

SUBLIMACIÓN DE GLACIARES DE MENOR ALTURA EN LA CORDILLERA DE VILCABAMBA (CUSCO-PERÚ)

Feliciano Escobedo Silva.

Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA)

Resumen— La presente investigación sobre retroceso glaciar de los Nevados Oq'obamba y Moyoq (Lado Este de la cordillera de Vilcabamba) y sus implicancias en la disponibilidad hídrica de las cuencas de los ríos Lechería y Colorado (Limatambo) en el periodo de 2000 al 2015, ha permitido detectar que los glaciares de los nevados referidos no solo retroceden, se fragmentan, encapsulan, encogen y subliman ya no se derriten; por lo tanto, visiblemente no aportan ningún torrente hídrico a sus cuencas receptoras. El objetivo principal de la Investigación fue la determinación de la relación de las desglaciaciones con la disponibilidad hídrica de las cuencas directas receptoras que fueron monitoreadas en la estación hidrométrica del Puente Kunyay durante el periodo 2000 al 2015. Ambas variables fueron sometidas al análisis de correlación, obteniéndose el coeficiente de correlación de Pearson $r_{xy}=0.467$, deduciéndose que no existe una relación significativa entre el retroceso glaciar y la disponibilidad hídrica, los resultados de la Investigación indican que a mayor Incremento de la temperatura ambiental la Línea de equilibrio altitudinal (ELA), se está elevando a altitudes superiores a 5030 msnm calculados para el año 2012 y consigo la fragmentación, encapsulamiento, sublimación y desaparición de los glaciares en la cordillera de Vilcabamba.

Palabras clave— Disponibilidad hídrica, calibración de caudales, retroceso glaciar y sublimación de glaciares.

1 INTRODUCCIÓN

La motivación del presente estudio es entender el fenómeno del retroceso glaciar y su relación con la disponibilidad hídrica.

En cuanto al estado de arte, el presente estudio puntualiza el análisis de glaciares de menor altura ya que la mayoría de las investigaciones tratan sobre los nevados más representativos de las cadenas montañosas, los glaciares de menor altura son los más susceptibles y constituyen los mejores indicadores del cambio climático identificándose 2341 (87.38%) (Superficies menores o iguales a 1 km², y 338 glaciares mayores a 1 km². (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2007).

El forzamiento radiativo por el incremento de la temperatura ambiental que está generando la sublimación directa los glaciares (Suarez W., y otros, 2015). Estos cambios dramáticos en los glaciares de menor altura son una antesala a escala fractal de lo que sucederá con los glaciares de mayor altura, tal como está sucediendo con el Nevado Salkantay, cuyo ELA (Línea de equilibrio altitudinal) se incrementa en forma ascendente cada año (Monitoreo glaciar Inkachiriasq'a, (2014)).

A nivel mundial, la disminución de las extensiones de nieve y de hielo de la Criosfera concuerda también con el calentamiento global. Datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que el promedio anual de la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en un 2,7 (Entre 2,1 y 3,3) % por decenio. En resumen, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios. (Cambio climático 2007 Informe de Síntesis)

En el continente americano desde Alaska, Parque Nacional de los Glaciares en EE. UU, Volcanes Mexicanos, glaciares tropicales Andinos desde Venezuela hasta Bolivia y los glaciares patagónicos comprendidos entre Chile y Argentina en Sudamérica también están en un franco proceso de retroceso. (Word Glaciers Monitoring Service, 2008)

En el Perú se encuentra el 71% de los glaciares tropicales del mundo distribuidos en 19 cordilleras, En el periodo 1962/1970 se contabilizó 3044 glaciares que cubrían 2041.82

km², en el año 2009 se contabilizó 2679 glaciares disminuyendo su área a 1298.59 Km² (Pérdida del 42% en 40 años).

La cordillera de Vilcabamba, contaba con 355 glaciares comprendidos en una extensión de 169.15 km² sin embargo, en el año 2014 se redujo dramáticamente y una extensión de 15.53 Km² habiendo perdido 22.21 Km² equivalente al 58.85 %. (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2007)

Los Nevados Oq'obamba y Moyoq constituían, la reserva hidrológica ya que sus deshielos alimentaban a los ríos Lechería y Colorado en el distrito de Limatambo (Lado Sur) y del Riachuelo Silque en Ollantaytambo (Lado Norte), debido a que estos nevados se encuentran a altitudes muy próximas a la ELA (Altitud de la línea de equilibrio) determinadas en el glaciar Inkachiriasq'a (Nevado Salkantay) en 5030 m en el año 2012. (Monitoreo glaciar Inkachiriasq'a, (2014)).

