

Evaluación del impacto hidrológico de una forestación de *Eucalyptus viminalis* Labill. en un ambiente típico de la Llanura Pampeana, Argentina

Germán Marcelo Milione^{1*}; Claudio Ramón Mujica²; Sergio Andrés Bea²; Javier Enrique Gyenge³

¹Cátedra de Dasonomía (UNCPBA). Av Rca de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina; ² CONICET, IHLLA. Av. Rca de Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina; ³ CONICET - AER Tandil, EEA Balcarce INTA, Gral. Rodríguez 370 (7000), Tandil, Buenos Aires, Argentina; *gmilione@faa.unicen.edu.ar

Milione Germán Marcelo; Claudio Ramón Mujica; Sergio Andrés Bea; Javier Enrique Gyenge (2020). Evaluación del impacto hidrológico de una forestación de *Eucalyptus viminalis* Labill. en un ambiente típico de la Llanura Pampeana, Argentina. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-14. <https://doi.org/10.24215/16699513e056>

Las transiciones de sistemas herbáceos a leñosos, suelen tener las improntas hídricas más significativas. Este efecto sobre el recurso hídrico, tanto en el suelo como en el acuífero freático, puede magnificarse en territorios llanos. Para analizar la dinámica del agua en el suelo y acuífero de manera continua, se establecieron dos parcelas en un ambiente típico de la Llanura Pampeana, una ubicada en una forestación con *Eucalyptus viminalis* Labill. y otra en un pastizal pareado. En la forestación se midió la transpiración promedio, la redistribución de las precipitaciones en los componentes trascolación, escurrimiento fustal e interceptación y en ambas parcelas la profundidad del acuífero freático y la humedad del suelo a 20 y 50 cm de profundidad durante 2 años. Asimismo, se realizó una simulación numérica para estimar la transpiración de los cultivos de verano más comunes en la región. En este estudio no se verificó una conexión de la vegetación con el acuífero. En la parcela forestal se encontró un perfil de suelo más seco que en la parcela herbácea y se registró una redistribución de los componentes de la precipitación similar a la reportada por otros autores en la región. Además, los valores medios de transpiración en la forestación fueron similares a los resultados obtenidos mediante el modelado numérico de un cultivo de *Glycine max*. Se concluyó que el horizonte petrocálcico cumple un rol fundamental en el ciclo hidrológico y que los menores valores de humedad del suelo bajo la parcela forestal no generan un impacto negativo sobre el acuífero freático.

Palabras clave: forestación de pastizales; hidrología de llanura; uso de agua; horizonte petrocálcico

Milione Germán Marcelo; Claudio Ramón Mujica; Sergio Andrés Bea; Javier Enrique Gyenge (2020). Evaluation of the hydrological impact of a forestation of *Eucalyptus viminalis* Labill. in a typical environment of the Pampas plain, Argentina. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-14. <https://doi.org/10.24215/16699513e056>

The transitions from herbaceous to woody systems, usually have the most significant water imprints. This effect on the water resource, both in the soil and in the aquifer, can be magnified in flat territories. To analyze the dynamics of water in the soil and aquifer continuously, two plots were established in an environment typical of the Pampas plain, one located in a forestation with *Eucalyptus viminalis* Labill. and another in a paired grassland. In the forestation the average transpiration, the redistribution of the precipitations in the components; direct precipitation, stemflow and interception were measured and in both plots the depth of the aquifer and the soil moisture at 20 and 50 cm depth over a period of 2 years. Also, a numerical simulation was carried out to estimate the transpiration of the most common summer crops in the region. In this study a connection of the vegetation with the aquifer was not verified. A drier soil profile was found in the forest plot than in the herbaceous plot and a redistribution of rainfall components similar to that reported by other authors in the region was recorded. In addition, the average values of transpiration in forestation were similar to the results obtained by numerical modeling of a *Glycine max* culture. It was concluded that the petrocalcic horizon plays a fundamental role in the hydrological cycle and that the lower values of soil moisture under the forest plot do not generate a negative impact on the groundwater.

Keys words: grassland afforestation; plain hydrology; water use; petrocalcic horizon

<https://revistas.unlp.edu.ar/revagro>

Recibido: 07/01/2020

Aceptado: 15/04/2020

Disponible on line: 07/12/2020

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina.

