

Vulnerabilidad hídrica del Golfo de Bizkaia: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro

Hydric vulnerability of the Gulf of Biscay: from the trends of the recent past to those of the future

Ane Zabaleta¹, Maite Meaurio^{1,2}, Tomás Morales¹, Laura Damas¹ e Iñaki Antigüedad¹

¹Grupo de Procesos Hidro-Ambientales, Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48940 Leioa, Bizkaia.
ane.zabaleta@ehu.eus, maite.meaurio@ehu.eus, tomas.morales@ehu.eus, laura.damas@ehu.eus, ñaki.antigüedad@ehu.eus

²Departamento de Química Aplicada, Facultad de Química, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 20018 Donostia-San Sebastián, Gipuzkoa.

ABSTRACT

In order to adapt to the effects of climate change on water systems, it is necessary to know the hydrological dynamics of the territory, so we ask ourselves two questions: where do we come from?, where are we going? In order to answer the first question, we have considered the historical discharge series from 117 gauging stations in the Gulf of Biscay. The results indicate that in the last 60 years there has been an evident downward trend in average discharge and an increase in the duration and severity of the low flow period during all seasons of the year. This reflects a notable spatial-temporal homogeneity in the evolution of flows. However, in the last 20 years, while Autumn and Summer maintain a downward trend for average discharge, during Winter and Spring they increased. This reflects a period of changes in the hydrological regime of this region. In order to respond to the latter question, future hydrological regimes have been simulated in two sub-basins. The results indicate that average discharge will decrease progressively until 2100 and that the duration and severity of low flow periods will increase. Autumn will be the most affected season (-18-33%) and Winter the least (-4-14%).

Key-words: hydrological trend, low flows, duration, severity, average discharge (Q_m).

RESUMEN

Para adaptarnos a los efectos del cambio climático en los sistemas hídricos hay que conocer la dinámica hidrológica del territorio, por lo que nos planteamos dos preguntas: ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde vamos? Para responder a la primera se han considerado las series históricas de caudal de 117 estaciones del Golfo de Bizkaia. Los resultados indican que en los últimos 60 años se ha dado una evidente tendencia descendente en los caudales en todas las épocas del año y un aumento de la duración y severidad del periodo de aguas bajas. Esto refleja una notable homogeneidad espacio-temporal en la evolución de los caudales. En los últimos 20 años ha habido un cambio de escenario, mientras otoño y verano mantienen una tendencia descendente, la de invierno y primavera son ascendentes. Esto refleja una heterogeneidad temporal de evolución de los caudales, que indica un periodo de cambios en el régimen hidrológico. Para responder a la segunda se han simulado regímenes hidrológicos futuros en dos subcuencas. Los resultados indican que el caudal descenderá progresivamente hasta 2100, así como un aumento en la duración y severidad de los periodos de caudales bajos. Otoño será la estación más afectada (18 - 33%) e invierno la menos (-4 - 14%).

Palabras clave: tendencia hidrológica, duración, severidad, caudales bajos, caudales medios (Q_m).

Geogaceta, 66 (2019), 55-58
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de febrero de 2019
Revisión: 25 de abril de 2019
Aceptación: 24 de mayo de 2019

Introducción

Los escenarios climáticos, para distintos horizontes temporales a lo largo del siglo XXI, que se derivan de los Modelos de Circulación General (GCM-*General Circulation Models*) son bastante variables de un modelo a otro (p. ej., IPCC, 2013), pero es mucho mayor la variabilidad cuando nos referimos a los "escenarios hidrológicos", es decir, los regímenes hídricos esperables en los ríos (considerando no sólo caudales medios, de interés en la gestión de recursos -em-

balses, por ejemplo-, sino también bajos -condicionantes básicos del buen estado ecológico de las masas de agua- y altos -ligados a riesgo de avenidas-), ya que a la propia incertidumbre de los modelos climáticos hay que añadirle la de los modelos hidrológicos utilizados en la "simulación/predicción" (p. ej., Gosling *et al.*, 2011, Teng *et al.*, 2012).

