



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Indicadores ambientales multiescala de la forestación en Uruguay

Proyecto ANII Fondo Sectorial de Innovación Industrial
ANII-FSI I 2016 1-128679

Empresas Proponentes

UPM-FO, Montes del Plata, Forestal Atlántico Sur

Ejecutante: Universidad de la República

Facultad de Ingeniería, Facultad de Agronomía, CURE, CENUR-LN

Administrador

Fundación Julio Ricaldoni

Montevideo - Uruguay
Diciembre de 2021

EQUIPO TÉCNICO DEL PROYECTO

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Facultad de Ingeniería: Jimena Alonso, Luis Silveira, Agustín Menta, Luciana Badano, Federico Vilaseca, Virginia García, Manuel Gimenez, Santiago Ford y Javier Gregorio.

Facultad de Agronomía: Mario Pérez Bidegain, Leticia Martínez, Maximiliano González, Luis Bentancor, Carolina Munka, José Gándara, Alvaro Montaña y Rodrigo Arthus.

Centro Universitario Regional Este: Franco Teixeira de Mello, Mariana Meerhoff, Maite Burwood, Giancarlo Tesitore, Margenny Barrios, Claudia Fosalba, Lucia Urtado, Bárbara Suárez, Martín Pacheco, Lucia Cabrera, Clementina Calvo y Natalie Villegas.

Centro Universitario Regional Litoral Norte: Pablo Gamazo.

EMPRESAS PROPONENTES

UPM - Forestal Oriental: Ricardo Methol, Alejandro González, Isabel Pereira, Clara Morales

Montes del Plata: Sebastián Ferrer, María Noel Fadel, Claudio da Silva y Ana Inés Gómez.

Forestal Atlántico Sur: Nelson Ledesma, Santiago Capote.

ADMINISTRADORA

Fundación Julio Ricaldoni: Lucía Zuasti, Marcelo Morante, Andrea Solari.

Agradecimientos

Al personal de las empresas UPM, Montes del Plata y Forestal Atlántico Sur por su apoyo y colaboración durante todo el proyecto. Al laboratorio Marine and Environmental Science Centre (MARE), Coimbra, Portugal, y a la Dra. Verónica Ferreira por su ayuda en el análisis de biomasa fúngica y en la tasa de esporulación de hongos hifomicetos. A Lucia Ziegler por su ayuda en el laboratorio de energética del CURE por el análisis de contenido calórico de las especies utilizadas en el análisis de descomposición de materia orgánica. Al Prof. Willem Vervoort de la University of Sydney por sus recomendaciones y aportes a la discusión. A Forestal Otegui de Lavalleja por el acceso a los predios con plantaciones forestales. A Luis, Martín y Teresa por el acceso a predios privados en el departamento de Rocha.

RESUMEN EJECUTIVO

En Uruguay el crecimiento de la superficie de suelo dedicada al uso forestal alcanzó en el año 2021 las 1.087.109 há efectivas. Este sostenido cambio de uso del suelo mantiene vigente la misión de la línea de investigación en Hidrología Forestal de la Universidad de la República: crear conocimiento nacional en relación a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas, suelo y organismos acuáticos.