1



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-No Comercial-CompartirIgual 4.0 internacional

INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios mencionan que aquellos cambios en la vegetación que involucran transiciones de sistemas herbáceos a leñosos, suelen tener las improntas hídricas más significativas (Zhang *et al.* 2001; Brown *et al.* 2005; van Dijk & Keenan 2007). Asimismo Lane & BassiriRad (2005) después de haber contrastado la capacidad de utilización del agua en el suelo y de nutrientes, destacaron que cada conjunto particular de vegetación tiene diferentes efectos en la evapotranspiración, la escorrentía y los patrones de drenaje profundo. Así, este efecto sobre el recurso hídrico podría magnificarse tratándose de territorios llanos donde casi la totalidad de la precipitación que reciben vuelve a la atmósfera por transpiración o evaporación directa (Scanlon *et al.* 2006; Jobbágy *et al.* 2008).

La presencia de una estructura leñosa genera una redistribución de las precipitaciones; el agua puede atravesar el canopeo del árbol para llegar al suelo (trascolación) o escurrir por los tallos de ramas y tronco (escurrimiento fustal). La trascolación es el elemento más significativo, mientras que el escurrimiento fustal tendría relevancia porque penetra muy cerca a la base del tronco y de esta manera puede infiltrar más rápida y efectivamente (Poore & Fries, 1987). Sumado a ello, en comparación con un ambiente de pastizal, se ve incrementada la interceptación de lluvia y evapotranspiración, redundando en una disminución de los procesos de drenaje (flujos superficiales y subsuperficiales, drenaje profundo) y provocando un menor contenido de humedad en el suelo (Le Maitre *et al.* 2000, Jobbágy & Jackson 2004, Huber *et al.* 2010). Así se ha descrito de manera amplia que las especies leñosas pueden consumir más agua en un plazo interanual, por evapotranspiración que otros tipos de vegetación, como los pastizales naturales o los cultivos de secano (Cao *et al.*, 2011; Zhang *et al.* 2001; Hibbert, 1967; Bosch & Hewlett, 1982). En este sentido, Benyon *et al.* (2006), remarcan que la mayor demanda evapotranspiratoria que caracteriza a las forestaciones es resultado de su mayor porcentaje de interceptación, rugosidad y altura del canopeo, su menor albedo, y a su capacidad de acceder a fuentes de agua más profundas (Zhang *et al.*, 1999, Jobbágy & Jackson 2004). Estos factores, pueden generar que la recarga de agua subterránea bajo los bosques sea menor que la de los pastos y cultivos, incluso cercana a cero, pudiendo de esta manera reducir los niveles del acuífero (Robins 2004). Así, en los pastizales pampeanos, las forestaciones podrían cambiar el régimen hidrológico de una situación de recarga a otra de descarga neta cuando las precipitaciones son inferiores a 1100 mm año⁻¹ (Nosetto *et al.* 2008). Este mayor consumo por parte de las forestaciones puede generar una depresión del acuífero en la zona forestal similar al bombeo mecánico. Así, Jobbágy (2009) menciona que puede haber fluctuaciones en la altura de la freática de hasta 10 cm (descensos diurnos, ascensos nocturnos) y que la misma tiene buena correlación con la transpiración. Por otro lado, según Jobbágy *et al.* (2006), las forestaciones estudiadas en la pampa, producen una estabilización de los niveles freáticos a no más de un metro por debajo de los

valores originales como producto del balance entre el aporte de agua subterránea desde áreas adyacentes de pastizal y la evapotranspiración de la masa boscosa. Sin embargo otros autores han demostrado que las plantaciones estudiadas solo fueron capaces de hacer uso del agua freática bajo una combinación de suelos con texturas medias y capa freática superficial y de baja salinidad (Benyon *et al.* 2006).

Este trabajo tiene como objetivo determinar, en un ambiente típico del centro de la provincia de Buenos Aires, el impacto hídrico que puede tener la forestación de ambientes con pastizales, principalmente a través de: a) caracterización de la magnitud y dinámica temporal de los cambios en la profundidad del acuífero freático y b) verificar si el consumo de agua de una forestación es superior a los cultivos más usuales de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio, clima y suelo

El sitio de estudio se encuentra dentro de la llanura Chaco-Pampeana Argentina, una gran extensión del territorio Argentino, ubicada en el centro-este del país entre las latitudes 32° y 40°W, y longitudes 57° y 63°S (SAGPyA 2001).

Las parcelas se establecieron en el Partido de Azul, provincia de Buenos Aires, cuartel VII (Figura 1). Estando circunscriptas en la parte alta de la subcuenca Sur del arroyo Azul, a unos 1200 metros del arroyo y con pendientes menores al 5% (Varni & Usunoff, 1999).

