

Calentamiento climático del Tercer Polo y cambios en el sistema de la criosfera

por Tandong Yao¹, Lonnie Thompson², Deliang Chen³, Yinsheng Zhang¹, Ninglian Wang⁴, Lin Zhao⁵, Tao Che⁶, Baiqing Xu¹, Guangjian Wu¹, Fan Zhang¹, Qihong Tang⁷, Walter Immerzeel⁸, Tobias Bolch⁹, Francesca Pellicciotti¹⁰, Xin Li¹, Wei Yang¹, Jing Gao¹ y Weicai Wang¹

Las montañas proporcionan agua, energía, minerales, productos forestales y agrícolas, así como áreas recreativas para la población. Las regiones de alta montaña conforman la mayor reserva de hielo y nieve después del Ártico y la Antártida. En Asia, este tipo de regiones incluyen los 14 picos más altos del mundo y unos 100 000 km² de glaciares. El llamado Tercer Polo abarca la meseta tibetana, el Himalaya, el Hindu Kush, el Pamir y las montañas Tien Shan. El agua líquida, producto de la fusión del hielo y la nieve del Tercer Polo, alimenta muchos de los grandes lagos y ríos del continente, incluidos el Indo, Brahmaputra, Ganges, Amarillo y Yangtsé. Conocida como “las torres de agua asiáticas”, esta región montañosa es fundamental para asegurar el agua y la sostenibilidad socioeconómica de muchas naciones. Alberga una población de 1 700 millones de habitantes y un producto interior

bruto (PIB) de 12,7 billones de dólares de los Estados Unidos (figura 1).

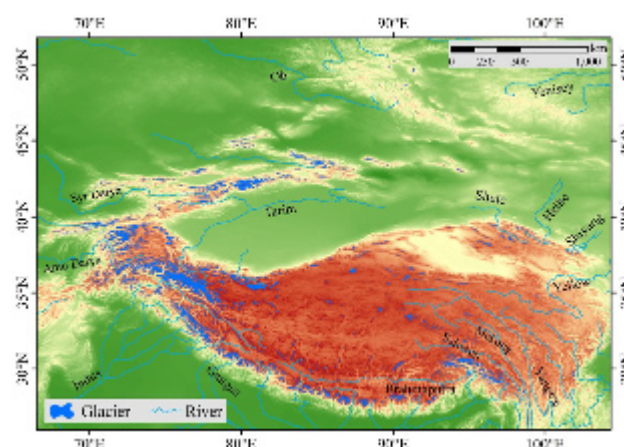


Figura 1. Distribución de los glaciares en el Tercer Polo y sus alrededores.

- 1 Instituto de Investigación de la Meseta Tibetana, Academia China de Ciencias
- 2 Centro Byrd de Investigación Polar y Climática, Universidad Estatal de Ohio
- 3 Universidad de Gotemburgo
- 4 Universidad del Noroeste
- 5 Universidad de Ciencia y Tecnología de la Información de Nankín
- 6 Instituto Noroeste de Medioambiente y Recursos, Academia China de Ciencias
- 7 Instituto de Ciencias Geográficas e Investigación de Recursos Naturales, Academia China de Ciencias
- 8 Universidad de Utrecht
- 9 Universidad de St. Andrews
- 10 Instituto Federal Suizo de Investigación sobre Bosques, Nieve y Paisajes, WSL

El Tercer Polo ha experimentado cambios medioambientales significativos en las últimas cinco décadas. Las condiciones y la estabilidad de las torres de agua asiáticas se ven afectadas por el calentamiento que provoca el retroceso de los glaciares, la desaparición de los hielos, la expansión de los lagos glaciares y los frecuentes desbordamientos repentinos de los mismos, hechos que repercuten en el progreso socioeconómico de los países de la región. Los rápidos cambios en los glaciares del Tercer Polo, así como en el permafrost, la capa de nieve, los lagos, los ríos y sus efectos aguas abajo, se han estudiado desde 2010 en el marco del programa Entorno del Tercer Polo con fondos de la Academia China de Ciencias. Esta iniciativa fundamental de investigación internacional aborda la interacción entre múltiples aspectos del sistema de la Tierra en la región del Tercer Polo. Los cambios en la criosfera de montaña y sus

impactos en la hidrología y en los recursos hídricos regionales son aspectos importantes de investigación del citado programa.

