

Evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en el río Chubut. Red Ecofluvial de la Patagonia.

Laura Brandizi, Silvia Flaherty, Ana Liberoff, Natalia Pessacg, Martín García Azorey y Miguel Pascual

CENPAT-CONICET/TNC (The Nature Conservancy)

E-mail: laurabrandizi@gmail.com

RESUMEN: El río Chubut es el recurso hídrico más importante de la Provincia; su caudal depende principalmente de las precipitaciones que recibe en sus nacientes y atraviesa la meseta patagónica hasta su desembocadura en el Océano Atlántico.

Los beneficios que proporcionan los ecosistemas a los seres humanos se definen como servicios ecosistémicos. El aumento en el uso consuntivo de la tierra y el agua ha resultado en el deterioro de la salud de los ecosistemas de agua dulce y de los servicios que estos proveen al ser humano, como por ejemplo la calidad del agua y el transporte de nutrientes. Esto hace necesario el uso de nuevas herramientas para apoyar los sistemas de decisión en el manejo de los recursos naturales, estableciendo métodos que relacionen procesos hidrológicos, químicos y biológicos a la escala en la cual se toman decisiones.

El modelo INVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) es una herramienta para guiar el manejo de los sistemas naturales con el fin de satisfacer las necesidades humanas y a su vez preservar la salud e integridad de los mismos. Se compone de un conjunto de modelos que utilizan datos en formato ráster de topografía, uso del suelo, cobertura vegetal, precipitación y evapotranspiración para estimar niveles de valoración de servicios ecosistémicos. Es necesario calibrar en primera instancia el módulo de producción de agua anual dado que es el forzante principal de los módulos restantes.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la aplicación del modelo INVEST para analizar la producción de agua anual del Río Chubut, en el marco de la Red de Conservación de Ecosistemas Fluviales Patagónicos (CONICET – The Nature Conservancy). Los resultados obtenidos de producción de agua anual se compararon con caudales anuales de estaciones hidrométricas disponibles obteniendo un coeficiente de correlación igual a 0.96 ($p < 0.01$).

INTRODUCCIÓN

La Patagonia Argentina es naturalmente rica en recursos hídricos continentales y contiene algunos de los glaciares continentales más grandes del mundo. Desde una perspectiva global y a la escala regional, la disponibilidad de agua podría no ser considerada un problema en sí misma Oki y Kanae (2006), sin embargo, un análisis más detallado de la temática del agua revela un escenario bastante más complejo, ya que el crecimiento poblacional, el desarrollo urbano y la agricultura están transformando las cuencas fluviales. Particularmente en Patagonia, existen proyectos avanzados para embalsar los últimos grandes ríos libres de represas en la región, las actividades mineras en las cabeceras de cuenca crecen sostenidamente polarizando las visiones referidas al rumbo del desarrollo en la región y muchos ríos y lagos ya no son capaces de sustentar las famosas pesquerías del pasado. El agua dulce se está transformando en un recurso limitante para

distintos núcleos urbanos de la región, particularmente para aquellos ubicados en el árido litoral Atlántico. Se espera que el cambio climático agrave esta situación, ya que los escenarios para la mayor parte de la región contemplan clima más cálido y más seco, Red Ecofluvial (2012).

La falta de respuestas integrales a problemas relacionados al agua denota que la conexión entre ríos saludables y bienestar humano no ha sido desarrollada ni aplicada en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales. Las prácticas y actividades relacionadas al uso de las aguas continentales no han sido aun contempladas desde una visión integral; podría decirse entonces que la sociedad regional no está en general preparada para enfrentar los impactos del desarrollo y el cambio climático sobre el suministro de agua y sobre los recursos acuáticos, Pascual et al. (2009).

El desarrollo de enfoques basados en la provisión de servicios ecosistémicos definidos como los beneficios que proporcionan los ecosistemas a los seres humanos MA (2005), reforzado por la generación de nuevas herramientas basadas en el concepto del Capital Natural; Kareiva et al. (2011), provee una oportunidad para establecer una nueva perspectiva en el análisis de las cuestiones de las aguas continentales.

