

*Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*  
ISSN 0188-4611, Núm. 80, 2013, pp. 55-70



## Costos mínimos de compensación y cuantificación de la oferta hídrica en la cuenca alta del río Sauce Grande, Argentina

Recibido: 31 enero de 2012. Aceptado en versión final: 14 de junio de 2012.

Claudia Cecilia Carrascal Leal\*

Gerardo Andrés Denegri\*\*

María Isabel Delgado\*\*

**Resumen.** El objetivo del trabajo fue estimar los costos de aumentar la oferta de disponibilidad hídrica a través del cambio en las prácticas de uso del suelo, para establecer el monto mínimo de compensación de un futuro Sistema de Pagos por Servicios Ambientales, dentro del territorio perteneciente a la cuenca alta del río Sauce Grande. Se trabajó en tres etapas: simulación de la infiltración para diferentes tormentas a través de la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS, cálculo de costos de reconversión de sistemas productivos y cálculo del costo del incremento en la disponibilidad de agua. Como resultados se presentan los mapas temáticos necesarios para simular la infiltración y las tablas

que muestran esta variación en distintas recurrencias de tormenta y diferentes prácticas de manejo del suelo. Para la recurrencia 1:1 el costo de oportunidad fue de U\$S 1.21.m<sup>-3</sup>, para la recurrencia de 1:3 fue de U\$S 0.73.m<sup>-3</sup>, hasta llegar a la tormenta cuyo costo fue de U\$S 0.62.m<sup>-3</sup>. Se concluye que estos costos permiten apoyar la planificación del recurso hídrico a través de un PSA y que para avanzar se debe realizar una valoración contingente para establecer la disponibilidad a pagar por los usuarios del servicio ambiental de la cuenca.

**Palabras clave:** HEC-HMS, Pago por servicio ambiental (PSA), cambio de prácticas agropecuarias, márgenes brutos.

## Minimum compensation costs and quantification of water supply in the upper watershed of the Sauce Grande River, Argentina

**Abstract.** The aim of this work was to estimate the monetary cost of increasing water supply due to a change in current land use, in order to establish the minimum compensation costs for a future System of Payments for Environmental Services in the Upper Watershed of the Sauce Grande River. The work involved three steps: simulation of the infiltration for different rainfalls applying the hydrologic model HEC-HMS, calculation of the cost of changing the productive systems and estimation of the cost of increasing water supply. Results consisted of the thematic maps needed for simulations and the tables that showed variation between rainfalls with different recurrence intervals and different land use.

For the recurrence of 1:1 the cost of opportunity was U\$S 1.21.m<sup>-3</sup>, for the recurrence of 1:3 was U\$S 0.73.m<sup>-3</sup> and the lowest cost found was of U\$S 0.62.m<sup>-3</sup>. We concluded that these costs will support future planning on the use of water resource within a system of Payments for Environmental Services, but it is also important to considerate that a contingent valuation is needed in order to establish the people's will to pay for the use of this resource in the watershed.

**Key words:** HEC-HMS, Payment for Environmental Services (PES), change of agricultural practices, gross margins.

\* Ministerio de Defensa, Av. Comodoro y 2055, piso 15, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. E-mail: [claudia\\_carrascal@yahoo.es](mailto:claudia_carrascal@yahoo.es)

\*\* Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional La Plata, Diagonal 113 N 469, tercer piso, 1900, La Plata, Argentina. E-mail: [gdenegri@agro.unlp.edu.ar](mailto:gdenegri@agro.unlp.edu.ar), (becaria de posgrado de CONICET) [isabeldelgado@agro.unlp.edu.ar](mailto:isabeldelgado@agro.unlp.edu.ar)

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de degradación ambiental están presentes en la mayoría de las cuencas hidrográficas de la Provincia de Buenos Aires, a consecuencia de ello la calidad y cantidad de los servicios hídricos se ven deteriorados, justificando explorar herramientas de compensación como son los Sistemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA).

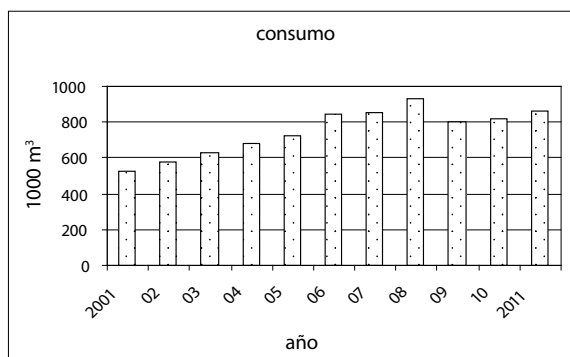
El caso en estudio es la cuenca alta del río Sauce Grande, la cual carece de un ordenamiento territorial, y presenta pérdida de suelo por erosión hídrica superficial e inundaciones recurrentes que inciden sobre la calidad de vida de sus habitantes. La cuenca abastece al complejo hidráulico Embalse Dique de Las Piedras, primordial para el consumo de agua de la ciudad de Bahía Blanca, y su polo industrial circundante. El problema de disponibilidad de agua y pérdida de suelo se agrava debido a la existencia de ciclos climáticos secos y húmedos, generando importantes pérdidas, tanto en el sector rural como en el turístico, la cuenca presenta altas tasas de crecimiento de consumo hídrico consuntivo. En la Figura 1 se aprecia este incremento, truncado a partir del 2008 donde comenzó un ciclo seco y hubo racionamiento de agua en dos localidades.

Esta cuenca, ubicada en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, presenta dos paisajes geográficos bien marcados. El primero es el paisaje natural del Sistema de Sierras de Ventania –Distrito

Austral del Pastizal Pampeano— que es el hábitat de especies endémicas (como por ejemplo: *Plantago bismarkii* “llantén plateado” o “pinito plateado”, *Festuca ventanicola* “pasto de las sierras”, *Grindelia ventanensis* “margaritas de la cumbres” y *Senecio ventanensis*), (Cuevas y Zalba, 2009) ahí se ubica el Parque Provincial Ernesto Tornquist creado por la Ley Provincial N° 5.421/1958 para proteger este ecosistema. El segundo paisaje presenta grados de antropización creciente, dada la existencia de heterogéneos establecimientos rurales de diferentes tamaños y grados de tecnificación. Como el Parque Provincial se ubica en la región serrana, existe un área de transición representada por establecimientos esencialmente ganaderos donde el paisaje natural está poco modificado. La economía de la región depende de la producción agropecuaria, pero en los últimos años el turismo está incrementando su participación.

De acuerdo con Bragachini (2009), se produjeron cambios profundos en la forma de producción agrícola en Argentina; tuvo lugar un significativo desarrollo de la siembra sobre campos alquilados con contratos de muy corto plazo (muchas veces una campaña) y un desplazamiento e intensificación de los sistemas ganaderos. Este proceso dificulta la planificación de un sistema de rotación de cultivos y la aplicación de tecnología para mejorar el balance de nutrientes, carbono en el suelo y reducción de la erosión.

La cuenca en estudio presenta áreas de manejo (subcuencas) con prácticas agrícolas no conservacionistas o inadecuadas, entre las que se pueden mencionar monocultivos o rotación de cultivos con cosecha continua y sobrepastoreo. Eso contribuye a la degradación física de la cuenca, observada en la pérdida de materia orgánica y estructura del suelo, la disminución de la fertilidad, la tendencia a la erosión y la baja calidad y cantidad del recurso hídrico captado, especialmente para consumo humano, con visibles efectos negativos en las posibilidades de desarrollo socioeconómico. De este modo, surge la necesidad de aplicar modelos productivos tecnológicos y/o integrales para el estudio de esta cuenca, de manera que orienten al desarrollo de políticas activas y mejoren así la realidad en el mediano y largo plazo.



