

Estudio espacial-temporal 1962-2011 de las lagunas Sayhuacocha, Raurac, Ampatococha y Tutayoc, Huancavelica, Perú

Gustavo A. Rondón Ramirez*
Karla V. Vergara Rodríguez**

Abstract

Using Landsat, QuickBird and Spot satellite images, and aerial photographs, we examined the Sayhuacocha, Raurac, Ampatococha and Tutayoc lagoons historical behavior, which are located in the department of Huancavelica, Peru. The analysis period covers the years between 1962 and 2011, being the photointerpretation and remote sensing, the tools used for it. The observed trend indicates the predominance of reducing water mirror in 2 of the 4 lagoons studied. This decrease is consistent with observed dry periods throughout the Mantaro basin.

Key words: *Multi temporal analysis, Lagoons, Glacier, Climate variability.*

Resumen

Mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat, QuickBird, Spot y fotografías aéreas, se analizó el comportamiento histórico de las lagunas Sayhuacocha, Raurac, Ampatococha y Tutayoc; ubicadas en el departamento de Huancavelica, Perú. El periodo estudiado abarca distintos años comprendidos entre 1962 y 2011 siendo la fotointerpretación y la teledetección las herramientas utilizadas para realizar el análisis. La tendencia que se observa en el análisis de las lagunas indica la predominancia en la reducción del espejo de agua en dos de las cuatro lagunas estudiadas. Esta disminución concuerda como se ha podido observar con periodos secos en toda la cuenca del Mantaro.

Palabras clave: *análisis multi-temporal, lagunas, glaciares, variabilidad climática.*

* Licenciado en Geografía y Medio Ambiente por la Pontificia Universidad Católica del Perú, correo electrónico: grondon@pucp.edu.pe

** Licenciada en Geografía y Medio Ambiente por la Pontificia Universidad Católica del Perú, correo electrónico: kvergara@pucp.pe

Introducción

El agua es el recurso máspreciado que tenemos los seres humanos como colectividad. Por ende, los cambios naturales o antrópicos que puedan sufrir nuestras fuentes de agua repercuten directamente en nosotros. Ya sean los glaciares, los lagos y lagunas o los ríos, todas las fuentes de agua presentan una dinámica propia que varía según su emplazamiento geográfico. En el caso del Perú, en los últimos decenios se observa el deshielo acelerado de nuestros glaciares tropicales, lo que afecta directamente a la disponibilidad de agua presente y futura. Pero no sólo los glaciares se ven afectados por el aumento de la temperatura global, sino también los lagos y lagunas. Es por eso que para evaluar el comportamiento histórico de estos cuerpos de agua ubicados en el departamento de Huancavelica, Perú se ha realizado el presente análisis espacial-temporal utilizando imágenes satelitales Landsat, QuickBird, Spot y fotografías aéreas.

Según Dukatz *et al.* (2007) los sensores remotos son una herramienta indispensable para la detección y cuantificación de cambios de los ecosistemas, ya que proveen medidas calibradas y consistentes sobre las características de la superficie terrestre (Chander y Markham, 2003). El uso de sensores remotos para el estudio de cuerpos lénticos está en expansión (Töyrä y Pietroniro, 2005), ya sea para estudiar las cualidades de las lagunas (Kutser, *et al.*, 2006) como su distribución espacial (Castañeda *et al.*, 2005).

El estudio tiene por objetivo determinar la variación en la superficie de agua de estas lagunas a través de un análisis multi-temporal. El periodo analizado abarca distintos años comprendidos entre 1962 y 2011, considerando la disponibilidad de imágenes y fotografías aéreas de distinta resolución para cada año.

Área de estudio

Las lagunas de Sayhuacocha y Raurac se ubican en el distrito de Huando, provincia de Huancavelica. Hidrográficamente estas lagunas pertenecen a la microcuenca del río Pallca, el cual es un tributario del río Ichu. Este río forma parte de la cuenca del Mantaro, perteneciente a la vertiente del Atlántico. Además, las lagunas se ubican dentro del área de influencia directa del proyecto Pukaqaqa Norte¹ de la Compañía Minera Milpo.

¹ <http://www.milpo.com/p03_05.htm>: es un yacimiento de cobre tipo *skarn* ubicado a 10km al noroeste de la ciudad de Huancavelica y a 230km al sureste de Lima, con elevaciones que fluctúan entre 4,000-4,700msnm. En el 2001, Milpo firmó un acuerdo de opción de compra con Río Tinto por el 100% de la propiedad. Los trabajos efectuados por Río Tinto, que culminaron con la perforación de 17,950m en 91 taladros, llevan al descubrimiento y definición del proyecto Pukaqaqa (Cu-Au). Los recursos minerales evaluados de este Proyecto están emplazados en un *skarn* de contacto subvertical (Gaby-Mónica Breccia) junto a dos extensas zonas de enriquecimiento secundario superficial (adyacente al *skarn*) formados en el *endoskarn* (*North y South Blanket*).

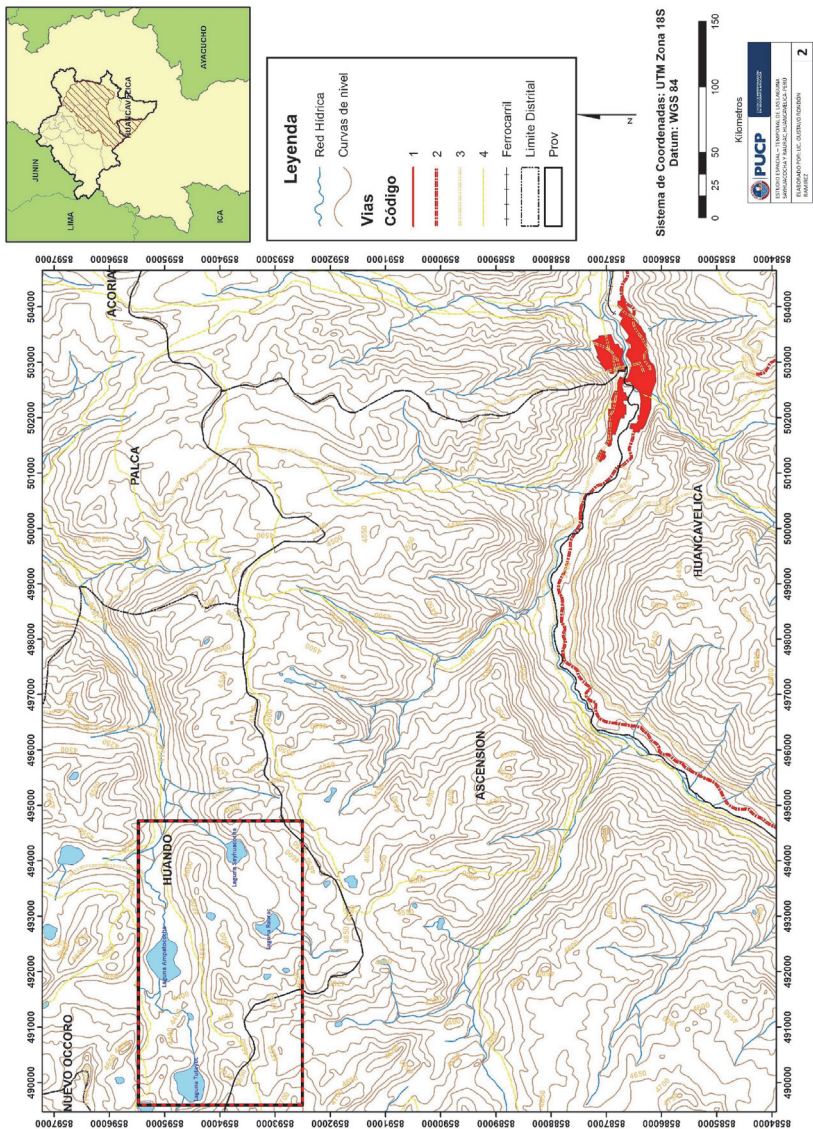


Figura 1. Mapa de ubicación. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N.

Tanto la laguna de Sayhuacocha como la de Raurac son nacientes de la microcuenca del río Pallca, sin embargo, no son las únicas pues en la otra margen de la microcuenca existen también dos lagunas importantes: Tutayoc y Ampatococha. Estas cuatro lagunas son las que aseguran el caudal en la microcuenca y permiten abastecer a los distintos centros poblados (aproximadamente 30 según la cartografía oficial) y principalmente al centro urbano de Pallca.

La principal actividad que se observa en la zona es la ganadería de auquénidos, seguido de una agricultura de subsistencia en su mayoría de cultivos de papa y habas, y algunas piscigranjas particulares y comunales.

Materiales y metodología

Materiales

Imágenes satelitales

Tabla 1
Imágenes utilizadas

<i>Satélite</i>	<i>Sensor</i>	<i>Formato</i>	<i>Bandas utilizadas</i>	<i>Fecha</i>
Landsat	TM	TIFF	1, 2, 3, 4, 5	15/08/1985
Landsat	TM	GeoTIFF	1, 2, 3, 4, 5	25/05/1990
Landsat	ETM+	GeoTIFF	1, 2, 3, 4, 5	04/11/2001
Landsat	TM	GeoTIFF	1, 2, 3, 4, 5	03/08/2004
Spot	ETM	TIFF	1, 2, 3	16/08/2010
QuickBird	ETM	TIFF	1, 2, 3	09/06/2011

Fuente: Global Land Cover Facility/Insituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil. Elaboración propia.