En este contexto el modelo INVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) es una herramienta que permite guiar el manejo de los sistemas naturales con el fin de satisfacer las necesidades humanas y a su vez preservar la salud e integridad de los mismos. INVEST fue desarrollado por el proyecto Capital Natural, Kareiva et al. (2011); Tallis y Polasky (2011) y se compone de un conjunto de módulos que utilizan el uso del suelo (LU) y la cobertura vegetal (LC) para estimar el nivel y valor económico de los servicios ecosistémicos.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la aplicación del modelo INVEST para analizar la producción de agua del río Chubut, en el marco de la Red de Conservación de Ecosistemas Fluviales Patagónicos (CONICET – The Nature Conservancy). La cuenca del Río Chubut es una de las cuencas piloto seleccionadas en el marco de la Red Ecofluvial, con el objetivo de promover una visión y concepción ecosistémica en el estudio y manejo de cuencas fluviales de Patagonia. La aplicación del módulo de producción de agua del modelo INVEST a esta cuenca es una primera etapa en la búsqueda de este objetivo general.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

La cuenca del río Chubut, con sus nacientes en la provincia de Río Negro, atraviesa la provincia de Chubut de oeste a este hasta desembocar en el Océano Atlántico. Abarca una superficie de 57.400km² Brunet et al. (2005) y está contenida entre los paralelos 41° 19' y 44° 21' Sur y los meridianos 65° 01' y 71° 24' Oeste, aproximadamente (Figura 1). El río Chubut es el recurso hídrico más importante de la

provincia; su caudal depende principalmente de las precipitaciones que recibe en sus nacientes. El río atraviesa la meseta patagónica sin recibir aportes de ningún tributario permanente. Sus crecientes son torrenciales e irregulares y se presentan fundamentalmente en otoño e invierno. El estiaje corresponde al verano.

En el extremo oriental de la provincia del Chubut, a 190km aguas arriba de la desembocadura en el Océano se encuentra la presa Florentino Ameghino, con capacidad de embalse de 2000 hm³. Se inauguró en el año 1963 con los siguientes objetivos principales: 1-Evitar las inundaciones ante crecientes del río, originadas por inviernos con copiosas nevadas en la Cordillera de los Andes y lluvias intensas aguas arriba de donde se ubicó el dique. 2-Almacenar en su embalse agua en invierno y primavera para poder abastecer durante el periodo estival a la red de canales para el riego de los cultivos en el Valle Inferior del río Chubut. 3-Proporcionar energía eléctrica al Sistema Interconectado Patagónico.

El dique permite también abastecer de agua a las poblaciones ubicadas aguas abajo del embalse para consumo humano e industrias, beneficiando a más de 18.000 ha.

La regulación del río modificó la distribución anual de caudales pasando de un típico régimen pluvio-nival con picos de crecidas en los meses de Junio y Septiembre, a otro muy uniforme. Los módulos son muy similares, con un valor aproximado de 40 m³/s. La presencia de la presa Florentino Ameghino redujo dramáticamente la intensidad de las crecidas, tal como había sido concebida. Sin embargo, luego de 40 años de regulación de las aguas del Río Chubut el curso experimentó un atrofiamiento de la sección modificando la relación entre caudales y niveles Kaless et al. (2008).

Características del modelo INVEST

El modelo INVEST se compone de un conjunto de modelos que utilizan los patrones espaciales de uso del suelo (LU) y de cobertura vegetal (LC) para estimar la valoración de los servicios que proveen los ecosistemas naturales.

El modelo se ejecuta en un mapa reticulado con un intervalo de tiempo anual; sus resultados se pueden obtener en términos biofísicos o en términos monetarios, en función de las necesidades y de la disponibilidad de información. INVEST incluye modelos para cuantificar, graficar y valorar espacialmente los beneficios proporcionados por los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos.