Los estudios específicos de este proyecto tuvieron como objetivo generar una herramienta simple de predicción de los efectos de la actividad forestal sobre la cantidad y la calidad de las aguas, aplicable en la escala espacial de interés para la generación de políticas en relación a los recursos hídricos. Propiciando además una buena gestión ambiental que atienda las demandas regulatorias para el establecimiento de nuevas plantaciones y a los estándares requeridos por las certificaciones internacionales de manejo forestal sustentable. El principal desafío planteado en este proyecto fue trasladar la simulación del comportamiento observado en cuencas forestadas de pequeña escala (menor a 1 km²) a escalas mayores (mayor a 1 000 km²). Esto implicó el abordaje multiescalar combinando monitoreo y modelación en cuencas asociadas a esas dos escalas espaciales. Para lograr esto, en primer lugar se mantuvo el programa de monitoreo en microcuencas que se encuentra operativo desde 2006, por entender fundamental la generación de datos nacionales con suficiente longitud para contemplar la variabilidad climática del Uruguay. En segundo lugar, se incorporó una selección de cuencas de mayor escala cuyo monitoreo depende de las redes oficiales nacionales. Las cuencas estudiadas se clasifican entonces en 10 grandes cuencas que van desde 774 a 7 855 km², 6 pequeñas cuencas experimentales (0.11 a 2.3 km²), en las cuales se completó el abordaje de análisis de información hidrológica y modelación. El área objeto de estudio, se completa con un grupo de 30 cuencas de escala pequeña a media (menor a 30 km²) en las que se realizó el monitoreo de calidad de agua y bioindicadores asociados al ecosistema acuático.

Indicadores Hidrológicos

Los indicadores son útiles fundamentalmente para realizar comparaciones en una misma cuenca, como para efectuar comparaciones entre cuencas. Ambas aproximaciones se abordaron en este trabajo, generando indicadores que permiten un análisis comparativo entre pares de microcuencas experimentales y entre períodos temporales para el caso de las macrocuencas estudiadas. Los principales resultados obtenidos reflejan los efectos que surgen del análisis comparativo entre la cobertura vegetal de plantaciones forestales respecto a pasturas naturales, tanto a nivel de parcelas y microcuencas experimentales como en las macrocuencas más forestadas del país:

Indicadores hidrológicos en microcuencas

Los indicadores derivados del balance hídrico en los dos pares de microcuencas del litoral oeste (DTf-LCp y NEf-NEp), así como en el par situado en la zona norte (EVp-EVf), permiten concluir lo siguiente:

- **Intercepción.** Indicador de la cantidad de agua que retiene la cubierta forestal y retorna a la atmósfera por evaporación. En promedio las plantaciones interceptan entre 13-28 % de la precipitación incidente variando de acuerdo a la especie, edad y densidad de plantación. El monitoreo de largo plazo muestra una tendencia creciente de la intercepción con la edad en la etapa más joven de la plantación (4-10 años), luego de la cual se observa un decrecimiento (13-16 años).

También se observaron diferencias en relación a la especie para un rango de edad comparable entre *E.maidenni* (895 á/ha) y *E.Grandis* (1080 á/ha) con valores medios de intercepción de 28 y 20 % respectivamente.

- **Reducción del caudal específico.** Indicador que relaciona la reducción del caudal específico con la precipitación acumulada. Para el par DTf-LCp se observa una tendencia decreciente del indicador al aumentar la precipitación, variando en términos anuales entre 11 y 46 % de la precipitación. El par NEf-NEp muestra que la reducción del caudal específico anual varía entre -1 y 31 % de la precipitación. Resultados preliminares del par EVf-EVp muestran reducciones del caudal específico anual entre -6 y 28 % de la precipitación para los primeros 5 años de crecimiento de la plantación.
- **Aumento de la evapotranspiración real.** Muestra la diferencia entre la evapotranspiración real en las microcuencas de uso contrastante, expresada como porcentaje de la precipitación. Este indicador toma valores similares a los observados para la reducción del caudal específico, las mayores diferencias pueden verse para DTf-LCp en períodos de déficit hídrico ($P_i < 500\text{mm}$) donde las diferencias aumentan por el déficit de humedad en los suelos a valores entre 31 y 71 % de la precipitación semestral.
- **Curvas de permanencia de caudal.** Muestran el porcentaje de tiempo durante el cual se iguala o supera un caudal específico. El análisis en los tres pares de microcuencas muestra caudales diarios promedio menores en la microcuenca forestada para todos los períodos, al igual que los caudales máximos (Q_{10}). Mientras que los caudales mínimos (Q_{90}) presentaron valores menores en DTf respecto a LCp, pero mayores en las microcuencas forestadas de los otros dos pares (NEf y EVf) en relación a las de pastura. Esto parece indicar una tendencia a que en las microcuencas más pequeñas (12-60 ha), la reducción de los caudales está dada por la reducción de los caudales altos y medios, mientras que los caudales asociados al flujo base permanecen sin ser afectados.
- **Recarga.** Indicador que mide la fracción de la precipitación incidente que recarga en forma difusa al acuífero libre próximo a la superficie del terreno. Esta estimación se realizó en los pares de microcuencas experimentales del litoral oeste mediante tres metodologías diferentes. Para DTf y LCp se estima una reducción de la recarga entre la pastura y la forestada de entre 6 y 15 % de la precipitación. Con la información aportada por la construcción y monitoreo de nuevos piezómetros, se verificó el ingreso de un aporte regional subterráneo en ambas microcuencas. Por otro lado entre NEf y NEp las diferencias son menores y alcanzan el 5 %.