Fuente: elaboración propia con base en datos de la Cooperativa Eléctrica Limitada de Saldungaray y Cooperativa de Provisión de Agua Potable Sierra de la Ventana.

Figura 1. Consumo de agua en las localidades de la cuenca alta del río Sauce Grande.

Con respecto a la actividad turística en la región, ésta presentó durante los primeros años de este siglo un crecimiento exponencial para luego estabilizarse en tasas de crecimiento del orden del 10% anual (González, 2008). Ese crecimiento motivó un excesivo consumo de agua, que el sistema natural no estuvo en condiciones de abastecer.

Si bien existen trabajos que integran modelos hidrológicos con el análisis económico (Heinz *et al.*, 2007; Volk *et al.*, 2008), esta combinación no es usual, especialmente en Latinoamérica. Analizar estas dos dimensiones de la sustentabilidad en forma conjunta permite comprender y solucionar los problemas derivados del manejo del agua. De este modo se facilita el desarrollo de un mecanismo de pagos por servicios ambientales que pueda contribuir a los objetivos de conservación de una manera más eficiente. Su diseño debe ser muy cuidadoso de modo de no lesionar los principios de equidad, las tradiciones locales y no comprometer el bienestar de las comunidades dependientes de los recursos ecosistémicos.

El PSA es un mecanismo flexible y adaptable a diferentes condiciones, que apunta a un pago o compensación directo por el mantenimiento o provisión de un servicio ambiental específico, para lograr la sostenibilidad (Villavicencio, 2009) por parte de los usuarios del servicio hídrico, el cual se destina a los proveedores. Los PSA en cuencas hidrográficas consideran la implantación de mecanismos de mercado para la compensación a propietarios de las tierras con la finalidad de mantener o modificar un uso particular del suelo que afecta la disponibilidad y/o calidad del recurso hídrico.

Un sistema de PSA puede contribuir a mitigar el problema planteado y constituir una estrategia de diversificación, especialmente para los pequeños productores, dado el creciente turismo rural. Según Burstein *et al.* (2002:1), el PSA resulta una gran oportunidad para la economía rural, que abarca una mezcla de actividades de consumo y mercado, de forma que el acomodo de proyectos parece resultar fácil y efectivo en ese sentido.

El sistema puede ser un mecanismo sostenible a largo plazo solo si éste se genera a partir de recursos locales, buscando resolver un problema concreto de la población; si su funcionamiento está basado

en recursos externos (principalmente donaciones) existe el riesgo de que surja dependencia económica. Los PSA aportan a la solución de conflictos dado que instruyen y familiarizan a los actores en los procesos de negociación. Una de las limitantes más importantes para su implementación son los altos costos de establecimiento, como ser el de los estudios biofísicos, de valoración y para su formulación (FAO, 2003:1); por lo cual debe haber investigación científica que establezca los principales pilares del sistema.

Si el esquema de pagos debiera autofinanciarse, sea a través de aportes públicos o privados, debe ser mayoritariamente manejado por los usuarios del agua y formar parte de la política de manejo del recurso hídrico (Porras *et al.*, 2008).

Vatn (2010) menciona que el sistema de pagos no consiste necesariamente en el ofrecimiento de incentivos. La incorporación de este tipo de sistemas puede ser percibida de manera muy distinta, dependiendo de las instituciones involucradas y el formato utilizado. Remarca a su vez en la importancia de realizar la distinción del pago como un incentivo o como una compensación.

Los PSA pueden ser además incentivos fiscales o créditos, en forma individual o colectiva; asegurando que los fondos recaudados se inviertan en las acciones establecidas y en la cuenca donde se recaudan. La compensación debe mantener o incrementar la rentabilidad actual del establecimiento en cuestión, dado que para el productor el cambio del sistema productivo le significa un costo de oportunidad (monetario y cultural) frente al tradicional. Por último, se debe tener en cuenta que todo el mecanismo sea discutido por la sociedad, en especial con la directamente afectada. Las modalidades de compensación a los productores comprenden pagos directos, apoyo técnico o asesoría, y provisión de servicios sociales e infraestructura, entre otros.

Uno de los primeros pasos para establecer la viabilidad de un PSA es calcular el monto mínimo de la compensación a los productores en función de las ganancias inmediatas que dejan de percibir. Wunder *et al.* (2008) expresan que en la mayoría de los PSA en funcionamiento el pago se realiza por los costos de reconversión del sistema.

Según mencionan Cameron *et al.* (2008), la elección del método apropiado para disminuir los costos de oportunidad y asignar prioridades para la conservación, va a depender de las características particulares del contexto de planificación en el que se esté trabajando.

Por otra parte, es importante contar con una estimación con bases científicas de la cantidad disponible de agua que generan los sistemas productivos sustentables. Porras *et al.* (2008) mencionan que en muchos esquemas, los impactos en el flujo del agua y en su calidad están basados en la opinión de los usuarios, ya sea la gente local o los administradores, en lugar de determinaciones a campo o modelizaciones de la relación entre el tipo de uso del uso y el agua.

El objetivo del trabajo fue estimar los costos de aumentar la oferta de disponibilidad hídrica a través del cambio en las prácticas de uso del suelo, para establecer el monto mínimo de compensación de un futuro Sistema de Pagos por Servicios Ambientales, dentro del territorio perteneciente a la cuenca alta del río Sauce Grande.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó para la cuenca alta del río Sauce Grande, en una superficie de 1 032.66 km<sup>2</sup>, la

misma se extiende desde su nacimiento en las sierras del Sistema de Ventania hasta el Dique Paso de las Piedras (Figura 2). Está compuesta por dos elementos morfológicos fundamentales: las sierras y la llanura circundante. La distribución de estas unidades y su homogeneidad geológica se reflejan en el marcado contraste de llanuras, con pendientes de hasta el 4%, y el abrupto pasaje a la zona serrana, cuyas pendientes críticas exceden el 48%.

En la cuenca se diferencian dos zonas hidrogeológicas. En las partes altas de la serranía existen vertientes intermitentes con una profundidad del acuífero que varía entre los 30 y 90 m, siendo la más superficial en las áreas serranas, aumentando el nivel hacia las zonas bajas; existe una zona de recarga ubicada en la parte media de la zona en estudio. La calidad del agua ha sido evaluada como buena a muy buena (Denegri y Gaspari, 2010:96).

La temperatura media anual es de 14.4° C y las precipitaciones anuales van de los 809 a los 972 mm. El tipo de clima (Thornthwaite, 1948) es húmedo-subhúmedo, mesotermal, con pequeño o nulo déficit de agua. La primavera y el verano son los periodos más lluviosos, no obstante existe un déficit de agua estival debido a la gran evapotranspiración. En invierno las precipitaciones son menores, registrándose frecuentes heladas entre los meses de abril y septiembre, con algunas nevadas ocasionales (Barrera y Frangi, 1994:243).