El retroceso glaciar iniciado en los finales de Pequeña Edad del Hielo (PEH) en la cordillera de Vilcabamba (Licciardi et al, 2009) fue gradual intensificándose en la década del 1970 al 2007 (Martín de la Calle, 2014)

Todos creemos por sentido común que a mayor retroceso mayor aporte hídrico (Baraer, y otros, 2012); Sin embargo, los resultados del presente proyecto de investigación indican que en la actualidad los glaciares ya no se derriten ni aportan agua a las cuencas receptoras, donde los caudales de los torrentes glaciares han dejado de discurrir, en similitud a lo que está ocurriendo en el glaciar Julcal Chile (Ayala, Pellicciotti, & Burlando, 2017).

Como medida de solución a este fenómeno se propone iniciar políticas de adecuación al inevitable cambio climático y hacer conocer a la comunidad internacional sobre el retroceso acelerado de los glaciares en la cordillera de Vilcabamba en la región cusco-Perú.

2 ÁREA DE ESTUDIO

Específicamente los Nevados Oq'obamba (5050 msnm) y Nevado Moyoq (5150 msnm), ocupan el extremo Este de la cordillera de Vilcabamba, de la cadena oriental Andina comprendidos entre latitud: 13° 33' 47.17" -13° 28.4" Sur y longitud 72°34'30.71" - 72°32'43.88" Oeste.

En el área se han verificado la existencia de lagunas de origen glaciar, algunas con potencialidades de convertirse en Glofs (Flujos por el desborde violento de una laguna glaciar) con incrementos de volumen de agua que evidencian el fuerte retroceso glaciar en las últimas décadas (Guardamino & Drenkhan, 2016).

3 METODOLOGÍA

Se planteo como objetivo el análisis por correlación de la data de la desglaciación (Variable independiente) y los caudales generados (Variable dependiente) en el periodo 2000-2015, de cuyo resultado se obtendría el valor de estadímetro que permitiría la interpretación de resultados.

3.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE DIFERENCIA DE NIEVE (NDSI)

Para la obtención del NDSI, se realizó la descarga de las imágenes satelitales Landsat de la United States Geological Survey (USGS) mediante la: www.usgs.gov en el periodo 2000 al 2015, se consideró las imágenes satelitales de los meses de Mayo a Julio debido a la mayor ablación en los referidos meses (Hall, Riggs, Foster, & Kumar, 2010).

El proceso se inició con la descarga de las imágenes de los satélites Landsat, obtenidos con sensores MSS, TM y OLI de acuerdo a su disponibilidad tecnológica(2000-2015) y que tienen la capacidad de distinguir altas reflectancia de los glaciares comparadas con las zonas circundantes no nevadas, vegetación y agua, siendo el objetivo principal determinar la reflectancia homogénea circundantes no nevadas, vegetación y agua, siendo el objetivo principal determinar la reflectancia homogénea (Hielo/Nieve) y con gran contraste en relación a los elementos vacíos suelo-roca.

Se aplicó el proceso de la clasificación no supervisada de imágenes satelitales mediante las correcciones: Geométrica, Radiométrica y la atmosférica, Asimismo se georreferenció y se puso en formato Geo-TIFF con coordenadas geográficas Latitud/Longitud con resolución espacial de 30 metros y en Datum WGS84.

Se consideró como cubierta nival cualquier celda que sea superior a un valor de 0,4 μm , este valor se considera como una orientación, puesto que el valor del “NDSI” depende del ángulo de elevación solar y las condiciones atmosféricas. (Dozier, 1989)

Para el análisis multitemporal se calculó la superficie (km²) para toda la superficie cubierta por glaciares y nevadas de los cuatro glaciares en el periodo y cumpliendo las recomendaciones de Dozier, utilizó la formula conocida:

$$NDSI = \frac{(B2-B5)}{(B2+B5)}$$

(1) Con lo que se obtuvo resultados y cálculo la tasa se retroceso glaciar y la tendencia del retroceso glaciar.