Resulta necesario que esa simulación se realice desde una visión cuenca del río, más allá de la visión cauce. Y en la visión cuenca, juega un papel esencial el uso de los suelos (ocupación del territorio).

Con esta perspectiva, el objetivo del trabajo realizado ha sido ir dando respuesta a dos preguntas de enfoque temporal: ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde parece que vamos?, claves para el conocimiento en el que deben sustentarse las medidas de adaptación. Así, se pretende aportar conocimiento sobre las tendencias pasadas de las series de caudal observadas, a una escala regional, del Golfo de Bizkaia, y sobre las tendencias futuras de cuencas de referencia de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV).

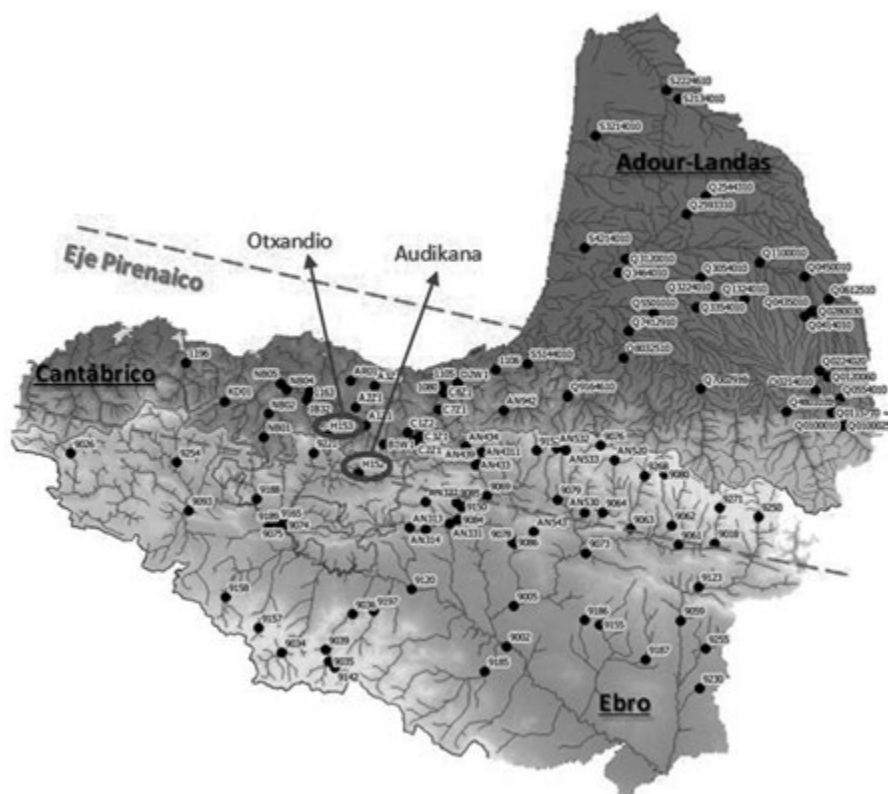


Fig. 1.- Ubicación y código de las estaciones analizadas. Zonación espacial general utilizada en este estudio: cuencas hidrográficas de Adour-Landás, Cantábrico y Ebro. Adicionalmente se ha considerado el eje pirenaico (zona cantábrica y Pirineos). Ver figura en color en la web.

Fig 1. Location and code of the analysed stations. General spatial zonation used in this study: hydrographic catchments of Adour-Landás, Cantabrian and Ebro. Additionally, the pyrenean axis (Cantabrian zone and Pyrenees) has been considered. See color figure in the web.

Tendencias Pasadas ¿De dónde venimos?

Metodología

Se ha seleccionado un área de estudio con 117 estaciones de aforo con datos de caudal diarios (Fig. 1) controladas por, la Diputación Foral de Gipuzkoa (GFA), la de Bizkaia (BFA), la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), la del Ebro (CHE), el Gobierno de Navarra (GN), Iberdrola, el Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia (CAB) y Eau France (DREAL Aquitaine). En este estudio el interés se ha centrado en los caudales medios y en los bajos.

Los caudales se han analizado en 3 periodos de tiempo: 20 años (desde el año hidrológico 1995-1996 hasta el 2014-2015; datos de 117 estaciones), 40 años (1975-1976 / 2014-2015; 43 estaciones), 60 años (1955-1956 / 2014-2015; 18 estaciones).