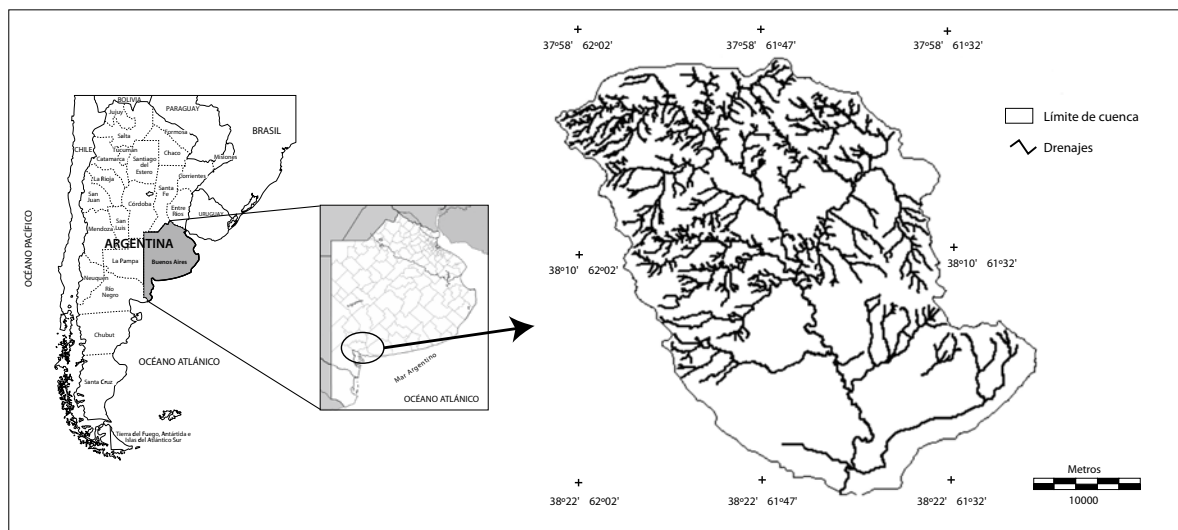


Figura 2. Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Sauce Grande.

Por otro lado, en publicaciones más recientes, como Delgado *et al.* (2009), se menciona que en los últimos años la distribución espacio-temporal de las precipitaciones en el Sistema Serrano de Ventania expresa una línea de tendencia negativa, indicando un impacto sobre las actividades humanas y los ecosistemas regionales, debido a la disminución del agua disponible.

### **Etapas de trabajo:**

Para alcanzar el objetivo propuesto, la metodología de trabajo se dividió en tres etapas:

1. Simulación hidrológica, aplicando diferentes tormentas a través del modelo HEC-HMS.
2. Cálculo de costos de reconversión de sistemas productivos.
3. Cálculo del costo del incremento en la oferta de agua.

#### *1. Simulación hidrológica a través del programa HEC-HMS*

Para poder realizar la simulación se procedió a delimitar la cuenca alta del río Sauce Grande, mediante la digitalización de las cartas topográficas de la zona en estudio (escala 1:50 000) del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Toda la cartografía fue procesada dentro del sistema de información geográfica (SIG) Idrisi Andes<sup>®</sup> v. 16.0, utilizando el sistema de coordenadas Gauss Krüger, Faja 4, datum WGS 84.

Se generó el mapa de subcuencas, utilizando como base el mosaico de cartas topográficas del IGN, el contorno de la cuenca y la red drenajes.

Para disponer del Modelo Topográfico Digital (MTD) de la cuenca se obtuvieron del sitio Web de la NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>) las imágenes Aster Global Digital Elevation Map "AST-GDEM. El MTD permitió calcular las características morfométricas de la cuenca.

A partir del *Atlas de Suelos de la República de Argentina*, publicado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA (1990), se obtuvieron los polígonos de tipos de suelo para la cuenca en estudio. Por otra parte, se realizó el mapa de uso de suelo mediante patrones de reconocimiento visual, información recogida en entrevistas con téc-

nicos locales, visitas a campo en el área en estudio y utilizando como material de apoyo un mosaico confeccionado con imágenes Landsat provistas por el Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil (INPE-Brasil). Este mapa constituye un insumo básico para la aplicación de la metodología del Número de Curva (NC). Las categorías del uso del suelo establecidas fueron las siguientes:

- Cultivos agrícolas conservacionistas.
- Cultivos agrícolas no conservacionistas.
- Pastizal y pasturas.
- Suelos rocosos
- Plantación de árboles y arbustales.
- Zonas urbanas.

El método desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) denominado "Número de Curva" (SCS, 1972) es utilizado mundialmente para la estimación de escurrimientos en cuencas agropecuarias. Dicho método establece complejos de suelos-vegetación a los cuales se les asigna un valor denominado NC. El procedimiento para determinar el NC consiste primeramente en definir el área según el grupo de suelo y luego según el uso de la tierra (expresado a través del tipo y grado de cobertura, según las diferentes especies y/o asociaciones vegetales presentes), para obtener el número de curva correspondiente a cada tratamiento y condición hidrológica.

La metodología utilizada en este trabajo para obtener el NC se realizó utilizando SIG, lo que permitió combinar datos de diversa índole que se presentan en una misma localización geográfica. La generación de mapas a escala regional del número de curva se realizó mediante la aplicación de tablas de reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información de las que depende. Se consideró apropiada esta metodología dado el tamaño de la cuenca y las condiciones de escasa información de detalle.

Para elegir el NC de la cuenca alta del río Sauce Grande, se utilizaron las tablas publicadas por Gaspari *et al.* (2009:38); de esta manera se pudo asignar el valor de NC, el cual está comprendido entre 0 (máxima tasa de infiltración) y 100 (nula capacidad de infiltración). Además, se consideró

la condición de humedad antecedente, es decir, el estado de humedad del suelo previo a la precipitación simulada, que según López Cadenas del Llano (1998) se divide en tres condiciones básicas: seca (I), media (II) y húmeda (III). Se definió una condición hidrológica media (II), equivalente a un estado medio de humedad con anterioridad a la presentación de la tormenta. Se realizó un cruzamiento entre el mapa de Grupo Hidrológico (elaborado a partir del mapa de suelos, según su composición y textura), y el mapa de uso de suelo. El mapa de NC se cruzó con el de subcuencas para obtener el valor de NC ponderado a nivel de subcuenca.

Para la simulación hidrológica se escogió un modelo operacional, de procesos hidrológicos, de evento y espacial, denominado HEC-HMS versión 3.5. Se trata de un software creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineering). Este software permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en gasto mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos. Puede ser usado para las cuencas sin datos en el cálculo de los efectos posibles en el escurrimiento por cambios en el uso del suelo (Al-Abed *et al.*, 2005, citados por Miranda-Aragón *et al.*, 2009).

El programa realiza los balances entre infiltración y escorrentía superficial, brindando el caudal pico y el momento en que se produce una vez iniciada la tormenta. En último lugar, la interfaz gráfica del programa permite analizar los hietogramas de cada subcuenca y de la salida misma.

Se aplicó el método del Hidrograma Unitario (HU), que según Chow (1994:1), es la función respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal, se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una pulgada de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva; como es desarrollado a partir de la información de lluvia y caudal en una cuenca, se aplica solamente para ella y para el punto donde se midió el caudal. Los hidrogramas unitarios sintéticos se utilizan para desarrollar HU para otros

puntos de la corriente dentro de la misma cuenca o cuencas similares.

El modelo hidrológico determina un hidrograma completo de la avenida. Se utilizó el HU de Clark, debido a la disponibilidad de datos para la cuenca en estudio. Este hidrograma parte del supuesto que el escurrimiento es el resultado de una pulgada de precipitación de exceso uniformemente generada y su duración se considera infinitesimalmente pequeña. Este exceso de la precipitación es aplicado uniformemente sobre una cuenca que es dividida en áreas de incrementos temporales, procedimiento considerado como sumamente objetivo, pues utiliza parámetros matemáticamente definidos basados en hidrogramas observados. Sin embargo, la derivación de la curva de área de tiempo sí requiere de un juicio individual, introduciendo un factor de subjetividad.