Las coordenadas correspondientes a las cuatro esquinas del lote forestal medidas utilizando un GPS 12 XL Garmin son 37°07'45.60" S y 60°03'41.00" O, 37°08'00.50" S y 60°03'44.30" O, 37°07'43.90" S y 60°03'47.90" S, 37°07'58.60" S y 60°03'50.5" O. La parcela herbácea se encontraba adyacente a la forestación mencionada (37° 8'3.03"S y 60° 3'48.30"O). El clima de la región es templado (Barros *et al.*, 2013), la precipitación promedio anual es de 898,3 mm distribuidos en primavera-verano-otoño principalmente y la temperatura media anual de unos 13,8 °C) (observaciones considerando el período 1931 – 1990, World Climate 2013).

Los suelos de la región se describen como Argiudoles típicos y Paleudoles petrocálcicos, que se presentan como una consociación en la carta de suelos Cerro Negro 3760-21-2 (INTA). Se realizó una calicata en cada parcela, para sendas se describió la siguiente secuencia de horizontes (Figura 2): O (0-0,03 m) mantillo mayormente compuesto por hojarasca en distintos grados de descomposición (ausente en la parcela herbácea); Ap (0,03-0,27 m) una capa de textura arcillosa, con estructura granular moderada y fina, muy friable; BA (0,27-0,47 m) también arcilloso, con bloques subangulares moderados que se rompen a granulado, muy friable; Bt1 (0,47-0,59 m) es de textura arcillosa con prismas medianos que se rompen en prismas subangulares medianos, débiles y delgados y abundantes barnices de arcilla; Bt2 (0,59-0,76 m) con textura arcillosa, prismas moderados que se rompen en bloques angulares y subangulares, barnices de arcilla muy comunes y 2Ckkm (0,76-1,06 m) una capa de carbonatos cementados.

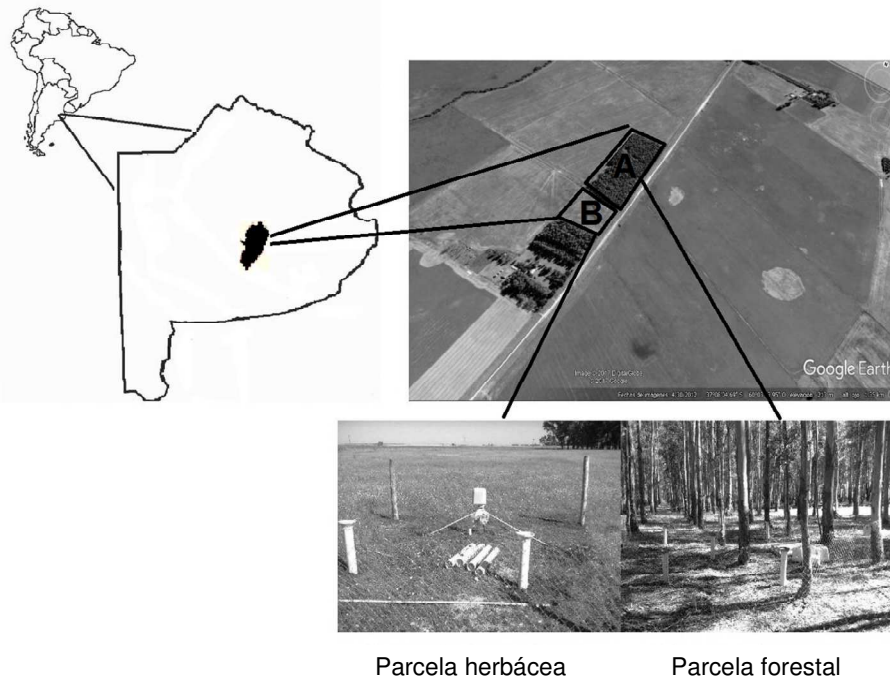


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio dentro de América del Sur, Argentina, provincia de Buenos Aires, partido de Azul. Se puntualiza una vista satelital de las parcelas forestal (A) y herbácea (B) y detalle de las mismas a campo. Imagen satelital Google Earth© 2017