Indicadores hidrológicos en macrocuencas

Para las macrocuencas la estimación de indicadores implica la división de las series temporales de datos observados (precipitación y caudal) en dos períodos: preforestación y posforestación. Se evaluaron las 10 macrocuencas (similar a nivel 2) que presentan mayor superficie forestada con plantaciones.

Únicamente para las 4 cuencas más forestadas del país ubicadas en el Río Tacuarembó y A^o Tres Cruces, se observa una diferencia significativa en la relación precipitación-escurrentía entre períodos, que indica que a igual nivel de precipitación ocurrida se genera menor escurrentía en el período posforestación. Además en ellas se identifica que el quiebre en la tendencia de las series de caudal, se ubica temporalmente cercano al umbral del 15 % de forestación en la cuenca.

La reducción de la escurrentía entre el período pre y pos forestación para cada cuenca se caracteriza según los indicadores de la curva de permanencia de caudal: caudal promedio, Q_{90} , Q_{50} y Q_{10} . Para

esas 4 cuencas se observa una reducción entre períodos de todos estos indicadores, siendo para el caudal promedio de entre 21 y 31 %, lo que corresponde a una disminución del caudal anual de entre 35 y 107 mm por cada 10 % de aumento de la superficie forestada.

Se observa que en este análisis no se contemplaron las posibles extracciones de agua en las cuencas que podrían corresponder a tomas y embalses los cuales de existir estarían afectando principalmente el rango de caudales bajos. Además se destaca que en las estimaciones de éste análisis se superponen los efectos del cambio de uso del suelo que implica la forestación, con los efectos de la variabilidad climática ya que se analizan dos períodos temporales diferentes con sus consiguientes diferencias climáticas.

Indicadores de calidad de agua y biológicos en microcuencas

Este trabajo evaluó los efectos de la forestación de *Eucalyptus* sobre los ecosistemas fluviales en Uruguay. Para ello se analizaron los posibles cambios en la calidad del agua, las comunidades de macroinvertebrados y peces, y en la descomposición de la materia orgánica. En invierno y verano de 2019, se muestrearon 30 microcuencas a lo largo de Uruguay abarcando un amplio gradiente de cobertura forestal.

En agua se evaluaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, conductividad específica, temperatura, pH y nutrientes (N, P). En el caso de la comunidad de macroinvertebrados, se analizaron las proporciones de (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera) EPT/Chironomidae, familias sensibles y tolerantes, Oligochaeta, Zygoptera, y grupos tróficos. En el caso de peces, se analizó la biomasa y densidad, así como la proporción de los diferentes órdenes y grupos tróficos.