3.2 TENDENCIA DEL RETROCESO Y LAS PRECIPITACIONES NIVALES

La tendencia de secuencia de las precipitaciones nivales a los glaciares y cumbres temporales de nieve es negativa. indica que cada año está disminuyendo 0.05 Km². Esta retroalimentación es insuficiente para alcanzar un estado de equilibrio que permita la acumulación, por lo que se encuentra en permanente estado de ablación (Vuille M., Bradley, Francou, Kaser, & Mark, 2007).

TABLA 1
ÁREAS DE LA CUBERTURA GLACIAR Y
PRECIPITACIONES NIVALES EN EL PERIODO 2000-2015

Año	Sensor	Area (Km2)		Tasa
		Neta	Variacion	Retroceso (%)
2000-2001	4 TM	1.398	-	-
2001-2002	4 TM	5.148	-3.750	268.240
2002-2003	5 TM	0.390	4.760	-92.420
2003-2004	5 TM	2.609	-2.220	568.970
2004-2005	5 TM	0.088	2.520	-96.630
2005-2006	8 TM	5.857	-5.770	6,555.680
2006-2007	5 TM	0.025	5.830	-99.570
2007-2008	5 TM	0.124	-0.100	396.000
2008-2009	5 TM	0.901	-0.780	626.610
2009-2010	5 TM	0.288	0.610	-68.040
2010-2011	5 TM	3.465	-3.180	1,103.130
2011-2012	5 TM	8.465	-5.000	144.300
2012-2013	8 OLÍ	0.041	8.420	-99.520
2013-2014	8 OLÍ	0.915	-0.870	2,131.710
2014-2015	8 OLÍ	0.028	0.890	-96.940

TABLA 2
TENDENCIA DEL RETROCESO GLACIAR

AÑOS(X)	ÁREA(Y)	X	Y	XY	X ²	Y ²
2000-2001	1.40	1	1.40	1.40	1	1.95
2001-2002	5.15	2	5.15	10.30	4	26.50
2002-2003	0.39	3	0.39	1.17	9	0.15
2003-2004	2.61	4	2.61	10.44	16	6.81
2004-2005	0.09	5	0.09	0.44	25	0.01
2005-2006	5.86	6	5.86	35.14	36	34.30
2006-2007	0.03	7	0.03	0.18	49	0.00
2007-2008	0.12	8	0.12	0.99	64	0.02
2008-2009	0.90	9	0.90	8.11	81	0.81
2009-2010	0.29	10	0.29	2.88	100	0.08
2010-2011	3.47	11	3.47	38.12	121	12.01
2011-2012	8.47	12	8.47	101.58	144	71.66
2012-2013	0.04	13	0.04	0.53	169	0.00
2013-2014	0.92	14	0.92	12.81	196	0.84
2014-2015	0.03	15	0.03	0.42	225	0.00
TOTAL		120	29.74	224.50	1240	155.14

En el cual los parámetros obtenidos fueron:

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} = 2.37 \quad b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} = -0.05$$

Siendo la curva resultante: $Y = 2.37 - 0.05 X$,



Figura 1. Variaciones del retroceso glaciar periodo 2000-2015.

El análisis de la tendencia del retroceso tanto en los cuatro glaciares analizados y de las precipitaciones nidales en las áreas dentro de las cuencas consideradas indican una tendencia negativa de menos 0.05 Km²/año, esta tendencia permite pronosticar los nevados Oq'obamba y Moyoq perderán toda su cobertura glaciar en el año 2030.

La variación de las áreas de retroceso y la frecuencia de nevadas en las áreas pos retroceso en el periodo 2000-2015 se observa que el índice Oceánico El Niño (ONI) ((Senamhi), 2014), que es uno de los más utilizados (Veetil, y otros, 2016) que donde se distinguen los fenómenos del Niño –Oscilación (ENOS y la “Niña”, se ha verificado la existencia de cierta coincidencia del proceso de las precipitaciones nidales que han retroalimentado a los glaciares de los nevados Oq'obamba y Moyoq, con los fenómenos del “Niño” y la “Niña”, indican que durante los años de predominio del “niño” disminuye las precipitaciones nidales y se incrementa cuando ocurre la “Niña” de lo cual se desprende que durante la “Niña” se recargan los glaciares y cumbres temporales de Nieve y durante el “Niño” disminuyen. (Perry, y otros, 2016).