Teniendo en cuenta la importancia de los caudales bajos, se han extraído de las series de datos de caudal, además de los

valores medios (Q_m), la duración de los caudales bajos (número de días con caudal inferior al percentil 0,2 de la totalidad de la serie; Hisdal *et al.*, 2001; Wilson *et al.*, 2010) y su severidad (volumen por debajo del percentil 0,2 en el periodo de tiempo considerado; Smakhtin, 2001; Ouarda *et al.*, 2008). Así, se han generado las series de caudales medios, y duración y severidad de los bajos a diferentes pasos de tiempo: diaria, mensual, estacional y anual. Después, con el objetivo de detectar cuáles son las épocas del año más sensibles, por estaciones (la serie de invierno, primavera, verano y otoño), e incluso mes a mes (serie de enero, de febrero, etc.), todas estas series se han calculado para todos los periodos de tiempo considerados en el paso anterior. Para cada una de las 117 series de caudales seleccionadas se han generado 232 tipos de series, un total de 27144 series.

Una vez generadas las series, y tras eliminar el efecto de la autocorrelación (Yue *et al.*, 2002), se ha procedido al análisis de las posibles tendencias mediante el test Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975).

Del test de tendencias se ha extraído el signo y la significancia de la misma, la cual siguiendo los criterios del IPCC (IPCC, 2013) se ha expresado como probabilidad de ocurrencia. Se han considerado tendencia aquellas con una probabilidad mayor del 66%.

Resultados

Para el periodo de 20 años (1995-2015) las tendencias significativas generalizadas en las series de caudales (Q_m) se limitan a otoño (octubre), con tendencia descendente por todo el territorio, y a invierno (febrero y marzo), con tendencia ascendente en todo el territorio, y sobre todo en el eje pirenaico (Fig. 1 y Tabla I). En primavera no hay tendencias generalizadas, aunque las que hay son ascendentes, como una cierta prolongación del invierno. En verano se observan estaciones con tendencia clara en todas las zonas, pero de signo contrario, y más estaciones aún sin tendencia. La tendencia anual está condicionada por la de invierno, sobre todo, y la de primavera. Para los caudales bajos (Q_{20}) lo más destacable es la disminución de su duración y severidad en invierno y primavera, y su ascenso en otoño.

Hay que tener en cuenta que 20 años es un periodo muy corto para poder deducir tendencias significativas, más aún teniendo en cuenta la posible variedad de intervenciones locales sobre los recursos (extracciones, gestión de embalses, etc.).

En el periodo de 40 años (1975-2015) se evidencia una tendencia negativa clara, de disminución de los caudales, a lo largo del territorio, en primavera y verano, sobre todo en la zona de Adour-Landás y en el eje pirenaico (Fig. 1 y Tabla I). Esta tendencia también aparece, aunque no de forma tan espacialmente evidente, en otoño (sobre todo en el Ebro) e invierno (sobre todo en Adour-Landás). La tendencia anual está condicionada por la de primavera, sobre todo, y la de verano. La duración y severidad (Q_{20}) presentan tendencias de todo tipo, aunque con una cierta preponderancia de las ascendentes, y sin una estacionalidad clara a lo largo del año, siendo algo más evidente en primavera.

Para el periodo de 60 años (1955-2015) se observa una muy clara tendencia a la disminución de los caudales medios (Q_m) a escala anual, y en todas las estaciones del año en el Ebro, y en primavera y ve-

rano en las otras dos zonas, siendo estas últimas las estaciones que condicionan la tendencia anual en cada zona. La duración y severidad (Q20) muestran la tendencia contraria a la observada en los Qm, lo cual es lógico, si bien es más evidente en Adour-Landas y eje pirenaico en otoño, primavera y verano, e igual de evidente en Ebro en todas las estaciones.

Tendencias Futuras ¿Hacia dónde parece que vamos?

Metodología

El estudio de tendencias futuras se centra en dos sub-cuencas de cabecera de dos embalses de la cuenca del Zadorra, concretamente las de Otxandio y Audikana (Fig. 1), de una extensión aproximada de 36 y 82 km², respectivamente.