Fotografías Aéreas

Tabla 2
Fotografías aéreas utilizadas

<i>Proyecto</i>	<i>Escala</i>	<i>Escena</i>	<i>Fecha</i>
W AST9 AF-60-17	1:35,000	13362	12/06/1962
W AST9 AF-60-17	1:35,000	13360	12/06/1962
W AST9 AF-60-17	1:35,000	12130	07/06/1962
W AST9 AF-60-17	1:35,000	12126	07/06/1962
W AST9 AF-60-17	1:35,000	12132	07/06/1962
W AST9 AF-60-17	1:35,000	13364	12/06/1962

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN). Elaboración propia.

A continuación se describen brevemente las bandas utilizadas (Murillo, 2007):

- *Banda 1*: Penetra el agua mejor que otras bandas, por lo que es a menudo utilizada para estudios de ecosistemas acuáticos. Utilizada para el monitoreo de sedimentos de agua, cartografía de arrecifes de coral y profundidad del agua. Es la más ruidosa de las bandas del Landsat, dado que la porción de azul del espectro es la más sensible al scatter que las otras bandas.
- *Banda 2*: Similares que la Banda 1, pero no es tan ruidosa. Concuerta con la longitud de onda del color verde.
- *Banda 3*: Dado que la vegetación absorbe casi toda la luz roja del espectro, esta banda es también llamada la banda de absorción de la clorofila. Esta banda es utilizada para la distinción entresuelo y vegetación y en el monitoreo de la salud (stress) de la vegetación.
- *Banda 4*: El agua absorbe prácticamente toda la energía de esta porción del espectro, por tal motivo los cuerpos de agua aparecen en tonalidades oscuras. Esto contrasta con la alta reflectividad del suelo y vegetación, por esta razón es una buena banda para definir la interfase agua/suelo. Sensitiva a la cubierta vegetal. Es la menos afectada por la contaminación atmosférica.
- *Banda 5*: Muy sensible a la humedad y es también utilizada para el monitoreo del estrés de agua en la vegetación y para la humedad del suelo.

Las imágenes fueron trabajadas en el software ArcGis 10. La descarga de estas imágenes a través de la página web de la Universidad de Maryland permitió tenerlas ya georeferenciadas, lo que minimiza el error en este aspecto. La imagen Spot fue adquirida a la empresa Ekodes, distribuidora autorizada por la compañía francesa, ya georeferenciada y con las bandas combinadas (RGB 321). La imagen QuickBird en formato tiff con las bandas combinadas (RGB 321) fue brindada por la consultora SNC-Lavalin.

Metodología

Para realizar un análisis detallado de los posibles cambios en los espejos de agua de las lagunas en estudio se combinaron las bandas descargadas. Este procedimiento se realizó mediante la herramienta “Composite Bands” del software ArcGis 10. Las combinaciones utilizadas fueron las siguientes (Fernández-Coppel y Herrero, 2001):

- **Combinación de color natural: RGB 3, 2, 1**: Constituye la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio. Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente, y por tanto sirven para discriminar el agua poco profunda y sirven para distinguir aguas turbias, corrientes, batimetrías y zonas con sedimentos.

- El azul oscuro indica aguas profundas.
- El azul claro indica aguas de media profundidad.
- La vegetación se muestra en tonalidades verdes.
- El suelo aparece en tonos marrones y tostados.
- El suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos.
- Combinación en falso color: RGB 4, 5, 3 y RBG 5, 4, 2: Realza con gran detalle los límites entre el agua y la tierra. Los diferentes tipos de vegetación se muestran en colores marrones, verdes y naranjas. Realza las diferencias de humedad en el suelo y es usada para el análisis de humedad en el suelo y vegetación. Generalmente el suelo húmedo aparece más oscuro.

Para cuantificar la variación areal del espejo de agua de las lagunas se procedió a digitalizar el perímetro. Para esto se creó una cobertura tipo polígono (*shapefile*) en el ArcGis 10. Al trabajar utilizando la proyección UTM con las imágenes satelitales de los distintos años analizados se puede obtener el área en unidades métricas (m² o km²) de manera directa, lo que elimina cualquier error que pueda inducir el tema de transformar unidades. En el caso de las fotografías aéreas fue necesario georeferenciarlas. Para esto se utilizó la herramienta “Georeferencing” del Arc Gis 10 y el software de uso gratuito Google Earth (para la ubicación de puntos de control).

Una vez georeferenciadas todas las fotografías aéreas, el siguiente paso fue ortoregistrarlas. Este es un proceso que sirve para corregir la distorsión propia de la imagen, permitiendo realizar las medidas necesarias con mayor precisión. Para ortoregistrar las fotografías aéreas se utilizó el mismo software (Arc Gis 10) ingresando las imágenes georeferenciadas y un Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) que fue descargada gratuitamente de la página web de Aster. Este DEM tiene una resolución de 30m, siendo lo más preciso que se encuentra disponible actualmente.

Resultados

Desaparición de nevados

Si bien el estudio analiza el comportamiento espacial temporal de la superficie de agua de las lagunas ubicadas dentro del área de influencia directa del proyecto Pukaqaqa Norte, es necesario tener una referencia de lo que ocurre a una escala más amplia en la zona de estudio, la presencia de relictos de glaciares es un buen indicador para dicho análisis. Para esto se interpretaron cuatro imágenes satelitales, de los años 1985, 1990, 2001 y 2004. En ellas se ha analizado el cambio que han sufrido los glaciares tropicales de la Cordillera Carhuarazo, ubicada en el departamento de Huancavelica, provincias de Huancavelica y Castrovirreyna. Más adelante se muestran cuatro mapas (véase Figuras 2, 3, 4 y 5) elaborados a partir de las imágenes satelitales antes mencionadas que permiten visualizar el cambio que ha venido ocurriendo.

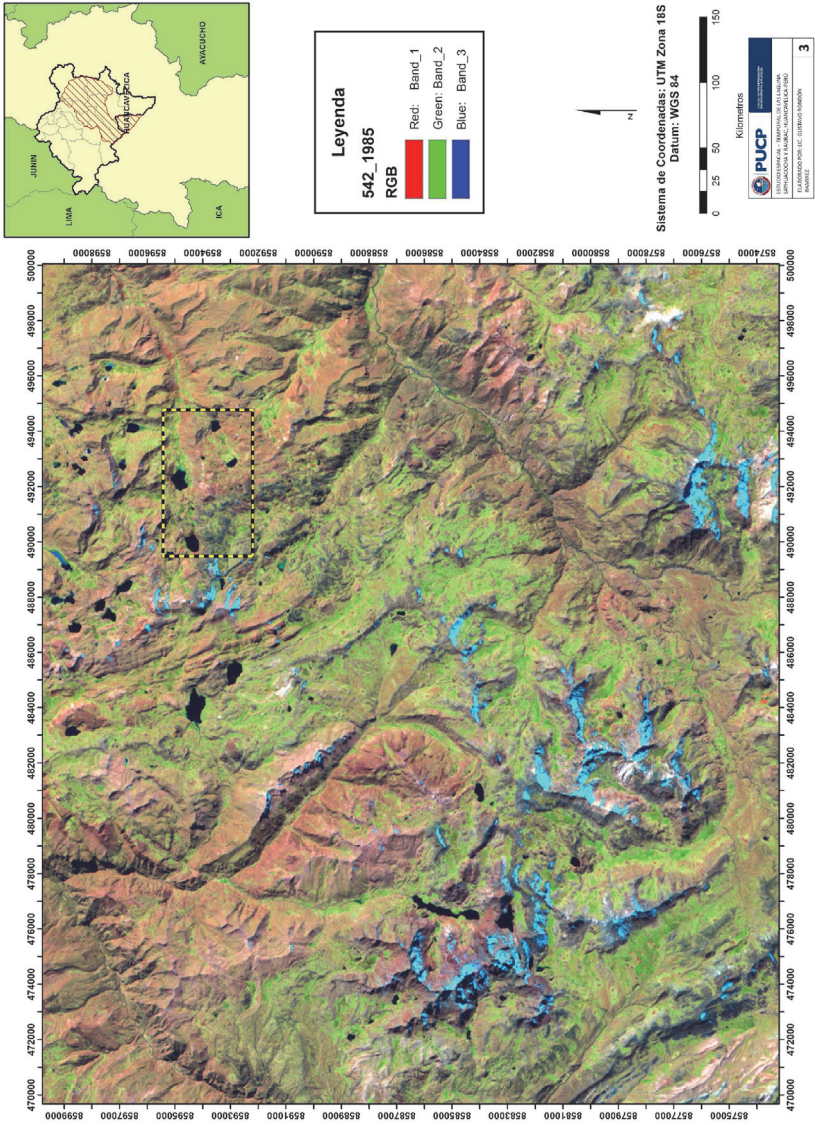


Figura 2. Cordillera Carhuarazo. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N, Landsat, 1985.