Otra propiedad importante del método es su capacidad para representar la forma del área de drenaje con la inclusión de los flujos máximos de escurrimiento, sujeto a la exactitud de la relación de área de tiempo estimada (Zhongbo, 2011). No obstante, en la mayoría de casos citados en la bibliografía específica sobre el tema, la curva adimensional de área tiempo incluida en el software HEC-HMS utilizado en este trabajo, es satisfactoria para obtener un confiable hidrograma unitario sintético. Teniendo en cuenta las entradas y las salidas del modelo hidrológico, se modelaron tres situaciones A, B y C:

- Situación A: situación actual. Se identificó la presencia de cultivos agrícolas conservacionistas, cultivos agrícolas no conservacionistas, pastizal y pasturas, suelos rocosos, plantación de árboles y arbustales, y zonas urbanas.
- Situación B: se adoptan prácticas culturales conservacionistas solo en los sectores con cultivos agrícolas, en aquellas subcuencas con prácticas no conservacionistas en la situación actual.
- Situación C: sobre la situación B se incorporan prácticas conservacionistas sobre aquellas pasturas y pastizales que en la situación A se manejaban en forma no conservacionista.

Para realizar la modelización hidrológica se estimaron recurrencias (número esperado de años que deben transcurrir antes de encontrar de nuevo el mismo evento) o periodos de retorno de las tormentas, y una situación denominada “tormenta observada”. A partir del análisis de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicados en la estación aferente a la cuenca alta del río Sauce Grande, se lograron establecer tormentas de recurrencias de 1, 3 y 8 años (1:1, 1:3 y 1:8, respectivamente), mientras que los datos de la “tormenta observada” fueron suministrados por la Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, FCAyF-UNLP. La utilización de tormentas de recurrencia conocida permitió, además de obtener el costo de oportunidad surgido de los cambios en las prácticas de manejo por m<sup>3</sup> de reducción de escorrentía, comparar a la “tormenta observada” con las de recurrencia conocida. Se debe aclarar que si bien la lluvia con recurrencia 1:1 no responde a las características de una tormenta, se incluyó en el análisis, dado que este evento tiene una probabilidad de ocurrencia cercana a un año y, en consecuencia, constituye un aporte certero de agua al sistema. A partir del cambio en el número de curva correspondiente a las subcuencas donde se propuso el cambio en el uso del suelo, se simuló los caudales pico para las situaciones “A y C” (la situación B no arrojó cambios de parámetros hidrológicos significativos para las mismas, por lo tanto no se incluye en dicho análisis) para las tres recurrencias y la “tormenta observada”, calculándose las diferencias entre los caudales pico e infiltración total.

## *2. Cálculo de costos de reconversión de sistemas productivos*

Se plantearon para analizar Modelos Agrícolas y Ganaderos con sus respectivos costos e ingresos, para cuantificar el cambio en los beneficios de pasar de la situación “A” a la “C”.

Modelo productivo agrícola: para este modelo se consideró en las prácticas actuales no conservacionistas: rotación sobre lotes de trigo, soja y girasol, implantados por labranza convencional y sin descanso del suelo. El modelo propuesto consiste en una rotación en cada lote, con cultivos de cosecha durante dos años e implantación de

una especie que se utilice como abono verde en el tercer año.

Modelo productivo ganadero: se asumió una superficie modal de 200 ha, de producción ganadera de cría de bovinos, con pastoreo continuo sobre una composición forrajera de 80% pastizal natural y 20% pastura perenne. El planteo técnico propuesto consiste en la incorporación del pastoreo rotativo como medida conservacionista y que simultáneamente permite aumentar la carga animal promedio por hectárea en el establecimiento, lo cual se traduce en una mayor producción de carne por ha/año.

El costo de oportunidad, definido para este trabajo como la diferencia entre los beneficios inmediatos que el productor deja de obtener al cambiar su producción tradicional por la de aplicar las prácticas propuestas.

Los costos de producción no determinan el valor de los servicios ambientales, dado que no están en función de los beneficios sociales que generan. Lo calculado aquí representa la compensación mínima al productor para que proteja el ambiente. Para calcular ese costo de oportunidad se procedió a establecer los márgenes brutos de las actividades actuales y las propuestas. Se define como “margen bruto” a la diferencia entre los ingresos (efectivos y no efectivos) generados por una actividad y los costos que le son directamente asignables. Partiendo de datos físicos, tanto de insumos como de productos, se les asigna un valor que generalmente corresponde a precios de mercado, y se obtiene una estimación del beneficio financiero resultante para cada actividad (modificado del INTA, 2009).

Para el caso de la cuenca en estudio, se consultaron los costos en la revista *Márgenes Agropecuarios* de noviembre de 2010. Para simplificar se eligieron modelos representativos de la región tanto para la situación no conservacionista y la mejorada. La tecnología adoptada en un modelo productivo influye sobre el margen bruto y por lo tanto en la compensación, pero en este caso se analizó el cambio tecnológico en un solo factor productivo, el referido a la sustentabilidad. Se asumió que el resto de los factores cambiarán en forma similar en ambos modelos (como la adopción de un nuevo material genético o agroquímicos) supuesto consi-

derado razonable debido a las características de la mayoría de los productores de la cuenca.

### 3. Cálculo del costo del incremento en la oferta de agua

Para llevar los costos de oportunidad del cambio de prácticas a la cuenca en su conjunto, se utilizó el mismo esquema que el utilizado para el cambio en el número de curva. Se calculó la superficie agrícola y ganadera con sistemas no conservacionistas y se multiplicaron por sus respectivos costos, obteniéndose así el costo total de reconversión productiva.

Obtenida la cantidad de agua infiltrada debido al cambio en el uso del suelo, según propuestas de cambio en los sistemas productivos, se procedió a relacionarla con sus costos de reconversión productiva. Esta relación permitió determinar el costo de incrementar la oferta de un metro cúbico de agua en el sistema subterráneo.

## RESULTADOS

### Mapas temáticos

A continuación se presentan los mapas temáticos obtenidos en el procesamiento de la información.

En la Figura 3 se presentan las 26 subcuencas obtenidas a partir de la digitalización en pantalla.

Como se observa en la Figura 4, el mapa de uso de suelo presenta la distribución espacial de las seis categorías establecidas. Por su parte, en la Figura 5 se observan los porcentajes que ocupan esas categorías. Predomina la categoría suelo rocoso, con un 45.1% de la superficie de la cuenca, los cultivos agrícolas conservacionistas ocupan un 28.4% y los no conservacionistas el 6.5%, los pastizales 17.8%, y resulta poco importante la superficie de plantación-árboles-arbustales con un 1.1%.

La Figura 6 muestra el mapa de Número de Curva con las 26 subcuencas. Su posterior análisis mostró que el 11.12% de la superficie presenta valores de NC menores a 70, el 27.29% entre 70 y 80, el 23.45% entre 80 a 90 y el 38.14% de la cuenca tiene un NC mayor a 90. Estos últimos valores permiten inferir que la cuenca en estudio tiene un elevado escurrimiento superficial, que dificulta la retención de agua por el sistema. También se observa que los NC tienen su grupo hidrológico B o D, según se corresponda con sus características. Se encontró que los tipos de suelos predominantes en la cuenca en estudio son Hapludoles líticos y Calciudoles típicos (pertenecientes al gran grupo Argiudoles).