Para evaluar los posibles efectos de la forestación sobre los indicadores, se utilizaron modelos lineales generalizados. Para el análisis de la descomposición de la materia orgánica (MO), se seleccionaron 3 arroyos asociados microcuencas forestadas y 3 arroyos asociados a microcuencas sin forestación. En dichos arroyos se analizaron las comunidades colonizadoras (hongos y macroinvertebrados) y la tasa de descomposición de 3 sustratos (*Schoenoplectus californicus*, *Eryngium pandanifolium* y *Eucalyptus globulus*) en un experimento in situ de 56 días de duración.

La concentración de nutrientes, temperatura, conductividad y sólidos disueltos en aguas, así como la proporción de familias tolerantes, Oligochaeta, filtradores, colectores, depredadores y fragmentadores, mostraron un incremento con el incremento de la cobertura forestal. Por el contrario, se observó una reducción de la concentración de oxígeno disuelto, pH, familias sensibles, índice EPT/Chironomidae, Zygoptera y raspadores con el incremento de la cobertura forestal. La biomasa de peces presentó en verano una reducción significativa con el aumento de la cobertura forestal, y positiva en el invierno. La densidad de peces mostró una respuesta positiva con el incremento de la cobertura forestal similar en ambas estaciones, mientras que la abundancia de Siluriformes (bagres y viejas de agua) mostró una relación negativa con el aumento de forestación en la cuenca. La tasa de descomposición de la MO fue significativamente menor dentro de los arroyos asociados a plantaciones forestales. El sustrato *S. californicus* con baja calidad nutricional obtuvo menor riqueza, tasa de esporulación y biomasa fúngica (comunidad microbiana) y menor riqueza y densidad de taxones de macroinvertebrados, resultando en bajas tasas de descomposición. Por otro lado, *E. pandanifolium* y *E. globulus* con mayor calidad nutricional y mayor colonización de las comunidades acuáticas, resultó en mayores tasas de descomposición. La utilización de la tasa de descomposición como una herramienta de biomonitorio podría ser efectiva ya que se observaron respuestas diferenciales en los dos tipos de usos del suelo analizados.

En atención a los resultados obtenidos a la concentración de nutrientes, vale destacar que en los resul-

tados previos obtenidos en las microcuencas DTf-LCp y NEf-NEp no se habían observado diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de nutrientes en agua, excepto en el caso del NH₄, que presentó concentraciones generalmente mayores en los arroyos de las microcuencas forestadas.

Los resultados obtenidos en este período de muestreo extensivo para los indicadores de calidad de agua, biológicos y funcionales, dejan en evidencia el efecto combinado del uso de suelo forestal con la actividad ganadera, por lo tanto para poder cuantificar el efecto independiente de ambas actividades se debería en esta línea evaluar la actividad forestal con exclusión de ganadería.

Indicadores edáficos

Con respecto a los suelos el objetivo fue estudiar el efecto de la sustitución de pasturas por plantaciones forestales sobre las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en el litoral-oeste del Uruguay. La metodología comprendió una revisión detallada de antecedentes edafológicos, obtenidos de trabajos realizados sobre basalto y areniscas cretácicas, y que se encuentren en las áreas correspondientes a las macrocuencas seleccionadas; así como la obtención de muestras de los suelos representativos de los Grupos CONEAT dominantes en cada una de las áreas de estudio, con el objetivo de obtener una caracterización físico-hidrológica de los mismos. Esto último incluyó la selección de los sitios representativos, muestreo en campo y análisis de laboratorio. Se extrajeron muestras imperturbadas de suelo en cada uno de estos Grupos CONEAT bajo cobertura de campo natural y de plantaciones forestales para evaluar el efecto del mencionado cambio de uso del suelo sobre sus propiedades físicas e hidrológicas. Se realizaron determinaciones de caracterización: textura, materia orgánica, cationes bases, pH; así como para la evaluación de las propiedades físicas (densidad aparente) e hidrológicas (curva característica de retención de agua). Esos dos últimos indicadores se realizaron solo en muestras imperturbadas superficiales (horizonte A).