Debido a que los glaciares analizados están a alturas inferiores al ELA (Vuille M., Bradley, Francou, Kaser, & Mark, 2007), presentan un comportamiento caótico y su retroalimentación se da únicamente durante las nevadas esporádicas y con mayor incidencia durante la presencia del fenómeno de la “Niña”.

3.3 CÁLCULO DE LA SUPERFICIE GLACIAR EXISTENTE AL AÑO 2015.

Como se puede evidenciar mediante imágenes satelitales del Google Earth los glaciares de nevados Oq'obamba y Moyoq se han reducido dramáticamente y continúan fragmentándose.

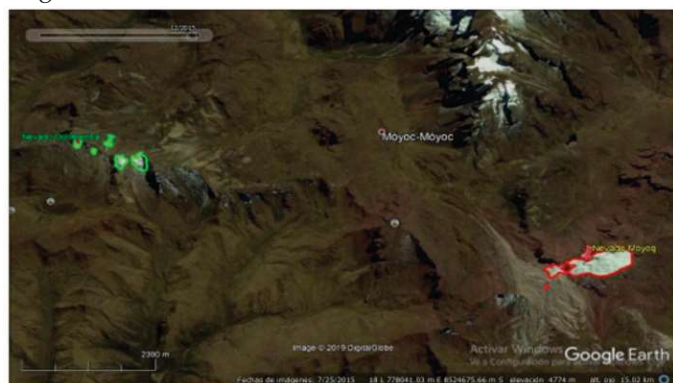


Figura 2. Nevado Oq'obamba (Color verde fosforescente) y Nevado Moyoq (Color rojo). Fuente: Google Earth.

Se verificó durante la visita de campo el nevado Oq'obamba (5050 msnm) la fragmentación en cuatro cuerpos encapsulados los dos ubicados en el lado izquierdo (Lado Oeste) se están subdividiendo en fragmentos cada vez menores en definitiva se ha roto el equilibrio entre la acumulación y la ablación. Sin embargo, los dos cuerpos del lado derecho (Lado este) permanecen aún anclados a las concavidades topográficas del terreno y también por estar ubicado en el flanco sur de la cumbre contrario a los rayos solares en horas de la tarde, a mi criterio el Angulo de reflexión de los rayos solares también tienen incidencia en la capacidad de no derretimiento de la nieve. Las escasas retroalimentaciones de las precipitaciones nidales no son suficientes para recuperar su equilibrio.



Figura 3. Glaciar Yawarmaki en el Nevado Oq'obamba

Sin embargo, todos estos cuerpos no aportan ningún flujo superficial visible, sus causas directos donde años atrás eran visibles permanece secos. Sin embargo, podrían estar aportando mediante flujos subsuperficiales, teniéndose que hacer mayores investigaciones para comprobar la referida hipótesis.



Figura 4. Quebrada Yawarmaki sin flujo alguno.

El termino quechua “Yawarmaki” significa mano de sangre en referencia que antiguamente los deshielos trasportaban por la quebrada del mismo nombre sedimentos férricos oxidados de color rojo y en la actualidad permanecen secos.

Otro detalle importe que informar es que a medida el retroceso glaciar avanza también se observa el prosperamiento de plantas, gramíneas, musgos y líquenes tal como se pueden observar en la siguiente fotografía.



Figura 5. Avance de vegetación en las zonas tras el retroceso glaciar en el nevado Oq'obamba.

TABLA 3

ÁREA Y PERÍMETROS DE LOS FRAGMENTOS DE GLACIARES DE LOS NEVADOS OQ'OBAMBA Y MOYOQ AL AÑO 2015.