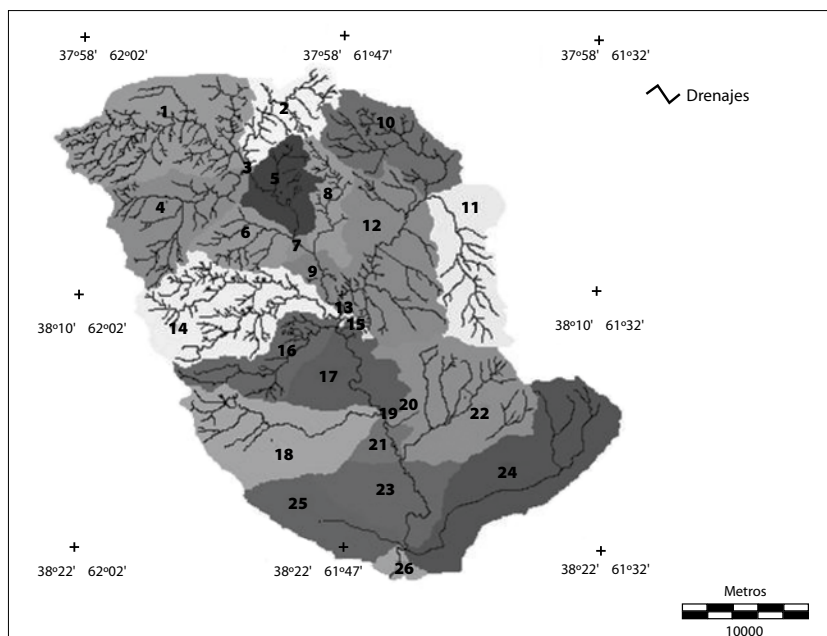


Figura 3. Mapa de subcuencas para la cuenca alta del río Sauce Grande.



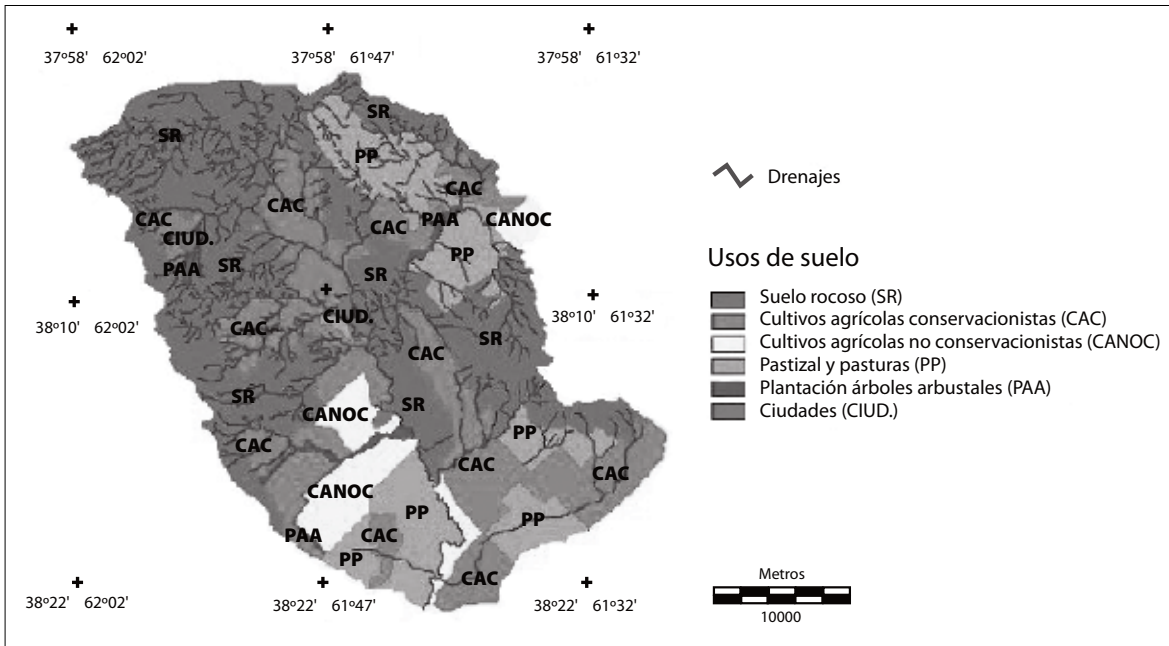


Figura 4. Mapa de usos de suelo para la cuenca alta del río Sauce Grande.

### Resultados de la simulación hidrológica con HEC-HMS

*Método del Hidrograma Unitario Sintético de Clark para las situaciones actual ("A") y propuesta ("C")*

Se presentan los resultados obtenidos con el método del Hidrograma Unitario Sintético de Clark para la tormenta observada y las situaciones A y C. No se incluyeron los resultados de la disminución del caudal pico de la situación "B" dado que no presenta casi diferencia con la "A", pero en la situación "C" la disminución fue importante. En el Cuadro 1 se presentan las subcuencas en donde se simularon prácticas sustentables a partir del cambio en los NC, ordenados en forma creciente; se observa que los NC disminuyeron significativamente.

Las subcuencas 23, 25, 26 y 21 presentan el menor NC (65 y 66) con un nivel de infiltración de 77.29 y 75.75. Estas cuatro subcuencas se caracterizan por presentar un uso del suelo predominantemente ganadero (con pastizal y pasturas), presentando menores problemas de escorrentía superficial frente a un evento de tormenta, si se producen los cambios planteados.

En este mismo contexto encontramos para los valores de caudal pico de la subcuenca 24 (super-

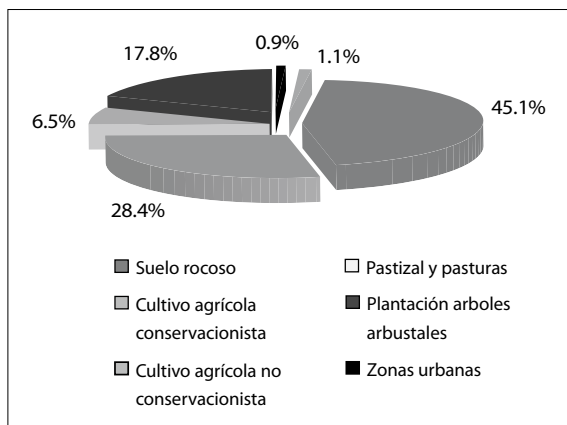


Figura 5. Porcentajes de superficies del uso de suelo en la cuenca alta del río Sauce Grande.

ficie de 101.4 km<sup>2</sup>), presenta un caudal pico de 18.8 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, menor que la subcuenca 18. Esto puede explicarse por un NC inferior (75) y por lo tanto una mayor infiltración (60.34 mm). Por otro lado, en el caso de la subcuenca 22, la cual presenta el mayor valor de caudal pico (28.9 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), la misma se caracteriza por presentar una baja pendiente media comparada con las demás 1.5%;

