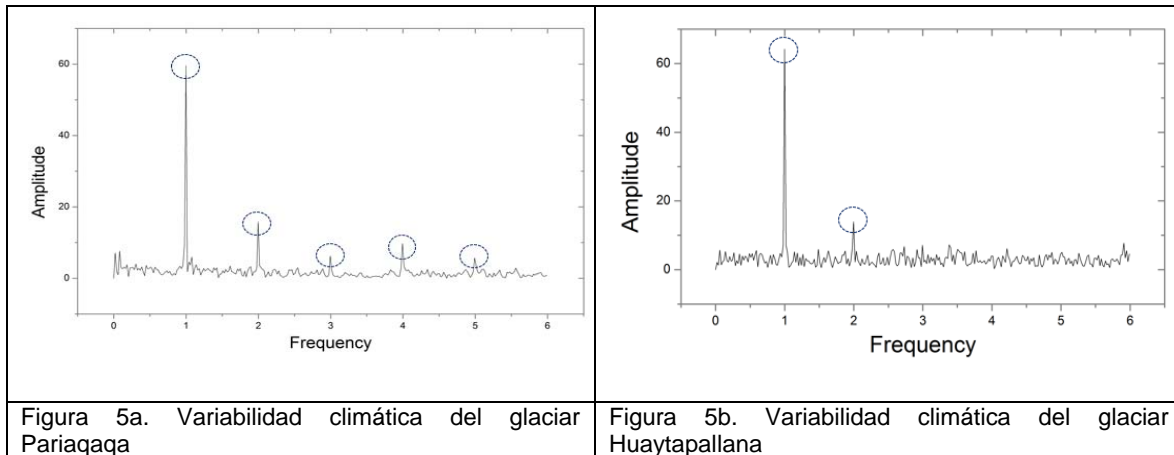


Figura 5a. Variabilidad climática del glaciar Pariaqaqa

Figura 5b. Variabilidad climática del glaciar Huaytapallana

Eventos atípicos

La figura 6 (a y b) muestra los eventos atípicos de las precipitaciones para la cordillera Pariaqaqa y Huaytapallana. En la cordillera Pariaqaqa se encontró varios eventos atípicos en los meses de diciembre, enero y febrero. Para el mes de diciembre se encontró cuatro eventos anómalos positivos con precipitaciones superiores en dos desviaciones al tercer cuartil. El año 2009 (186mm), 2010 (202mm), 2011 (195mm). También se encontró un evento anómalo negativo para el mes de diciembre en el año 1971 (1,1mm). Para el mes de enero se encontraron seis eventos atípicos positivos y un evento negativo que corresponde al año 1991 (59,1mm). Finalmente para el mes de febrero se encontró dos eventos atípicos positivos en los años 2010 (190,7mm) y 2011 (199,4mm) y un evento atípico negativo que corresponde al año 1965 (28,5mm).

Para la cordillera Huaytapallana, se encontró menores eventos atípicos en los meses de diciembre, enero y febrero. En el mes de enero se encontró dos eventos atípicos positivos que corresponde al año 2010 (190,7mm) y el 2011 (199,4mm). El evento atípico negativo fue el año 1965 (28,5mm). Para el mes de enero se encontró un evento atípico positivo para el año 1977 (294,2mm) y finalmente se encontró un evento atípico negativo para el mes de febrero que corresponde al año 1997 (0mm).