Características del bosque y pastizal

El rodal es coetáneo y homogéneo, integrado por individuos de *Eucalyptus viminalis* Labill., especie comúnmente elegida en la zona debido a su buena adaptación a las condiciones ambientales locales (Cozzo 1976). La forestación tiene forma de paralelepípedo y una superficie total de 7,84 ha. La orientación de su eje mayor es de 20,6° NE, medida utilizando una brújula Suunto. El marco de plantación, medido usando un metro láser marca Bosch DEL 70, es de 3m por 2,5m, de esto se deduce que la plantación fue realizada para la obtención de madera con destino de trituration, en un planteo típico del régimen de talar. Se estableció una parcela permanente de 4 filas por 10 árboles (Figura 1), midiendo *a posteriori* la superficie ocupada. Dentro de la superficie delimitada se midió con cinta diamétrica el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) de todos los árboles vivos. También se determinó la altura de los árboles dominantes (H, m) mediante clinómetro Suunto PM-5/360PC (Suunto, Finlandia). Se consideró como pie individual a todos aquellos fustes mayores de 3 cm de diámetro. A partir de estos estadísticos se estimó la densidad (árboles ha⁻¹) y área basal del rodal (AB, m²) determinada a partir de la sumatoria de todas las áreas individuales obtenidas a partir del DAP. La cobertura forestal se estimó a partir del análisis de fotografías planas mediante el programa ImageJ 1.48v (Wayne Rasband,

National Institutes of Health, EEUU).

El estado de desarrollo del rodal se corresponde con la etapa de crecimiento conocida como fustal, dado que se trata de un arbolado adulto capaz de fructificar y en donde se encuentra un gran número de individuos dominados, muchos de ellos muertos en pie (Montoya Oliver & Mesón García 2004). No tuvo intervenciones silviculturales y el sotobosque está prácticamente ausente, estando conformado en su mayor parte por individuos de *Cynodon dactylon*.

En forma paralela se realizaron mediciones en un pastizal natural semi-alterado por la presencia de especies herbáceas exóticas. Este pastizal tiene una superficie de 3,6 ha y se encuentra actualmente bajo pastoreo de llamas (muy poco frecuentes en la región), caballos, ovejas y ocasionalmente ganado bovino, siempre con alta carga (Figura 1). Dentro del mismo se estableció una parcela 16 m² a la que se clausuró por medio de un alambrado romboidal para evitar el ingreso de los animales (Figura 1). En esta parcela las especies de plantas dominantes pertenecían a las familias; *Poaceas* (*Paspalum quadrifarium*, *Stipa brachychaeta*, *Pithochaetium* spp., *Mellica* spp., *Bothriochloa laguroides*), y *Apiaceas* (*Eryngium paniculatum*). Además, se encontraron especímenes de *Asteraceas* como *Carduus acanthoides*, *Dispsacus fullonum*, *Bellis* spp. e *Hypochaeris* spp..

