

8

Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en los Andes peruanos en las últimas décadas

Condom T.^{1,2}

Sicart J.E.^{1,2}

Rabatel A.³

Mourre L.²

Cochachin A.⁴

Santillán N.⁴

Dávila L.⁴

Tacsi A.⁴

Torres J.⁴

Colonia D.⁴

Santiago A.⁴

Suarez W.⁵

Byron Morera S.⁶

Villacis M.⁷



¹ Institut de Recherche pour le Développement - IRD

² Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement – LTHE (CNRS, IRD, Université Joseph Fourier), Grenoble, France.

³ Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement - LGGE (CNRS, Université Joseph Fourier), Grenoble, France

⁴ Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua - ANA, Huaraz, Perú

⁵ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, Lima, Perú

⁶ Instituto Geofísico del Perú - IGP, Lima, Perú

⁷ Escuela Politécnica Nacional - EPN, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

RESÚMENES

Español

Casi todos los glaciares tropicales del mundo se encuentran en los Andes. Por su ubicación en la zona intertropical, son sometidos al fenómeno de ablación (pérdida de masa glaciar) todo el año y son más sensibles al cambio climático que los glaciares de las zonas templadas. Usando imágenes satelitales y fotografías aéreas, ha sido posible calcular las variaciones en la extensión de los glaciares de las 18 cordilleras peruanas desde los años 1970s. En 40 años, la superficie glaciar se ha reducido en 43%, con mayor incidencia en las cordilleras con glaciares pequeños y cumbres entre los 5,200-5,300 msnm. En el punto de control de Condorcerro, en la Cordillera Blanca, se ha estimado que, entre y al 1970 y 2000, el 7% del volumen escurrido en el Río Santa provino del derretimiento de los glaciares. Si continúa la tendencia de aumento de la temperatura en el futuro, se producirá una aceleración del derretimiento así como un aumento del escurrimiento en las sub-cuencas altas. Pero después, cuando el reservorio glaciar se haya reducido, los aportes de agua del derretimiento serán menores. Los estiajes podrían ser más severos que en el presente, dado que el agua disponible para diversos usos, como la agricultura o la energía eléctrica, estará bajo el control de las aguas subterráneas y superficiales en relación con la precipitación.

Francés

Retrait glaciaire et ressources hydriques dans les Andes péruviennes au cours des dernières décennies

La quasi totalité des glaciers tropicaux du monde se trouve dans les Andes. Situés dans la zone intertropicale, ils sont soumis au phénomène d'ablation (perte de masse glaciaire) toute l'année et sont plus sensibles au changement climatique que les glaciers des zones tempérées. En utilisant des images satellites et des photographies aériennes, la variation de l'étendue des glaciers de 18 cordillères péruviennes a été estimée depuis les années 1970. En 40 ans, la superficie des glaciers a diminué de 43%, la plus forte incidence s'observant dans les cordillères avec de petits glaciers et sommets autour de 5200-5300 m d'altitude. Au point de contrôle Condorcerro dans la Cordillère Blanche, il a été estimé que, entre 1970 et 2000, 7% du volume drainé dans la Rio Santa provenait de la fonte des glaciers. Si la tendance à la hausse des températures se poursuit, une accélération de la fonte et l'augmentation du ruissellement dans les sous-bassins d'altitude se produira. Mais, lorsque le réservoir glaciaire aura diminué, les contributions de l'eau de fonte seront inférieures. Les sécheresses pourraient être plus graves qu'à l'heure actuelle, étant donné que l'eau disponible pour divers usages, comme l'agriculture ou de l'électricité, sera sous le contrôle des eaux souterraines et de surface directement liés aux précipitations.