Tras diez años de estudio, es útil sintetizar los resultados de la investigación y analizar la disponibilidad de agua y las implicaciones socioeconómicas en las regiones montañosas más amplias. Este informe, la primera parte de la síntesis, se centra en el calentamiento climático y los cambios en el sistema de la criosfera del Tercer Polo, es decir, los cambios en las condiciones de la cubierta de nieve, los glaciares y el permafrost. La segunda parte (que se publicará en el próximo número del *Boletín*) tratará de la respuesta hidrológica a los cambios en la criosfera del Tercer Polo, la seguridad hídrica y la sostenibilidad socioeconómica.

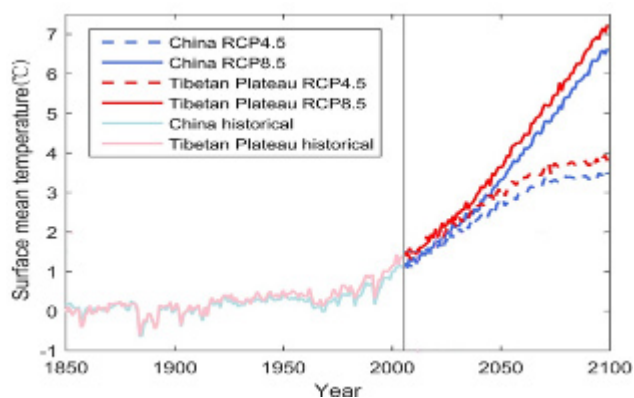


Figura 2. Temperatura superficial media regional para China y la meseta tibetana en el período comprendido entre 1850 y 2100 a partir de las medias del conjunto multimodelo del Proyecto de Intercomparación de 21 Modelos Acoplados (CMIP) 5 según las trayectorias de concentración representativas (RCP) 8,5 y 4,5 del IPCC. La línea marrón vertical marca el límite entre las simulaciones históricas y las del RCP CMIP5 (You y otros, 2019).

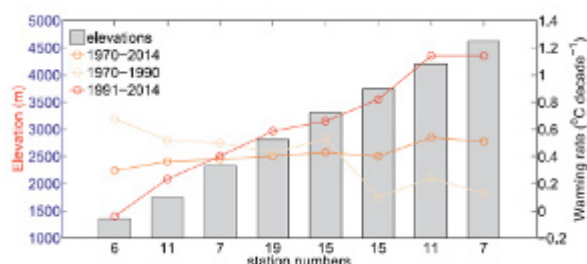


Figura 3. Calentamiento dependiente de la elevación para la temperatura media del aire en invierno sobre la meseta tibetana en el período de 1970 a 2014 (Yao y otros, 2019).

Calentamiento climático en el Tercer Polo

El Tercer Polo es una de las áreas más sensibles al cambio climático. Se considera un lugar para observar las señales de alerta temprana del calentamiento global (Yao y otros, 2019; You y otros, 2019). La región se ha calentado aproximadamente 1,8 °C durante el último medio siglo (figura 2), con un ritmo de calentamiento significativamente más alto que el del hemisferio norte y el de la media mundial (Kang y otros, 2010; Liu y Chen, 2000; Yang y otros, 2014). Las temperaturas anuales y estacionales aumentaron más en las zonas de mayor elevación del Tercer Polo (figura 3; Gao y otros, 2018; Liu y Chen, 2000; Liu y otros, 2009; Yao y otros, 2019). Este calentamiento dependiente de la elevación es especialmente pronunciado durante las estaciones de invierno y otoño (Yao y otros, 2019) en áreas por debajo de la cota de 5 000 metros sobre el nivel del mar.