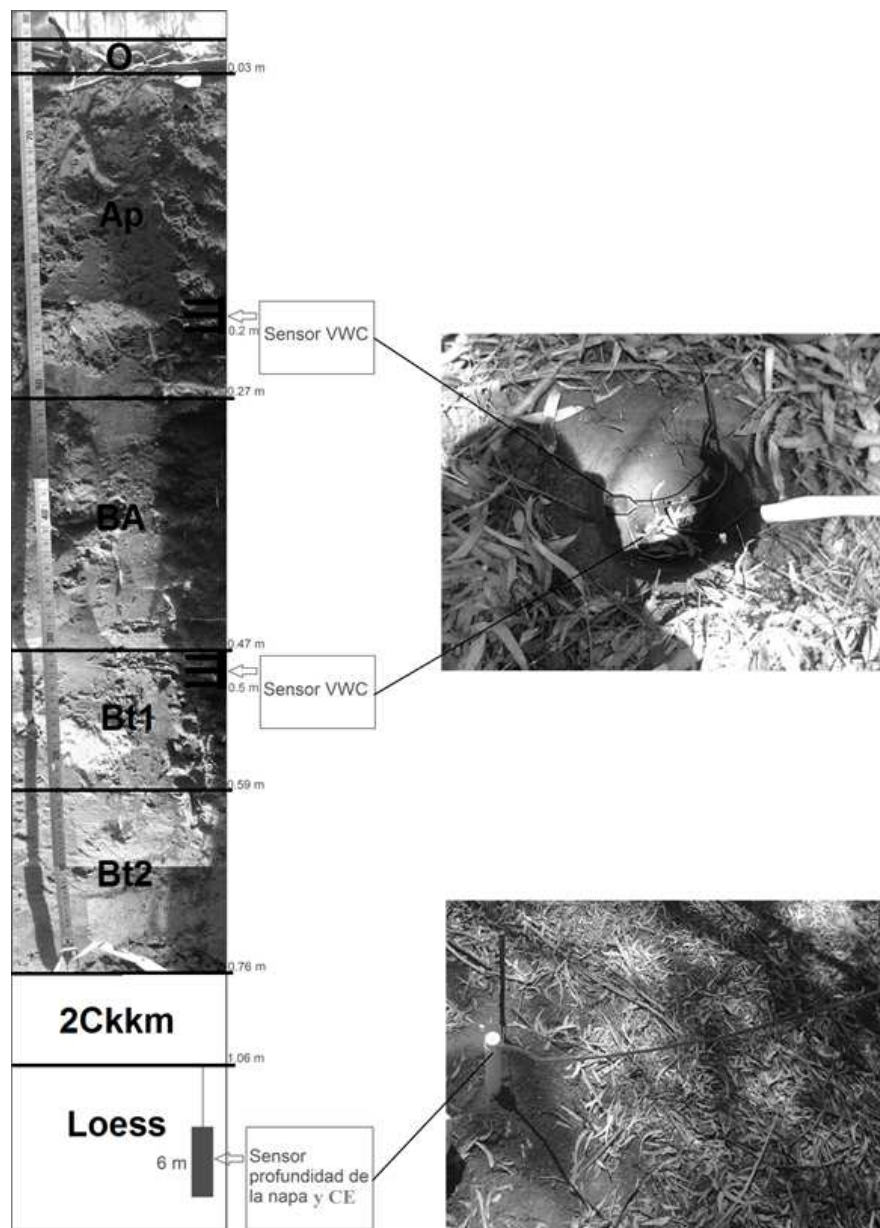


Figura 2. Perfil de suelo en la parcela forestal. Se observan la secuencia de horizontes y la ubicación de los sensores del acuífero freático y suelo.

Mediciones meteorológicas e hidrológicas

Durante un periodo de 2 años, los parámetros atmosféricos, temperatura y humedad relativa, fueron registrados cada hora en la parcela de la forestación con un sensor Cavadevices modelo 2K14. En la misma parcela, la trascolación fue medida con un total de 9 pluviómetros de embudo, los que fueron reubicados mensualmente para evitar errores de muestreo por captación en sitios preferenciales de escurrimiento (Besteiro & Rodríguez Vagaría, 2012).

El escurrimiento fustal se estimó por medio de 4 embudos instalados en el fuste de 4 árboles tipo. La cantidad de agua colectada en ambas mediciones se realizó con una frecuencia mensual o quincenal durante el periodo completo de este trabajo. La precipitación total (pp, mm) fue determinada en la parcela herbácea de la misma forma que la trascolación pero usando dos pluviómetros de embudo. Por último la Interceptación (I, mm) fue calculada según la siguiente ecuación (Besteiro & Rodríguez Vagaría 2012):

$$I = pp - (Tr + Ef)$$

donde

pp: precipitaciones totales que inciden sobre la forestación (mm),

Ef: escurrimiento fustal (mm) y

Tr: trascolación (mm).

Los parámetros del suelo y del acuífero freático (también durante un periodo de 2 años) se registraron cada hora con un colector automático de datos Em50 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EE.UU.). El contenido volumétrico de agua (m^3m^{-3}) se midió cada hora a lo largo del período de tiempo utilizando sensores Decagon 5TE (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EE.UU.) a dos profundidades diferentes (0,2 m y 0,5 m) por duplicado tanto debajo de la forestación como en el pastizal (Figura 2). Los niveles del acuífero freático y su salinidad, se midieron cada hora utilizando sendos sensores Decagon CTD-10 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EE.UU.), instalado en dos freatímetros de seis metros de profundidad tanto en la forestación como en el pastizal (Figura 2). Los niveles del acuífero freático obtenidos con los sensores se verificaron mensualmente con un medidor de nivel de agua manual (medidor de inmersión marca Eijkelkamp).

Estimación de la transpiración individual y a nivel de rodal

Se estimó el flujo de la savia de 9 árboles por medio de la aplicación del método de disipación de temperatura desarrollado por Granier (Granier, 1985 y 1987; Gyenge *et al.* 2010). En cada árbol se instaló un par de termocuplas a lo largo de su eje vertical, a una altura de 1 m desde el piso y separada a 0,1 m entre ellas. Para insertar las termocuplas se extrajo la corteza y el floema utilizando un punzón, utilizando un taladro de baja velocidad para perforar el xilema. Siguiendo la metodología propuesta por Gyenge *et al.* (2010), la termocupla superior se calentó de manera constante mediante la aplicación de energía constante (0,2W), estimándose la diferencia de temperatura con respecto a la termocupla de referencia cada 30 minutos. Los datos se registraron de manera sistemática en un colector automático de datos (Campbell CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah, EE.UU.). Finalmente, se utilizó un aislante aluminizado para evitar el calentamiento del tronco del árbol en la región en donde se insertaron las termocuplas. Así se calculó la densidad del flujo de savia (u , $ml\ cm^{-2}\ min^{-1}$) la cual se define como la cantidad de agua que pasa por un área conocida de madera por unidad de tiempo. La u se estimó a partir de la siguiente ecuación (Granier 1985):

$$u = 0,714 ((\Delta T_{\text{máxima}}/\Delta T_{\text{real}})-1)^{1,231} [ml\ cm^{-2}\ min^{-1}]$$

donde $\Delta T_{\text{máxima}}$ es la diferencia máxima de temperatura entre las termocuplas de cada par (generalmente en la noche) y ΔT_{real} es la diferencia de temperatura en cada momento.