Inglés

Glacial retreat and water resources in the Peruvian Andes in recent decades

Almost all the world's tropical glaciers are found in the Andes. Because of its location in the tropics, glaciers are subject to the ablation phenomenon (glacier mass loss) throughout the year, and are more sensitive to climate change than glaciers in temperate zones. Using satellite images and aerial photographs, it has been possible to calculate variations in glacier extent of 18 Peruvian mountain ranges from the 1970s. In 40 years, the glacier area has decreased by 43%, with a greater incidence in mountain ranges with small glaciers and peaks between 5,200 and 5,300 meters above the sea. In Condorcerro checkpoint in the Cordillera Blanca, it has been estimated that among 1970-2000, 7% of the volume drained at the Santa River comes from melting glaciers. If the trend of rising temperatures will continue, then an acceleration of melting as well as increased runoff in high sub basins will occur. But later, when the glacier reservoir will be reduced, the contributions of melt water will be lower. The droughts may be more severe than at present, since the available water for various uses, such as agriculture or electricity, will depend on groundwater and surface water directly related to precipitation.

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 99% de los glaciares tropicales del mundo se encuentran distribuidos en los Andes Sudamericanos, de los cuales el 71% se localizan en las cordilleras del Perú [1]. En el Perú se viene observando desde hace más de 30 años un proceso de desglaciación como consecuencia del incremento de la temperatura global y de una disminución de las precipitaciones que están conduciendo a la desaparición parcial o total de algunos glaciares. A través del uso de imágenes (fotográficas y satelitales) se han realizado estudios sobre las variaciones de las superficies, que permiten calcular la extensión glaciar para las 18 cordilleras con glaciares del Perú. Se debe tener en cuenta que un glaciar tiene dos componentes ligados entre sí, que controlan sus variaciones de extensión y la posición de su frente. El primer componente es la dinámica del glaciar porque, aunque al ojo parece ser una masa inmóvil, en realidad el hielo tiene movimiento: es un fluido en escurrimiento el cual depende de la pendiente del glaciar, del volumen de hielo y de la cantidad de agua líquida en el glaciar y a la interfaz entre el hielo y la roca de fondo. El segundo componente es el balance de masa del glaciar, que depende del balance entre la acumulación (cantidad de agua que cae en forma de nieve, no se derrite y se queda en la parte alta del glaciar, las avalanchas, etc.) y la ablación (cantidad de agua que sale del glaciar por los procesos de fusión, cambio de estado del agua de sólido a líquido, y de sublimación, cambio de estado de sólido a gaseoso). El balance de masa del

glaciar está controlado por las precipitaciones y por su balance de energía. A la escala anual, se pueden definir dos zonas que dividen el glaciar: en primer lugar la zona de acumulación con un balance positivo (zona donde el glaciar aumenta su masa durante el año considerado) y en segundo lugar la zona de ablación con un balance negativo (zona donde el glaciar pierde masa). El límite entre las dos zonas es la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés "Equilibrium Line Altitude"), donde el balance de masa anual es cero. Existe una diferencia fundamental en el comportamiento de los glaciares de la zona templada y de la zona tropical a lo largo del año. En zonas templadas, la acumulación máxima ocurre durante el invierno y la ablación máxima durante el verano, como se puede observar en los glaciares de los Alpes por ejemplo. En el caso de los glaciares andinos, ubicados en la zona intertropical, es diferente: la acumulación se hace durante el verano austral (o sea durante la época de lluvias en la sierra peruana) y la ablación ocurre a lo largo de todo el año, pero es máxima también en verano. En las cuencas hidrográficas con presencia de glaciares, las aguas escurridas pueden ser originadas por el derretimiento de los glaciares, por el escurrimiento directo superficial (de las aguas que caen sobre el glaciar y escurren hacia abajo) o por el escurrimiento subterráneo. Debido a la ausencia de datos sobre las aguas subterráneas, nos enfocaremos en la descripción de las pérdidas de agua desde las cuencas con glaciares consecutivas al derretimiento y al escurrimiento superficial asociado.