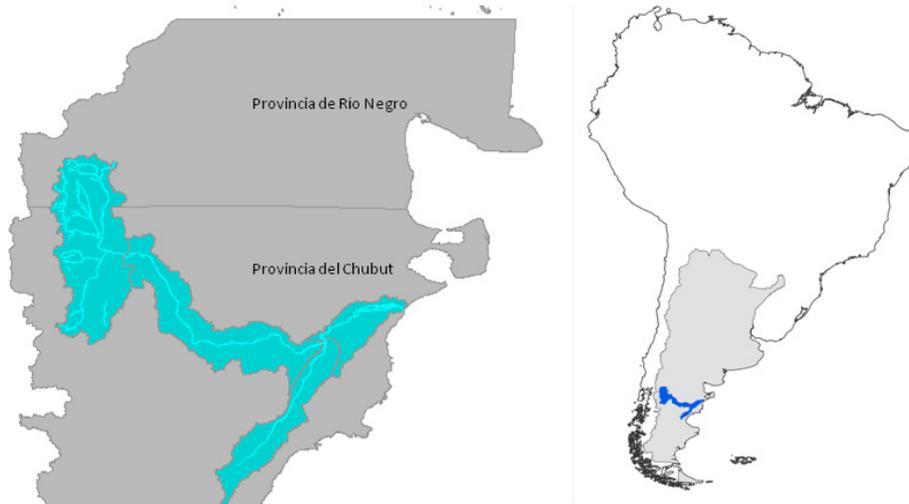


Figura 1. – Ubicación de la cuenca del río Chubut.

Este trabajo se centra en el servicio de producción de agua dulce. Este servicio aporta información sobre la cantidad total de agua disponible en una cuenca, teniendo en cuenta las entradas y salidas de agua dulce y de otros procesos como la evapotranspiración.

Es fundamental validar el módulo de agua dulce ya que el mismo se utiliza como base de otros módulos de INVEST que permiten analizar diferentes servicios ecosistémicos, como el transporte de sedimentos a lo largo de la cuenca a estudiar.

La producción de agua anual para cada celda se calcula como la cantidad de precipitación anual que se evapotranspira, determinada por las características de tipo de suelo y cobertura vegetal de cada celda. Para la estimación, se utilizan datos de precipitación media anual, evapotranspiración de referencia anual y un factor de corrección por el tipo de vegetación, la profundidad del suelo y el contenido de agua en el suelo disponible para las plantas. La producción de agua anual Y_{xj} para cada celda se calcula con la siguiente ecuación (1):

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{ATE_{xj}}{P_x}\right) P_x \quad (1)$$

En donde ATE_{xj} es la evapotranspiración real anual en cada celda “x” según el uso y el tipo de suelo “j” y P_x es la precipitación anual en la celda “x”.

Se utiliza la Curva de Budyko desarrollada por Zhang et al. (2001) para calcular la fracción de evapotranspiración en el balance de agua (ATE_{xj}/P_x) como se muestra en la ecuación (2):

$$\frac{ATE_{xj}}{P_x} = \frac{1 + W_{xj} R_{xj}}{1 + W_{xj} R_{xj} + \frac{P_x}{R_{xj}}} \quad (2)$$

R_{xy} es el índice de sequía de Budyko (1974). Valores mayores a 1 significan que la celda es potencialmente árida. Este índice adimensional se define según la ecuación (3):

$$R_{xy} = \frac{K_{xy} ETo_x}{P_x} \quad (3)$$

En donde ETo_x es la evapotranspiración de referencia para la celda “x” y k_{jx} es el coeficiente de evapotranspiración de las plantas asociado al uso y el tipo de suelo de la celda “x”. ETo_x representa la demanda climática y K_{xy} determina las características de la vegetación en cada celda “x” Allen et al. (1998).

El coeficiente w_x indica el agua disponible para las plantas. Este coeficiente adimensional representa la diferencia relativa en la forma en que las plantas utilizan el agua del suelo para la transpiración Zhang et al. (2001). Puede ser estimado según la ecuación (4):

$$w_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (4)$$

En donde el coeficiente Z es un factor de estacionalidad que representa la distribución de las precipitaciones a lo largo del año Zhang y McFarlane (1995); Zhang et al. (2001,2004); Milly (1994). Adopta valores entre 1 y 10; el coeficiente Z se acercará a 10 en áreas con precipitaciones de invierno, mientras que en regiones húmedas con las precipitaciones distribuidas durante todo el año o regiones con precipitaciones de verano se acercará a 1. AWC_x es el contenido de agua disponible para las plantas en milímetros para cada celda “x”.

