Impactos del cambio climático en grandes cuencas montañosas: simulación hidrológica y estrategias de adaptación en la cuenca del Mar de Aral (Asia Central)

Sergio Contreras López, Johannes Hunink FutureWater Spain, S.L., Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena – ESPAÑA; <u>www.futurewater.es</u>

Arthur Lutz, Peter Droogers, Walter Immerzeel
FutureWater Netherlands, Costerweg 1V, 6702 AA Wageningen – THE
NETHERLANDS; www.futurewater.nl



Material docente preparado para el curso de verano "Cambio climático e hidrología: desde la ciencia a la práctica en gestión hídrica y manejo del suelo" organizado por la Universidad Politécnica de Cartagena e impartido del 10 al 12 de julio de 2013.



I INTRODUCCIÓN

Recientes investigaciones sugieren entender el agua de descarga de los ríos de alta montaña como un recurso no renovable. Esta visión se hace especialmente necesaria cuando en las grandes cadenas montañosas existen extensas superficies cubiertas de glaciares y masas de hielo (cordillera de los Andes, Himalaya, o de Pamir y Tien Shan en Asia Central). En las últimas décadas los ríos que nacen en aquellas regiones vienen experimentando un aumento de sus caudales que están favoreciendo la implantación y el crecimiento de los oasis de riego en los piedemontes y valles colindantes. Pero hay evidencias empíricas de que el aumento gradual de los caudales en estos ríos son la consecuencia directa de la fusión de las masas de hielo y glaciares presentes en los sistemas cordilleranos (Immerzeel et al., 2010; Kaser et al., 2010; Masiokas et al., 2013; Unger-Shayesteh et al., 2013) lo que sugiere que estos sistemas presenten una hidrología en fase de transición hacia un escenario de reducción de los caudales en el medio/largo plazo. Reconocer está realidad es fundamental para evaluar la vulnerabilidad de las "sociedades hidráulicas" y los ecosistemas naturales dependientes de los recursos hídricos de montaña y para articular, en consecuencia, planes de ordenación del territorio sostenibles en el largo plazo (Masiokas et al., 2013)

En este capítulo se resume parte de los resultados derivados de un conjunto de proyectos realizados por la empresa FutureWater encaminados a esclarecer los impactos que el cambio climático tendrán en la hidrología de las regiones de alta montaña de Asia Central y de cómo los recursos disponibles procedentes de estas regiones afectarían a los patrones de demanda de agua y la sostenibilidad de los oasis de riego de los piedemontes y llanuras colindantes (Immerzeel et al., 2012; Lutz et al., 2012). El área de estudio está delimitado por las cuencas de los ríos Amu Darya y Syr Darya ambos con cuencas vertientes al casi extinto Mar de Aral (Figura 1). En esta parte del mundo, el recurso nival, glaciares y pequeños casquetes de hielo juegan un papel crucial en la disponibilidad de agua dulce. Las

previsiones pronostican que el retroceso de los glaciares y la reducción de las precipitaciones nivales observada en la región en las últimas decenas de años se acelerará durante el siglo XXI (Sorg et al., 2012). Las consecuencias a futuro serán una reducción de la disponibilidad de agua, la pérdida del potencial de energía hidroeléctrica y cambios en la dinámica estacional de los caudales de los ríos.

A los cambios de los regímenes de precipitación proyectados para la región, ha de unírsele escenarios de aumento de temperaturas que acrecentarán la demanda de agua de los oasis de riego y las restricciones hídricas. En la actualidad los consumos de agua por el sector doméstico e industrial son testimoniales en relación con la agricultura que consume alrededor del 97% del total de los recursos hídricos de la cuenca: 93.800 Mm³/año para abastecer más de 1 Mha de cultivos. Los cambios en la hidrología local tendrán igualmente importantes efectos en el funcionamiento y la estabilidad de los ecosistemas dependientes de las descargas de aquellos ríos y acuíferos anexos.



FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDIO EN EL CENTRO DE ASIA (ANTIGUAS REPÚBLICAS DE LA UNIÓN SOVIÉTICA) CON LAS CUENCAS VERTIENTES DE LOS RÍOS AMU DARYA Y SYR DARY. AMBOS RIOS DESEMBOCAN EN EL MAR DE ARAL CUYA EXTENSIÓN SE HA VISTO DRÁSTICAMENTE REDUCIDA EN EL ÚLTIMO 60 AÑOS EN LO QUE SE CONSIDERA UNA DE LAS MAYORES CATÁSTROFES MEDIOAMBIENTALES DE LA HISTORIA RECIENTE.

II APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Se adoptaron dos dominios de modelización para investigar el impacto del cambio climático sobre la hidrología de la región. El primer dominio de estudio corresponde a las secciones de cabecera de los ríos Amu Darya y Syr Darya donde la influencia humana sobre la hidrología local es despreciable (Figura 2). El segundo estaría integrado por los piedemontes y valles "regados" por estos ríos y en donde la influencia humana en términos de regulación hídrica o desarrollo agrícola es más prominente (Figura 2). Ambos dominios fueron demarcados para las diferentes subcuencas de la región considerando la ubicación de las principales unidades de demanda de agua en los piedemontes y valles. Dentro de cada subcuenca, el límite entre dominios está marcado por la ubicación de los diques y las presas de regulación de cabecera a partir de las cuales se derivan las redes de distribución de agua de riego para cada unidad de demanda.

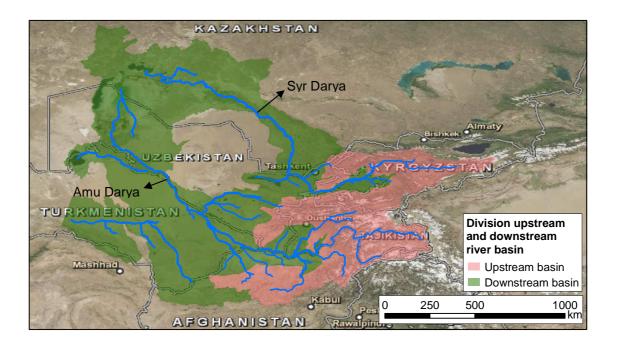


FIGURA 2. DIFERENTES DOMINIOS DE SIMULACIÓN DELIMITANDO LAS ZONAS DE CABECERA, SIN INFLUENCIA HUMANA (ROJO) Y DE VALLE, CON INFLUENCIA HUMANA (VERDE).

Para la modelización del dominio de cabecera se aplicó un modelo criosféricohidrológico espacialmente distribuido de resolución temporal diaria y espacial de 1 km (Immerzeel et al., 2012). El modelo fue codificado en PCRaster¹, un lenguaje abierto de programación y simulación espacio-temporal desarrollado por la Universidad de Utrecht. Tras un proceso de calibración y validación previa para un periodo de referencia (2001-2010), el modelo fue aplicado en el área de estudio para simular la generación y redistribución lateral de escorrentía superficial a partir de las entradas de precipitación, sólidas y líquidas, y la dinámica de fusión de las masas nivales y glaciares. La simulación abarcó el periodo temporal 2010-2050 en base a diferentes 5 escenarios climáticos (2010-2050). Los valores de descarga en las secciones de cauce ubicadas al final del primer dominio fueron finalmente considerados como las entradas de agua al segundo dominio de simulación.

En el segundo dominio de simulación, aquél en el que se evaluaron las afecciones del cambio climático sobre la sostenibilidad de los agrosistemas, se aplicó un modelo de evaluación de oferta-demanda de agua y de asignación de recursos según usos siguiendo la arquitectura conexión-nodo de la herramienta de simulación WEAP21² (Yates et al., 2005) (Figura 3). La codificación de WEAP21 se realizó para las condiciones de estudio y con el objetivo de simular para cada unidad de demanda el balance de agua resultante de los flujos de entrada de agua desde redes de riego, las necesidades hídricas de los cultivos, las pérdidas de agua por escorrentía e infiltración profunda, y las variaciones de almacenamiento de las infraestructuras hidráulicas. En este domino, WEAP fue aplicado para prever los patrones de uso de agua resultantes en la cuenca bajo diferentes escenarios de cambio climático y diferentes estrategias de gestión del agua y de adaptación a los recursos hídricos disponibles. En la figura 4 se resumen conceptualmente la metodología empleada.