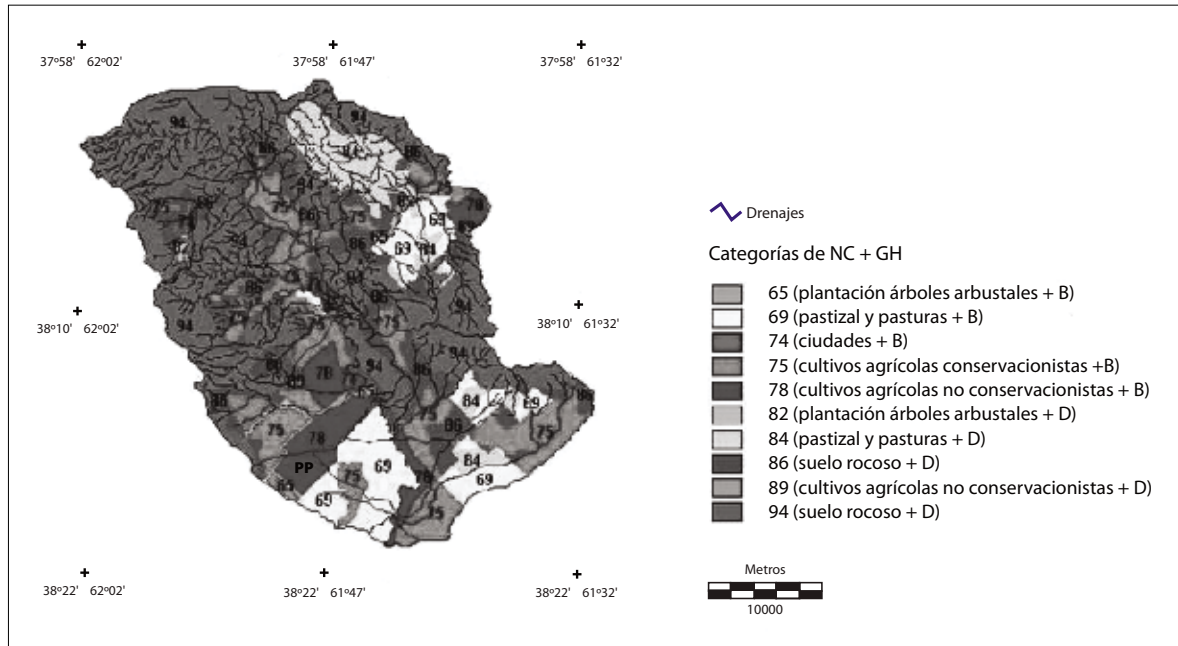


Figura 6. Mapa de Número de Curva con las 26 subcuencas pertenecientes a la cuenca alta del río Sauce Grande.

pero su infiltración es muy escasa (44.09 mm), ya que presenta un 38.70% de suelo rocoso.

El Cuadro 2 se ordenó en forma ascendente por disminución del NC ponderado, y de esta manera se puede obtener un mejor análisis:

Para las subcuencas (24, 12, 8, 10, 22, 2, 18 y 19) que cambian el NC entre 1 y 4%, el caudal pico disminuye entre 0 y 13%, mientras que la infiltración aumenta entre 4 y 18%.

Cuando el cambio del NC se ubica entre 5 y 11% (para las subcuencas 23, 25, 26 y 11), la disminución del caudal pico es más acentuada, variando entre 17 y 31%, con infiltraciones que se incrementan entre un 18 y 21%. La subcuenca 21 presenta el mayor valor de cambio en el NC (12%), con un aumento de infiltración del 26%, y una disminución del caudal pico del 34%.

En todas las subcuencas, la variación del tiempo al pico es mínima (30 minutos) entre ambas situaciones. En tal sentido, con las nuevas condiciones de uso del suelo propuestas, en las que solo se considera pastizal con broza, pasto mezclado con pajonal con la mejor cobertura y cultivos agrícolas conservacionistas, el caudal pico de la cuenca en estudio disminuyó un 7%, pasando de 229.2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

en la situación inicial (A) a 213.7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en la situación final (C).

Observando las Figuras 7 y 8, las cuales contienen los hidrogramas para las dos situaciones modeladas, se puede ver que la situación C presenta una disminución del caudal pico en las dos gráficas. Sin embargo, pese a que disminuye el caudal, no varía el tiempo al pico para la cuenca considerada en su totalidad.

### Márgenes brutos vs modelación hidrológica

Según Aduriz *et al.* (2003:1) y en coincidencia con la clasificación de usos del suelo realizada, la superficie de la cuenca alta del río Sauce Grande utilizada por la agricultura es del 28%, siendo los principales cultivos el trigo, soja y girasol, y en menor proporción avena, maíz y sorgo. La ganadería ocupaba el 72% restante (dado que avanza en los territorios rocosos), clasificando a la zona como *predominantemente ganadera* donde los vacunos representaban más del 90% de las cabezas. La actividad agrícola se concentraba en los terrenos con bajas pendientes, mientras que la ganadería en las zonas más escarpadas, aunque la mayoría de los establecimientos realizan ambas. El Cuadro 3

Cuadro 1. Cambios en los NC asignando a las subcuencas que tenían pastizal y pasturas, números de curva de “pastizal, con broza, pasto mezclado con pajonal, con la mejor cobertura”

Situación Actual “A”						Situación “C” Pastizal y Pasturas a “Pastizal, con broza, pasto mezclado con pajonal, con la mejor cobertura”				
Subcuenca	NC Total Ponderado	Total Escurrimiento Directo (mm)	Total Infiltración (mm)	Caudal Pico (m <sup>3</sup> .s-1)	Tiempo al Pico	NC Total Ponderado	Total Escurrimiento Directo (mm)	Total Infiltración (mm)	Caudal Pico (m <sup>3</sup> .s-1)	Tiempo al Pico
23	73	41.98	64.02	6.7	11:00	65	28.71	77.29	4.6	11:30
25	73	41.98	64.02	13.1	04:00	66	30.25	75.75	9.5	04:30
26	73	41.98	64.02	1.3	19:30	66	30.25	75.75	0.9	20:00
21	75	45.66	60.34	3.5	05:30	66	30.25	75.75	2.3	06:00
24	78	51.46	54.54	21.2	01:30	75	45.66	60.34	18.8	01:30
18	80	55.52	50.48	19.1	21:00	79	53.47	52.53	18.4	21:00
12	84	41.91	38.39	11.8	17:00	81	36.54	43.76	10.3	17:30
11	85	43.81	36.49	14.4	15:30	81	36.54	43.76	12	15:30
22	85	66.37	39.63	31	11:30	83	61.91	44.09	28.9	12:00
8	87	47.77	32.53	14	20:00	84	41.91	38.39	12.4	20:30
10	87	47.77	32.53	18.6	06:00	84	41.91	38.39	16.3	06:30
19	87	71.02	34.98	1.9	09:30	86	68.67	37.33	1.9	09:30
2	89	51.98	28.32	20.4	21:00	87	47.77	32.53	18.8	21:00

Cuadro 2. Cambios en porcentajes del caudal pico e infiltración en las subcuencas que se modificaron los NC de pastizal y pasturas a “pastizal, con broza, pasto mezclado con pajonal, con la mejor cobertura”

Subcuenca	NC ponderado situación “A”	NC ponderado situación “C”	% de disminución del NC ponderado	% de cambio del caudal pico	% de cambio de la infiltración
21	75	66	-12	-34	26
23	73	65	-11	-31	21
25	73	66	-10	-27	18
26	73	66	-10	-31	18
11	85	81	-5	-17	20
24	78	75	-4	-11	11
12	84	81	-4	-13	14
8	87	84	-3	-11	18
10	87	84	-3	-12	18
22	85	83	-2	-7	11
2	89	87	-2	-8	15
18	80	79	-1	-4	4
19	87	86	-1	0	7

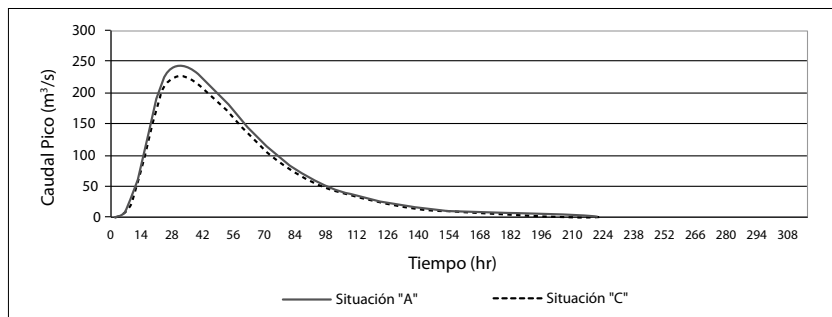


Figura 7. Hidrogramas de las situaciones A y C para la cuenca alta del río Sauce Grande. Tormenta observada.