Bases de datos

Para aplicar el módulo de Producción anual de agua de INVEST se requiere de cierta información básica. En la Figura 2 (a y b) se observa la distribución de precipitación y de evapotranspiración de referencia a lo largo de la cuenca promediada para el período 1998-2008, respectivamente. Se utilizaron los datos de precipitación de TRMM -NASA (Tropical Rainfall Measuring Mission) con resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (aproximadamente 25 km). Los datos de evapotranspiración potencial se obtuvieron de Global Data Base (<http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>) con la misma resolución que los datos de precipitación.

El modelo de elevación digital del terreno (DEM) se obtuvo de las imágenes disponibles en SRTM Project, SRTM (2004) con resolución de tres segundos de arco y proyección geográfica datum WGS84 (Sistema Geodésico Mundial).

El mapa de uso y cobertura del suelo, el contenido de agua disponible para las plantas y el mapa de profundidad del suelo se obtuvieron de la base de datos INTA (Instituto nacional de Tecnología Agropecuaria). En la Figura 3 se observa el mapa de usos y cobertura del suelo utilizado para ejecutar el modelo. El coeficiente de evapotranspiración de las plantas se obtuvo de la base de datos de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) FAO/UNESCO (2003).

La delimitación de la cuenca y sub-cuencas se procesó con sistemas de información geográfica y se verificó según la base de datos de la Secretaría de Recursos Hídricos de Argentina; Giraut et al. (2010).

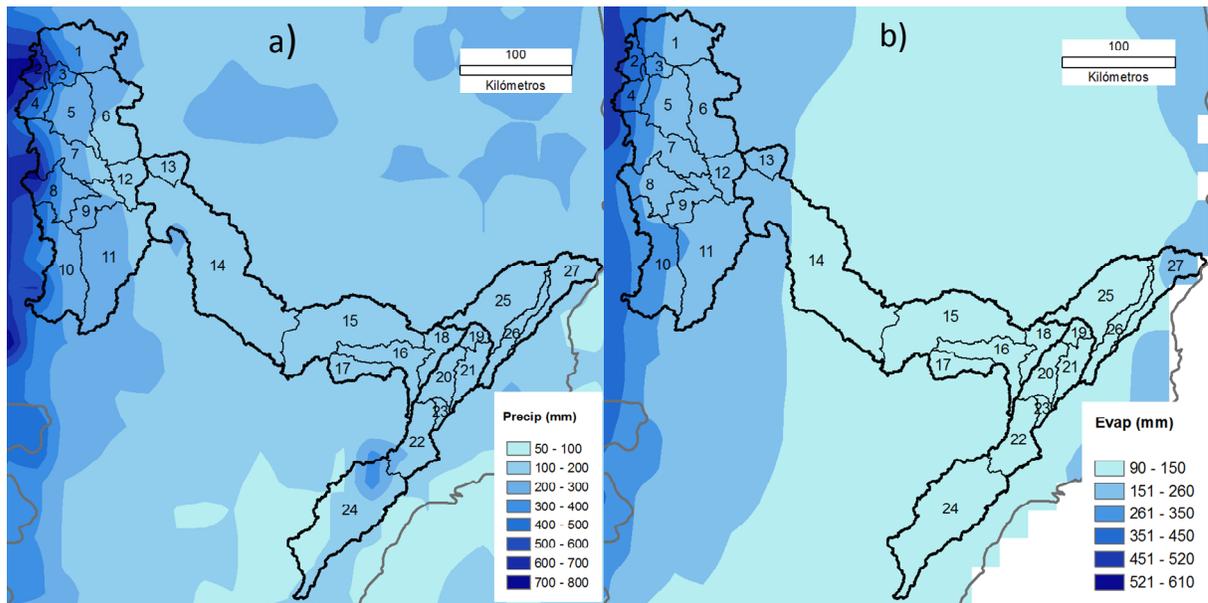


Figura 2. – Datos de precipitación y de evapotranspiración de referencia a lo largo de la cuenca promediada para el período 1998-2008.