El clima del Tercer Polo se caracteriza por un verano húmedo y lluvioso y un invierno fresco y seco. Aproximadamente entre el 60 % y el 90 % de la precipitación anual cae entre junio y septiembre. Desde 1960, la precipitación anual, con una variabilidad interanual significativamente alta, aumentó ligeramente en la mayoría de las zonas del Tercer Polo, excepto en las regiones sur y sureste (Gao y otros, 2015) (figura 4a, b). Debido a la inaccesibilidad y al terreno escarpado, la precipitación en la mayoría de las zonas del noroeste del Tercer Polo sigue siendo en buena medida desconocida debido a la falta de observaciones (véase la figura 4b). De manera similar a la dependencia del calentamiento con la elevación, hay una tendencia significativa creciente de la precipitación en verano con la elevación en el Tercer Polo (figura 4c), que es del 0,83 % por década y por km entre 1970 y 2014, y del 2,23 % por década y por km entre 1991 y 2014 (Li y otros, 2017). Se prevé que la precipitación en el Tercer Polo aumente durante el siglo XXI, especialmente en las regiones del norte y oeste.

Características y cambios de la capa de nieve

El calentamiento climático afecta directamente al sistema de la criosfera del Tercer Polo, lo que conlleva un retroceso significativo de los glaciares, cambios en la capa de nieve y degradación del permafrost (Yao y otros, 2019). Los datos de teledetección revelan cambios en las condiciones de la capa de nieve desde 1980 hasta 2018. Las extensiones media, máxima y mínima de la nieve en el período de acumulación (noviembre a marzo) fueron grandes en las décadas de 1980 y 1990, pero han

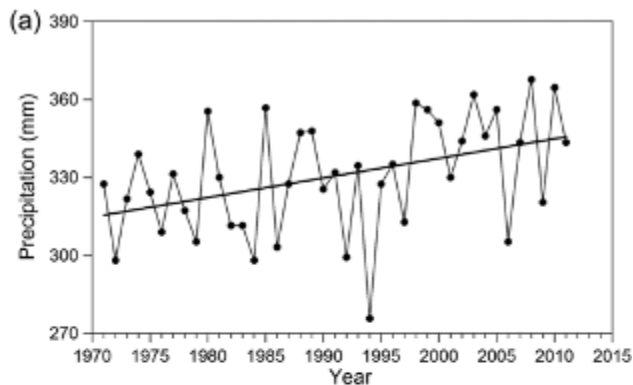


Figura 4. a) Variación de la precipitación media anual promediada en el Tercer Polo desde 1971 a 2011 (Gao y otros, 2014); b) distribución espacial de las tendencias de precipitación anual en la meseta tibetana desde 1979 a 2011. Los símbolos rellenos indican una tendencia creciente, mientras que los símbolos huecos indican una tendencia decreciente. Los símbolos más grandes representan tendencias significativas (Gao y otros, 2015).

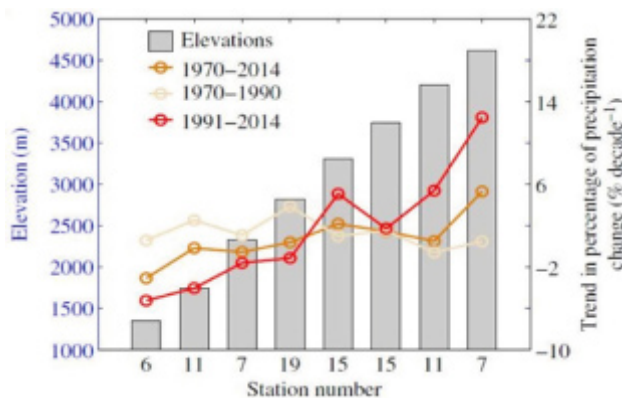


Figura 4. c) Dependencia con la elevación de las tendencias (% por década) de la precipitación en verano durante tres periodos (1970-1990, 1991-2014 y 1970-2014) en la meseta tibetana.

disminuido constantemente desde el año 2000 (Che y otros, 2008). La extensión máxima de la nieve fue de aproximadamente 2,5 millones de km² en el invierno de 1994/1995. La mayor parte de la meseta tibetana ha experimentado menos días cubiertos de nieve entre 1980 y 2016, con una disminución media de menos de 2 días/año en casi la mitad de la región, y más de 4 días/año en algunas áreas. La disminución en la duración de la nieve también resulta evidente en la meseta tibetana desde la década de 1980. Del mismo modo, el espesor de la nieve ha disminuido entre 1980 y 2018, con una gran fluctuación interanual antes de 2000 y una menor variación después de 2000 (Che y otros, 2019). Existen datos espaciales contradictorios en el cambio del espesor de nieve en la meseta tibetana, por una parte hay una clara disminución de 0,1-0,2 cm/año en las montañas Nyenchen Tanglha, y por otra un ligero aumento (menos de 0,1 cm/año) en la montaña Qilian, la montaña HohXil y la vertiente norte del Himalaya (figura 5).