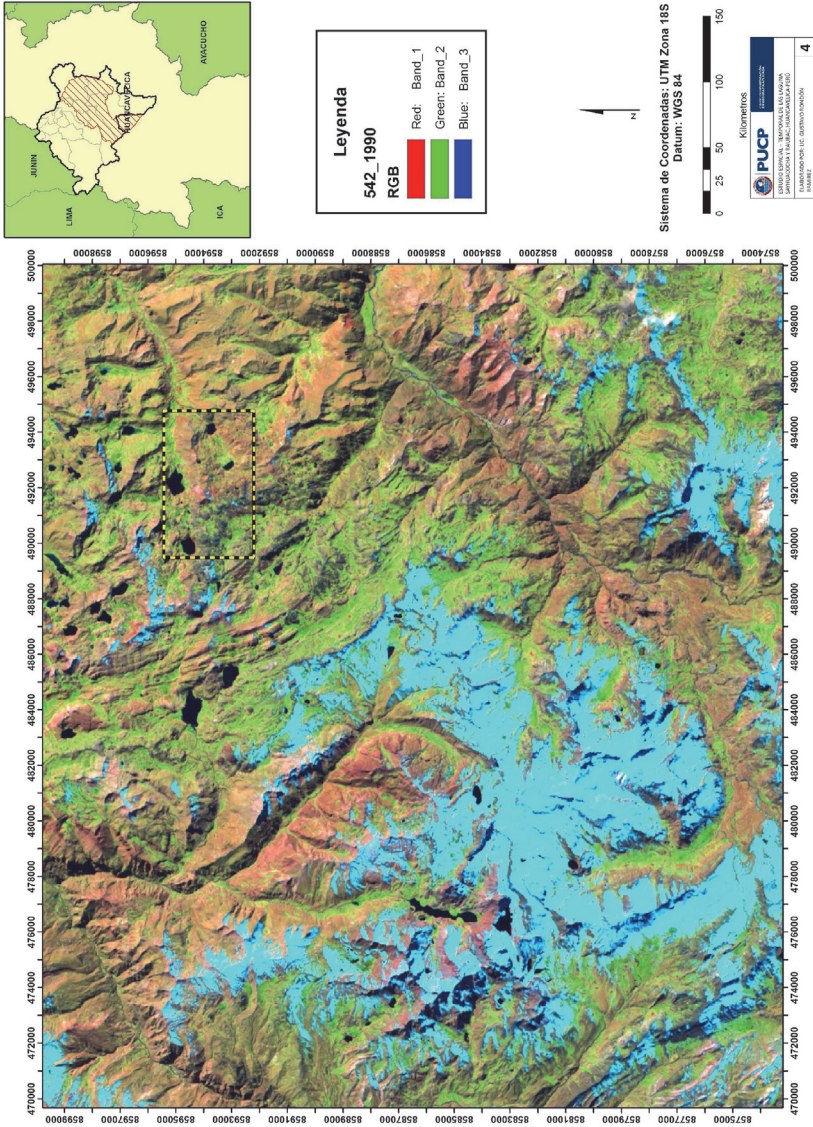


Figura 3. Cordillera Carhuarazo. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N, Landsat, 1990.

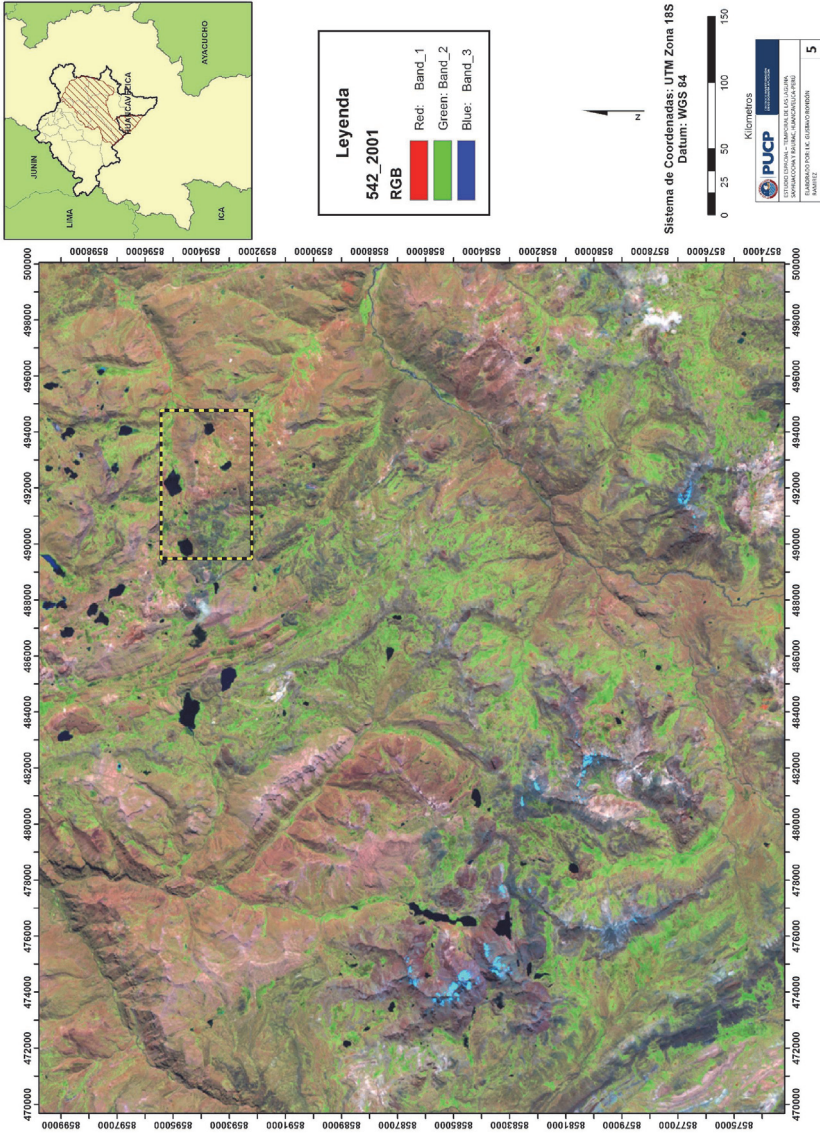


Figura 4. Cordillera Carhuarazo. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N, Landsat, 2001.

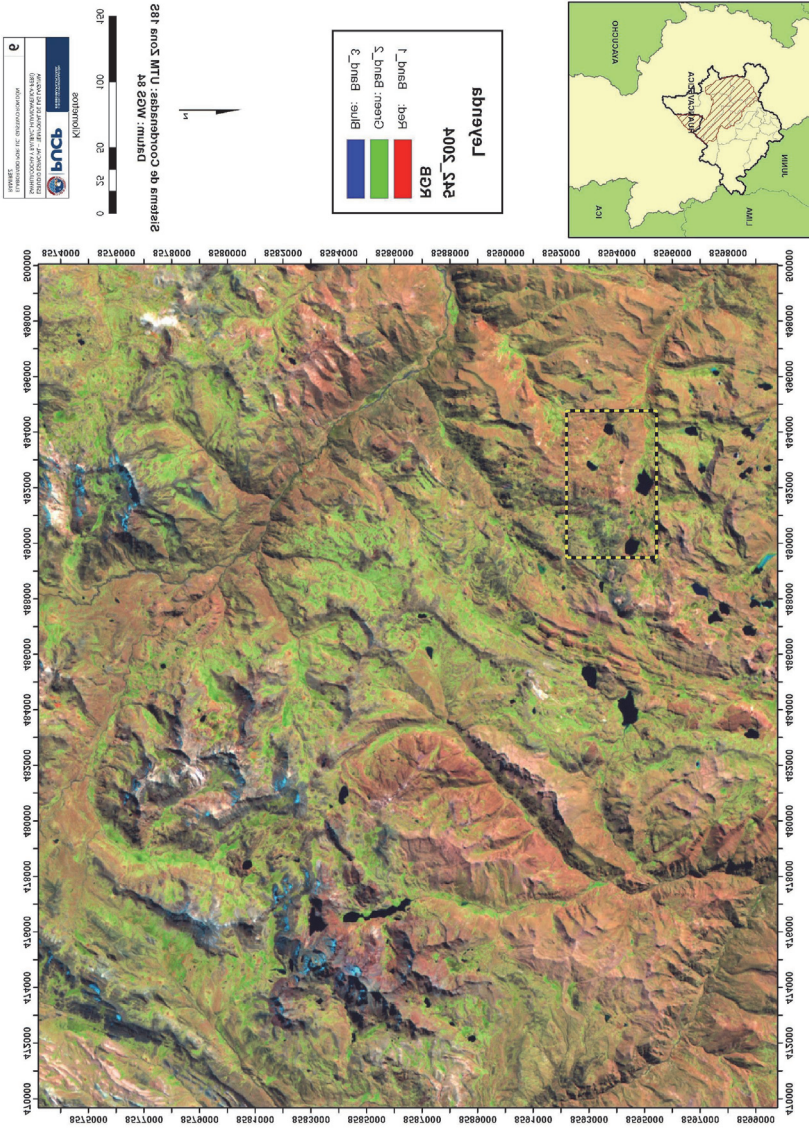


Figura 5. Cordillera Carhuarazo. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N, Landsat 2004.