Los objetivos en este artículo son los siguientes:

1. Al nivel de todo el Perú, calcular las variaciones de extensión de los glaciares de las 18 cordilleras Peruanas desde los años 1970s, usando imágenes satelitales y fotografías aéreas en base a los inventarios existentes [2,3].

2. Al nivel de la cuenca del Río Santa en la Cordillera Blanca y al punto de control de Condorcerro por el periodo 1970-2000, estimar las variaciones del recurso hídrico calculando las variaciones de reservas superficiales de agua (lagos y glaciares) que comparamos con el volumen escurrido en el río.

Retroceso de los glaciares de las cordilleras peruanas desde 1970

Considerando imágenes satelitales y fotografías aéreas la Unidad de Glaciología y de Recursos Hídricos (UGRH que pertenece a la Autoridad Nacional del Agua) se han cuantificado las variaciones de superficies para las 18 Cordilleras del Perú entre 1970 y el periodo actual (o sea entre 2003 y 2010 según las cordilleras). Las superficies de 1970 fueron obtenidas gracias a los mapas topográficos y las fotos aéreas así como en base a los inventarios pasados [2]. Para el periodo reciente, la clasificación automática considera el índice de Nieve (NDSI, que usa información del espectro solar en el verde y en el infrarrojo medio, ver ecuación 1 donde Bverde es la banda del verde y Brojo la banda del infrarrojo medio) con un umbral de 0,4 para caracterizar a los glaciares. Las imágenes son georreferenciadas (su localización geográfica es

registrada con precisión en un sistema de coordenadas) y tomadas durante la época seca para evitar confusión con las caídas de nieve.

La Figura 1 indica un ejemplo de variación de superficie glaciar para el nevado Huascarán (el pico más alto del Perú con 6 768 msnm).

$$\text{Ecuación 1: } \text{NDSI} = (\text{Bverde} - \text{Binfrarojo}) / (\text{Bverde} + \text{Binfrarojo})$$

La tabla 1 sintetiza las variaciones, para cada cordillera peruana, de las superficies glaciares entre 1970 y la actualidad. Se observa que todas las cordilleras presentan un retroceso durante los últimos 40 años independientemente de su tamaño.

En 1970, las 18 cordilleras nevadas del Perú cubrían una superficie total de 2 041.85 km², la cual se ha reducido a 1 171.19 km² en 2010. Es decir que en 40 años la pérdida de la superficie glaciar es del orden de 43%, con mayor porcentaje de reducción en las cordilleras de menor tamaño como es el caso de Chila (97%), Chonta (92%) y Huanzo (88%).

Variabilidad del recurso hídrico (lagos, ríos, glaciares) desde 1960 en la cuenca del Río Santa (Perú)

La Figura 3 presenta el límite de la cuenca del Río Santa, la cual cubre 11 900 km², desde alturas de 6 768 msnm y hasta el Pacífico. Situado al noroeste del Perú, el Río Santa es el segundo más grande de los ríos del lado Pacífico de la Cordillera de los Andes Peruanas [4]. De manera general, sobre el

8 Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en los Andes peruanos en las últimas décadas

Nº	Cordilleras	Superficie glaciar			Pérdida	
		HIDRANDINA S.A. (1970)	UGRH		km ²	%
		km ²	km ²	año		
1	Blanca	723.37	527.62	2003	195.75	27.06
2	Huallanca	20.91	7.01	2007	13.90	66.48
3	Huayhuash	84.97	55.27	2007	29.70	34.95
4	Raura	55.2	28.34	2007	26.86	48.66
5	Huagoruncho	23.4	9.71	2009	13.69	58.50
6	La Viuda	28.6	6.03	2007	22.57	78.92
7	Central	116.65	51.91	2007	64.74	55.50
8	Huaytapallana (*)	59.08	24.58	2009	34.50	58.40
9	Chonta	17.85	1.4	2009	16.45	92.16
10	Ampato	146.73	60.96	2010	85.77	58.45
11	Urubamba(*)	41.48	15.89	2009	25.59	61.69
12	Vilcabamba(*)	37.74	15.53	2009	22.21	58.85
13	Huanzo	36.93	4.51	2010	32.42	87.79
14	Chila	33.89	0.93	2010	32.96	97.26
15	La Raya	11.27	3.06	2010	8.21	72.85
16	Vilcanota	418.43	279.4	2009	139.03	33.23
17	Carabaya	104.23	34.53	2009	69.70	66.87
18	Apolobamba (*)	81.12	44.51	2010	36.61	45.13
Total		2041.85	1171.19		870.66	42.64