Para realizar la simulación de las proyecciones hidrológicas se ha utilizado el código numérico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*; Arnold *et al.*, 1998). A partir del modelo digital de elevaciones (LIDAR; www.geo.euskadi.eus) y el punto de salida elegido por el usuario, ArcSWAT delimita la cuenca y genera la red de drenaje. Posteriormente, crea el mapa de pendientes, y superponiéndolo con los mapas de usos del suelo (Unión Europea CORINE; 1:100.000, año 2012) y el edafológico (elaborado a través de la metodología de la erosión hídrica laminar; Gobierno Vasco, 2005) se crean las unidades espaciales con una respuesta hidrológica homogénea (Unidad de Respuesta Hidrológica; HRU).

Una vez realizada la discretización espacial, se han introducido los datos climáticos históricos (precipitación y temperatura máxima y mínima a escala diaria) en el código SWAT y se ha procedido a su calibración (1987-1994) y validación (2005-2015) mediante la comparación de los caudales diarios simulados y los valores reales medidos en las estaciones de aforo de Otxandio y Audikana. En ambos casos se han obtenido resultados satisfactorios (Moriassi *et al.*, 2015). Con el modelo calibrado y validado se procedió a realizar cambios, concretamente, a introducir nuevos datos meteorológicos (proyecciones climáticas). Es interesante mencionar que aunque no sea el objeto de este estudio, SWAT también permite realizar cambios en los usos del suelo, algo fundamental de cara a futuros estudios de cambio global.

Así, con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático en los caudales de estas dos cuencas se ha simulado la hidrología con SWAT para 16* proyecciones climáticas proporcionadas por AEMET; 5 GCM (ACCESS1-0, BNU-ESM, MPI-ESM-RL, MPI-ESM-MR, CMCC-CESM), 2 Trayectorias de Concentración Representativa (RCP-Representative Concentration Pathway, de 8,5 y 4,5) y 2 métodos de *downscaling* análogos AEMET (AN) y el Método Estadístico de Reducción de Escala (SDSM). Las proyecciones se han realizado para tres horizontes temporales: 2011-2040 (2030), 2041-2070 (2060) y 2071-2100 (2090), y se han estudiado las tendencias que pueden existir en los caudales medios (Qm) y en la duración y la severidad de los caudales bajos.

Resultados

Los resultados muestran que el descenso del caudal medio va siendo mayor de forma progresiva del horizonte 2030 hasta el 2090, de forma generalizada y en todas las estaciones del año (Tabla I). En la sub-cuenca de Otxandio (de clima más atlántico y uso del suelo forestal), a finales de siglo, se espera que el caudal medio anual descienda entre 10 y 17 %. Otoño será la estación más afectada (Tabla I), mientras que los menores descensos se darán en invierno (Tabla I). A finales de siglo se espera que el caudal medio de verano descienda entre 20 y 27 %. Primavera (abril) es la estación en la que mayores caudales se registran, a lo largo del siglo XXI el caudal en esta estación también descenderá, pero según las proyecciones lo hará en menor medida que en otoño y verano (Tabla I). Los resultados de la sub-cuenca de Audikana (de clima más mediterráneo y uso eminentemente agrícola), aunque no son iguales a los de Otxandio (indican mayores descensos), muestran la misma tendencia de descenso del caudal a lo largo del siglo XXI. Para el horizonte 2090 se espera que el caudal anual pueda descender entre 11 y 26 %. Otoño es la estación que mayores descensos sufriría (entre 20 y 33 %), mientras que en primavera, el caudal podrá descender entre 10 y 25 %. En verano e invierno, los caudales proyectados para finales de siglo son bastante similares, en ambos casos los descensos son de entre 4 y 14 %.