Antes de analizar el cambio en la cobertura glaciar es necesario señalar que la imagen satelital de 1990 fue captada en el mes de mayo, mientras que las de los años 1985 y 2004 corresponden al mes de agosto y la del año 2001 al mes de noviembre. Esta diferencia entre los meses de las imágenes satelitales debe ser considerada pues durante los temporada de lluvia (noviembre-mayo) se da una recarga de la capa glaciar, producto de la precipitación y las bajas temperaturas. Sin embargo, al ser noviembre el mes de inicio de lluvias la diferencia es sustancial con el mes de mayo. Como se observa en los mapas, la desaparición del glaciar es sumamente marcada y dramática. Esta pérdida de cobertura glaciar es un proceso que se viene manifestando en distintos glaciares tropicales de nuestro país, lo cual indica que estamos perdiendo una fuente importante de agua. Este proceso de derretimiento posiblemente generó un aumento en el caudal de los ríos, el cual podría ser comprobado con un análisis de caudales dentro del periodo analizado.

Sin embargo es necesario considerar otros factores, como el escurrimiento subterráneo, la evaporación del agua por efecto de la temperatura, la variación en la cantidad e intensidad de las precipitaciones, etc. Es en este panorama de deshielo de glaciares en el que se va a analizar el cambio espacial-temporal de las lagunas de Raurac y Sayhuacocha.

Lagunas

Como se observa en la Tabla 3, estamos ante un proceso de reducción del espejo de agua en casi todas las lagunas, salvo en la laguna Sayhuacocha dónde el espejo de agua tiene una tendencia al incremento en los últimos años estudiados. Sin embargo, en las otras tres lagunas se observa una reducción progresiva a partir del año 1990. La Tabla 4 permite visualizar mejor estas variaciones.

Entre el año 1962 y 1985 todas las lagunas presentan una disminución. Este comportamiento no se mantiene para el periodo 1985-1990, pues se presenta una tendencia inversa (incremento en el espejo de agua) en tres de las cuatro lagunas. Cabe mencionar que en un muy reducido margen (-1,510m²) la laguna de Sayhuacocha es la única que no se comporta igual que el resto y reduce su espejo de agua, tiene una dinámica distinta a las demás en los siguientes años. Así vemos que en las lagunas de Tutayoc, Ampatococha y Raurac se presenta una reducción progresiva en el tiempo del espejo de agua desde 1990 al 2011. A continuación se explicará de una manera más detallada la dinámica de cada una de estas lagunas.

Tabla 3
Áreas de las lagunas estudiadas

<i>Lagunas</i>	<i>Áreas (metros cuadrados)</i>						
	1962	1985	1990	2001	2004	2010	2011
Tutayoc	244,446.6	211,331.7	238,103.3	229,609.5	223,292.9	237,401.4	236,107.9
Ampatococha	285,072.8	253,219.8	386,906.8	367,945.3	330,624.7	336,848.4	318,327.9
Raurac (utilizadas)	74,983.6	617,12.6	82,386.7	69,084.8	57,857.7	56,996.9	53,928.1
Sayhuacocha (utilizadas)	112,999.8	91,860.1	90,345.4	110,050.0	95,065.4	96,027.1	117,477.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Variación del área de las lagunas estudiadas

<i>Lagunas</i>	<i>Variación en m²</i>					
	62-85	85-90	90-01	01-04	04-10	10-11
Tutayoc	-33,120	26,770	-8,490	-6,320	14,110	-1,290
Ampatococha	-31,850	133,690	-18,960	-37,330	-6,230	-18,520
Raurac (utilizadas)	-13,270	20,680	-13,310	-11,220	-860	-3,070
Sayhuacocha (utilizadas)	-21,140	-1,510	19,700	-14,980	960	21,450

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis, en la laguna Tutayoc el espejo de agua tenía aproximadamente 244,446.6m² en el año 1962. Este se redujo considerablemente para el año 1985 alcanzando su nivel más bajo (211,331.7m²). Luego se da un incremento en el año 1990 (238,103.3m²) aunque sin alcanzar el nivel del año 1962. En los años 2001 y 2004 el espejo de agua se vuelve a reducir de manera progresiva (229,609.5 y 223,292.9m² respectivamente). Finalmente en los años 2010 y 2011 se da un nuevo incremento en la superficie de las lagunas (237,401.4 y 236,107.9m² respectivamente). Sin embargo, este aumento no alcanza los niveles observados en el año 1962.

La laguna Ampatococha tenía en 1962 un espejo de agua de aproximadamente 285,072.8m². Este se redujo para el año 1985 levemente (253,219.8m² aproximadamente). Para el año 1990 se observa un considerablemente aumento en el espejo de agua, alcanzando aproximadamente un área de 386,906.8m². A partir de ese año, la reducción del espejo de agua es progresiva en casi todos los años estudiados. Para el 2011, el espejo de agua es de 318,327.9m² cifra que es inferior a la del año 1990 pero que sigue siendo mayor a la registrada en el año 1962.

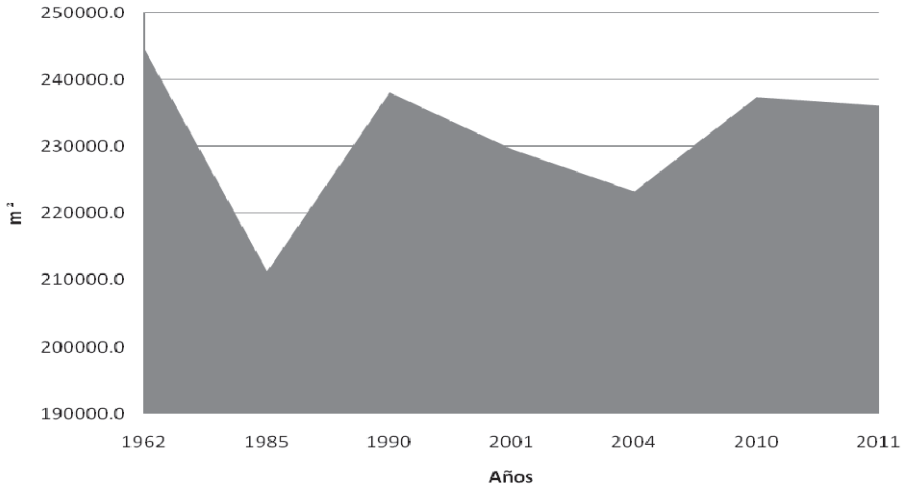


Figura 6. Variación superficial de la Laguna Tutayoc (m²). Elaboración propia.

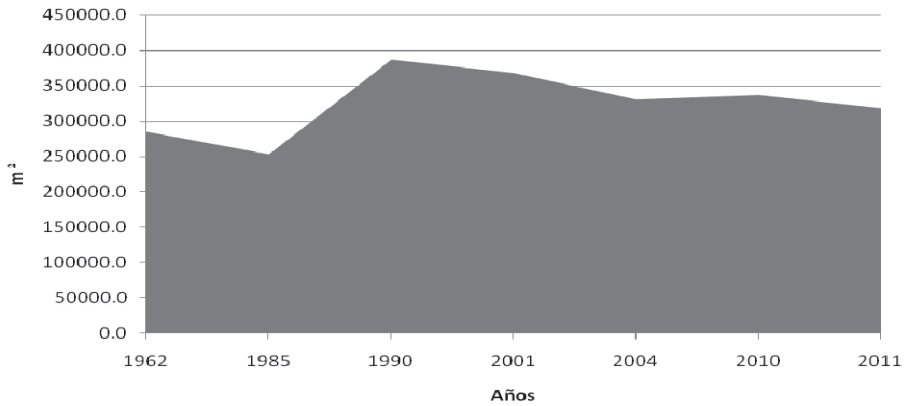


Figura 7. Variación superficial de la Laguna Ampatococha (m²). Elaboración propia.

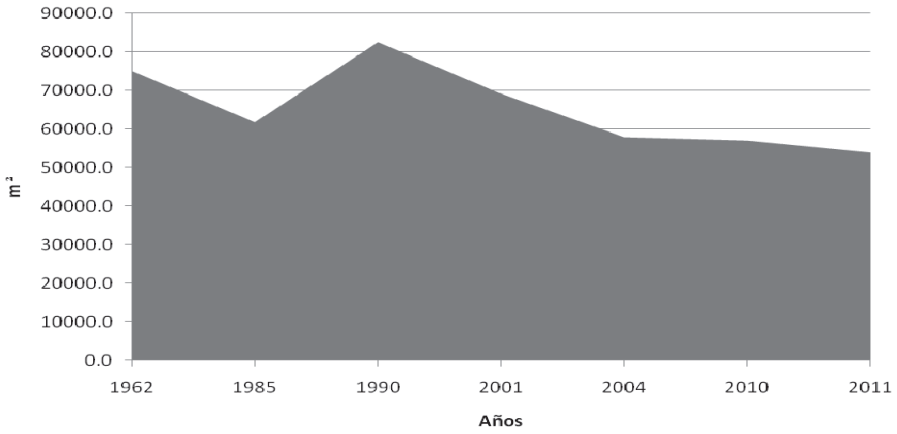


Figura 8. Variación superficial de la Laguna Raurac (m²). Elaboración propia.