Los resultados obtenidos no establecieron diferencias significativas entre los valores de densidad aparente del horizonte superficial al comparar los diferentes usos del suelo (forestación y pastura natural). En cambio, hubo diferencias entre usos de suelo al evaluar la retención de agua por parte del suelo; bajo uso forestal los mismos presentan menor capacidad de retención de agua que bajo pastura, a cualquier nivel de succión. Este fenómeno se evidencia con mayor intensidad cuando es evaluado a mayores succiones (menor contenido de agua) y es más notorio en suelos de texturas más livianas (con mayor contenido de arena). Los suelos bajo uso forestal perderían el agua retenida más fácilmente que los de pasturas ante aumentos de la succión. Se observó que las diferencias se acentúan a medida que el suelo se va secando. A valores de tensión equivalentes a capacidad de campo (100 cm) la disminución es aproximadamente de un 23 % pero cuando los valores de tensión se incrementan a 1 000 cm el porcentaje de disminución alcanza un 28.5 %. Una posible explicación de este fenómeno es el desarrollo de menores fuerzas matriciales como consecuencia de compuestos orgánicos hidrofóbicos, vinculados a las coberturas forestales.

Estos resultados son en cierta medida consistentes con la variación de los parámetros calibrados en el modelo VisualBalan en las microcuencas experimentales del litoral. Particularmente, los parámetros que debieron modificarse para la representación de la sustitución de pasturas por plantaciones fueron una mayor velocidad de infiltración en el suelo y mayor capacidad de infiltración en punto de marchitez permanente para suelos bajo forestación. No obstante, en el modelo se obtuvo una menor capacidad de infiltración en condición de humedad a capacidad de campo, bajo forestación, situación que no va en la misma línea de lo anteriormente comentado. Es de destacar que los estudios edafológicos realizados, obtuvieron diferencias significativas para los primeros cm de suelo mientras que la modelación considera

espesores de suelo del orden de 1 m. Se evidencia la necesidad de continuar en esta línea de trabajo para profundizar los vínculos entre el monitoreo y la modelación de estos indicadores y parámetros.

Ecofisiología, estudio en microcuenca

El dosel forestal en la microcuenca DTf (*Eucalyptus dunnii*, 1300 á/ha, 4 años de edad) se caracterizó por un índice de área foliar (IAF) promedio de 4.18 ± 0.69 y un porcentaje de radiación solar interceptada medio de 87.50 ± 6.40 . Se estimó el flujo transpiratorio en intervalos de 30 min durante dos años consecutivos (2019-2020). Se cuantificó el consumo de agua (en base diaria y estacional) en función de la demanda atmosférica (déficit de presión de vapor, DPV) y disponibilidad hídrica. La transpiración media anual por árbol y por día registrada fue de 29 kg día^{-1} , siendo cinco veces mayor en verano respecto al invierno y levemente superior en otoño respecto a la primavera. Estas diferencias entre estaciones pueden ser atribuidas mayormente a las condiciones meteorológicas de los períodos analizados (principalmente el DPV). La tasa máxima registrada para toda la serie de datos fue $103.3 \text{ kg día}^{-1}$.

La actividad transpiratoria ($\Delta\psi$) varió entre árboles ($p = 0.0070$) y promedió -1.96 MPa en primera temporada y -1.85 en la segunda. En la segunda temporada estos valores diarios se correlacionaron con un menor potencial base, reflejando menor contenido de agua en suelo y una menor g_s ($231 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La g_s en la primera temporada (2019) varió entre 230 y $460 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y durante la segunda entre 180 y $390 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dichos valores se encuentran por encima de los observados a campo en *E. dunnii* bajo moderado déficit de presión de vapor (DPV: 1 a 3 kPa). En la primera temporada se observó una g_s más variable (CV = 32%) que durante la segunda temporada (CV = 21%). Si bien la medición de g_s permitió ajustar un valor para el modelo hidrológico SWAT, la sensibilidad de este parámetro no resultó significativa en el modelo y su variación dentro de rangos apropiados no permitió mejorar la estimación de evapotranspiración potencial que realiza el SWAT, la cual queda significativamente subestimada para las plantaciones forestales.