Tabla 1: variaciones de superficies de los glaciares de las Cordilleras peruanas.

Fuente: ANA.

comportamiento hidrológico del Río Santa, durante la época de lluvia el río escurre hasta el Océano Pacífico y está alimentado por la lluvia, las aguas subterráneas y el aporte por fusión de los glaciares. Durante la época seca (mayo-setiembre), las aguas subterráneas y el aporte glaciar son las únicas fuentes que permiten un

escurrimiento perenne. Como resultado del cambio climático, se observa un retroceso de los glaciares (reducción de área y de volumen) durante las últimas décadas, implicando cambios en el escurrimiento hacia los ríos parcialmente alimentados por la fusión de los glaciares.

8 Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en los Andes peruanos en las últimas décadas

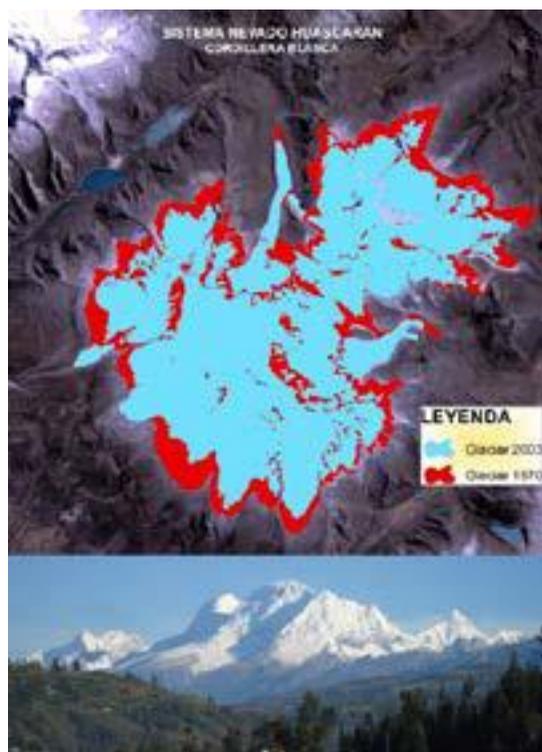


Figura 1: Arriba - Zona del Nevado Huascarán con 2 límites glaciares según las fechas 1970 y 2003; abajo fotografía actual del Nevado Huascarán. Foto: © ANA / Cochachin, Alejo.

La zona de estudio considera el punto de control en Condorcerro, lugar que junta las 2 sub-cuencas Santa y Tablachaca. La superficie de la cuenca a Condorcerro es de 9 500 km² con un porcentaje de área glaciar de 4.6%. Esta cuenca junta las cuencas de Tablachaca y de Alto Santa (Fig.3). Durante los últimos 40 años la distribución de agua en los lagos ha podido modificarse (desarrollo de lagos pro-glaciar, por ejemplo como el lago del Nevado Pastoruri, Fig. 2). Desafortunadamente, la medición directa con batimetría (técnica que mide las profundidades subacuáticas para determinar los volúmenes de agua de los lagos) no puede realizarse para todos los lagos de la cuenca por un tema de

accesibilidad y por que son muy numerosos. Por lo tanto, proponemos un cálculo basado en una relación de tipo empírico. En primer lugar, calculamos una relación lineal empírica regional sobre la base de medición directa de 67 lagos (Fig. 4 y ecuación de la tendencia lineal). En segundo lugar, considerando esta relación entre volumen y área, calculamos los volúmenes de todos los lagos para 2 periodos (1980 y la actualidad) con las áreas derivadas de los inventarios.