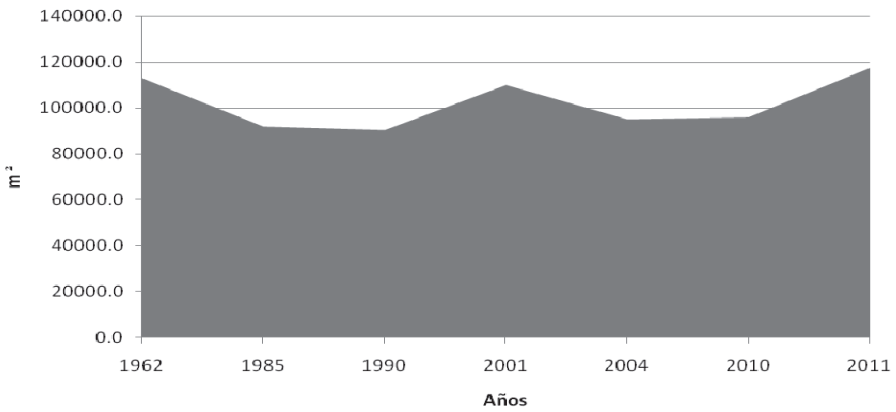


Figura 9. Variación superficial de la Laguna Sayhuacocha (m²). Elaboración propia.

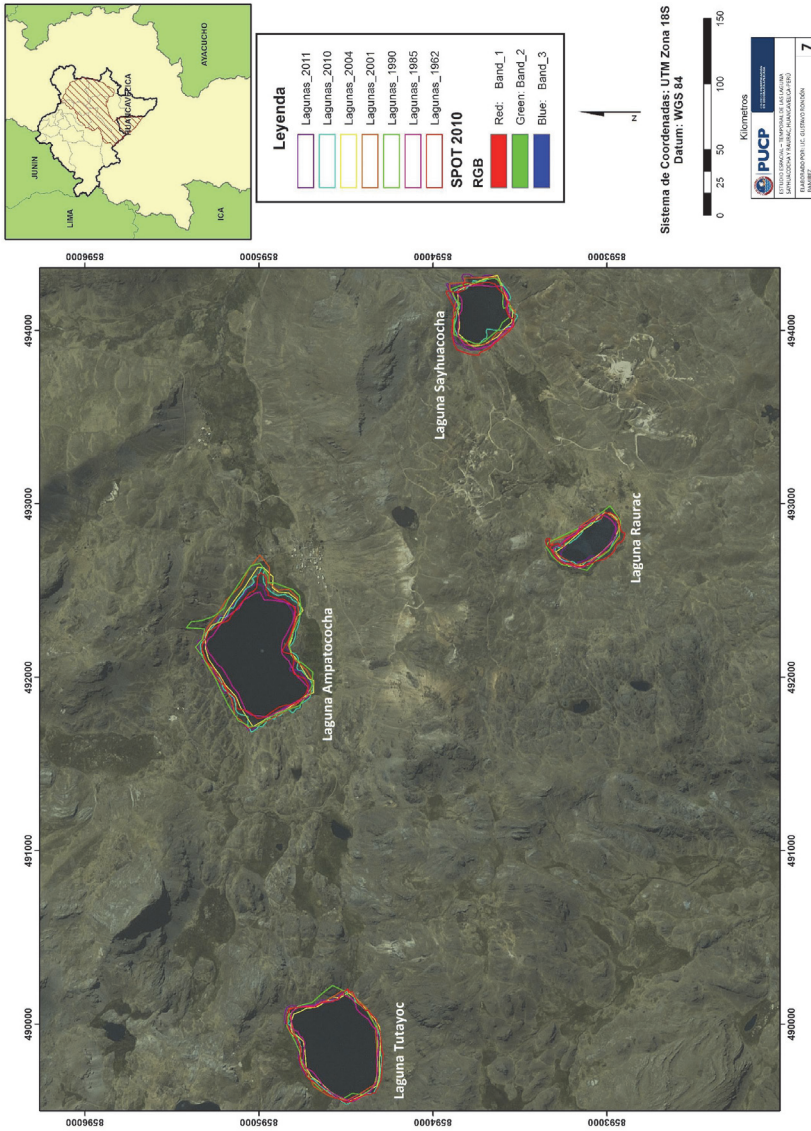


Figura 10. Mapa análisis espacial-temporal. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N. Imágenes Landsat, QuickBird, Spot.
Fotografías: IGN, años 1962, 1985, 1990, 2001, 2004, 2010 y 2011.

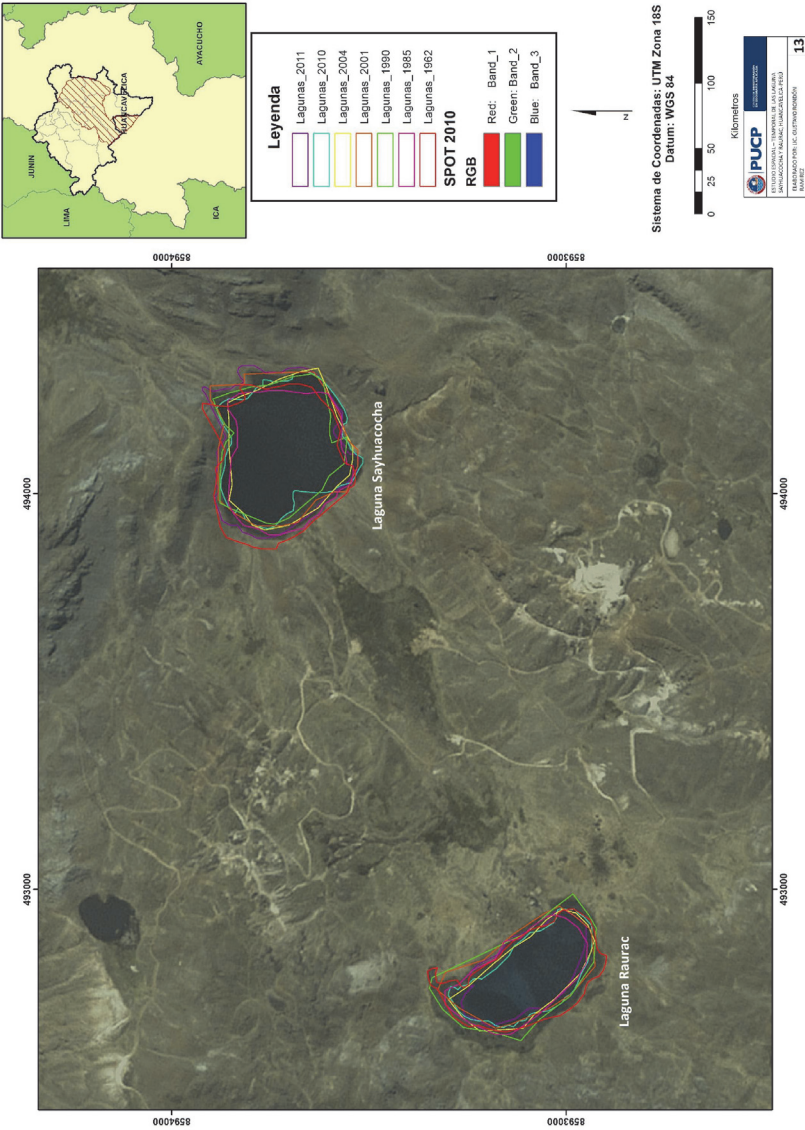


Figura 11. Mapa análisis espacial-temporal: Lagunas Raurac y Sayhuacocho. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N. Imágenes Landsat, QuickBird, Spot.
Fotografías: IGN, años 1962, 1985, 1990, 2001, 2004, 2010 y 2011.

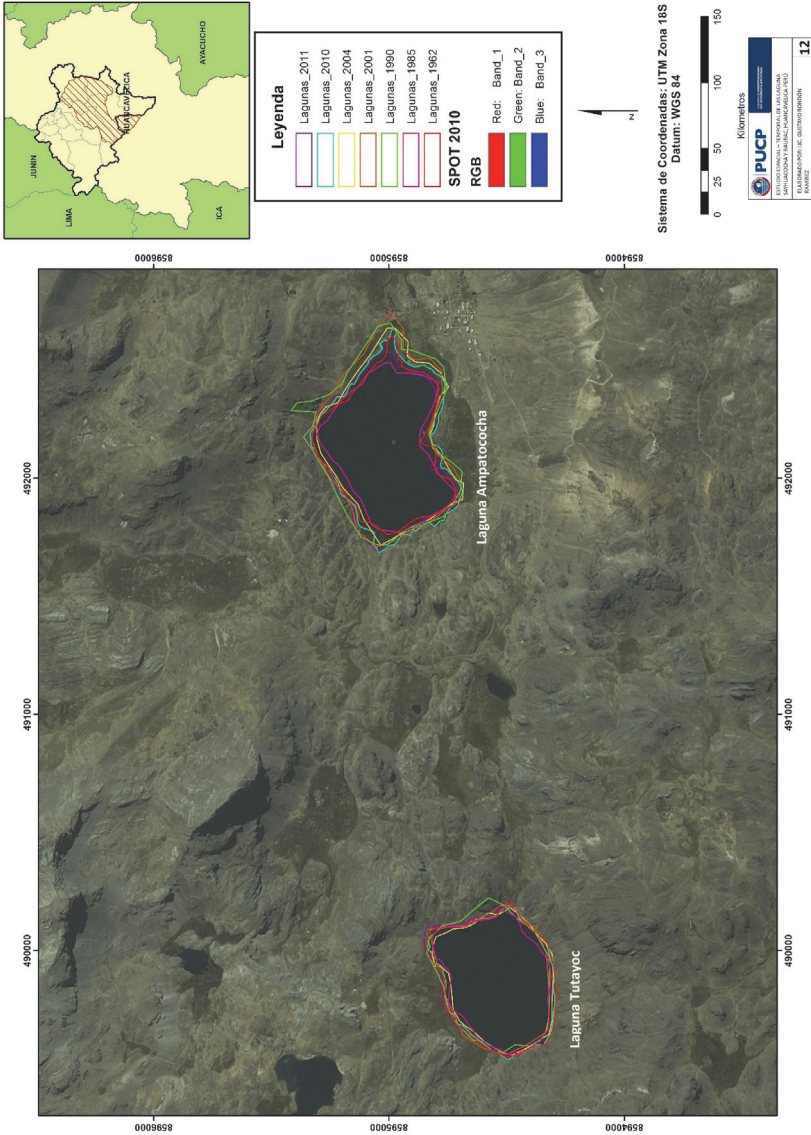


Figura 12. Mapa análisis espacial-temporal: Lagunas Tutayoc y Ampatococha. Elaboración propia.
Fuente: IGN, Carta Nacional 26M, 26N. Imágenes Landsat, QuickBird, Spot.
Fotografías: IGN, años 1962, 1985, 1990, 2001, 2004, 2010 y 2011.