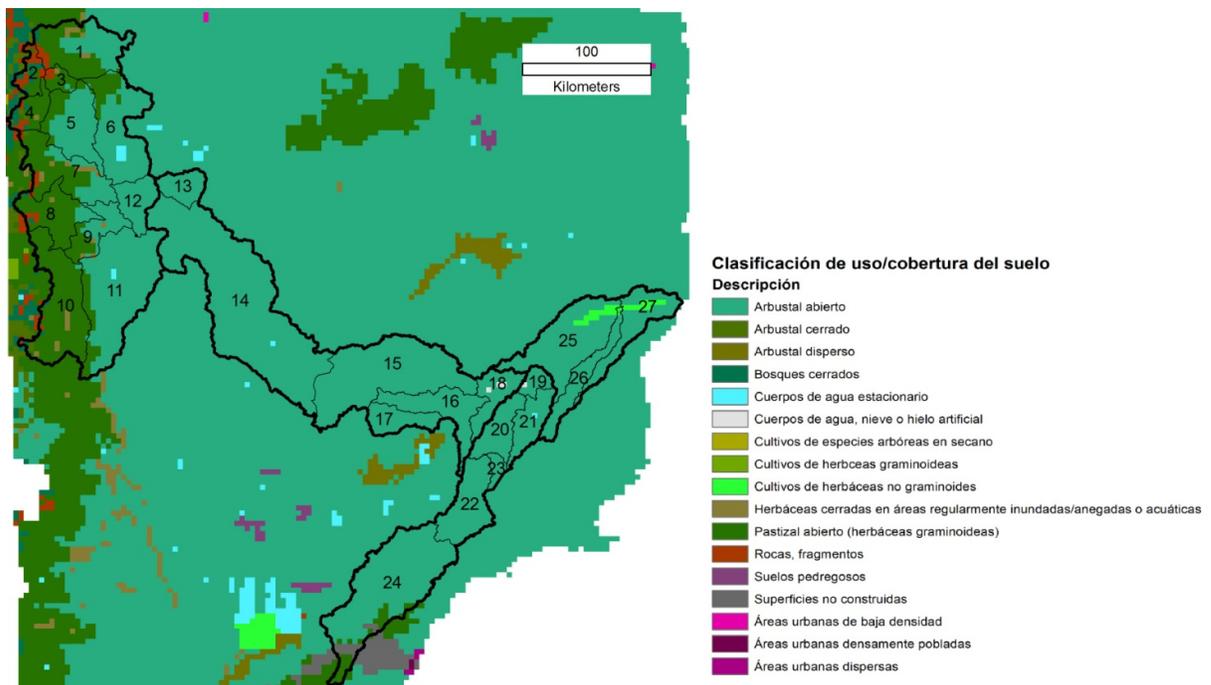


Figura 3. – Mapa de usos y coberturas del suelo para la cuenca del río Chubut.

RESULTADOS

La Figura 4 muestra la producción de agua anual por celda simulada con el modelo INVEST. Los resultados

indican que la producción de agua responde al gradiente de precipitación oeste-este con el que se forzó el modelo (Figura 2a).

En la Figura 5 se muestra la producción de agua anual por sub-cuenca enumeradas desde 1 a 27. Se observa mayor producción de agua en las sub-cuencas ubicadas al oeste, respondiendo al patrón de mayor precipitación en esa región de la cuenca.

Los resultados obtenidos tanto a nivel de celda como de sub-cuenca, demuestran que la precipitación es un forzante importante del módulo producción de agua. Por esta razón, se analizaron diferentes bases de datos, encontrando que existe una gran variación en las climatologías mostradas por los diferentes conjuntos de datos reticulados y satelitales. En este estudio se utilizó la base de datos TRMM –NASA que resultó ser la más coherente con los datos de precipitación observados en las estaciones meteorológicas disponibles en la cuenca.