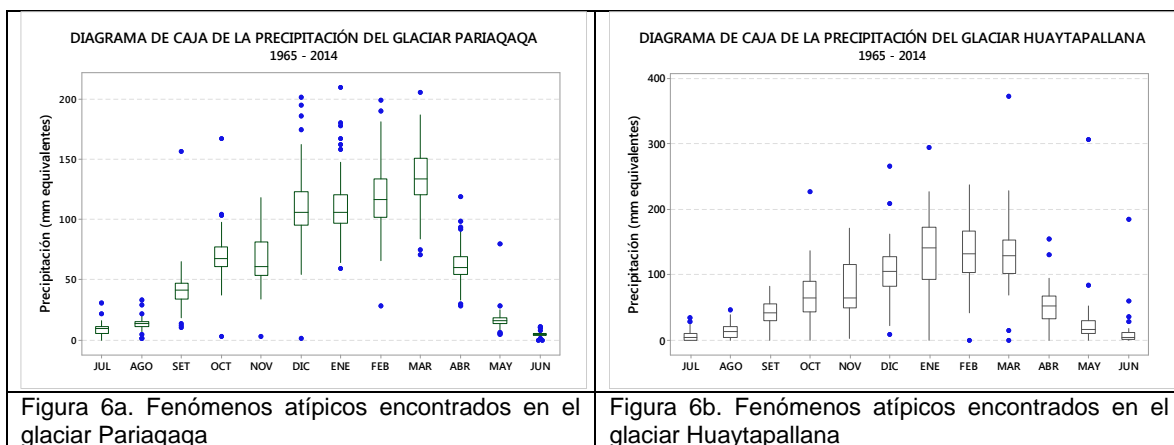


Figura 6a. Fenómenos atípicos encontrados en el glaciar Pariaqaqa

Figura 6b. Fenómenos atípicos encontrados en el glaciar Huaytapallana

Relación entre anomalías climáticas y cobertura de nieve

En la figura 7 y 8 se muestran la distribución de puntos de las anomalías climáticas y la cobertura de nieve de los glaciares Pariaqaqa y Huaytapallana. El grado de relación entre ambas variables es de $r = 0.75$ para el glaciar Pariaqaqa y de $r = 0.80$ para el glaciar Huaytapallana. Ello indica el alto grado de asociación entre ambas variables que define el comportamiento de la cobertura de nieve en ambos glaciares.

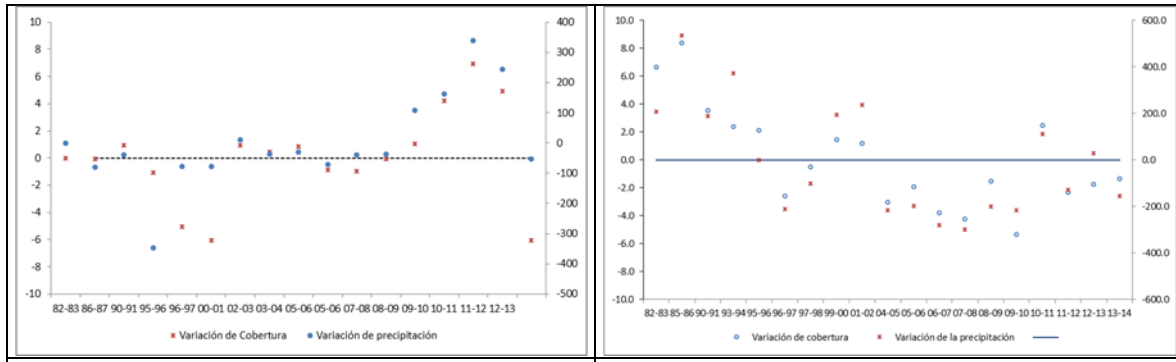


Figura 7. Variaciones en el glaciar Pariaqaqa

Figura 8. Variaciones en el glaciar Huaytapallana

Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve

En la figura 9 y 10 se presenta la regresión lineal entre las anomalías climáticas (variaciones de la precipitación en mm) y la cobertura de nieve (variaciones del manto de nieve en km²). Las anomalías de la precipitación explican el 55% de la cobertura del manto de nieve del glaciar Pariaqaqa y el 64% del glaciar Huaytapallana. Una anomalía positiva influye en mayor cobertura y un efecto negativo disminuye la masa del manto de nieve. Además el factor de cambio $\frac{\Delta cobertura}{\Delta precipitación} = 0,0145$ para el glaciar del Pariaqaqa y de $\frac{\Delta cobertura}{\Delta precipitación} = 0,0135$ para el glaciar Huaytapallana.