El flujo de savia (F) se obtuvo según la ecuación (Granier 1985):

$$F = \sum (u SA) [ml\ min^{-1}]$$

donde u es la densidad del flujo de savia y SA es el área del xilema activo en cm^2 . Para determinar la profundidad del xilema hidroativo y así estimar el SA, se tomaron muestras de madera de árboles de distinto tamaño utilizando un barreno de Pressler de 0,51cm y se calculó la relación entre SA y DAP, lo cual permite normalizar la cantidad de agua transpirada (Granier *et al.* 1990).

La transpiración diaria promedio para el rodal (T , $mm\ día^{-1}$) fue estimada según la siguiente ecuación propuesta por Granier *et al.* (1990):

$$T = \sum_{i=1}^i (SA_{ci} U p_i \delta \text{ área})$$

donde SA_{ci} es el área del xilema activo de la clase diamétrica i (cm^2); U es el flujo medio diario, calculado como el promedio de la integral diaria de u ($ml\ cm^{-2}\ día^{-1}$); p_i es la proporción adimensional de cada clase diamétrica i ; δ es la densidad de plantación (árboles ha^{-1}) para un área unitaria (Gyenge *et al.* 2003). Cabe mencionar que la transpiración diaria de cada árbol se puede obtener dividiendo T por la densidad de plantación.

Simulación de la transpiración de los cultivos

Para estimar el uso consuntivo de agua que tendrían las especies de verano más cultivadas en la región (*Zea mays*, *Helianthus annuus* y *Glycine max*), en el mismo momento y sitio donde se realizó la forestación, se llevaron a cabo tres simulaciones. Se empleó el programa AquaCrop Versión 5.0 (FAO; www.fao.org/aquacrop), al cual se lo configuró con los datos climáticos del periodo simulado y de suelo obtenidos en la parcela intensiva forestal (temperatura, humedad ambiente, precipitaciones, perfil del suelo, profundidad del acuífero freático y salinidad del mismo) y los parámetros estándar para cada cultivo agrícola (Raes *et al.* 2009, 2012). De esta manera, se simuló la siembra directa de los cultivos agrícolas para el 15 de noviembre del 2015, a una densidad de plantación para *Zea mays*, *Helianthus annuus* y *Glycine max* de 7,5 plantas m^{-2} , 5,8 plantas m^{-2} y 33 plantas m^{-2} respectivamente. Usando InfoStat versión 2011 (www.infostat.com.ar), se verificaron las suposiciones de ANOVA y se aplicó test de LSD de Fisher ($p < 0,05$), como una comparación entre los valores de transpiración diaria medidos durante 2 meses en la forestación y modelados en el mismo periodo para los cultivos.

RESULTADOS

Mediciones meteorológicas e hidrológicas

Mediciones meteorológicas

La temperatura media del aire, medida con el sensor ubicado en la parcela forestal durante todo el periodo de estudio, fue de 13,25 °C, siendo la mínima absoluta

de -5°C y la máxima absoluta de 38,1°C. La temperatura media obtenida fue apenas 0,55 °C debajo de la media histórica (World Climate 2013). El año 2016 presentó precipitaciones acumuladas de 728,4 mm, encontrándose 169,9 mm por debajo de la media histórica (898,3 mm según World Climate 2013), mientras que el año 2017 registró 1385,8 mm siendo superior al promedio histórico por 487,5 mm. En la Figura 3 se puede visualizar el acumulado para cada estación del año, de las precipitaciones históricas y registradas.