Por el periodo 1980-2000, se calcula que los volúmenes de agua han sido casi constante con 1 132 km³ hasta 1 133 km³ respectivamente en los lagos.

Consideramos los datos de caudales del Río Santa al nivel de Condorcerro sobre el periodo 1970-2000: un caudal promedio anual de 145 m³ por segundo y un volumen total escurrido de 133 km³. Este volumen puede ser comparado al volumen perdido por el derretimiento del glaciar. Para calcular esto, al igual que en el caso de los lagos, mediciones directas no pueden ser realizadas a la escala de toda la cordillera. Por lo tanto, proponemos usar un método que permite el cálculo de volumen considerando la fórmula de “basal shear-stress” (fuerza de cizalladura en la base del glaciar), que da el espesor del glaciar (h) multiplicado por la superficie [5]. Puesto que el glaciar escurre debido a la fuerza de la gravedad, el componente de

En 40 años la pérdida de la superficie glaciar es del orden de 43%, con mayor porcentaje de reducción en las cordilleras de menor tamaño como es el caso de Chila, Chonta y Huanzo.

8 Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en los Andes peruanos en las últimas décadas



Figura 2: Formación de laguna a consecuencia del retroceso del glaciar Pastoruri, junio 2009. Foto: © ANA / Cochachin, Alejo.