http://pcraster.geo.uu.nl/

² http://www.weap21.org/

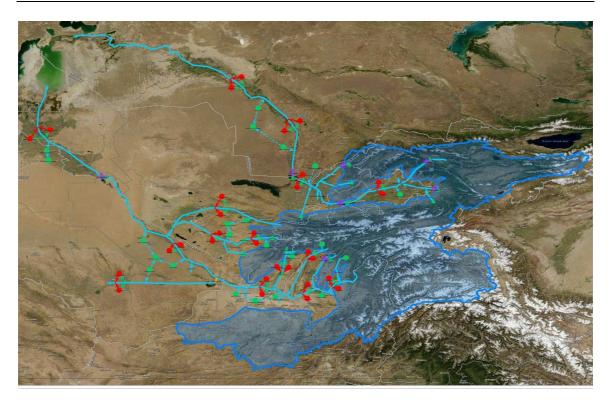


FIGURA 3. DIAGRAMA TOPOLÓGICO DE NODOS Y CONEXIONES ENTRE UNIDADES DE DEMANDA DE AGUA EN EL DOMINIO DE SIMULACIÓN BAJO INFLUENCIA HUMANA. EN SOMBREADO AZUL SE DELIMITA EL DOMINIO DE SIMULACIÓN EN CABECERA.

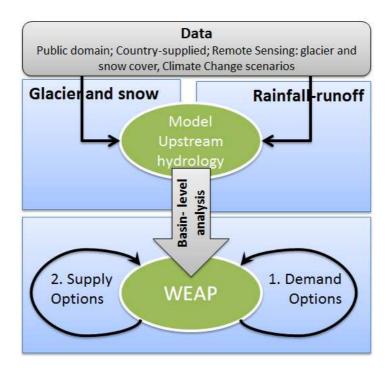


FIGURA 4: ESQUEMA CONCEPTUAL MOSTRANDO LA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y LOS PROCESOS SIMULADOS EN CADA DOMINIO.

ANÁLISIS DE CAUDALES EN EL PERIODO DE REFERENCIA (2001-2010)

La ejecución, calibración y validación del modelo criosférico-hidrológico en el domino de cabecera permitió cuantificar para la actualidad la importancia relativa de los diferentes componentes de la descarga total en la región. Estos valores se definen la línea de base de referencia sobre la que poder evaluar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la región. El modelo espacialmente distribuido diferencia cuatro componentes de flujo que contribuyen a la descarga total de agua observada en la red fluvial:

- 1. Escorrentía directa. Es la que se genera a partir de la precipitación líquida que cae sobre la cuenca y que fluye directamente hacia los cauces. Es una escorrentía de origen pluvial de carácter "rápido" ("quick overland flow").
- 2. Escorrentía de base. Es la componente de la descarga que procede del aporte de agua de los acuíferos. Es la escorrentía "subterránea" caracterizada por un régimen de flujo más o menos lento dependiendo de la naturaleza de los acuíferos.
- 3. Escorrentía nival. Es la componente de la descarga total procedente de la fusión de la nieve. Esta componente puede integrarse en la descarga total de forma directa o "rápida", o percolar hacia los acuíferos y liberarse como descarga subterránea o escorrentía de base.
- 4. Escorrentía de deshielo. Es la componente procedente del deshielo de los glaciares y de las masas de hielo presentes en las zonas de mayor altitud. Al igual que la escorrentía nival, puede constituirse como escorrentía directa o de base.

Conocer la contribución relativa de cada componente al volumen total es muy importante para evaluar el régimen de oferta de agua, su variación estacional y los instrumentos de control y regulación de caudal más apropiados. En general la componente de escorrentía directa está condicionada por la existencia de eventos de lluvias muy intensos o por periodos de precipitación muy prolongados en el

tiempo, dando lugar a inundaciones. Sin embargo el riesgo de inundaciones puede verse disminuido con la adopción de medidas que reduzcan la degradación de tierras y favorezcan la recarga subterránea en las cabeceras, lo que implicaría un incremento en la contribución relativa de la escorrentía de base. El agua precipitada en forma de nieve también tiene un carácter laminador ya que su fusión no se inicia hasta la primavera-verano coincidiendo con el periodo de mayores demandas de agua para la agricultura de los piedemontes y valles. La cinética de fusión de los glaciares es aún más lenta contribuyendo a la descarga total de forma lenta mientras existan reservas de hielo.

Los resultados evidencian diferencias importantes en el régimen fluvial en las cuencas de cabecera de ambos ríos. En el Syr Darya la contribución de la escorrentía directa y la procedente de la fusión de nieve representa alrededor del 66% del total de las descargas en cabecera, mientras que en el Amu Darya la contribución del deshielo es con diferencia la componente principal llegando a representar casi el 40% de la descarga total (Tabla 1, Figura 5). Estas cifras sugieren diferentes grados de vulnerabilidad de estas cuencas y sus agroecosistemas al cambio climático.