En el caso de la laguna Raurac tenemos que para el año 1962 se tenía un espejo de agua de 74,983.6m². Este se redujo en el año 1985 alcanzando los 61,712m². Para el año 1990 se da un aumento considerable en el área (82,000m² aproximadamente) que incluso supera el nivel inicial registrado en 1962. A partir de este año la reducción del espejo de agua es sostenida y progresiva a través de los años 2001, 2004, 2010 y 2011. La superficie que alcanza en el año 2011 es de 53,928m², que es inferior al primer nivel observado.

Finalmente tenemos a la laguna Sayhuacocha la cual es la única que no cumple con el patrón observado en las otras tres lagunas. Esta laguna tenía en el año 1962 un espejo de agua de 112,999.8m². Este se redujo para el año 1985 e incluso, a diferencia de lo observado en todas las otras tres lagunas, en el año 1990 también redujo su superficie (90,345.4m²). Para el año 2001 se da un aumento en la superficie, alcanzando los 110,050m², la cual vuelve a descender en los años 2004 y 2010. Finalmente, en esta dinámica distinta a las demás lagunas en el año 2011 vuelve a aumentar su área, aproximadamente 117,477.5m².

Discusión y conclusiones

El uso de imágenes satelitales es un complemento fundamental para el estudio de la dinámica espacial de los cuerpos de agua (Dukatz *et al.*, 2007). El estudio de la variación en la superficie de las lagunas se realizó con fotografías aéreas de 1962, imágenes Landsat para el periodo 1985-2004, con una imagen Spot del año 2010 y con una imagen QuickBird del 2011. Este análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales permite cuantificar la variación en el área de las lagunas comprendidas dentro del área de influencia del proyecto Pukaqaqa Norte.

Cerca del área donde se ubican las lagunas se observa una reducción importante de la cordillera del Carhuarazo, donde prácticamente en 15 años ha desaparecido la capa glaciar. Esta reducción es sin lugar a dudas producto del fenómeno global de calentamiento que estamos viviendo. Tanto la reducción de la superficie glaciar como la reducción de las lagunas (de manera general) permite señalar que localmente ha habido un incremento de la temperatura (datos que deben ser contrastados con información meteorológica) que ha generado estos efectos en ambos cuerpos de agua. Al aumentar la temperatura también aumenta la evaporación, lo que hace que la superficie de agua se reduzca.

Si bien en el año 1990 la superficie glaciar alcanza niveles extraordinarios (identificados en la combinación de bandas RGB 542) producto de la fecha de la imagen y las variables meteorológicas que se presentan (lluvias y bajas temperaturas) se puede observar que desde el año 1985 la superficie glaciar viene disminuyendo, habiendo desaparecido casi totalmente para el año 2004. Como se mencionó en la sección de resultados, este proceso de deshielo de los glaciares tropicales es una realidad que se observa en distintos puntos de la cordillera peruana y es un tema que es muy estudiado en regiones como Cuzco, Ancash o Junín pero que en el departamento de Huancavelica no se ha encontrado estudio alguno.

Estas diferencias pueden explicarse debido a la fecha en que han sido tomadas las imágenes. Como todos sabemos el régimen de lluvias en la sierra de nuestro país empieza generalmente en los meses de septiembre-octubre-noviembre y terminan los meses de abril-mayo. Tanto las imágenes de los años 1962, 1985, 2004, 2010 y 2011 corresponden a meses de estiaje, caracterizados por la ausencia de precipitaciones. Sin embargo, las imágenes del año 1990 y 2001 corresponden a los meses de mayo y noviembre, meses dónde generalmente las lluvias están terminando o están empezando.

Con el objetivo de identificar la influencia de las precipitaciones en las variaciones de la superficie del espejo de agua de las lagunas del presente estudio, se analizó el comportamiento mensual e interanual de la precipitación, para detectar los meses de máximas y mínimas precipitaciones, así como los años más lluviosos y secos.

Variabilidad estacional de las precipitaciones

Según la data trabajada por la Consultora SNC-Lavalin, las precipitaciones en la microcuenca Pallca está marcada por una época seca entre mayo y julio, alcanza los valores mínimos en julio; y una estación lluviosa entre agosto y abril. La mayor parte de las precipitaciones se concentra entre los meses de enero-marzo, considerado a los meses de febrero y marzo como los picos de la estación lluviosa. La otra parte está concentrada en el medio de la temporada de lluvias entre los meses de octubre y diciembre.

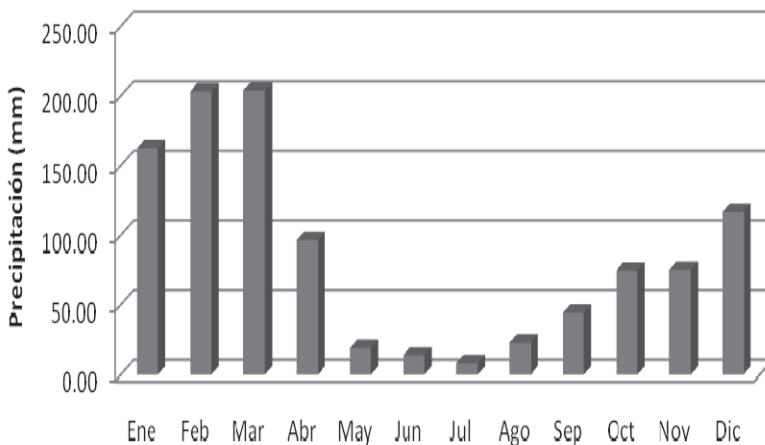


Figura 13. Promedio multianual (climatología) de la precipitación (mm/mes) en la microcuenca Pallca, periodo 1973-2010. Datos: SNC-Lavalin. Elaboración: Karla Vergara R.

Variabilidad interanual de las precipitaciones

La cantidad y distribución de las lluvias puede variar año a año (véase Figura). Con el propósito de determinar los años característicos como “años secos” y “años húmedos o lluviosos” se calculó la anomalía anual estandarizada de la precipitación. Según éste método, se calcularon las distribuciones probabilísticas empíricas de las series de datos de precipitación, las cuales son transformadas a una distribución teórica normal, de tal modo que, la media del SPI es cero para cualquier estación. Valores positivos del SPI indican precipitaciones mayores que la media, y valores negativos indican precipitaciones menores que la media.

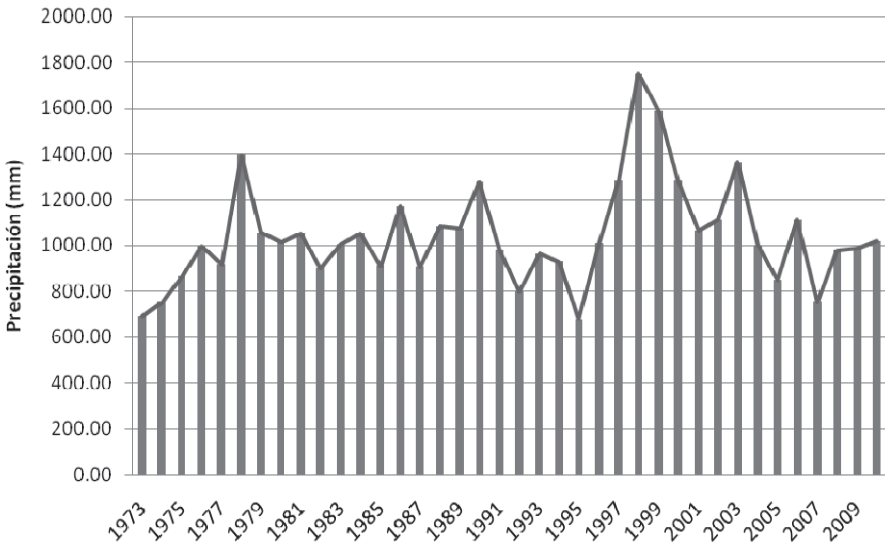


Figura 14. Precipitación total anual (mm/año) en la microcuenca Pallca. Datos: SNC-Lavalin. Elaboración: Karla Vergara R.