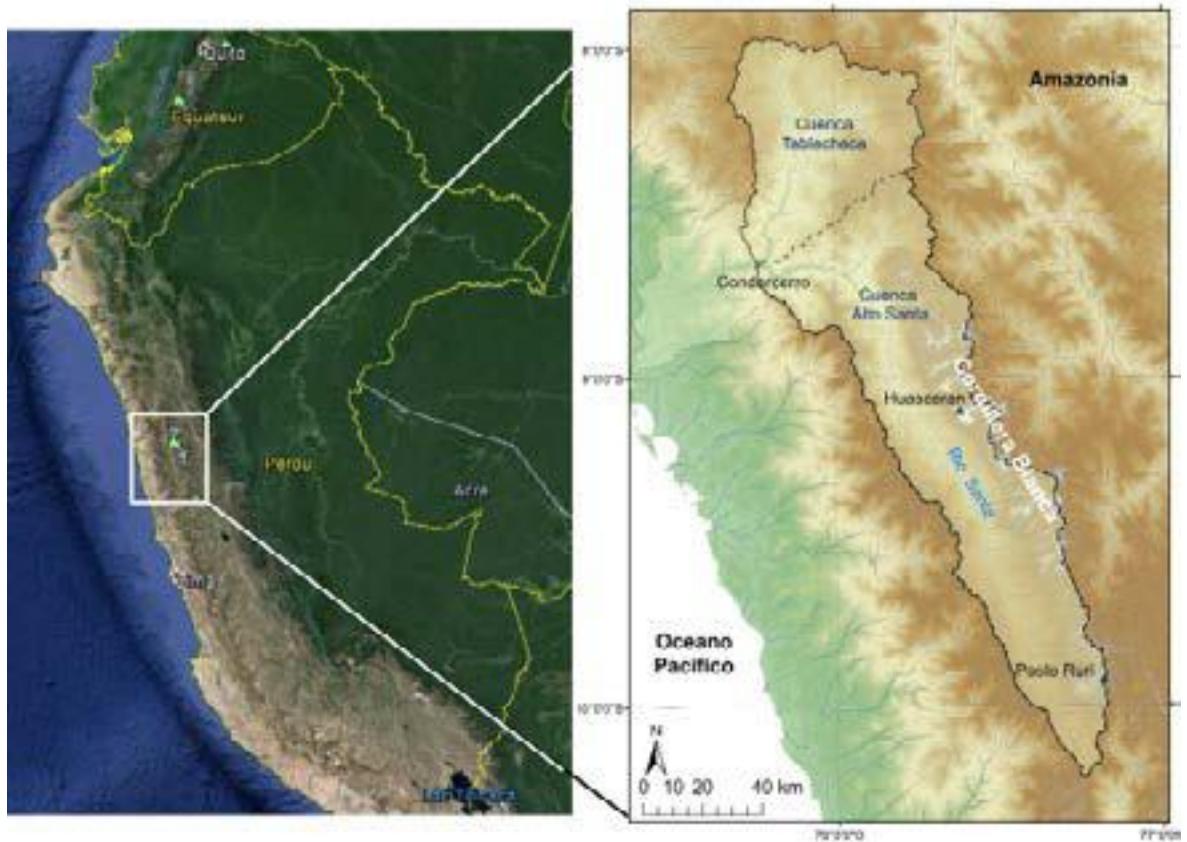


Figura 3: Cuenca del río Santa con el punto de control Condorcero. Glaciares en blanco (2003).

8 Retroceso de los glaciares y recursos hídricos en los Andes peruanos en las últimas décadas

gravedad a lo largo de la base del glaciar en contacto con la roca es $\rho g \sin(\alpha)$ y τ_0 (bar) es el "shear-stress". Pudiendo escribir el espesor promedio del glaciar como:

$$\text{Ecuación 2: } h = \tau_0 / \rho g \sin \alpha$$

En donde h: espesor de hielo (m), ρ masa volumétrica del hielo (900 kg.m^3), g la constante de gravedad de la tierra (9.81 m/s^2) y α la pendiente del glaciar obtenido con el modelo numérico de terreno ($^\circ$).

Para sintetizar, los resultados obtenidos indican que durante el periodo 1970-2000 entre 5 y hasta 7% del volumen escurrido en el Río Santa al nivel de Condorcerro provienen del derretimiento de los glaciares. Las diferencias entre los porcentajes del aporte por el derretimiento dependen del valor de "shear stress" considerado (Tabla 2).

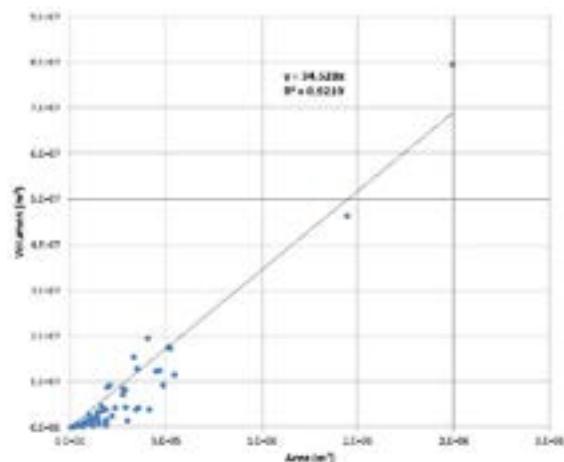


Figura 4: Relaciones superficie/volumenes de los lagos en la cuenca del Santa y del Tablachaca (batimetría de 67 lagos en las cuencas del río Santa – fuente UGRH/ANA)

Periodo	87-70	2000-87	2000-70
Volumen Condorcerro (km^3)	78.2	54.8	133.0
% derretimiento con shear stress ($\tau_0=0.8 \text{ bar}$)	4.6	0.4	5.0
% derretimiento con shear stress ($\tau_0=1 \text{ bar}$)	5.6	0.6	6.3
% derretimiento con shear stress ($\tau_0=1.2 \text{ bar}$)	6.9	0.6	7.5

Tabla 2: Variaciones del volumen escurrido en el río Santa periodo [1970-2000] y su comparación con el volumen calculado del derretimiento de los glaciares.