¿De dónde venimos?	años		Zona	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	ANUAL
	60	(1955-2015)	Ebro,	negativa	negativa	negativa	negativa	negativa
40	(1975-2015)	Cantabrico,	negativa	?	negativa	negativa	negativa	
20	(1995-2015)	Eje Pirenaico	negativa	positiva	<i>positiva</i>	negativa	positiva	
¿Hacia dónde parece que vamos?	30	(2011.2040)	Otxandio	negativa	<i>negativa</i> <i>positiva</i>	<i>negativa</i> <i>positiva</i>	negativa	negativa
			Audikana			negativa	negativa <i>positiva</i>	
	60	(2041.2079)	Otxandio	negativa	<i>negativa</i>	<i>negativa</i>	negativa	negativa
			Audikana					
	90	(2071-2100)	Otxandio	negativa	negativa	negativa	negativa	negativa
			Audikana					

Tabla I.- Tendencias estacionales y anuales derivadas del estudio de los caudales medios (Qm). En **negrita** las tendencias que resultan muy claras en todo el territorio (pasado) o para todas las proyecciones climáticas (futuro) y en *cursiva*, aquellas en las que las tendencias no son tan claras o existe alguna zona o proyección climáticas con resultados contrarios.

Table I. Seasonal and annual trends derived from the study of mean flows (Qm). In **bold** the tendencies that are very clear in all the territory (past) or for all the climatic projections (future) and in *italics*, those in which the trends are not so clear or there is some area or climatic projection with opposite results.

* ACCESS1-0_AN_R45, ACCESS1-0_AN_R85, BNU-ESM_AN_R45, BNU-ESM_AN_R85, BNU-ESM_SDSM_R45, BNU-ESM_SDSM_R85, CMCC-CESM_AN_R85, CMCC-CESM_SDSM_R85, MPI-ESM-RL_AN_R45, MPI-ESM-RL_AN_R85, MPI-ESM-RL_SDSM_R45, MPI-ESM-RL_SDSM_R85, MPI-ESM-MR_AN_R45, MPI-ESM-MR_AN_R85, MPI-ESM-MR_SDSM_R45, MPI-ESM-MR_SDSM_R85 (R hace referencia al RCP).

Así, el análisis de tendencias muestra una alta probabilidad de descenso de los caudales medios (Q_m) y aumento de la duración y la severidad de los caudales bajos (Q_{20}) a escala anual, sobre todo para las proyecciones climáticas obtenidas bajo el RCP 8,5. A escala estacional, estas mismas tendencias son muy claras en primavera para ambos RCPs y en verano y en otoño para el RCP 8,5. Invierno es la estación del año que muestra una mayor incertidumbre en las tendencias observadas. Las mayores diferencias entre cuencas se dan en otoño para el RCP 4,5, donde la cuenca de Otxandio, más forestada, muestra una mayor incertidumbre en las tendencias.

De los resultados obtenidos a partir de los cinco GCM analizados, se puede decir que, a pesar de la excepción de algunas proyecciones, el caudal descenderá en todas las épocas del año y por consiguiente también lo hará a escala anual (Tabla I).

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido dar respuesta a dos preguntas claves para el conocimiento en el que deben sustentarse las medidas de Adaptación en el Golfo de Bizkaia: ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde parece que vamos?

En respuesta a la primera de las preguntas, ¿de dónde venimos?, en los últimos 60 años (1955/1956 a 2014/2015) se observa una homogeneidad espacial y temporal en el comportamiento de los caudales, habiéndose dado una evidente tendencia descendente de los caudales medios y un aumento de la duración y severidad de los bajos. La tendencia anual está condicionada, sobre todo, por las de primavera y verano.

Sin embargo, para los últimos 20 años (1995/1996 a 2014/2015) se observa una heterogeneidad temporal. Se constata una tendencia al aumento de los caudales medios en invierno y primavera, a la vez que disminuyen los caudales medios y aumentan la duración y severidad de los bajos en verano y otoño, algo que también observaron Zabaleta y Antigüedad (2012). Ésto conlleva un reparto más desigual de caudales a lo largo del año.

Los resultados obtenidos son coherentes, con estudios a escala Europea (Meaurio *et al.*, 2017). Por lo tanto, se puede pensar que estamos ante el impacto hidrológico de cambios a nivel regional; cambios en el clima (aumentados o reducidos por otro tipo de cambios -en los usos del suelo, gestión de infraestructuras, etc.- a escala de cuenca).