Con la anomalía anual estandarizada se pudo identificar en qué año se han dado excesos o déficit de lluvias, considerando cuando éstas han estado por debajo o por encima de una desviación estándar. Para el periodo 1973-2010 se observa que los años lluviosos son 1978, 1990, 1997, 1998, 1999, 2000 y 2003. Por otro lado, se observa que los años más secos dentro del periodo son 1973, 1974, 1992, 1995 y 2007.

La anomalía anual estandarizada también permitió identificar periodos secos y húmedos. Se observa un periodo seco de 1973-1977 y otro de 1991-1996. También se identificó un periodo húmedo 1997-2003.

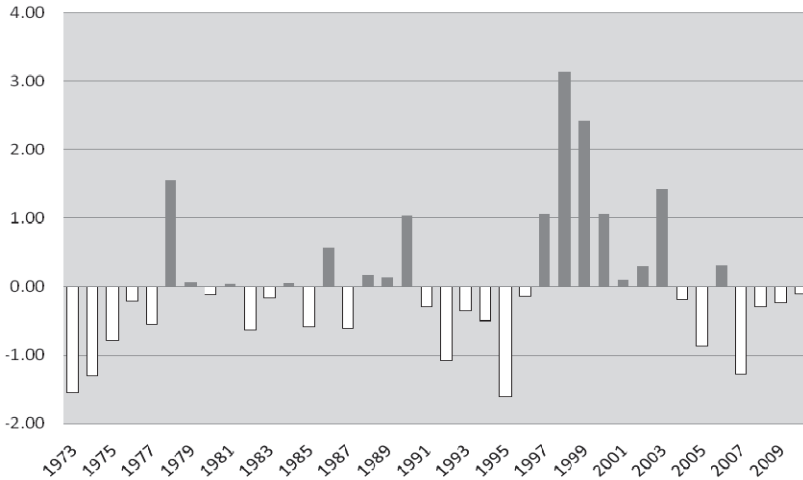


Figura 15. Anomalía anual estandarizada de la precipitación (mm) en la microcuenca Pallca. Datos: SNC-Lavalin. Elaboración: Karla Vergara R.

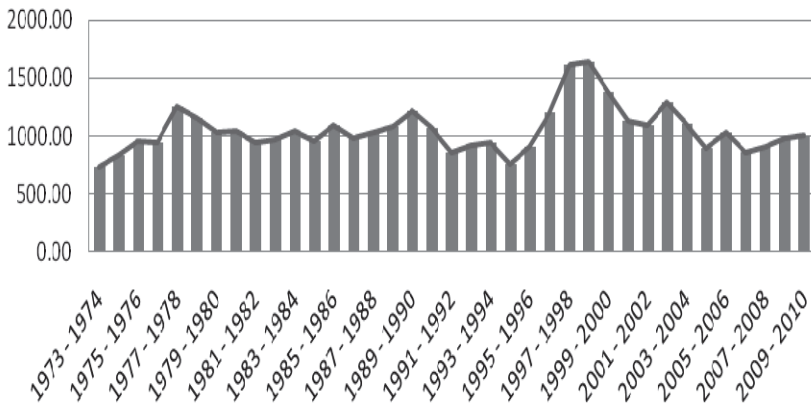


Figura 16. Precipitación total en función del año hidrológico en la microcuenca Pallca. Datos: SNC-Lavalin. Elaboración: Karla Vergara R.

Variabilidad de las precipitaciones en base al año hidrológico

El año hidrológico emplea para intentar reflejar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones sobre una determinada cuenca hidrográfica. El comienzo del año hidrológico puede variar entre una región y otra, incluso dentro de un mismo país. En este caso el comienzo del año hidrológico se da en el mes de septiembre y culmina en el mes de agosto, basándose en el año agrícola o hidrometeorológico.

En función al año hidrológico se identificó como años hidrológicos con déficits de lluvia: 1973-1974, 1975-1976, 1991-1992, 1994-1995. Y se pudo identificar como años hidrológicos con excesos de lluvias a: 1977-1978, 1997-1998, 1998-1999, 1999-2000, 2002-2003. También se pudo identificar periodos húmedos y secos para el periodo 1973-2010 como 1973-1978, 1979-1985, 1988-1991, 1991-1996, 1996-2004 y 2004-2010.

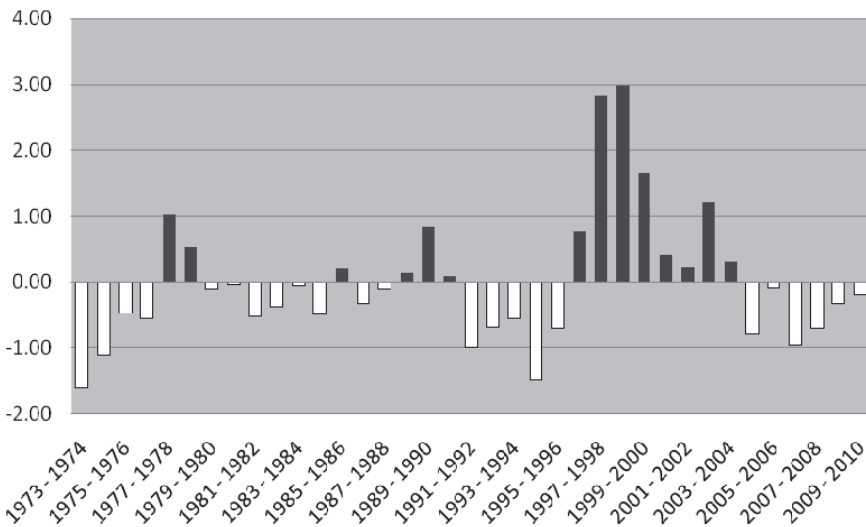


Figura 17. Anomalia estandarizada de la precipitación en la microcuenca Pallca. Datos: SNC-Lavalin. Elaboración: Lic. Karla Vergara R.

Esta información es respaldada por los resultados que se muestran en el *Atlas Climático de la Cuenca del río Mantaro* (SENAMHI, 2011) donde se señala que en una amplia franja del sector más occidental de la cuenca (subcuenca Ichu), la cuantía de las lluvias aumenta, siendo mayor al promedio multianual al recibir una precipitación media anual superior a los 800mm (Lircay, 801mm; Huancalpi, 962mm; Paucarbamba, 1,020mm, Marcapomacocha, 1,190mm, Río Pallanga, 1,320mm).

También en el sector occidental (sector de mayor elevación de la cuenca), la decisiva influencia del relieve favorece la inestabilidad mecánica para las lluvias orográficas y la mejor exposición de estas áreas montañosas a los vientos cálidos y húmedos provenientes de la Amazonía (al Este de la cuenca) crea un verdadero cinturón húmedo en la puna de orientación Norte-Sur de la cordillera occidental (posiblemente una de las punas más lluviosas del Perú), correspondiente a la margen derecha del río Mantaro, con precipitaciones más cuantiosas.

En cuanto al ciclo anual y régimen estacional de las precipitaciones se sabe que es entre enero (129.3mm) y febrero (133.4mm) cuando se producen los acumulados mensuales máximos, variando entre la región Norte-Sur-occidental que presenta los máximos acumulados en enero y la región centro-oriental que presenta sus máximos en febrero (SENAMHI, 2011). A finales de marzo y sobre todo en abril, las precipitaciones disminuyen bruscamente y entramos en otro período seco; sólo 13.2mm se acumula en el mes de junio, 9.1mm en julio y 18.9mm en agosto (SENAMHI, 2011). Las precipitaciones que ocurren entre septiembre (mes en el cual se inicia el período lluvioso) y abril (mes donde las precipitaciones disminuyen notablemente), representan el 91.8% del acumulado anual, y durante este período, sólo entre diciembre y marzo llueve el 61.9% del acumulado anual. Las precipitaciones que ocurren entre mayo y agosto, sólo representan el 8.2% del total de las lluvias anuales en la cuenca (SENAMHI, 2011).

Finalmente sobre los períodos secos y húmedos, el estudio identifica sequías moderada a extrema, que ocurrieron de manera localizada en los años 1968/69, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1994-1995 y 2004-2005. Los principales años secos entre 1965 y 2010 se identifican en la década de los noventa, siendo el episodio más crítico de 1991-1992 con predominancia de sequías extremas y severas en los sectores centro y sur de la cuenca (Jauja, Huayao, Acobamba y Lircay), situación que continuó al año siguiente pero en forma más localizada (SENAMHI, 2011).

Las deficiencias observadas en la década de los ochenta, fueron más intensas respecto a la década anterior, aún cuando éstas fueron más localizadas, siendo Huancalpi, la localidad más afectada por deficiencias de lluvia, aunque destaca la severidad del evento seco 1982-1983 y la duración del período seco 1986-1990, éste último albergó al episodio de sequía extrema del año 1987/88. En el año 1989-1990 gran parte de la cuenca presentó deficiencias, siendo afectado el sector sur (Acobamba y Lircay) con sequías severas (SENAMHI, 2011).

Comportamiento de la temperatura

Debido a la falta de información de temperaturas en las distintas estaciones utilizadas en el capítulo de climatología del informe de la consultora SNC-Lavalin, se decidió utilizar la información del *Atlas Climático de la Cuenca del río Mantaro* (SENAMHI, 2011).