Por otro lado, se realizaron diferentes ejercicios con el fin de analizar la sensibilidad del modelo a los diferentes datos de entrada (no mostrado). Estos ejercicios permitieron comprobar los resultados del modelo en función de la variación de las condiciones de la cuenca. Se obtuvo que la relación evapotranspiración / precipitación es muy variable a lo largo de la cuenca (de 0.03 a 0.65), lo que indica que en el caso del río Chubut la producción de agua no es solo sensible a la precipitación sino que los usos y cobertura del suelo son también forzantes importantes.

Con el objetivo de validar los resultados, se comparó el módulo anual del caudal de agua observado en ocho estaciones hidrométricas (Figura 4), con el rendimiento de agua anual, obtenido de sumar la producción de agua de las sub-cuencas aguas arriba de cada estación hidrométrica. Los resultados se muestran en la Fig. 6, indicando un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.96 con $p < 0.01$. El ajuste a la recta de regresión lineal es muy satisfactorio, esto indica que los resultados obtenidos a través del modelo de producción de agua resultan representativos de los caudales anuales observados en las estaciones hidrométricas.

Las estaciones que se encuentran más alejadas de la recta de regresión son Gualjaina (Río Gualjaina) y El Maitén. En el caso de Gualjaina se observa mayor producción de agua anual respecto al caudal anual observado. Este resultado puede estar asociado a diferentes factores, entre ellos, la presencia de zonas de descarga hacia acuíferos que el modelo INVEST no considera. En el caso de El Maitén, se observa mayor caudal anual que producción de agua, esto puede estar asociado a que la aproximación obtenida con el modelo aún no considera los usos del agua para consumo humano y/o riego.

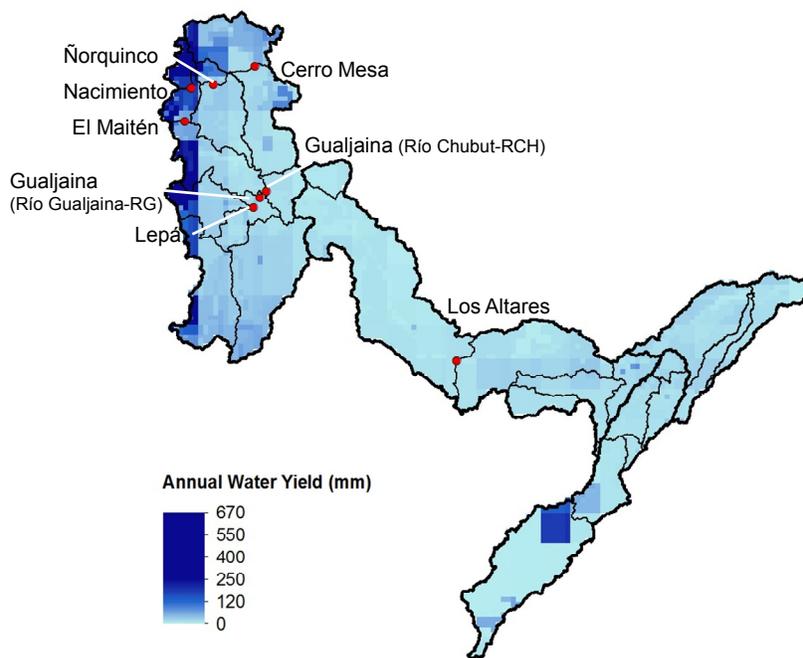


Figura 4. – Producción de agua anual a escala de celda.