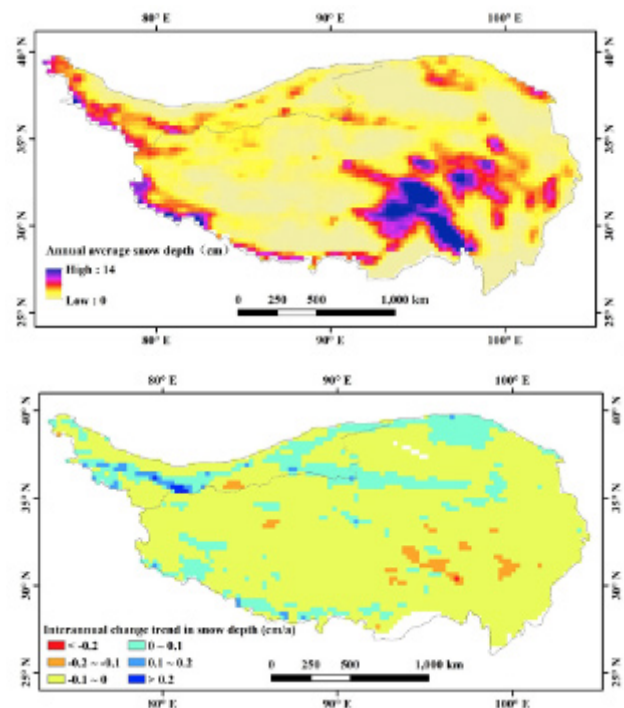


Figura 5. Distribución y cambio del espesor de nieve en el periodo 1980-2018 en el Tercer Polo.

Los procesos de deshielo cambian en el espacio y en el tiempo en el Tercer Polo. Aunque el deshielo de primavera no es la principal contribución al caudal de los ríos, llega al final de la citada estación, que es el período crucial para el riego y el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, el deshielo es un importante suministro de agua para la humedad del suelo y la escorrentía de los ríos

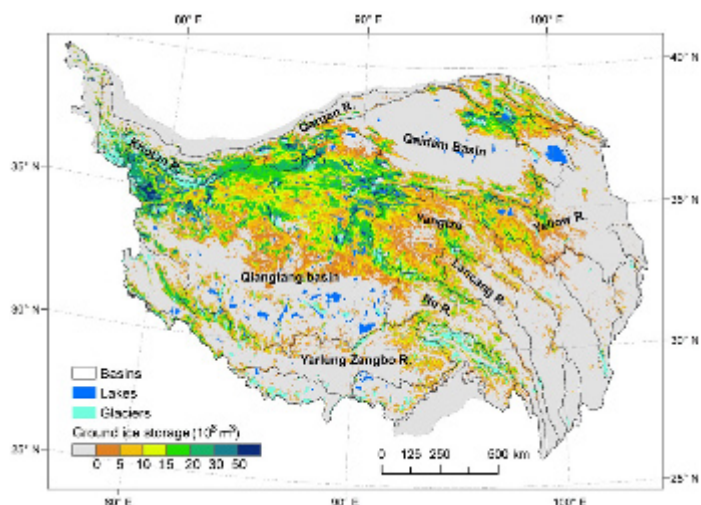


Figura 6. Distribución del permafrost y del hielo superficial en el Tercer Polo.

en el Tercer Polo. El cambio climático afecta significativamente a los procesos hidrológicos en la meseta tibetana. En los últimos años, se ha detectado, gracias a varios estudios (Immerzeel y otros, 2010; Wang y Li, 2006), un aumento en la escorrentía y un máximo más temprano de la cantidad de agua líquida de deshielo. Los resultados de los modelos sugieren que existen diferencias regionales en los procesos de deshielo y de escorrentía a consecuencia del calentamiento climático en el Himalaya (Rees y Collins, 2006). Por ejemplo, el aumento de las nevadas en primavera en la parte oriental del Himalaya reduciría el aumento de la escorrentía de deshielo y desfazaría la sincronización de los flujos máximos.