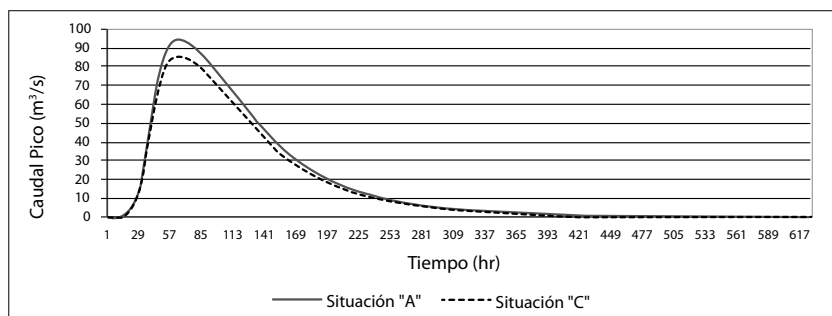


Figura 8. Hidrogramas de las situaciones A y C para la cuenca alta del río Sauce Grande. Recurrencia 1:1.

presenta los márgenes brutos y costos de conversión para los modelos agrícola y ganadero correspondientes a la cuenca. Para el caso del modelo agrícola, el costo de conversión es de U\$S 93.70 por hectárea productiva.

Para el caso ganadero deben hacerse consideraciones adicionales. El margen bruto por hectárea para el año 1 incluye el costo de implantación de la pastura en el 20% del establecimiento, tanto para la situación actual como para la propuesta.

Sin embargo, para esta última, la conversión del manejo de la base forrajera, pasando de pastoreo continuo a pastoreo rotativo, implica además una inversión inicial en alambrados que permita la división del establecimiento en lotes o potreros. En tal sentido, el costo de conversión de una situación a la otra resulta ser de U\$S 111.63 para el año inicial considerado. En los años siguientes, el margen bruto para la situación propuesta resulta mayor que el de la situación actual, en U\$S 22.48/ha.

Cuadro 3. Margen bruto y costo de conversión para modelos agrícola y ganadero al adoptar actividades agropecuarias conservacionistas propuestas

MODELO AGRÍCOLA	Situación actual	Situación propuesta	Costo de conversión por año y por ha
	Labranza convencional y rotación continua	Siembra directa y abono verde	
Margen bruto (U\$S/ha)	USD 344.47	USD 250.76	USD -93.70
MODELO GANADERO	Situación actual	Situación propuesta	Costo de conversión por ha
	Pastizal y pastura con pastoreo continuo	Pastizal y pastura con pastoreo rotativo	
Margen bruto año 1 (U\$S/ha)	USD -14.90	USD -126.53	USD -111.63
Margen bruto años posteriores (U\$S/ha)	USD 165.10	USD 187.58	USD 22.48
VAN a 10 años (tasa de descuento: 15%)	USD 772.90	USD 768.53	USD -4.37

Sin embargo, cuando se realiza un flujo de caja para un periodo de diez años, considerando una tasa de descuento anual del 10%, pese al mayor margen bruto anual del modelo propuesto, el valor actual neto resultante es inferior en U\$S 111.63/ha respecto a la situación actual, debido a la fuerte incidencia de la inversión inicial en alambrados.

El Cuadro 4 muestra las subcuencas con sus respectivas áreas de prácticas no conservacionistas (en pastizales, pasturas y cultivos agrícolas) a reemplazar por conservacionistas. Se presenta el diferencial de margen bruto para las subcuencas, calculado al cambiar de la situación actual "A" a la situación propuesta "C". El diferencial de margen bruto, calculado para los cambios en dichas subcuencas, indica de alguna forma el valor mínimo que el productor podría aceptar a cambio de modificar sus prácticas productivas.

El Cuadro 5 exhibe la cuantificación de los cambios físicos que se producen en la cuenca cuando los productores adoptan las prácticas conservacionistas, medidos a través de cambios

en los caudales pico calculados con el modelo hidrológico.

El análisis de los resultados presentados indica que con los cambios propuestos para las recurrencias estimadas, existe una diferencia en el escurrimiento de entre 2 y 4 millones de m<sup>3</sup> con un costo total de compensación de U\$S 2 455 886. Este monto si bien es impreciso debido a los supuestos de los modelos y que se utiliza para los cálculos una tecnología de producción estándar, constituye un primer aporte. Este monto, por ser una transferencia, no constituye un costo de oportunidad social y de concretarse generará beneficios futuros extras dados por la mayor producción y mejora ambiental. Este trabajo asume que el agua resultante de la disminución en el escurrimiento se infiltra y pasa como reserva del sistema en las napas freáticas, posteriormente puede ser utilizado por la población a través de la extracción en los pozos. Si bien este supuesto es poco verosímil, para una primera aproximación y ante la falta de información sobre la dinámica del agua subterránea,

Cuadro 4. Diferencial de margen bruto por subcuenca al adoptar actividades agropecuarias conservacionistas propuestas

Subcuenca	Pastizal y pasturas		Cultivo agrícola		Total	
	Superficie	Diferencial margen bruto	Superficie	Diferencial margen bruto	Superficie	Diferencial margen bruto
	(ha)	U\$S	(ha)	U\$S	(ha)	U\$S
2	1 059.54	-118 277.76	0.00	0.00	1 059.54	-118 277.76
8	794.83	-88 727.64	0.00	0.00	794.83	-88 727.64
10	2 338.71	-261 073.28	0.00	0.00	2 338.71	-261 073.28
11	1 515.34	-169 159.61	894.83	-83 849.99	2 410.17	-253 009.60
12	2 845.67	-317 665.92	0.00	1.00	2 845.67	-317 664.92
18	11.39	-1 270.97	2 133.31	-199 900.63	2 144.69	-201 171.60
19	0.00	0.00	21.31	-1 996.77	21.31	-1 996.77
21	705.20	-78 723.03	100.47	-9 414.38	805.67	-88 137.41
22	674.43	-75 287.97	43.31	-4 058.42	717.74	-79 346.39
23	2 475.25	-276 316.36	1 016.92	-95 289.98	3 492.17	-371 606.34
24	2 846.90	-317 803.32	56.54	-5 298.29	2 903.44	-323 101.61
25	1 881.98	-210 088.37	1 042.00	-97 639.97	2 923.98	-307 728.34
26	286.33	-31 963.25	128.93	-12 081.55	415.26	-44 044.80
Total	17 435.56	-1 946 357.49	5 437.62	-509 528.98	22 873.18	-2 455 886.47

Cuadro 5. Cambio en caudales picos, escurrimiento y margen bruto total para la cuenca por adoptar actividades agropecuarias conservacionistas propuestas

Recurrencias		1:1	1:3	1:8	Observada
No Conservacionista	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	94.4	203.80	262.70	243.30
	Escurrimento (m <sup>3</sup> )	20 324 200	44 707 200	57 613 700	54 039 800
Conservacionista	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	85.4	189.10	245.70	225.90
	Escurrimento (m <sup>3</sup> )	18 295 100	41 332 200	53 706 500	50 070 600
Diferenciales	Δ Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	9	14.70	17.00	17.40
	% de Cambio	-10%	-7.2%	-6.5%	-7.2%
	Δ Escurrimento (m <sup>3</sup> )	2 029 100	3 375 000	3 907 200	3 969 200
	% de Cambio	-10%	-7.5%	-6.8%	-7.3%
	Δ Margen Bruto U\$\$	-2 455 886			
	U\$\$ / m <sup>3</sup>	1.21	0.73	0.63	0.62

se considera aceptable. Knapp *et al.* (2003:291) encuentran que los costos de transferencia del agua en California, desde una cuenca con abundancia de agua a otra con escasez, se están incrementando exponencialmente, con lo cual solucionar el problema de abastecimiento dentro de la misma cuenca es mucho más eficiente. Es importante remarcar que los costos disminuyen a medida que aumenta la lluvia y en tormentas extremas.