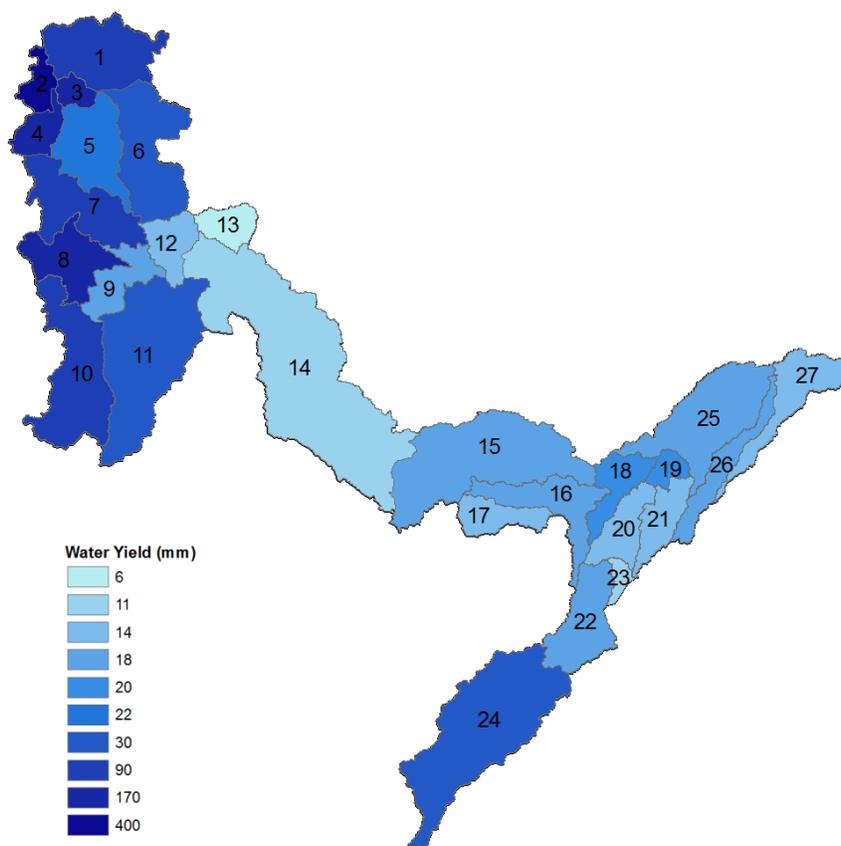


Figura 5. – Producción de agua anual a escala de sub-cuencas.

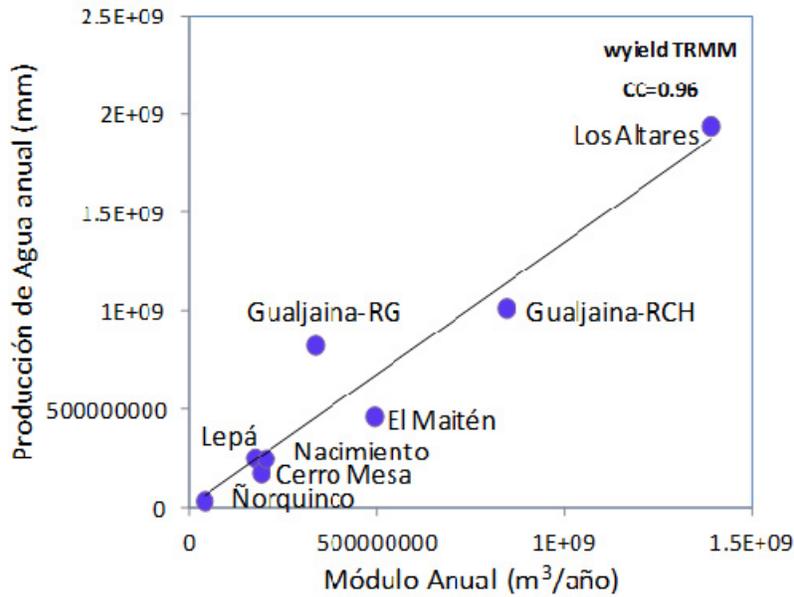


Figura 6. – Producción de agua anual modelada versus caudal anual observado en cada estación hidrométrica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó el módulo Producción de agua del modelo INVEST en la cuenca del río Chubut. Los resultados obtenidos son razonables y compatibles con los patrones geográficos esperados, demostrando que la precipitación es un forzante importante en el módulo analizado y que es conveniente ajustar con precisión los valores de evapotranspiración de referencia y de uso y cobertura del suelo, dado que la interacción entre estos factores y la precipitación podrían tener mucha importancia en algunas regiones específicas.

El hecho de que el modelo es sensible a los diferentes usos y coberturas del suelo, brinda la posibilidad de analizar diferentes escenarios de cambios de usos del suelo y comparar resultados.