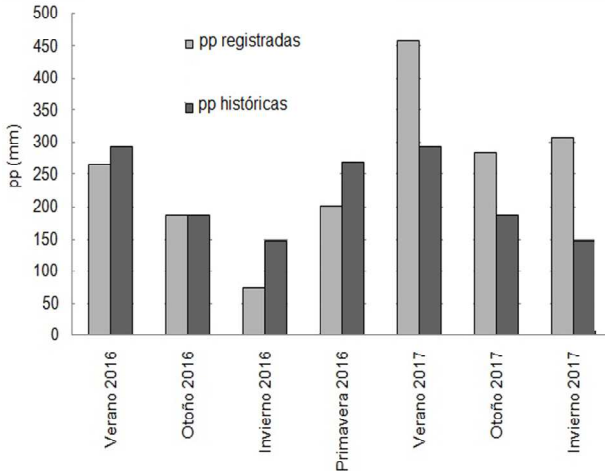


Figura 3. Evolución de las precipitaciones históricas (World Climate 2013) y registradas durante el periodo 2016 - 2017 según estaciones del año. pp = precipitaciones en mm.

En la misma se verifica que durante el invierno, primavera y verano del 2016 las precipitaciones registradas son menores al promedio histórico (solo durante el otoño son similares), mientras que durante las estaciones del año 2017 fueron mayores.

Redistribución de las precipitaciones sobre la forestación

El comportamiento de los componentes resultantes de la redistribución de las precipitaciones sobre la forestación de *Eucalyptus viminalis* se visualiza en las Figuras 4 y 5. Así las ecuaciones fueron lineales con respecto a la precipitación total, mostrando un grado de ajuste (R^2) para trascolación, interceptación y escurrimiento fustal de 0,988, 0,749 y 0,528 respectivamente (Figura 4). Asimismo, la trascolación representa el componente mayoritario con un $80,49 \pm 9,20$ % de las precipitaciones totales, seguido por la interceptación con un $16,40 \pm 8,96$ % y por último el escurrimiento fustal un $3,10 \pm 1,16$ %. El componente interceptación constituye un porcentaje mayoritario cuando las precipitaciones totales son menores y su peso en la distribución porcentual de los componentes disminuye a medida que las precipitaciones son más abundantes (Figura 5). Lo opuesto ocurre con la trascolación que se comporta de manera complementaria a las precipitaciones totales. Finalmente el escurrimiento fustal se mantuvo en un porcentaje estable (Figura 5).

Contenido de agua en el suelo

En general, el contenido de agua en el suelo fue mayor en la parcela herbácea que en la forestal, mostrando la primera unos valores mínimos similares a los máximos medidos en la parcela forestal (Figuras 6 y 7).

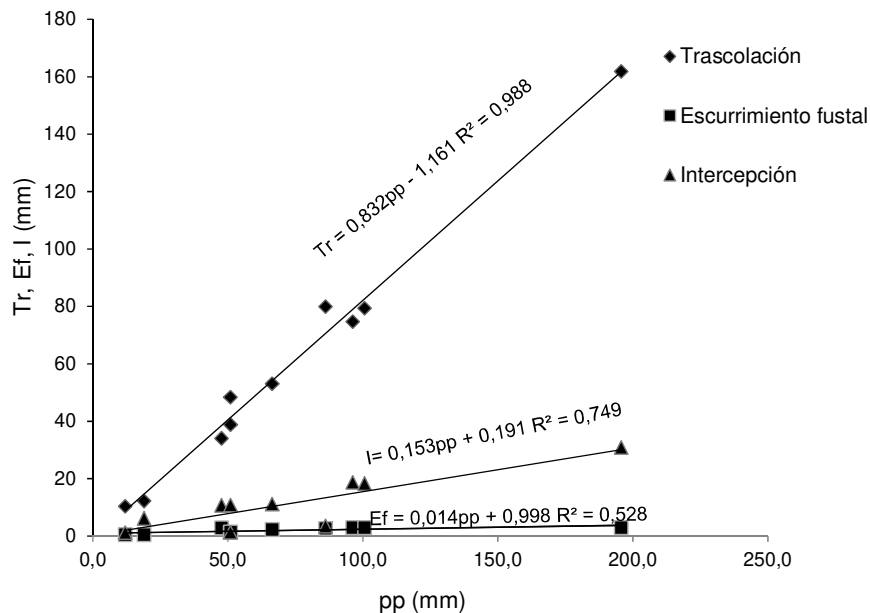


Figura 4. Distribución de los componentes; Tr = trascolación, Ef = escurrimiento fustal e I = Interceptación, en relación con la precipitación total (pp) que incide sobre la plantación de *Eucalyptus viminalis*.