TABLA 2. LA CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS CUATRO COMPONENTES DEL FLUJO TOTAL, AGUAS ARRIBA DEL SYR DARYA Y AMU DARYA PARA EL PERÍODO DE REFERENCIA ('LINEA DE REFERENCIA DE BASE') 2001-2010.

	Syr Darya	Amu Darya
Escorrentía directa	31%	16%
Escorrentía de base	23%	19%
Escorrentía nival	35%	27%
Escorrentía de deshielo	11%	38%

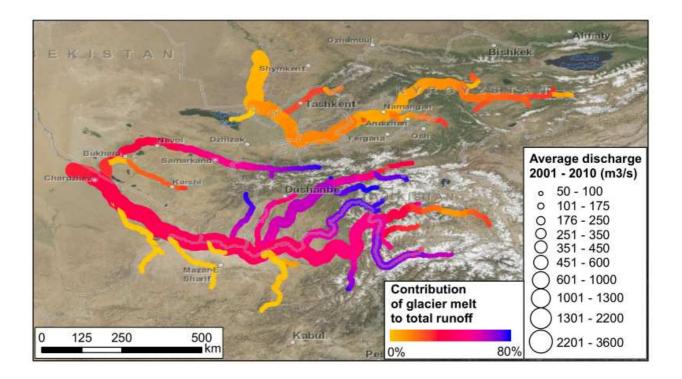


FIGURA 5. CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LA ESCORRENTÍA DE DESHIELO SOBRE LA DESCARGA TOTAL DE LAS CUENCAS DE CABECERA DE LOS RÍOS AMU DARYA Y SYR DARYA.

IV ANÁLISIS DE CAUDALES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (2010-2050)

Nuestras simulaciones sugieren una reducción de los caudales en las cuencas de estudio y también cambios en la contribución relativa de cada una de las componentes de escorrentía en la descarga total. La magnitud de las tasas de reducción en la descarga total es variable dependiendo del escenario climático elegido y de las características particulares de cada cuenca. En promedio, la descarga total se reducirá un 22-28% en el Syr Darya, y un 26-35% en el Amu Darya, donde las masas de hielo presentan una mayor distribución. Las simulaciones sugieren que las reducciones de caudal serán especialmente intensas al final del periodo estival y principios del otoño, entre agosto y octubre, con una disminución de los recursos del 45% en ambas cuencas. En el Syr Darya, la escorrentía de deshielo se hará prácticamente nula a partir del 2030, mientras que en el Amu Darya las reservas de hielo seguirán contribuyendo hasta el 2050 (Figura 6 Y 7).

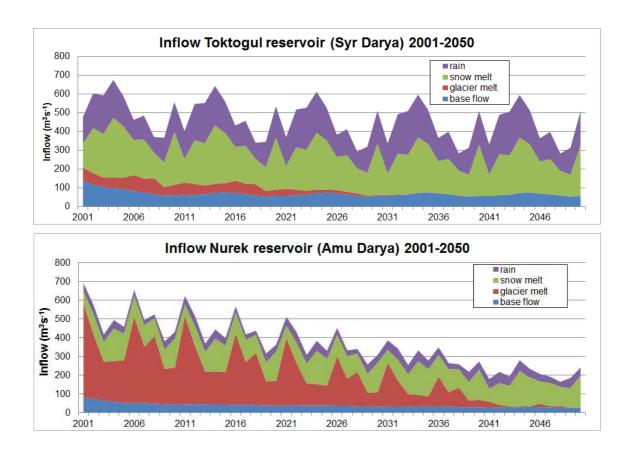
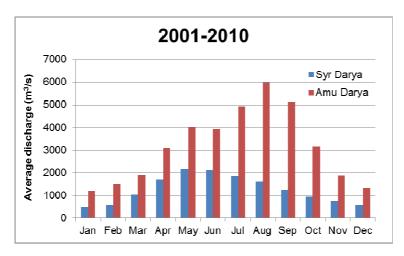


FIGURA 6. EVOLUCIÓN OBSERVADA Y SIMULADA DE LA DESCARGA TOTAL Y DE LAS PRINCIPALES COMPONENTES DE ESCORRENTÍA (DIRECTA -RAIN-, DE BASE, NIVAL Y DE DESHIELO) EN DOS ESTACIONES DE AFORO UBICADAS EN LAS DOS CUENCAS DE ESTUDIO AL FINAL DEL DOMINIO DE CABECERA. LOS MODELOS PRONOSTICAN QUE EN 1950 ALREDEDOR DEL 50% DE LA EXTENSIÓN DE LOS GLACIARES SE HABRÁ PERDIDO QUEDANDO LA SUPERFICIE GLACIAR REMANENTE POR ENCIMA DE LA ISOTERMA DE 0 ° C.