El volumen fustal final fue de $0.197 \text{ m}^3 \text{ árbol}^{-1}$ y $261 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (130 ton ha^{-1}). Dichos valores representan un incremento entre temporadas de $44,28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, es decir, $22.01 \text{ ton ha}^{-1}$. El crecimiento relativo promedio fue de 20.4%.

Este trabajo permitió obtener los primeros registros de transpiración en *Eucalyptus* medida por flujo de savia en el Uruguay. Se valora como una sustantiva contribución la obtención de parámetros ecofisiológicos medidos y el ajuste de técnicas de medición en ecofisiología de leñosas en condiciones de cultivo locales.

Modelación hidrológica

Se implementaron cuatro modelos hidrológicos con estructuras diferentes y distinto nivel de complejidad, que representan los principales procesos hidrológicos que son afectados por el cambio de cobertura vegetal:

- El modelo Témez+Gash consiste en acoplar al modelo mensual de escorrentía regionalizado para Uruguay (Témez) el modelo de intercepción de la precipitación (Gash) basado en las mediciones realizadas en las parcelas experimentales del litoral oeste y este del país. Para las microcuencas este modelo acoplado representa con un muy buen ajuste los volúmenes escurridos a nivel mensual en base a la precipitación incidente en la cuenca, la evapotranspiración potencial de la zona y

la modelación de intercepción basada en las características estructurales de la plantación. La implementación en las macrocuencas mostró un muy buen ajuste en las 4 macrocuencas más forestadas del norte del país. El modelo acoplado no tuvo un ajuste aceptable para las cuencas que presentan interferencia de otros usos del suelo (agricultura) y/o problemas de falta de datos o calidad de la información.

- El modelo HBV, de paso diario, resultó un herramienta adecuada para la representación del uso forestal del suelo en sustitución del campo natural, además de robusta al requerir del ajuste de pocos parámetros. Tanto en la implementación para las microcuencas experimentales como para las 5 macrocuencas, la rutina de humedad del suelo resultó ser la más sensible, requiriendo fundamentalmente de incrementar el parámetro relativo al almacenamiento en el suelo, para poder representar el aumento que genera la intercepción de la cubierta forestal y de disminuir el parámetro que define la reducción de la evapotranspiración real respecto a la potencial. Se observa además que para los 2 pares de microcuencas más pequeñas (NEp-NEf y EVp-EVf) el ajuste del modelo en paso mensual mejora ampliamente. En este caso se considera que el modelo es apropiado para la estimación de la disponibilidad hídrica mensual pero no así para la simulación de los escurrimientos diarios.
- El modelo SWAT fue implementado en las macrocuencas del litoral oeste (Queguay y Arroyo Grande) y en las microcuencas experimentales ubicadas en éstas (DTf-LCp y NEf-NEp), con el objetivo de poder extender los resultados hacia la escala espacial mayor. Este modelo que representa además de los procesos hidrológicos el crecimiento del cultivo, presentó la ventaja de permitir la verificación de variables de estado que son medidas in-situ en las microcuencas experimentales: IAF, biomasa; o de las que se pueden tener mediante estimaciones satelitales como la evapotranspiración real en el caso de las macrocuencas. Si bien los resultados logrados en las microcuencas son aceptables, el modelo subestima en forma significativa el aumento de la evapotranspiración al sustituir las pasturas por plantaciones forestales, debido a que realiza una inadecuada modelación de la intercepción. A nivel de las macrocuencas, el ajuste logrado para el período posforestación, es apenas aceptable principalmente debido a la sobrestimación de los caudales bajos (asociados al flujo base) producto de la subestimación de la evapotranspiración. Se destaca también que para estas dos macrocuencas existe además una superposición de efectos debida a la alta ocupación agrícola en las cuencas que en el caso de Queguay es del mismo orden de la forestación y en Arroyo Grande la supera ampliamente. También las series de caudales observados presentan en ambas cuencas numerosos datos faltantes y períodos donde se evidencian problemas de calidad de la información.
- El modelo VisualBalan, de paso diario, se implementó en los 2 pares de microcuencas del litoral oeste (DTf-LCp y NEf-NEp) y su análisis estuvo focalizado en la evaluación de las componentes de flujo subterráneo y subsuperficial. El modelo ha logrado reproducir de manera satisfactoria la variación piezométrica así como los volúmenes de escorrentía a nivel diario y mensual. Este modelo también ha permitido incorporar en la evaluación parámetros y variables monitoreadas y medidas in situ.