Para responder a la segunda de las preguntas, ¿hacia dónde parece que vamos?, se ha realizado una modelización hidrológica a futuro en dos sub-cuencas de cabecera de los embalses de la Cuenca del Zadorra: Otxandio y Audikana. Los resultados obtenidos, a partir de 16 proyecciones climáticas, están sujetos a numerosas incertidumbres que, es necesario considerar al analizarlos.

Se deduce que el caudal medio descenderá progresivamente a lo largo del siglo XXI, en todas las estaciones y a escala anual. Esta tendencia es más evidente en Audikana (de clima más mediterráneo) que en Otxandio. En ambas, la estación que presenta la mayor disminución de caudal es otoño, y la menor, invierno. Esta tendencia a la baja también se detecta en la región atlántica de Francia y la Península Ibérica (Meaurio *et al.*, 2017). Además, también es muy probable el futuro aumento de la duración y severidad de los caudales bajos a escala anual y en primavera, y en verano y otoño para el RCP 8,5.

Tanto en las series de caudal históricas más largas (60 años; entre 1955-1956 y 2014-2015), como en las series de caudal simuladas a partir de las proyecciones climáticas (2011-2100), resulta clara la tendencia a la disminución de los caudales medios y al aumento de la duración del periodo de aguas bajas, tanto a escala estacional como a escala anual.

La tendencia positiva observada en los caudales, a nivel regional, en invierno y primavera en los últimos 20 años (1995-2015) tiene cierta continuación, en las cuencas de Otxandio y Audikana, en el periodo 2011-2040. Lo cual debe considerarse en la gestión a corto-medio plazo. Este hecho podría ser indicativo de tendencias a corto plazo que pueden ser contrarias a las tendencias a medio-largo plazo.

El comportamiento a escala anual está más condicionado por las tendencias de invierno y primavera que son las estaciones que presentan mayor incertidumbre en los escenarios futuros. Esto refuerza la importancia de abordar los estudios de impactos hidrológicos del cambio climático a escalas más finas (estacional, mensual).

Agradecimientos

Agradecemos a IHOBE la financiación para poder realizar este proyecto (convocatoria KLIMATEK 2016) y a los organismos que nos han cedido los datos de caudal. También nos gustaría agradecer las aportaciones de la Dra. Ane Miren Epelde.

Referencias

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. y Williams, J.R. (1998). *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34 (1), 73–89.
- Gobierno Vasco (2005). *Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma de Euzkadi*. Informe realizado por IDER Ingeniería y Desarrollo Rural, S.A. para el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección de Biodiversidad y Participación Ambiental del Gobierno Vasco.
- Gosling, S.N., Taylor, R.G., Arnell, N.W. y Todd, M.C. (2011). *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 279-294.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. y Demuth, S. (2001). *International Journal of Climatology* 21, 317–333.
- IPCC (2013). En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (T.F. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, 1535 pp.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation measures*. Charles Griffin, London, UK. 260 pp.
- Mann, H.B. (1945). *The Econometric Society* 13, 245–259.
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Boithias, L., Epelde, A.M., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M., Srinivasan, R. y Antigüedad, I. (2017). *Journal of Hydrology* 548, 46-62.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N. y Dappupati, P. (2015). *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 56(8), 1763-1785.
- Ouarda, T.B.M.J., Charron, C. y St-Hilaire, A. (2008). *Water Resources and Industry – Journal* 33 (2), 195-206.
- Smakhtin, V.Y. (2001). *Journal of Hydrology* 240, 147-186.
- Teng, J., Vaze, J., Chiew, F.H.S., Wang, B. y Perraud, J.M. (2012). *Journal of Hydrometeorology* 13 (1), 122–139.
- Unión Europea CORINE, 1:100.000 (2012). (visitado 23/4/2019). <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>
- Wilson, D., Hisdal, D. y Lawrence, D. (2010). *Journal of Hydrology* 394, 344-346.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. y Cavadias, G. (2002). *Hydrological Processes* 16, 1807-1829.
- Zabaleta, A. y Antigüedad, I. (2012). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(1), 211-223.