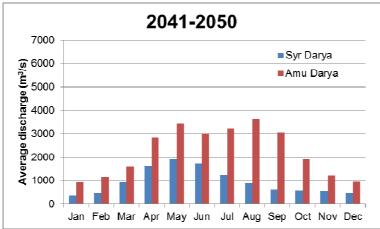
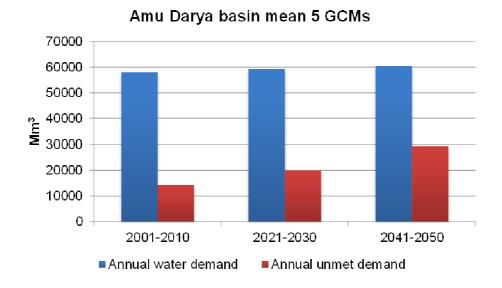


FIGURA 7. DINÁMICA ESTACIONAL DE LA DESCARGA TOTAL PROMEDIO OBSERVADA EN EL PERIODO DE REFERENCIA 2001-2010 Y SIMULADA PARA EL PERIODO 2041-2050.

Aguas abajo del dominio de cabecera, en los valles y oasis de riego, las proyecciones de demanda de agua por la agricultura se estiman en un aumento del 3-5% para el 2050 (Figura 7). El efecto combinado de una mayor demanda y una menor disponibilidad hídrica intensificará los periodos de escasez de agua en ambas cuencas. Para el Syr Darya se proyecta que la demanda agrícola no satisfecha aumentará hasta los 13.700 Mm³/año para el año 2050, lo que representaría aproximadamente el 35% de la demanda total. Para la misma fecha, en el Amu Darya la demanda no satisfecha aumentaría hasta 29.400 Mm³/año, alrededor del 50% de la demanda total.



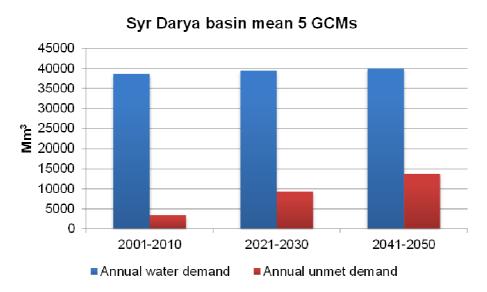


FIGURA 7. DEMANDA AGRÍCOLA ACTUAL Y FUTURA, Y ESTIMACIONES DE DEMANDA NO SATISFECHA O 'ESCASEZ HÍDRICA' (DATOS EN MM³/AÑO). LAS ESTIMACIONES FUTURAS SE HAN CALCULADO COMO EL PROMEDIO DE LOS VALORES OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DE 5 ESCENARIOS CLIMÁTICOS.

∨ ESCENARIOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE GESTIÓN

La consideración de qué estrategias de gestión adoptar para hacer frente a los impactos del cambio climáticos dependerá de las particularidades ambientales y socioeconómicas del área de estudio, así como de la escala política que se

considere en la toma de decisiones. En el caso que nos concierne, se exploraron tres tipos de acciones: (i) las que se centran en la gestión de la oferta mediante la ampliación de los volúmenes de agua utilizables, (ii) las que se centran en la optimización del uso y el aumento de la productividad del agua, y (iii) las que persiguen la reducción de la demanda de agua. La matriz de opciones va desde la construcción de embalses para un mayor almacenamiento y regulación de los recursos, la mejora de las prácticas agrícolas, el aumento de la reutilización del agua en la agricultura de regadío y el uso doméstico, la reducción de la superficie regada, la reducción de la demanda interna, y la adopción de estrategias de riego deficitario.