CONCLUSIONES

Si sigue la tendencia de aumento de la temperatura en el futuro (sin considerar cambios en las precipitaciones) se observará un retroceso del frente glaciar así como una subida de la Altitud de la Línea de Equilibrio, lo cual significa un aumento de la zona de ablación o pérdida de masa. ¿Cuáles podrían ser los cambios para el Río Santa? Para las sub-cuencas altas con una parte glaciar importante, se notara una aceleración de la fusión así como un aumento del escurrimiento causado por esta fusión. En este caso el balance hidrológico no estará en equilibrio y el volumen de agua escurrido será más grande que el volumen de agua caído por la precipitación (líquida o sólida). Se observara una pérdida del agua almacenada en los glaciares. Así que el máximo de caudal anual debería ser más importante en los años que vienen, pero en una segunda instancia cuando el reservorio glaciar sea pequeño, el funcionamiento hidrológico de la cuenca (y por lo tanto el agua disponible para diversas actividades como la agricultura o la energía eléctrica) estará bajo el control de las aguas subterráneas y superficiales en relación más directa con la cantidad de precipitación. Con menores aportes glaciares, los estiajes podrían ser más severos que en el presente: significa que cuando no habrá lluvia, habrá menos agua disponible en la cuenca y particularmente en las subcuencas altas con una parte glaciar importante. Este escenario debe ser tomado con prudencia en la medida que los escenarios climáticos futuros tienen bastante problemas para proporcionar esquemas de precipitación confiables, sin embargo, el componente de la precipitación es fundamental para explicar el funcionamiento hidrológico de cuencas de montañas. Para concluir, hemos visto que los estudios del comportamiento de los glaciares permiten interpretar los cambios climáticos y que existe un impacto en la distribución de los recursos hídricos. Finalmente, las investigaciones, con la condición de un seguimiento y monitoreo de los glaciares a través de estudios glaciológicos e hidrológicos (gracias a una red de observación instrumental), permitirán entender los procesos y proporcionar algunas pistas para definir estrategias de adaptación frente a estos cambios. Estos estudios deben ser realizados con la participación de todos los actores (gente que vive en la zona, autoridades locales, empresas públicas y privadas, investigadores y políticos) para que las medidas de adaptación a la nueva distribución de recursos hídricos en la zona sean sustentables.

REFERENCIAS

- 1 - Kaser, G. & Osmaston, H. (2002). Tropical Glaciers. Cambridge: Cambridge University Press.
- 2 - Hidrandina (1989). Inventario de glaciares de Perú. Fuente: fotografías aéreas de 1962, 1963, 1970.
- 3 - UGRH (2010): Inventario de Glaciares Cordillera Blanca, Lima, Perú, Autoridad Nacional del Agua. 120p.
- 4 - Mark, B. & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. Quaternary Science Reviews, 24, 2265-2280.
- 5 - Lliboutry, L. (1965). Traité de glaciologie: Masson (Paris).

EL PERÚ FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Resultados de investigaciones franco-peruanas

Coordinadores:

Sonia González Molina (MINAM)

Jean-Joinville Vacher (IRD)

Editora científica:

Anne Grégoire (IRD)



Ouvrage publié à l'occasion de la Conférence des Parties de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques - COP20.

Obra publicada en el marco de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - COP20.