Estado del permafrost y sus cambios

El permafrost es el suelo (tierra o roca, incluido hielo o material orgánico) que permanece a 0 °C o menos durante al menos dos años consecutivos (Harris y otros, 1988). El permafrost cubre aproximadamente el 40 % de

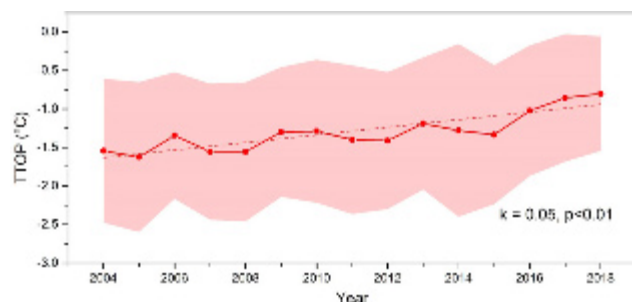


Figura 7. Temperatura del suelo en el fondo de la capa activa, en el periodo 2004-2018.

la superficie del Tercer Polo, alrededor de $1,06 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Zou y otros, 2017). El permafrost se encuentra en la cabecera de muchas de las grandes cuencas fluviales, y su extensión en ellas varía de menos del 10 % a más del 60 % en las montañas Qilian y entre las montañas Kunlun y Tangula. Durante el período de formación del permafrost y la segregación repetida del hielo, una gran cantidad de agua en estado sólido se acumuló bajo tierra en forma de hielo subterráneo cerca del techo del permafrost. La reserva de hielo en el suelo, cerca del techo del permafrost en la meseta Qinghai-Tíbet, es de aproximadamente $1,27 \times 10^{13} \text{ m}^3$ (Zhao y otros, 2019) (figura 6).

El calentamiento global debido al cambio climático ha reducido en general el permafrost en el Tercer Polo. La observación *in situ* muestra aumentos significativos en la profundidad de la capa activa y en la temperatura del suelo. Las observaciones de perforaciones a lo largo de la carretera Qinghai-Tíbet desde 2004 hasta 2018 señalan un calentamiento de 0,48 °C/década, en promedio, en el fondo de la capa activa, y de 0,02 ~ 0,31 °C/década a una profundidad de 10 metros (Cheng y otros, 2019) (figura 7). Los resultados de los modelos también indican una tendencia a incrementar el espesor de la capa activa con una profundidad que aumenta 19,5 cm/década (Hu y otros, 2019). Los cambios en la capa activa muestran una heterogeneidad espacial; son más marcados en las regiones frías de permafrost, con alta elevación, en prados de alta montaña y en regiones con suelos de grano fino.

La degradación del permafrost puede conducir a cambios en los procesos hidrológicos, que incluyen modificaciones del almacenamiento de agua en reservorios superficiales (por ejemplo, lagos y humedales), la conectividad hidrológica y la interacción entre las aguas

superficiales y las subterráneas (Connon y otros, 2014). En el terreno con permafrost, la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial está restringida porque el permafrost actúa como una capa impermeable. Con la degradación del permafrost, se espera que el almacenamiento de agua subterránea y su recarga aumenten (Niu y otros, 2011; Bense y otros, 2012). Se ha identificado la degradación del permafrost como una posible causa asociada del aumento del caudal fluvial en invierno en la cuenca alta del río Heihe (Gao y otros, 2018) y en el río Lhasa (Gong y otros, 2006).

El aumento de espesor de la capa activa afecta a la producción, la convergencia y los procesos ecológicos en las regiones de permafrost; la fusión del suelo helado libera agua líquida que se añade y participa en el ciclo hidrológico. En las regiones de permafrost, durante las temporadas de deshielo, el contenido de agua del suelo aumentó en el perfil del mismo (Zhao y otros, 2000). En respuesta al aumento de espesor de la capa activa y a la fusión del suelo helado, el contenido de agua en el fondo de la capa activa aumentó en general entre un 11 % y un 32 % entre 2004 y 2018, mientras que la humedad del suelo superficial disminuyó o permaneció constante (Wu y otros, 2017; Zhao y otros, 2019).