La zona de estudio se ubica en el sureste de la cuenca del río Mantaro. En esta cuenca existen evidencias estadísticamente significativas, que en los últimos 46 años, la temperatura del aire se viene incrementando de manera sostenida en algunas localidades de la cuenca; este incremento es en promedio de 0.2°C/década en temperatura máxima del aire y 0.1°C/década en temperatura mínima del aire, siendo este incremento más acentuado en localidades como Acobamba (0.4-0.7°C/década), Pilchaca (0.2-0.4°C/década) y Huayao (0.1-0.3°C/década); contrariamente, Jauja viene presentando disminuciones del orden de -0.3°C/década (SENAMHI, 2011).

Durante el año, la temperatura del aire máxima presenta dos picos máximos, uno en mayo y el más intenso en noviembre, mientras los valores menores se dan en los meses de verano. En localidades ubicadas sobre los 4,000msnm estos máximos no son muy notorios, registrándose temperaturas máximas muy similares durante todo el año. La ocurrencia del segundo pico máximo (noviembre) se debe a que en esta temporada se tiene escasa cobertura nubosa y la superficie recibe la máxima radiación solar incidente, además los suelos están relativamente secos, mientras que en el verano la radiación solar incidente disminuye debido a la cobertura nubosa, por ser temporada de lluvias. Es la primavera la estación más cálida en toda la cuenca, asociado a la mayor exposición solar durante este periodo, mientras que los menores valores de temperatura máxima ocurren en el verano, asociado a la mayor cobertura nubosa (SENAMHI, 2011).

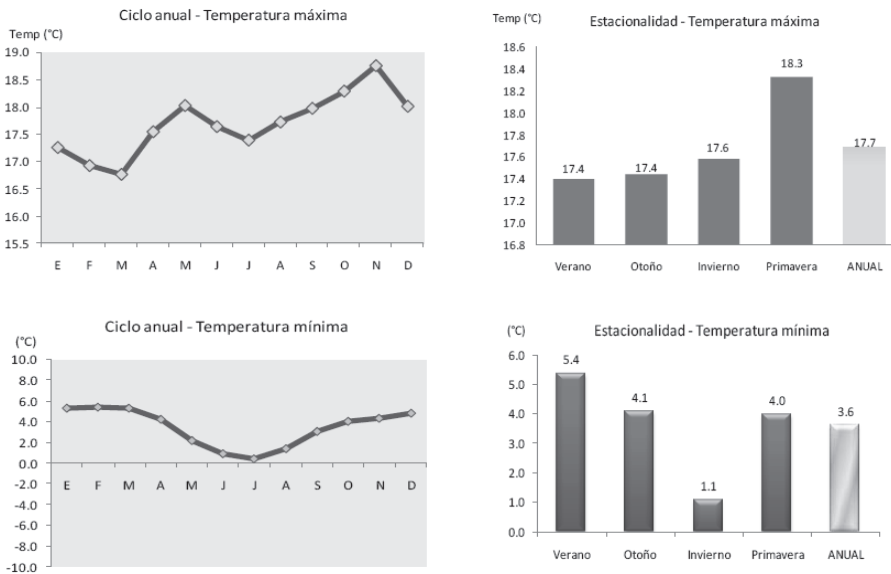


Figura 18. Comportamiento anual de la Temperatura en la Cuenca del río Mantaro.
Fuente: *Atlas Climático de la Cuenca del río Mantaro*, SENAMHI, 2011.

Los antecedentes de datos medidos desde 1965 a la fecha demuestran que la cuenca, como en la mayor parte del mundo, se ha estado calentando prácticamente durante toda la segunda mitad del siglo XX, con niveles estadísticos significativos. En la Tabla 5 se aprecia que la tendencia anual de la temperatura máxima en los puntos de medición considerados es positiva y varía entre +0.1 y +0.4°C/década, a excepción de Jauja (Junín) con -0.1°C/década y Lircay (Huancavelica) con -0.1°C/década. En cuanto a la temperatura del aire mínima, también es observable que la tendencia anual es positiva en gran parte de la cuenca, a excepción de La Quinoa (Ayacucho) con -0.2/década y Jauja con -0.3/década. Los valores positivos oscilan entre +0.1 y +0.7 °C/década, siendo más acentuado en Acobamba. Resultados similares fueron encontrados en un estudio de tendencias entre 1965-2005 realizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2007) en la misma cuenca.

Tabla 5
Tendencia anual de las temperaturas del aire máxima y mínima (°C)
en la cuenca del río Mantaro

LUGAR	Altitud (msnm)	TMÁX (°C/década)
Marcapomacocha	4413	+0.1
Jauja	3322	- 0.1
Huayao	3308	+0.3
Pilchaca	3570	+0.4
Acobamba	3236	+0.4
Lircay	3150	- 0.1
La Quinoa	3260	+0.1

Fuente: *Atlas Climático de la cuenca del río Mantaro*, SENAMHI, 2011.

La tendencia que se observa en el análisis espacial-temporal de las lagunas indica la predominancia en la reducción del espejo de agua en dos de las cuatro lagunas estudiadas. Sin embargo, es necesario mencionar que en las lagunas Tutayoc, Ampatococha y Raurac presentan una disminución casi sostenida a partir del año 1990. Esta disminución concuerda como se ha podido observar con periodos secos en toda la cuenca del Mantaro.

El año de 1990 resulta clave pues en las tres lagunas mencionadas se da un aumento considerable del espejo de agua y sólo en la laguna Sayhuacochoa se da una disminución pero muy leve. El año hidrológico 1990-1991 nos muestra que fue un año seco, sin embargo, reportes de distintas estaciones de la cuenca del Mantaro señalan que ese verano sucedieron lluvias extraordinarias, lo que ayudaría a corroborar ese aumento en 3 de las 4 lagunas estudiadas.

Luego del año 1996-1997 se da un periodo húmedo en la zona de estudio hasta el año 2001 dónde nuevamente se registra hasta la actualidad una baja en las precipitaciones. Esta dinámica en las precipitaciones concuerda con la dinámica de 3 de las 4 lagunas (salvo en el año 2010 en la laguna Tutayoc) que desde el año 2001 vienen disminuyendo su espejo de agua. La única laguna que no presenta relación evidente con las precipitaciones y tiene un comportamiento anormal dentro de la regularidad de las otras es la laguna Sayhuacocha, la cual parece tener una dinámica propia muy relacionada con el tipo de suelo (permeabilidad) y su entorno (bofedales). Con esto se puede señalar que las precipitaciones juegan un papel fundamental en la dinámica de las lagunas y por ende de la disponibilidad hídrica en la microcuenca del río Pallca

Finalmente, si bien el estudio se centró en las cuatro lagunas antes mencionadas, se observó que en la zona también existen otras lagunas más pequeñas en superficie. Durante la salida de reconocimiento realizada en enero del 2012 se indicó eran estacionales (aparecen en época seca) pero el análisis de las imágenes satelitales permite señalar que estas son permanentes, sólo que al igual que las cuatro lagunas estudiadas, pueden variar en su superficie.

Bibliografía

- Castañeda, C.; Herrero, J. y Casterad, M. A., "LandSat monitoring of playa-lakes in the Spanish Monegros desert", *Journal of Arid Environments*, vol. 63, pp. 497-516, 2005.
- Chander, G. y Markham, B., "Revised LandSat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges", *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, vol. 41:11, pp. 2674-2677, 2003.
- Dukatz, F.; Ferrati, R.; Canziani, G.; Marinelli, C. y Cepeda, R., "Sistematización del análisis de la evolución espacial y temporal de ambientes acuáticos en la Región Pampeana y transferencia a capas GIS", *Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (XI CONFIBSIG)*, publicado en CD, sin paginado, Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG) y Universidad Nacional de Luján (UNLu), Buenos Aires, 29 al 31 de mayo de 2007.
- Dukatz, F.; Ferrati, R. y Canziani, G., "Clasificación de lagos someros pampeanos mediante imágenes Landsat TM", *Biología Acuática*, núm. 22, Tandil, Buenos Aires, pp. 95-101, 2005.
- Fuenzalida de la Cerda, G., "Análisis de la variación de la superficie de agua de las Lagunas Salada, Saladita, Interna, La Punta y La Brava, en el Salar de Atacama, mediante Imágenes Satelitales Landsat, QuickBird y GeoEye-1", *Adenda 3 EIA Modificaciones y mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacamam*, Gestión Ambiental Consultores, Antofagasta, 26 pp., 2010.

- Fernández-Coppel, I. y Herrero, E., “Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+. Satélite Landsat”, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Palencia, Universidad de Valladolid, libro electrónico, 37 pp., 2001.
- Kutser, T.; Metsamaa, L.; Strömbeck, N. y Vahtmäe, E., “Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 67, pp. 303-312, 2006.
- Murillo, E., “Procesamiento Digital de Imágenes”, Facultad de Geografía, UAEM, México, pp. 14-17, 2007.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), *Atlas Climático de la Cuenca del Mantaro*, Informe que forma parte del Programa de Adaptación al Retroceso Acelerado de los Glaciares Tropicales, Lima, pp. 23-33, 2011.
- SNC-Lavalin, “Informe climatológico e hidrológico”, *Preliminar estudio de impacto ambiental del Proyecto Pukaqaqa*, Lima, pp. 7-24, 2012.
- Töyrä, J. y Pietroniro, A., “Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, pp. 174-191, 2005.