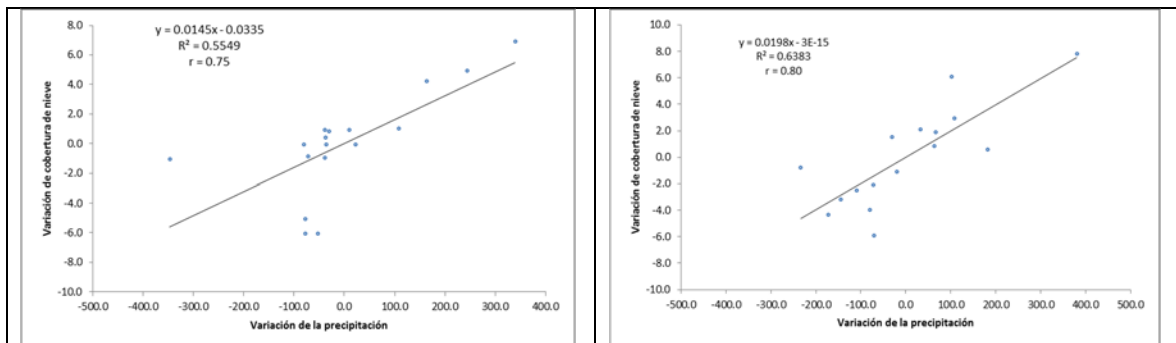


Figura 9. Línea de regresión lineal entre las variaciones de la precipitación y la variación de la cobertura de nieve del glaciar Pariaqaqa.

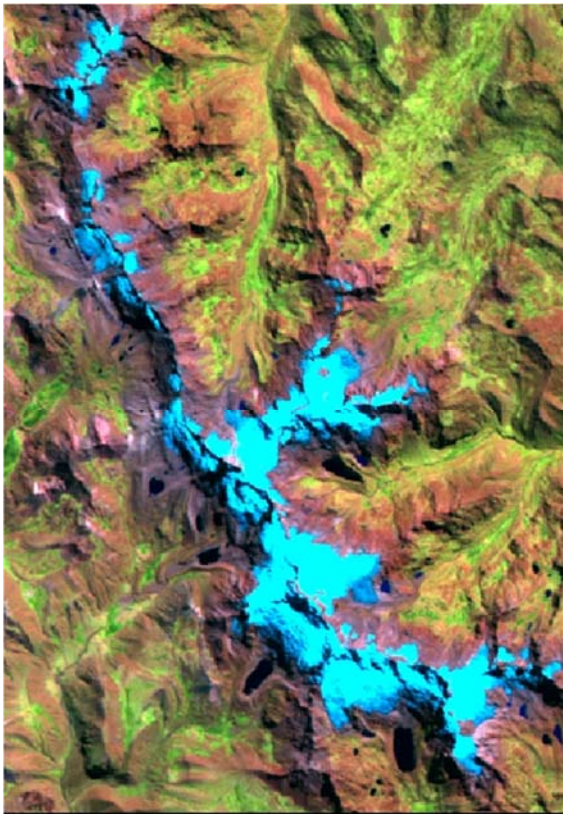
Figura 10. Línea de regresión lineal entre las variaciones de la precipitación y la variación de la cobertura de nieve del glaciar Huaytapallana.

Cambios observados en la cobertura del manto de nieve del glaciar Huaytapallana por efectos de las anomalías climáticas del año 2010 y 2012

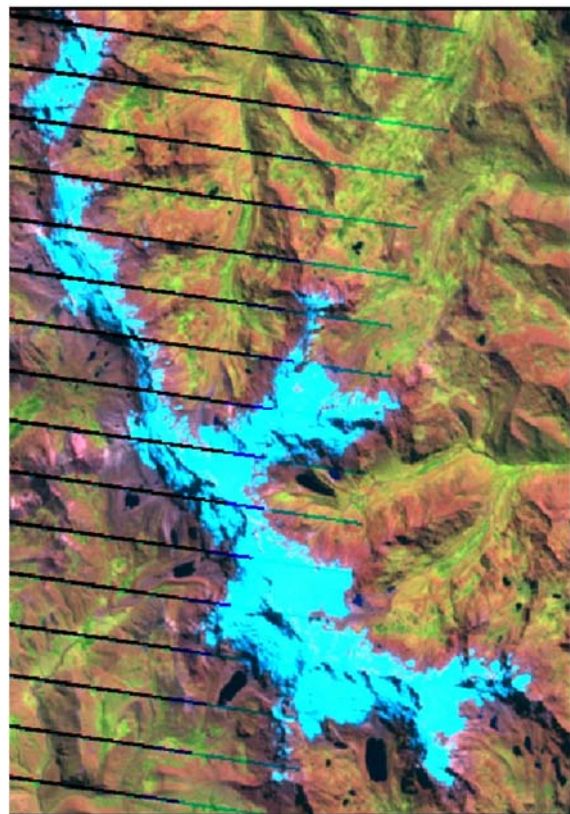
La extensión de cobertura de masa glaciar entre dos momentos temporales que corresponden a imágenes satelitales del año 2010, considerado como el punto crítico de disminución de la cobertura y del 2012 como el punto de acumulación máxima registrada con respecto a la imagen del año 2010 son presentados en la figura 11. Ambas imágenes se analizan con el régimen hídrico que corresponde al periodo del ciclo hidrológico 2009-2010 que tiene relación con una disminución de

las precipitaciones por debajo de su normal o patrón pluviométrico y al ciclo hidrológico que corresponde al periodo 2011-2012, en relación a la normal climática.