Nevado Moyoq			Nevado Oq'obamba			Total
Fracción	Perímetro (Km)	Área (Km²)	Fracción	Perímetro (Km)	Área (Km²)	
1	3.4	0.39	1	1.16	0.064	
2	1.35	0.2	2	0.96	0.044	
3	0.26	0.003	3	0.33	0.008	
	4.14		4	0.68	0.021	
Sub Total		0.49	Sub Total		0.12	0.61

A la fecha diciembre del 2015 los nevados Oq'obamba y Moyoq se han reducido a 0.61 Km², de los cuales el glaciar Llamawasi, ha perdido su superficie glaciar mucho antes del inicio de la investigación y según las imágenes satelitales del Google Earth histórico el glaciar Q'elwaq'ocha ha perdido su superficie glaciar en el año 2006.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN DE CURVA

Siendo la ecuación de calibración de Curva, la representación gráfica de las variaciones de las descargas(Q) en la sección transversal de un río, en función de las lecturas de mira (H) que se produce teóricamente en un régimen permanente ((Colindres, 2016), se ha considerado el registro de las descargas diarias durante los 15 años en el periodo 2000-2015, anotadas en la estación hidrométrica del puente Kunyay, mediante un Limnómetro, dado que es muy difícil lograr una medición directa y continua del caudal de un río.

Las mediciones del limnómetro se realizan tres veces por día y se contrastó con campañas de aforos periódicos para lo cual se utilizan equipos de última tecnología como Q-Liner y procesamiento en campo mediante software QTT. ((Senamhi), 2014).

La Ecuación de calibración de curva obtenida en la estación hidrométrica del puente Kunyay, para el río Apurímac es:

$$Y=41.647 \cdot H^{1.7652}$$

Donde: Y=Caudal del río Apurímac (m³/s) y H=Altura del limnómetro, en una sección determinada (m).

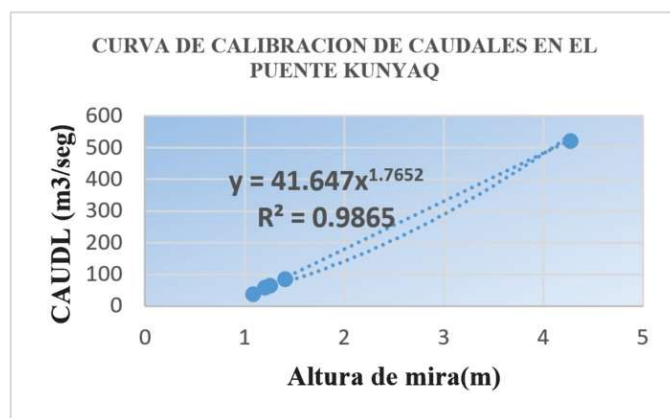


Figura 6. Curva de calibración obtenida de las campañas de aforo en la estación hidrométrica del puente Kunyay.

Una vez determinado el caudal en el puente Kunyay se pudo calcular, los caudales en el Alto Apurímac, río Bermejo también previa discriminación del río Blanco que colecta las aguas provenientes del nevado Salkantay y alrededores; Con la misma lógica se pudo establecer los caudales de los ríos Colorado y Lechería aplicándose la Ley de extrapolación de áreas y caudales.



Figura 7. Extrapolación de caudales y áreas.

Una vez precisado los caudales en los ríos Colorado y Lechería se calculó los caudales de las microcuencas directamente colectoras de los glaciares Oq'obamba y Moyoq: Llamawasi, Yawarmaki, Q'elwaq'ocha y Ch'akill. (Ver tabla N° 05).



Figura 8. Estación hidrométrica del puente Kunyay en el Río Apurímac (Km 100 Carretera Cusco-Abancay)

Las campañas de aforos son ejecutadas por personal técnico especializado del servicio nacional de meteorología e Hidrología de Perú, zonal Cusco.



Figura 9. Aforo con Q-Liner en la Estación hidrométrica del puente Kunyayq.

TABLA 4
CÁLCULO DE CAUDALES DE LOS RÍOS
COLORADO Y LECHERÍA.