La implementación de los cuatro modelos a escala de las microcuencas experimentales permitió establecer rangos de variación de los parámetros más sensibles en cada modelo para los usos de suelo objeto de este estudio: campo natural y plantaciones forestales. También permitió establecer, en particular para los modelos VisualBalan y SWAT vínculos entre las mediciones de propiedades hídricas de los suelos y características fisiológicas de las plantaciones realizadas a escala de parcelas. La implementación de los modelos en las macrocuencas permitió fundamentalmente avanzar hacia su utilización, en

forma de ensamble, para la generación de escenarios de disponibilidad hídrica frente a escenarios de aumento en la superficie dedicada a la forestación.

Herramienta de estimación de rangos de afectación en la cantidad y la calidad de los recursos hídricos

Para la estimación de rangos de afectación a la cantidad de agua, se trabajó en base a los modelos hidrológicos implementados en 5 macrocuencas (2 en el litoral oeste y 3 en el norte del país). Se generaron escenarios de aumento de la superficie forestada en base a criterios de aptitud forestal de los suelos y de área máxima efectiva de cobertura forestal. Se generó para cada cuenca un set de modelos idénticos tanto en su implementación como en la serie climática de entrada, variando únicamente la superficie afectada a la forestación en cada uno.

La afectación a la cantidad se evaluó en términos de los indicadores: i) reducción del caudal específico y ii) curva de permanencia: incluyendo: caudal promedio y los percentiles 10 y 90 representativos de los caudales máximos y mínimos respectivamente. Como resultado general se estimaron reducciones del caudal promedio de hasta un 20 %, en relación al caudal del escenario preforestación, para un 40 % de superficie ocupada por plantaciones forestales. Se observa que estas variaciones en el indicador de reducción de caudal presentan valores sensiblemente menores a las que derivan del análisis de datos medidos en las cuencas del norte del país que son las que actualmente alcanzan la mayor forestación. Estas diferencias se deben a que los datos medidos reflejan la superposición de los efectos generados en forma combinada por el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática entre los períodos pre y pos forestación. Mientras que en los escenarios obtenidos mediante la modelación hidrológica es posible estimar el efecto aislado del aumento de las plantaciones forestales, considerando las simulaciones bajo regímenes climáticos idénticos. Se recomienda la validación periódica de los modelos implementados incorporando nueva información hidrométrica y meteorológica con el objetivo de mejorar su ajuste.

En relación a la estimación de la afectación de la calidad del agua y comunidad de macroinvertebrados, considerando que este estudio incluyó un gran número de microcuencas con una amplia distribución en el país, se considera que los modelos estadísticos obtenidos son representativos para el tipo de sistemas analizados dentro de los rangos de las variables analizadas. Se propone la aplicación de estos modelos como una caja de herramientas dentro de programas de monitoreo asociados a la gestión de las microcuencas forestales de nuestro país. Además de su aplicación, es recomendable su validación y ajuste periódico, incluyendo un mayor número de sitios en áreas forestales y/o la incorporación de la variabilidad interanual en las 30 microcuencas analizadas.