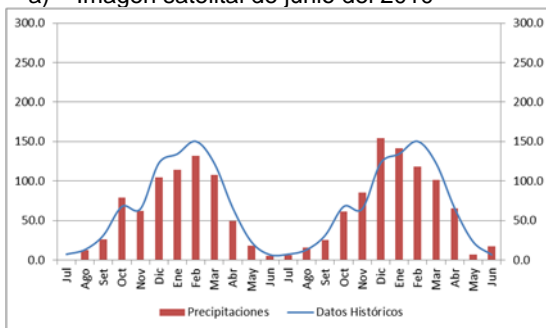
En el periodo del ciclo hidrológico 2010-2011, el régimen pluviométrico se incrementó en 50% sobre la normal pluviométrica conocida, factor que tiene relación con la recuperación de la cobertura de masa glaciar. Mientras que los periodos 2009-2010 corresponde a periodos deficitarios por presentar valores por debajo de su patrón o normal pluviométrico.



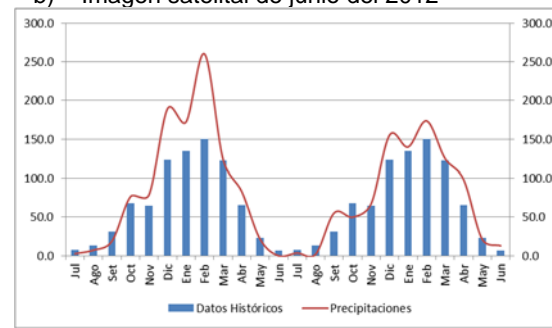
a) Imagen satelital de junio del 2010



b) Imagen satelital de junio del 2012



c) Régimen pluviométrico 2009-2010

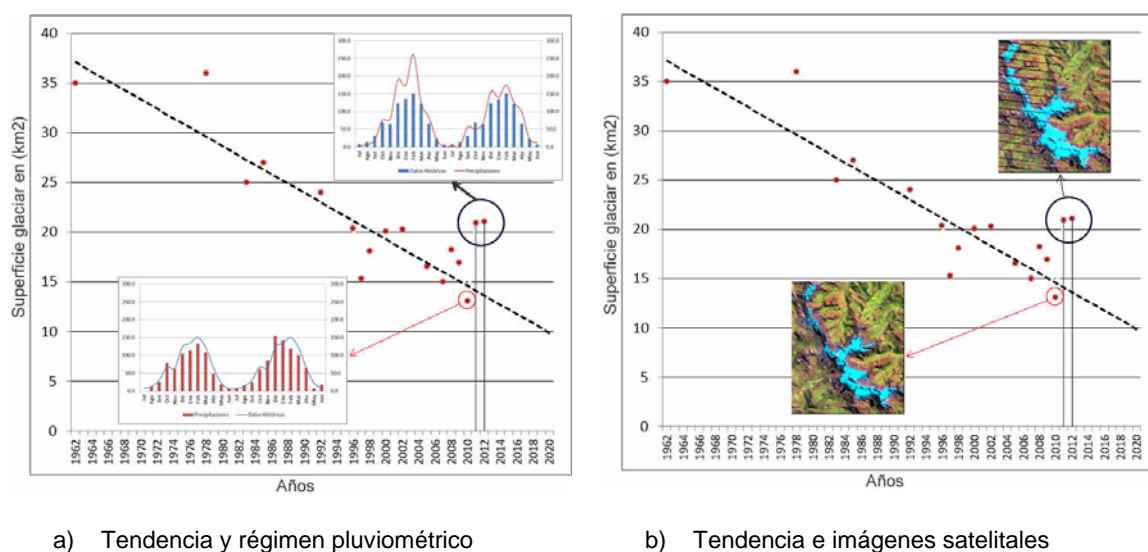


d) Régimen pluviométrico 2011-2012

Figura 11. Observaciones comparativas entre dos momentos temporales de imágenes satelitales de las variaciones de la cobertura de masa glaciar del nevado del Huaytapallana que corresponde a los ciclos hidrológicos del 2009-2010 y 2011- 2012. También se presenta la variación del régimen pluviométrico que corresponde a dos periodos hidrológicos, de la fase de disminución crítica y aumento significativo en el 2012.