Cálculo de caudales de las cuencas relacionadas a partir de la calibración de curva en la estación hidrométrica del puente Kunyayq				
Periodo (Años)	Caudales (m ³ /seg) Ríos			
	Alto Apurímac	Bermejo	Colorado	Lechería
2000-2001	203.07	4.2053	2.5482	0.5415
2001-2002	149.92	3.1046	1.8812	0.3997
2002-2003	203.07	4.2053	2.5482	0.5415
2003-2004	152.95	3.1674	1.9193	0.4078
2004-2005	113.5	2.3504	1.4242	0.3026
2005-2006	197.63	4.0927	2.4799	0.5269
2006-2007	181.45	3.7576	2.2769	0.4838
2007-2008	141.79	2.9363	1.7792	0.3781
2008-2009	139	2.8785	1.7442	0.3706
2009-2010	191.8	3.9719	2.4068	0.5114
2010-2011	190.26	3.94	2.3874	0.5073
2011-2012	256.31	5.3078	3.2162	0.6834
2012-2013	206.47	4.2757	2.5908	0.5505
2013-2014	149.4	3.0939	1.8747	0.3983
2014-2015	179.4	3.7151	2.2512	0.4783

Con la misma lógica de la extrapolación de áreas y caudales se calculó los caudales generados en las cuencas directas de los glaciares analizados.

La validación de los resultados se ha realizado comparativamente con los resultados obtenidos en el glaciar Inkachiriasq'a en el nevado Salkantay, realizados por la Autoridad nacional del agua (ANA) ubicado a 16 Km del nevado Oq'obamba y a 22 km del nevado Moyoq.

Estos resultados fortalecen al estado de arte propuesto inicialmente, ya que el análisis de los glaciares de menor altura ha permitido obtener los resultados mostrados debido a que ofrecen las siguientes ventajas:

- 1.-Son de fácil acceso y economizan los costos de investigación.
- 2.-Se evitan las costosas campañas en equipos y personal especializado.
- 3.-Los resultados son visibles y comparables con medios disponibles en el medio.

TABLA 5
CÁLCULO DE CAUDALES DE LOS RIACHUELOS LLAMAWASI, YAWARMAKI, Q'ELWAQ'OCHA Y CH'AKIL.

Periodo (Años)	Caudales en las Cuencas evaluadas (m ³ /seg)			
	Llamawasi	Yawarmaki	Q'elwaq'ocha	Ch'akil
2000-2001	0.1246	0.0698	0.1389	0.0434
2001-2002	0.092	0.0515	0.1025	0.032
2002-2003	0.1246	0.0698	0.1389	0.0434
2003-2004	0.0938	0.0526	0.1046	0.0327
2004-2005	0.0696	0.039	0.0776	0.0243
2005-2006	0.1212	0.0679	0.1352	0.0422
2006-2007	0.1113	0.0538	0.1241	0.0388
2007-2008	0.087	0.0487	0.097	0.0303
2008-2009	0.0853	0.0478	0.0951	0.0297
2009-2010	0.1177	0.0659	0.1312	0.041
2010-2011	0.1167	0.0654	0.1301	0.0407
2011-2012	0.1572	0.0881	0.1753	0.0548
2012-2013	0.1267	0.071	0.1412	0.0441
2013-2014	0.0916	0.0514	0.1022	0.0319
2014-2015	0.11	0.0617	0.1227	0.0383

TABLA 6
RESULTADOS FINALES DE LA VARIABLES
INDEPENDIENTE Y DEPENDIENTE

Años	Área(km ²)	Caudal(m ³ /seg)
2000-2001	1.398	2.548
2001-2002	5.148	1.881
2002-2003	0.39	2.548
2003-2004	2.609	1.919
2004-2005	0.088	1.424
2005-2006	5.857	2.479
2006-2007	0.025	2.276
2007-2008	0.124	1.779
2008-2009	0.901	1.744
2009-2010	0.288	2.406
2010-2011	3.465	2.387
2011-2012	8.465	3.216
2012-2013	0.041	2.59
2013-2014	0.915	1.874
2014-2015	0.028	2.251

3.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTE Y DEPENDIENTE.

El análisis de correlación de la “r de Pearson mediante el software statgraphics entre las variables arrojó un valor $r=0.467$, lo que indica que no existe una relación significativa entre el retroceso de los glaciares y la disponibilidad hídrica, sin embargo, se puede analizar que dicho valor es bajo debido a la Sublimación de los glaciares, los caudales de los ríos están relacionado estrechamente con el aporte hídrico de los deshielos de los glaciares.