Los estudios de isótopos revelan que las contribuciones del descongelamiento del permafrost a los lagos termokarst podrían alcanzar el 61,3 % en la región de Beiluhe (Yang y otros, 2016). Las contribuciones del agua fundida, procedentes del suelo helado, a la escorrentía alcanzan el 37,4 % en el río alpino típico del paso de montaña de Kunlun (Yang y otros, 2016) y del 13,2 % al 16,7 % en la región de cabecera del río Amarillo (Yang y otros, 2019). La cantidad de hielo derretido y su efecto en el ciclo regional del agua es difícil de cuantificar, ya que la respuesta del permafrost al calentamiento climático es relativamente lenta. En consecuencia, el impacto de la degradación del permafrost en el proceso hidrológico también es gradual. Los procesos específicos de cambios o variaciones del permafrost en climas más cálidos y húmedos y sus efectos sobre las condiciones hidrológicas en el Tercer Polo requieren más investigación.

Cambios y pérdida de masa en los glaciares

Los cambios en los glaciares y su impacto en los recursos hídricos y el aumento del nivel del mar han llamado la atención en todo el mundo (Immerzeel y otros, 2019;

Zemp y otros, 2019). En las latitudes medias, el Tercer Polo es la región con la mayor concentración de glaciares (figura 1). Según la nueva versión del inventario mundial de glaciares Randolph v.6.0 (RGI, 2017), habría 97 760 glaciares con un área de 98 739,7 km² en la meseta tibetana y sus alrededores, incluidos Hindu Kush, Pamir, Tien Shan y Altái. El volumen de hielo de estos glaciares sería aproximadamente de 7 481 km³ (Zemp y otros, 2019). Es importante para la gestión de los recursos hídricos aguas abajo y para el desarrollo socioeconómico sostenible comprender los cambios en los glaciares y sus influencias en la escorrentía fluvial.

Los cambios en los glaciares se reflejan principalmente en cambios en la altitud de la línea de equilibrio, el área y el balance de masa. Los cambios en el balance de masa y el área del glaciar están directamente controlados por los cambios en la altitud de la línea de equilibrio. En la meseta tibetana y sus alrededores, solo hay unos pocos glaciares monitorizados. En los últimos 50 años, todos esos glaciares mostraron una tendencia general de retirada, y sus altitudes de la línea de equilibrio mostraron una tendencia creciente. Por ejemplo, las del glaciar número 1 en el nacimiento del río Urumuqi en Tien Shan, del glaciar Maliy Aktru en las montañas Altái y del glaciar Qiyi en las montañas Qilian han aumentado en aproximadamente 110 m, 140 m y 250 m respectivamente desde 1960 (Wang y otros, 2010; Ye y otros, 2016). Los datos de teledetección proporcionan una base importante para el estudio de los cambios glaciológicos así como del inventario de glaciares a una gran escala espacial. La evaluación de Wang y otros (2019) de los cambios en el área de los glaciares en la meseta tibetana y sus áreas circundantes, a través de la síntesis de los resultados de muchos estudios, puso de manifiesto un patrón espacial claro de cambios en el área de los glaciares en los últimos 40 años. Ese patrón consiste en una contracción de los glaciares de menos del 0,2 %/año en las montañas de Kunlun occidental, Pamir y Karakórum (solo 0,04 %/año en Karakórum central), del 0,4 %/año en Altái oriental, Tien Shan, Qilian, Kunlun oriental, Tangula, Gangdis, suroeste del Tíbet e Himalaya y más del 0,7 %/año en el sureste del Tíbet. Wang y otros (2019) también resumieron los resultados de los estudios sobre los cambios en el balance de masa de los glaciares obtenidos por métodos geodésicos y glaciológicos, e informaron de que el balance de masa específico de los glaciares en los últimos 50 años fue cercano a cero y/o ligeramente mayor o menor que cero en Karakórum, Kunlun occidental y Pamir, pero tuvo un valor significativamente negativo en las demás regiones (figura 8). Por otro lado, los glaciares estaban o bien ganando masa o bien