Tendencia de la cobertura del manto de nieve en el glaciar Huaytapallana

En la figura 12 se compara dos periodos de análisis uno que corresponde a un punto crítico del año 2010 y la cobertura de masa glaciar del año 2012 (figura 12a). También se analiza las imágenes satelitales del año 2010 y del 2012 (figura 12b) y se compara con los puntos de tendencia registrada. Además se presentan en la misma línea de tendencia las imágenes de satélite que corresponden al periodo del 2010 y al periodo final de la evaluación del 2012. Ambas imágenes constituyen las evidencias empíricas del efecto de las anomalías climáticas en la cobertura del manto de nieve del glaciar por cambios en el régimen pluviométrico.



a) Tendencia y régimen pluviométrico

b) Tendencia e imágenes satelitales

Figura 12. Puntos que indican la cobertura de la masa glaciar desde el año 1961, realizado mediante fotografía aérea hasta el año 2012 realizado mediante imágenes satelitales. Se presenta una línea de tendencia negativa hasta el año 2010 y un cambio o recuperación durante el año 2011 y 2012.

DISCUSIÓN

Las anomalías climáticas tienen un efecto en la cobertura del manto de nieve de los glaciares que se encuentran en las cordilleras de los Andes centrales del Perú. El glaciar del Pariaqaqa (figura 9) tiene un coeficiente de determinación de 0,55 que indica que las anomalías presentadas en las precipitaciones influyen en la cobertura de nieve; esto constituye el principal factor de cambios en el manto de nieve. En el glaciar del Huaytapallana (figura 10) el coeficiente de determinación es de 0,63 que explica el efecto de las anomalías climáticas en la cobertura del manto de nieve. Estos resultados confirman las conclusiones del estudio de López et al (16), quienes afirman que las variaciones en las precipitaciones son el principal factor de cambio en la cobertura de nieve del glaciar Huaytapallana.

Además el manto de nieve que cubre los glaciares Pariaqaqa y Huaytapallana, están condicionados por la variabilidad del clima que modifica el régimen y la estacionalidad del manto de nieve, esto refuerza los estudios de Lagos (23) quién afirma que la variabilidad climática constituye un mecanismo importante de carga y recarga de los mantos de nieve. También Ames y Francou (8) mencionan los efectos que tienen la variabilidad climática en los mantos de nieve anual. Viulle y Bradley (12) aclaran que la variabilidad climática está condicionada por los cambios en la atmósfera.

En los glaciares del Pariaqaqa y Huaytapallana se encontró dos variaciones en la cobertura del manto de nieve de mayor intensidad (figura 5a y 5b). Estas variaciones dependen de los cambios en la circulación atmosférica del Atlántico que condiciona el comportamiento del clima en un periodo seco y otro húmedo como menciona Espinoza et al. (27). Los cambios en la circulación del Pacífico que se manifiesta en las estacionalidades (otoño, invierno y primavera) influyen en menor intensidad en el comportamiento del manto de nieve del glaciar Pariaqaqa pero no del glaciar Huaytapallana como también lo reporta Brecher (28).

Estos comportamientos diferentes en la variabilidad climática indican la importancia que tiene la subsidencia del pacífico sur en el glaciar Pariaqaqa. La estación de invierno no es totalmente seco debido a la contribución húmeda del Anticiclón del Pacífico Sur (SEPA) como la menciona Schulz et al. (28). Además la variabilidad intraestacional que se presenta cada dos y cuatro meses ayuda en la conservación de grandes flujos de mantos de nieve. Mientras que el glaciar Huaytapallana no tiene esa contribución adicional.