3.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El valor de $r=0.467$ indica que no existe una relación significativa en entre el retroceso glaciar y la disponibilidad hídrica. Este hecho confirmaría las evidencias observadas en el campo, el cero aporte directo a las cuencas receptoras y se plantea la hipótesis de la sublimación glaciar presente en esta parte de la cordillera de Vilcabamba.

SUBLIMACIÓN DE GLACIARES EN LA CORDILLERA DE VILCABAMBA

Si la sublimación es la transformación directa del hielo del estado sólido al gaseoso, proceso en la requiere una cantidad de energía equivalente a 2834 Joules por kg, es decir más de 8.50 veces más que la fusión, entonces indica que las condiciones de temperatura ambiental se han incrementado considerablemente en la cordillera de Vilcabamba, la pérdida de la superficie glaciar ha implicado que no se está reflejando la luz solar y este hecho hace que se acumule la energía en las rocas generando un incremento de calor a nivel local y esta energía sería la causa de la sublimación asociado a otras causas materia de investigación.

Este fenómeno no es exclusivo en la cordillera de Vilcabamba, la sublimación de glaciares has sido reportado en el glaciar Juncal (Chile) donde se ha reportado que hasta el 50 % de los glaciares se están evaporando (Ayala, Pellicciotti, & Burlando, 2017).refieren que la concepción preliminar de la sublimación glaciar debido a los efectos de la baja humedad en ambientes montañosos áridos ha quedado desfasado ya que las últimas investigaciones realizadas indican que la elevación del glaciar juega un factor preponderante, debido a que las condiciones frías, secas y de exposición al viento que se incrementan con la altura (msnm) se asocian a elevadas a las tasas de sublimación.

4 CONCLUSIONES

- 1.-El retroceso glaciar que han sufrido los glaciares: Llamawasi, Yawarmaki (Nevado Oq'obamba), Q'elwaq'ocha, Ch'akilq'asa (Nevado Moyoq) es de 24.75 Km² que corresponde al 98.21 % de su superficie glaciar.
- 2.-La correlación entre variables de áreas y los caudales, cuyo resultado es $r_{xy}=0.467$, se concluye que **no existe relación significativa** entre el retroceso glaciares de Llamawasi, Yawarmaki, Q'elwaq'ocha y Ch'akilq'asa y la disponibilidad hídrica de los ríos Lechería y Colorado durante el periodo de análisis 2000-2015.
- 3.-El proceso del retroceso glaciar en los nevados Oq'obamba y Moyoq se está acentuando por la sublimación glaciar evidenciado por las evidencias encontradas y reportadas.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi mayor gratitud a las siguientes instituciones y personas: Escuela de pos grado de la Universal Nacional San Antonio Abad del Cusco (Unsaac), Universidad nacional Micaela Bastidas de Apurímac (Unamba), Servicio nacional de meteorología e Hidrología (Senamhi) Cusco, Servicio Nacional de Áreas naturales protegidas por el estado (Sernanp) Cusco, Autoridad nacional del Agua Zona XI. Pampas Apurímac, Ing. Juan Carlos Jiménez Nina, Biólogo Américo Cabrera Alarcón; estudiantes de la Escuela académico profesional de Ingeniería de Minas de la Unamba que me acompañaron en el viaje al glaciar Ch'akilq'asa: Franco Ubalde A, Rosmel Catalán M. ,Bernabé Valenzuela Nelson Onzueta V ,Egoavil Gallardo C, Edu Arias R, Vladimir C. Escobedo M. y Elizabeth Tevés H, al estudiante William Ccanahuire P. por su apoyo técnico ,A la comunidad campesina de Sondorf por permitir la realización de la investigación en su territorio y también las gracias eternas a mi amigo y consocio comunal Sr. Demetrio Gallegos Tevés, por su disposición y los caballos facilitados para el viaje al nevado Oq'obamba.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Pellicciotti & P. Burlando (2017). “Mely and surface sublimation across a glacier in a dry environment:distributed energy-balance modelling of juncalk Norte Glacier,Chile”. Journal of Glaciology. doi: 10.1017/jog.2017.46
- [2] M. Baraer, B. Mark, J. McKenzie, T. Comdom, J.Bury, K. Huh, C.Portocarrero ,J Gomez y S. Rathay, (2012). “Glaciaer Recesión and water resources in Peru's Cordillera Blanca. Journal of Glaciology, Vol. 58, No. 207,2012 doi: 10.3189/2012JoG11J186
- [3] N. Campos (2012). “Glacier evoluciónin the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera de Ampato, Perú”. Madrid España: Universidad Complutense de Madrid.
- [4]W. Colindres (2016). “Curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrológicas de la cuenca coatán a la cuenca madre vieja, correspondiente a la vertiente del pacífico para el periodo 2010-2013”. Tegucigalpa: Universidad San Carlos.
- [5] J. Dozier (1989). “Spectral Signature of Alpine Snow Cover from Lansat Thematic mapper”.Remote sensing of environment. [Volume 28](#), April–June 1989, Pages 9-22
- [6] L. Guardamino & F. Drenkhan (2016).” Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en la cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991 y 2014”. Univerty of Zurich.
- [7] D. Hall, G. Riggs, J. Foster, & S. Kumar (2010). “Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product”. DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln. Remote sensing of environment.
- [8] G. Kaser, J. Irmgard, C. Georges, J. Gomez &W. Tamayo