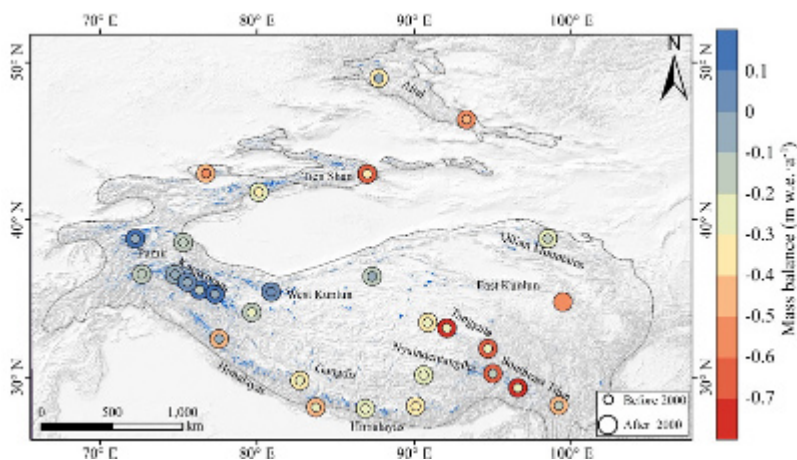


Figura 8. Cambios espaciales y temporales del balance de masa de los glaciares en el Tercer Polo y sus áreas circundantes. Datos utilizados de: Bolch y otros, 2017; Cao y otros, 2014; Chen y otros, 2017; Gardelle y otros, 2013; Gardner y otros, 2013; Kääb y otros, 2012; Ke y otros, 2015; Maurer y otros, 2019; Neckel y otros, 2014; Pieczonka y otros, 2013; Scherler y otros, 2011; Shangguan y otros, 2010; Wang y otros, 2008; Wang y otros, 2013; Wei y otros, 2015a; Wei y otros, 2015b; WGMS, 2017; Wu y otros, 2018; Xu y otros, 2013; Zhang y otros, 2016; Zhou y otros, 2018; 2019.

perdiendo menos masa en Karakórum, Kunlun occidental y Pamir después de 2000; aunque otros glaciares experimentaron una pérdida de masa acelerada en las demás regiones después de 2000. Esto parece implicar que la “anomalía del Karakórum” podría extenderse parcialmente a las zonas cercanas de Kunlun occidental y Pamir (Farinotti y otros, 2020), y que el suministro de agua desde los glaciares en la región de la “anomalía del Karakórum” corriente abajo debería ser relativamente estable.

Los glaciares del Tercer Polo se concentran principalmente en las cuencas de los ríos Tarim, Indo y Amu Darya (véase la figura 1, aproximadamente el 60 % del área total de glaciares se encuentra en estas tres cuencas). Los grandes glaciares que hay en estas cuencas pueden generar abundantes recursos de agua debido a su deshielo. Por ejemplo, más del 40 % de la escorrentía total del río Tarim proviene del deshielo de los glaciares. A pesar de que el área de los glaciares en la cuenca de este río se ha reducido, la escorrentía debida al deshielo de los glaciares aumentó durante el período 1961-2006 (Gao y otros, 2010). Sin embargo, a medida que los glaciares retrocedan aún más, la pregunta clave es ¿cuándo alcanzará el máximo la escorrentía anual de los glaciares? A este momento se le suele llamar “pico de agua”, y más allá de él, la escorrentía disminuye ya que el glaciar reducido no puede seguir aumentando su aporte de agua de deshielo. Un estudio reciente estimó que el pico de agua en las cuencas de los ríos más grandes del Tercer Polo se alcanzará entre 2030 y 2050, dependiendo de los diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (Huss y Hock, 2018). Este momento es crítico para la gestión actual y futura de los recursos hídricos en los tramos más bajos.