Por otra parte, y en coincidencia con Vatn (2010), se considera que los PSA facilitan la solución de ciertos problemas ambientales, y también pueden a su vez fortalecer el trabajo desde un enfoque cooperativo, ya que es fundamental partir de la base del consenso y el trabajo en conjunto entre los distintos actores involucrados.

## CONCLUSIÓN

La creciente escasez y competencia por el uso del agua en la cuenca alta del río Sauce Grande, lleva a profundizar los análisis que relacionen el aumento de la oferta de agua con sus costos económicos. Este trabajo responde a cómo dichos costos pueden ser incorporados en un modelo que integra el subsistema hidrológico con el económico y permite apoyar la planificación del recurso hídrico a través de un PSA.

Al existir una relación directa entre la sustentabilidad del sistema productivo y la capacidad

de infiltración de agua del sistema hidrológico, cuantificada mediante el programa HEC-HMS, se pudo establecer que el costo de incrementar la disponibilidad de un metro cúbico de agua oscila entre U\$\$ 0.60 y U\$\$ 1.20 en diferentes escenarios de precipitaciones. Este estudio se debería complementar con trabajos que cuantifiquen los beneficios de las prácticas conservacionistas como por ejemplo: aporte de materia orgánica, mejora de la estructura y de la agregación del suelo, que redundarán en el aumento de rendimiento de cultivos además de beneficios ambientales (como mejora en la calidad del agua) y sociales (redistribución de ingresos), que surgirían de incorporar el PSA en un plan de ordenamiento territorial, como forma de promover el desarrollo local.

Para avanzar en este sentido se debe realizar una valoración contingente para establecer la disponibilidad a pagar por los usuarios del servicio ambiental. Si bien los valores obtenidos son elevados en relación con los montos manejados en Argentina, la creciente escasez del vital elemento en la región llevará a la necesidad de internalizar los costos de retención de agua, en la tarifa de agua potable, sentando las bases para crear un mecanismo de pagos por servicios ambientales.

## REFERENCIAS

- Aduriz, M. A., A. O. Gargano, P. Chimenno, M. C. Saldugaray y V. P. Conti (2003), "Caracterización de los agrosistemas predominantes de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande, Argentina", *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 32, núm. 003, pp. 1-23.
- Barrera, M. D. y J. L. Frangi (1994), "Estructura de la biomasa de pastizales en Sierra de la Ventana (Buenos Aires, Argentina)", *Revista del Museo de La Plata*, tomo XIV, Botánica N° 100, La Plata, Argentina, pp. 243-263.
- Burstein, J., G. Chapela, J. Aguilar y E. de León (2002), *Informe sobre la propuesta de pago por servicios ambientales en México*, Informe del proyecto "Pago por servicios ambientales en Las Américas", auspiciado por la Fundación FORD y ejecutado por Fundación PRISMA, México, pp. 1-103 [http://www.prisma.org.sv/pubs/Mexico\_o.pdf].
- Bragachini, M. (2009), *Integración vertical de los sistemas productivos argentinos*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Cameron, S. E., K. J. Williams and D. K. Mitchell (2008), *Efficiency and concordance of alternative methods for minimizing opportunity costs*.
- Chow, Ven Te (1994), *Hidráulica de canales abiertos*, McGraw-Hill, pp. 1-373.
- Cuevas, Y. y S. Zalba (2009), "Control de pinos invasores en el parque provincial Ernesto Tornquist (Buenos Aires): áreas prioritarias y análisis de costos", *BioScriba*, vol. 2, núm. 2, pp. 76-89.
- Delgado, M. I., G. E. Senisterra, F. J. Gaspari, A. Rodríguez Vagaría y S. Besteiro (2009), "Variación del Régimen Pluviométrico en el Sistema de Serrano del Suroeste Bonaerense, Argentina", *Revista Electrónica REDLACH*, Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas, núm. 1, año 5, diciembre.
- Denegri, G. y F. Gaspari (2010), "Lineamientos para la formulación de pagos por servicios ambientales. Estudio de caso: alta cuenca del río Sauce Grande", *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, núm. 46 (2010-1), España, pp. 96-100.
- FAO (2003), *El foro regional sobre sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*, Informe final, Arequipa, Perú, pp. 1-27 [http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/infopinpsa.pdf].
- Gaspari, F. J., G. Senisterra, M. I. Delgado, A. M. Rodríguez Vagaría y S. I. Besteiro (2009), *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*, La Plata, Argentina, pp. 1-321.
- González, P. (2008), *Estudio de mercado para la instalación de un complejo de cabañas en Sierra de la Ventana y Villa Ventana, provincia de Buenos Aires*, tesis de Licenciado en Hotelería, Universidad Abierta Interamericana [http://imgbiblio.vaneduc.edu.ar/fulltext/files/TC086133.pdf].
- Heinz, I., M. Pulido Velázquez, J. Lund and J. Andreu (2007), "Hydro-economic modeling in river basin management: implications and applications for the European Water Framework Directive", *Water Resources Management*, July, vol. 21, Issue 7, pp. 1103-1125.
- INTA (1990), *Atlas de Suelos de la República de Argentina*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- INTA (2009), "Indicadores económicos para la gestión de empresas agropecuarias. Bases metodológicas", Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, pp. 1-44 [http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/indices/tematica/econ/Indicadores\_economicos.pdf].
- Knapp, K. C., M. Weinberg, R. Howitt and J. F. Posnikoff (2003), "Water transfers, agriculture, and groundwater management: a dynamic economic analysis", *Journal of Environmental Management*, no. 67, pp. 291-301.
- López Cadenas del Llano, F. (1998), "Restauración hidrológica forestal y control de la erosión", *Ingeniería Ambiental*, Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España.
- Miranda Aragón, L., A. L. Ibáñez Castillo, J. R. Valdez Lazalde y P. Hernández de la Rosa (2009), "Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de período de retorno del río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo, México", *Agrociencia*, vol. 43, núm. 4, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Redalyc) [http://redalyc.uaemex.mx/pdf/302130211257001.pdf].
- Porrás, I., M. Grieg-Gran and N. Neves (2008), *All that glitters: a review of payments for watershed services in developing countries*, vol. 11, London, U.K.
- SCS (1972), *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S. Dept. Of Agriculture, Soil Conservation Service, disponible en U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Thornthwaite, C. W. (1948), "An approach towards a rational classification of climate", *Geographical Review*, no. 38, pp. 55-94.
- Vatn, A. (2010), "An institutional analysis of payments for environmental services", *Ecological Economics*, no. 69, pp. 1245-1252.
- Villavicencio, A. (2009), "Propuesta metodológica para un Sistema de Pago por Servicios Ambientales", *Cuadernos Geográficos*, Universidad de Granada, Granada, vol. s/n, pp. 29-44.
- Volk, M., J. Hirschfeld, A. Dehnhardt, G. Schmidtd, C. Bohna, S. Lierscha and P. Gassman (2008), "Integrated ecological-economic modelling of water

- pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin”, *Ecological Economics*, vol. 66, Issue 1, 15, pp. 66-76.
- Wunder, S., S. Engel and S. Pagiola (2008), “Taking stock: a comparative analysis of payments for environmental services programs in developed and developing countries”, *Ecological Economics*, vol. 65, pp. 834-52.
- Zhongbo, Y. (recuperado de internet, julio de 2011), Apuntes del Curso “Principles of Hydrology”, University of Nevada, Las Vegas [<http://hydro.nevada.edu/courses/gey711/week06.pdf>].