- (2003). "The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological".
- [9] J. Licciardi, J. Schaefer, J. Taggart y D. Lund. (2009). "Holocene Glacier Fluctuations in the Peruvian Andes Indicate Northern Climate. Science. Vol 325, Issue 5948 25 septiembre 2009.
- [10] A. Martín de la Calle (2014). "Evolución reciente de los Glaciares de la vertiente sur del Nevado Salcantay (Perú)". Madrid (España): Universidad Complutense de Madrid.
- [11] P. Pellikka & G. Rees (2010). "Remote sensing of glaciers Techniques for topographic spatial and thermatic mapping of glacier". Londres UK
- [12] B. Perry, A. Seimon, M. Andrade, J. Endries, S. Yuter, F. Velarde, S. Arias, M. Bonshoms, E. Burton, I. Welkenmann, C. Cooper, G. Mamani, N. Montoya y N. Quispe, (2016) ".Characteristics of Precipitating Storms in Glacierized Tropical Andean Cordilleras of Perú and Bolivia.". Journal [Annals of the American Association of Geographers](#) Volume 107, 2017
- [13] A. Rabatel et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. The Cryosphere
- [14] F. Rau, F. Mauz, S. Vogt, S. Jodha, & B. Raup. (2005). "Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual". Institut für Physische Geographie, Freiburg (Germany).
- [15] W. Suarez, N. Macedo, N. Montoya, S. Arias, S. Echauwecker, C. Huggel, M. Rohrer y T. Condom, (2015). "Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisquipina en la región Cusco (1990-2010)" Lima: Revista Peruana Geo-atmósfera (SENAHMI).
- [16] Senamhi, (2014). "El fenómeno del niño en el Perú". Lima-Perú. Reducir la vulnerabilidad de la población y sus medios de vida ante riesgo de desastres. Desarrollar el conocimiento del riesgo.
- [17] L. Thompson (2010) "Climate Change: The Evidence and Our Options". Ohio EE.EE. . doi: [10.1007/BF03392211](#)
- [18] J. Úbeda. (2010) "El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico de Coropuna (Cordillera occidental de los andes centrales)". Madrid España: Universidad complutense de Madrid.,
- [19] Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRHH)- Servicio nacional de áreas naturales protegidas (SERNANP). (2014). "Monitoreo Glaciar Inkachiriasq'a. Cusco" Santuario Histórico de Machupicchu.
- [20] B. Veetil et al. (2016). "Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los andes tropicales usando Teledetección". Santiago: Investigaciones geográficas Chile.
- [21] M. Vuille (2013). "Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes". Inter-American Development Bank.
- [22] M. Vuille, R. Bradley, B. Francou, G. Kaser & B. Mark (2007). "Climate Change in the tropical Andes - Impacts and consequences for glaciation and water resources Part I: The scientific basis".
- [23] P. Wagnon, P. Ribstein, G. Kaser & P. Bertron. (1999). "Energy balance and runoff seasonality of a Bolivian glacier".
- [24] WGMS (World Global Monitoring Service). (2007). *Global Glacier Changes: facts and figures*. UNEP.