Peligros y desastres glaciares

Los rápidos cambios de los glaciares en el Tercer Polo pueden dar lugar a desastres relacionados con peligros naturales como colapso de glaciares, oleadas glaciares, flujo de escombros glaciares o desbordamientos repentinos de lagos glaciares. Estos incidentes asociados a los glaciares se caracterizan por su distribución espacio-temporal así como por sus procesos y mecanismos dinámicos. Las oleadas glaciares ocurren activamente en los macizos del Karakórum e Himalaya, y al sureste del Tercer Polo. La velocidad del movimiento de la superficie del hielo puede alcanzar cientos de metros cada año. Hubo 27 glaciares en avance en el Tercer Polo en el período de 1978 a 2015 con aumentos significativos en área y longitud. La velocidad de cambio para el lado occidental del glaciar Wood Stark fue de 904 m/a de 1996 a 1998, 446 m/a para el lado este del glaciar del K2 de 2007 a 2009, y 238 m/a de 1978 a 1990 para el glaciar 5Y654D497 (Xu y otros, 2016). Las oleadas glaciares pueden moverse rápidamente hacia los lagos glaciares y causar desbordamientos repentinos. El flujo de escombros de los glaciares puede desencadenarse por una fusión intensa y rápida de los mismos, por desbordamiento repentino de un lago glaciar y por colapso o avalancha de glaciares. Las temperaturas altas y la precipitación fuerte son los dos factores meteorológicos principales relacionados directamente con la ocurrencia del flujo de escombros glaciares.

En el Tercer Polo están ocurriendo nuevos tipos de desastres relacionados con los glaciares. El 17 de julio y el 21 de septiembre de 2016, se produjeron dos enormes colapsos de hielo en Aru Range, Ngari, oeste del Tercer Polo (Kääb y otros, 2017). El colapso del glaciar Aru causó



Figura 9. Rescate de posibles sobrevivientes del colapso del glaciar Aru, en julio de 2016 (foto de Xinhua Net).

nueve fallecidos (pastores) y la pérdida de cientos de cabezas de ganado (figura 9). Los días 17 y 29 de octubre de 2018, el colapso de los glaciares causó un flujo de escombros y bloqueó el río Yarlung Zambu en el valle de Sedongpu, en el sureste del Tercer Polo. El hecho de que tanto los glaciares continentales (Aru) como los marítimos (Sedongpu) hayan experimentado colapsos parece sugerir que los glaciares de la meseta tibetana podrían encontrarse en un estado inestable.

Implicaciones importantes

Más de la mitad de la población mundial vive en las cuencas hidrográficas de los grandes ríos, cuyas fuentes en las montañas provienen de los glaciares y el deshielo (Kaltenborn y otros, 2010). Los cambios en la criosfera del Tercer Polo afectan a la hidrología regional, al ecosistema y a los seres humanos que habitan en la totalidad de cada cuenca hidrográfica. Por ejemplo, debido a la disminución de la contribución de la escorrentía de los glaciares, los caudales de los ríos serán más sensibles a las variaciones de la precipitación, lo que conducirá a procesos hidrológicos más aleatorios. A la larga, el agua de deshielo glacial disminuiría en el flujo de los ríos si los glaciares de montaña continúan perdiendo masa o desaparecen.

En la región del gran Himalaya, hasta el 45 % del caudal total de los ríos proviene de la fusión de la nieve

estacional y del deshielo (Instituto de Recursos Mundiales, 2003; Kehrwal y otros, 2008). Las áreas aguas abajo del alto Himalaya tienen demandas crecientes de agua debido al rápido crecimiento demográfico y económico. Los cambios en la escorrentía glacial (con probable disminución en el futuro) reducirían la disponibilidad de agua de riego, disminuirían la productividad agrícola y amenazarían la seguridad alimentaria en la región. Debido a la escasez en el suministro de agua, la seguridad alimentaria del 4,5 % de la población en las cuencas de los ríos Brahmaputra, Indo, Yangtsé y Ganges se verá amenazada por la reducción de la escorrentía glacial (Immerzeel y otros, 2010).

Resulta evidente que los cambios en la criosfera del Tercer Polo tendrán implicaciones muy amplias. Hay una necesidad urgente de:

- vigilar los cambios en la criosfera del Tercer Polo y comprender sus impactos en los recursos hídricos y
- desarrollar una estrategia de adaptación, no solo a nivel regional o nacional, sino a escala de cuenca que involucre a todos los países ribereños, especialmente en la región del Tercer Polo, a fin de tener en cuenta y equilibrar la demanda de agua de todas las partes de las grandes cuencas hidrográficas.

*** Las referencias están disponibles en la versión en línea.**