Actualmente no se dispone de datos de evapotranspiración observados por lo que no es posible llevar a cabo una comparación entre la producción de agua observada respecto a la modelada, pero existe una buena correlación con los datos de caudales anuales para las estaciones hidrométricas ($CC=0.96$, $P<0.01$). Por esto, uno de los próximos objetivos de la Red Ecofluvial es desarrollar escenarios de posibles cambios en el servicio ecosistémico producción de agua anual debidos al cambio climático, utilizando predicciones futuras que consideren cambios en los patrones espaciales de precipitación y de temperatura a lo largo de la cuenca.

El transporte de sedimentos a lo largo del río Chubut es un tema importante de análisis, dado que tiene efectos aguas arriba y aguas abajo del Dique Florentino Ameghino. La producción de sedimentos como

servicio ecosistémico puede ser evaluada con INVEST a través del módulo retención de sedimentos. Tanto este módulo, como otros módulos de INVEST, utilizan como dato de entrada la producción de agua anual de la cuenca. Por esta razón, el objetivo de este trabajo ha sido validar este módulo en primera instancia para luego poder aplicar el resto de los módulos según el interés regional en cuanto al servicio ecosistémico que consideran.

En el caso de Patagonia, y probablemente para otras regiones del mundo, los datos climáticos y de usos y cobertura del suelo de bases de datos globales aún no proveen el nivel de detalle deseado para mejorar la resolución de este tipo de aplicaciones. Por este motivo, otro objetivo importante de la Red Ecofluvial, es generar y mejorar la resolución de las bases de datos locales para que puedan ser utilizadas en diferentes estudios aplicados a la conservación de los recursos naturales.

REFERENCIAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Irrigation and drainage, FAO, 56. Rome, Italy: FAO.
- Brunet, F., Gaiero, D., Probst, J.L., Depetris P.J., Gauthier Lafaye, F. and Stille, P., 2005. $\delta^{13}C$ tracing of dissolved inorganic carbon sources in Patagonian rivers (Argentina). *Hydrological Processes*, 19 (17): 3321-3344.
- Budyko, M.I., 1974. Climate and life. San Diego, California. *Academic*.
- FAO, 2003. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm>
- Giraut, M., Ludueña, S., Lupano, C. y Valladares, T.A., 2010. *Atlas digital de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina-Versión 2010*. Secretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina. (CD Rom).
- Kaloss G., Matamala F., Monteros B., Greco W., 2008. Cambios hidrológicos y morfológicos en el río Chubut aguas abajo de la presa Florentino Ameghino. *V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*. Tucumán, Argentina.
- Kareiva, P., Tallis H., Ricketts T., Daily G. and S. Polasky S., 2011. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services. *Oxford Biology*.
- MA., 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. *Synthesis*. Island Press, Washington DC.
- Milly P.C.D., 1994. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resour Res*. 3–7:2143–56.
- Oki, T. and Kanae S., 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science* 313:1068-1072.
- Pascual, M.A., Lancelotti, J., Ernst-Elizalde B., Ciancio J.E, Aedo-Marchant E. and M. García-Asorey., 2009. Scale, connectivity, and incentives in the introduction and management of non-native species: the case of exotic salmonids of Patagonia. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(10):533-540.
- Red Ecofluvial., 2012. *Resumen Ejecutivo*. CONICET-The Nature Conservancy.
- SRTM., 2004. "DEM data from International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)". Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Tallis, H. y Polasky, S., 2011. Assessing multiple ecosystem services: an integrated tool for the real world. In: Kareiva P, Tallis H, Ricketts TH, Daily GC, Polasky S, editors. Natural capital. Theory and practice of mapping ecosystem services New York, USA. *Oxford University Press*.
- Zhang G.J. and McFarlane N.A., 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the CCC GCM. *Atmos Ocean*.407–46.

- Zhang L., Dawes W.R. and Walker G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour Res.*37:701–8.
- Zhang L., Hickel K., Dawes W.R., Chiew F.H.S., Western A.W. and Briggs P.R., 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resour Res.* 40:W02502.<http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002710>