En la serie de análisis de anomalías secos o extremadamente secos. El periodo del año 1991 se considera como un año extremadamente seco para ambos glaciares (Figura 3a y 3b). Esto constituye el único año que coinciden en el análisis de periodos extremadamente secos. La cobertura del manto de nieve de ambos disminuyó considerablemente hasta dejar expuesto el hielo glaciar en la temporada de humedad. El déficit de precipitación se asocia a un cambio en las condiciones de circulación global debido a la presencia del fenómeno del niño como lo da a conocer Viulle (1). Posteriormente se observa dos años muy secos en el glaciar Pariaqaqa y tres años en el glaciar Huaytapallana que se asocia a la desglaciación significativa de muchos glaciares como lo afirma Rabatel (20).

El periodo del año 2010, se observa como como el año extremadamente húmedo para ambos glaciares (Figura 3a y 3b). Espinoza et al (27) asocia el enfriamiento de la atmósfera con la presencia del fenómeno de la niña. Esta anomalía del clima positivo, ayudó a aumentar el volumen de los mantos de nieve en ambos glaciares. Además en el glaciar Pariaqaqa se presentaron dos años considerados muy húmedos, mientras que en el glaciar Huaytapallana se registró únicamente un año considerado como muy húmedo. Estas anomalías positivas son favorables para aumentar la cobertura del manto de nieve.

En el glaciar Pariaqaqa se presentan más fenómenos atípicos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo que coincide con la temporada de precipitaciones (figura 6a y 6b) . Se observa variaciones positivas hasta el doble de su normal climática que repercute en mayor acumulación y mayor área cubierta de nieve. En el glaciar Huaytapallana se observa pocos fenómenos atípicos positivos, todos los eventos se encuentran dentro del rango de su variabilidad como lo menciona Arroyo et al. (22).

Con respecto a los cambios observados en la cobertura del manto de nieve del glaciar Huaytapallana debido a la anomalía climática de los años 2010 y 2012, se atribuye al fenómeno de la niña del nivel moderado. Este cambio en la circulación atmosférica permitió obtener una mayor cobertura de nieve en ambos glaciares como lo menciona Wilks (30). En el glaciar del Huaytapallana (figura 11). La imagen satelital muestra la cobertura que diferencia al año 2010. Esto se puede explicar mediante los cambios observados en la temperatura y la precipitación desde el año 2009 hasta el año 2012 (Tabla 2). Una anomalía negativa (años 2009 y 2010) puede reducir el glaciar hasta 8,0km². Mientras una anomalía positiva puede favorecer a la cobertura del manto de nieve hasta 9,0km². Esto lo

reporta Kaser y Osmaston (9). Esta variación permitió modificar la tendencia de la cobertura de mantos de nieve (figura 12) para luego retornar a su tendencia negativa.

Tabla 2. Resultado de variaciones de temperatura, precipitación y cobertura del manto de nieve del glaciar Huaytapallana.

Variables	Años		Total	Años		Total	Diferencias
	Cálidos			Templados			
Variaciones con respecto a su media	2009	2010		2011	2012		
Temperatura en grados centígrados (°C)	0,27	0,75	0,51	0,11	0,14	0,13	0,39
Precipitación en milímetros de lluvia (mm)	-67,4	-84,6	-152,0	334,3	213,2	547,5	699,5
Cobertura glaciar del nevado Huaytapallana en km ²	-2,1	-5,9	-8,0	3,9	5,1	9,0	11,0

AGRADECIMIENTOS

A Rosalind Arroyo y Edsel Arroyo por la colaboración en el tratamiento y análisis de datos de campo. A Wyler Espeza y Frans Cornejo por su apoyo en los trabajos de campo. A Wilfredo Bulege y a la Universidad Continental por el apoyo logístico. Al IGP por su apoyo científico en la investigación y finalmente a Domingo Rosales por contribuir con algunas metodologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Viulle M. Burns S. Taylor B. et. al. A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. 2012.
2. Thompson L. Mosley-thompson E. Davis M. et. al. Tropical glacier, records and indicator of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology*. 2011
3. Francou B, Ribstein P, Wagnon P, Ramirez E, Pouyaud B. Glaciers of the tropical Andes: indicators of global climate variability. In: Huber, U., Bugmann, H.K.M., Reasoner, M.A. (Eds.), *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*, vol. 23. Springer, Dordrecht: Ediciones IRD; 2005.
4. Bury J., Mark B., McKenzie J.M., French A., Baraer M., In Huh, K., Zapata Luyo, M.A., Gomez Lopez, R.J. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change* 105, 179–206. 2011.
5. Georges C. The 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36 (1), 100–107. 2004.
6. Francou B, Vuille M, Wagnon P, Mendoza J & Sicart JE. Tropical Climate Change Recorded by a Glacier of the Central Andes During the Last Decades of the 20th century: Chacaltaya Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*; 2003.
7. Kaser G., Georges C. On the mass balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca. *Geografiska Annaler* 81A (4), 643–651. 1999
8. Vuille M., Bradley R.S., Werner M., Keimig F. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Clim. Chang.* 59 (1–2), 75–99. 2003.