La demanda agrícola total no satisfecha para las dos cuencas de estudio asciende a 43.000 Mm³/año para el año 2050 considerando los cambios en la demanda potencial de los cultivos y la reducción de las entradas de agua al sistema (Figuras 6 y 7). Para suplir la demanda no satisfecha se hizo un análisis coste beneficio de las diferentes estrategias y se pudo obtener la curva marginal del coste-efectivo para toda la cuenca en la que se ordena el impacto económico de cada instrumento de gestión en la reducción de la demanda no satisfecha. Esta curva solamente muestra los costes económicos marginales asociados a la ejecución directa de cada instrumento de gestión, y no los costes indirectos requeridos para incentivar su implantación efectiva. A pesar de sus limitaciones, la obtención de esta curva es útil como guía para establecer prioridades en la toma de decisiones (Fig. 6).

Para la cuenca de estudio, las medidas de adaptación más efectivas por su balance coste-beneficio serían aquellas centradas en la mejora de las prácticas agrícolas, la adopción de estrategias de riego deficitario, el aumento de la reutilización del agua en la agricultura y, por último la reducción de las zonas de regadío. En general, las medidas aplicadas sobre el sector agricultura son mucho más efectivas en la reducción de la escasez hídrica que aquellas que inciden sobre el sector doméstico. La adopción de las medidas mencionadas anteriormente supondría un coste directo de alrededor de 1.730 M\$/año en el 2050 (valor actual neto). Aproximadamente 550 M\$/año (~1/3 del coste total) podrían achacarse a los efectos del cambio climático.

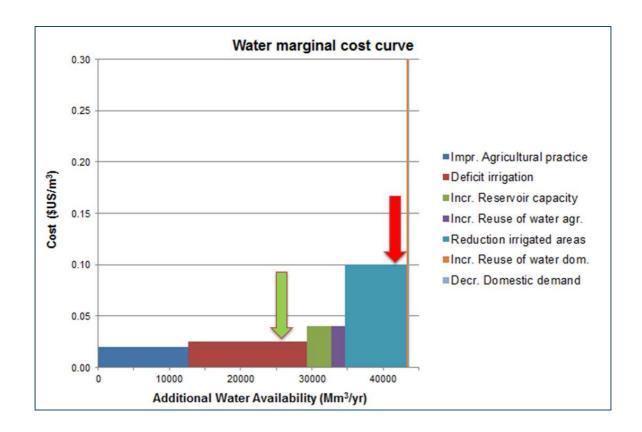


FIGURA 8. CURVA DE COSTE MARGINAL DE LA REDUCCIÓN DEL DÉFICIT HÍDRICO EN LAS CUENCAS AMU DARYA Y SYR DARYA. LA FLECHA ROJA INDICA LA DEMANDA TOTAL NO SATISFECHA PROYECTADA PARA 2050 2050; LA FLECHA VERDE INDICA LA DEMANDA NO SATISFECHA EN 2050 SIN LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO. EL EJE DE ORDENADAS HA SIDO CORTADO EN 0.30. LOS COSTES UNITARIOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA URBANA SE ESTIMAN EN 2,00 \$/m3.

VI **BIBLIOGRAFIA**

Immerzeel, W. W., Van Beek, L. P. H. y Bierkens, M. F. P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, *328*: 1382–1385.

Immerzeel, W.W., Lutz, A. F. y Droogers, P. 2012. Climate change impacts on the upstream water resources of the Amu Darya and Syr Darya river basins. FutureWater Report no 107.

Kaser, G., Grosshauser, M. y Marzeion, B. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 20223–20227.

- Lutz, A. F., Droogers, P. y Immerzeel, W.W. 2012. Climate change impact and adaptation on the water resources in the Amu Darya and Syr Dary river basins. FurtureWater Report no 110.
- Masiokas, F., Villalba, R., Luckman, B. H., Montaña, E., Betman, E., Christie, C., Le Quesne, C. y Mauget, S. 2013. Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in Central-Western Argentina. En R. A. Pilke (Ed). *Climate vulnerability: Understanding and addressing threats to essential resources*, Vol. 5 (5-14): 213-227. Elsevier Inc., Adademic Press.
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O. y Beniston, M. 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 1–7, doi:10.1038/NCLIMATE1592.
- Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A., y Merz, B. 2013. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. Global and Planetary Change, http://dx.doi.org/10.1016/j.glopacha.2013.02.004
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A. 2005. WEAP21 A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. Water International, 30: 487-500.