Coordination éditoriale

Coordinación editorial

Sonia González Molina

Jean-Joinville Vacher

Révision des textes

Revisión de los textos

Anne Grégoire

Traductions

Traducciones

Anne Grégoire

Liliana Lalonde

Eduardo Neira

Mise en page et illustrations

Diseño e ilustraciones

Siembra

Impression

Impresión

Forma e imagen

Première impression Novembre 2014, 500 exemplaires

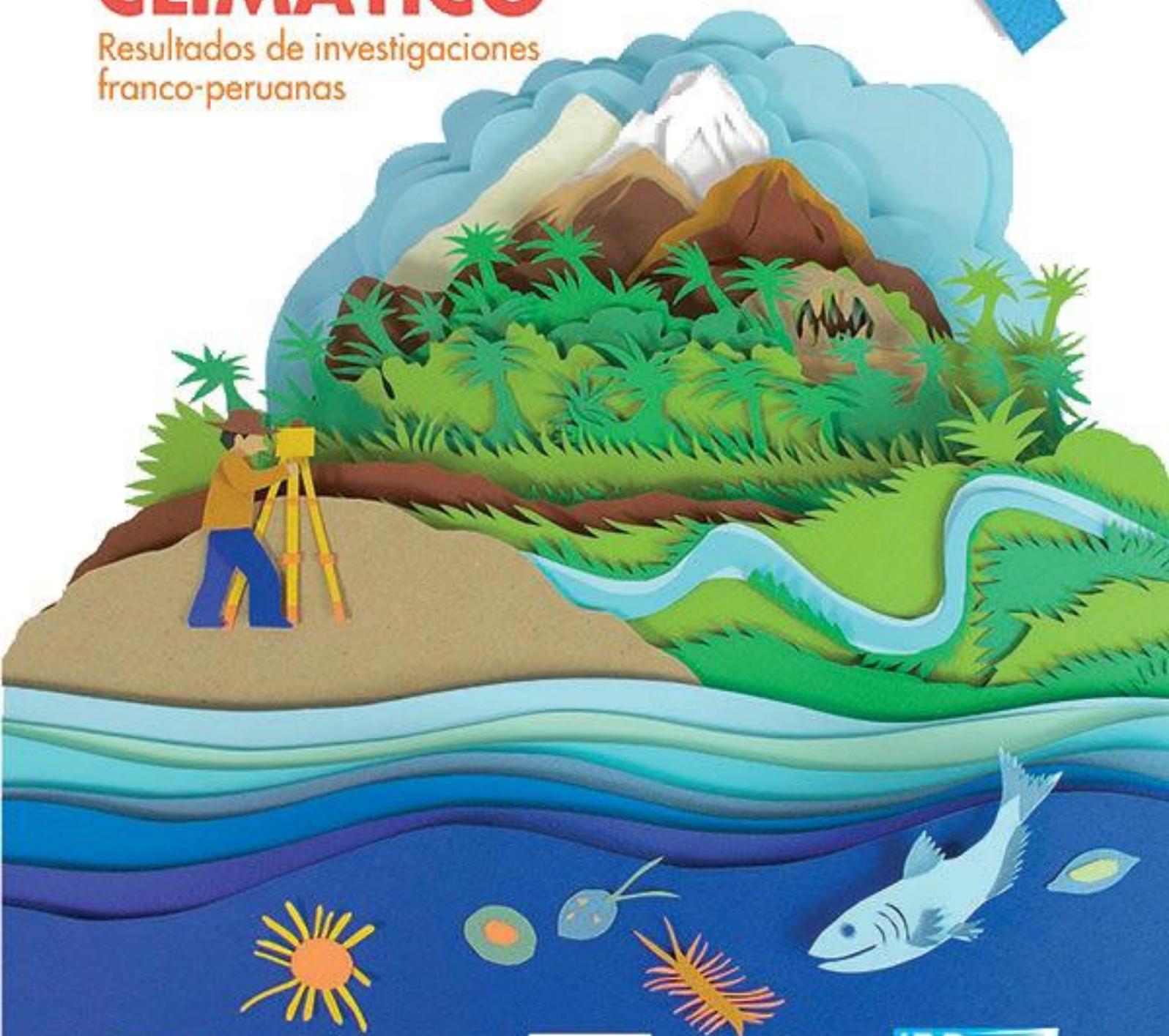
Primera impresión Noviembre 2014, 500 ejemplares

© IRD, 2014

ISBN 978-2-7099-1906-7

EL PERÚ FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Resultados de investigaciones
franco-peruanas



Con el apoyo de la Embajada de Francia en el Perú y la Cooperación Regional Francesa para los Países Andinos