9. Kaser G. Osmaston H. Tropical Glaciers. Cambridge: University Press - United Kingdom; 2002.
10. Racoviteanu A.E., Manley W., Arnaud and., Williams M.W. Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: an example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Glob. Planet. Chang.* 59 (1–4), 110–125. 2007.
11. Mark B.G. Tracing tropical Andean glaciers over space and time: some lessons and transdisciplinary implications. *Global and Planetary Change* 60 (1–2), 101–114. 2008.
12. Bradley R.S., Keimig F.T., Diaz H.F. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters* 31 L16210. 2004.
13. Chevalier P., Pouyand B., Suarez W., Condom T. Climate change threats to environment in the Tropical Andes: glaciers and water resources. *Reg. Environ. Chang.* 11 (1), 179–187. 2011
14. Sicart J.E., Wagnon P., Ribstein P. Atmospheric controls of heat balance of Zongo Glacier (16° S, Bolivia). *J. Geophys. Res.* 110 (D12106). 2005
15. Zubieta R, Lagos P. Cambios de la superficie glaciar en la cordillera Huaytapallana: periodo 1976 - 2006. En *Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro- Balance de 7 años de estudio.* Publicación Institucional – Instituto Geofísico del Perú. Lima. 2010.
16. López – Moreno J. Fontaneda J. Bazo J. Revuelto J. Azorin-Molina C. Valero-Garcés E. et al. Recent glacier retreat and climate trend in Cordillera Huaytapallana, Peru. 2013
17. Ames A. Francou B. Cordillera Blanca: Glaciares en la Historia. En *Boletín Institucional de estudios Andinos.* Paris 1995, 24(1): 37-64
18. Fraser B. Melting in the Andes: Goodbye glaciers. *Nature* 491, 180–182. 2012.
19. Mark B.G., Seltzer G.O. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quat. Sci. Rev.* 24, 2265–2280. 2005.
20. Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.-E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Ménégos M., Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M., Wagnon P. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere* 7, 81–102. 2013.
21. Portocarrero C. Retroceso de glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos. *Bull. Institut Fr. Étud. Andines* 24 (3), 697–706. 1995.
22. Arroyo, J. Tendencias y cambio del clima del valle del Mantaromediante los análisis de índices de precipitación efectiva y temperatura eficiente. *Apuntes Cienc. Soc.* 01, 45–54. 2011.
23. Lagos P., Silva Y., Nickl E. El Niño y la precipitación en los Andes del Perú. *Bol. Soc. Geol. Lima Espec.* 6, 7–23 (Alberto Giesecke Matto). 2005.
24. McFadden, E.M., Ramage, J., Rodbell, D.T., 2011. Landsat TM and ETM+ derived snowline altitudes in the Cordillera Huayhuash and Cordillera Raura, Peru, 1986–2005. *Cryosphere* 5, 419–430.
25. ElectroPerú. Boletín Anual de precipitaciones y análisis hidrológico de la Cuenca del Mantaro. V1. N° 10. 2013.

26. Nuñez S., Nuñez L., Podesta G., Skansi M. El Índice Estandarizado de Precipitación como Herramienta para la Caracterización y el Monitoreo de la Sequía: Una Prueba de Concepto. En Abstract submitted to CONGREGMET IX, 9th. Argentina congress of Meteorology. Buenos Aires 3 – 7 10 2005.
27. Espinoza J-C., Ronchail J., Guyot J., Junquas C., Vauchel P., Lavado W., Drapeau G., Pombosa R. Climate variability and extreme drought in the upper Solimoes River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*. 2011
28. Brecher H.H., Thompson L.G. Measurement of the retreat of Qori Kalis Glacier in the Tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 59, 1017–1022. 1993.
29. Schulz N., Boisier P., Aceituno P. Climate Change Along the Arid Coast of Northern Chile. *International Journal of Climatology*. 2011
30. Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Second ed. Academic Press (618 pp). , 2006.