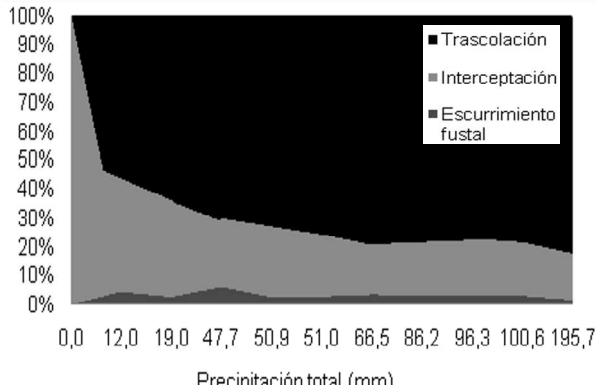


Figura 5. Redistribución porcentual de los componentes; Trascolución, interceptación y escurrimiento fustal sobre la forestación de *Eucalyptus viminalis*.

El contenido promedio de agua en el suelo por estación del año y a 20 cm de profundidad, en la parcela forestal, varió desde un mínimo de $0,17 \pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2016, hasta un máximo de $0,27 \pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2017.

Mientras que en la parcela herbácea se registró un mínimo de $0,25 \pm 0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en la primavera del 2016, hasta un máximo de $0,33 \pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2017.

Por otro lado, a 50 cm de profundidad en la parcela forestal se midió un mínimo de $0,23 \pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2016, hasta un máximo de $0,31 \pm 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2017.

Mientras que en la herbácea se registró un mínimo de $0,30 \pm 0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el verano del 2017 y un máximo de $0,40 \pm 0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el invierno del 2017.

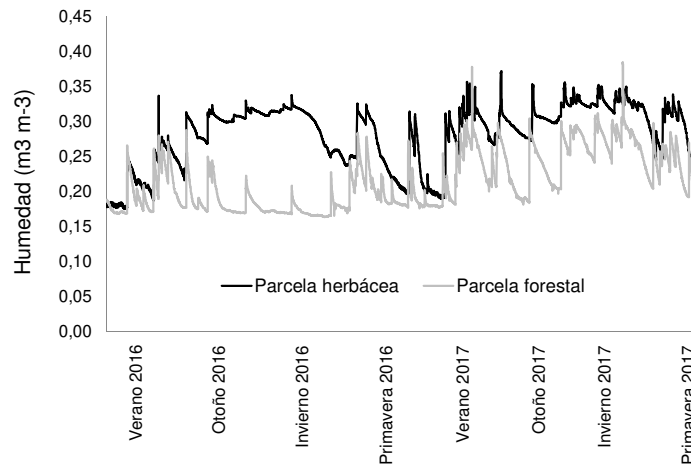


Figura 6. Agua en el suelo promedio ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) a 20 cm de profundidad, para la parcela herbácea y forestal en cada estación del año, a lo largo de los dos años de muestreo (no se muestran los desvíos en orden de tener mayor claridad en el gráfico).

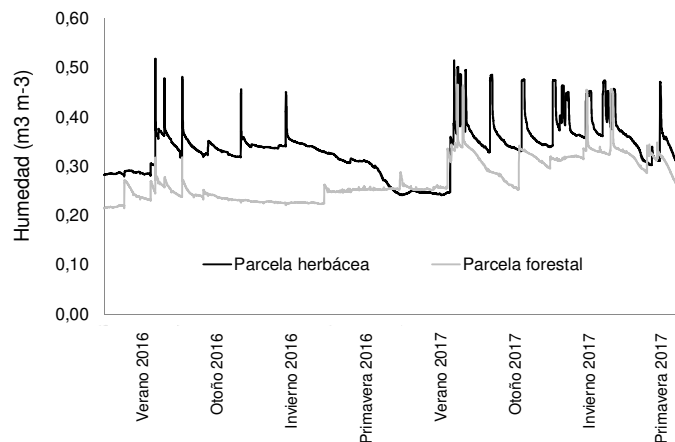


Figura 7. Agua en el suelo promedio ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) a 50 cm de profundidad para la parcela herbácea y forestal en cada estación del año, a lo largo de los dos años de muestreo (no se muestran los desvíos en orden de tener mayor claridad en el gráfico).

Nivel del acuífero freático en relación a la superficie del suelo

Los niveles del acuífero freático variaron a lo largo de los dos años de muestreo, desde un mínimo registrado de 2,16 m durante el invierno del 2017 hasta un máximo de 5,46 m durante el verano del 2017 (Figura 8). Se registro un promedio de $3,87 \pm 0,94$ m y de $4,16 \pm 0,99$ m para las parcelas herbáceas y forestal respectivamente. Aunque las diferencias fueron pequeñas, gráficamente se observó que en la mayor parte del período analizado el acuífero freático bajo la forestación estuvo a menor profundidad que el pastizal (Figura 8). Esto último cambió durante las distintas temporadas de los años analizados; por ejemplo durante la primavera del año 2017 y el otoño del 2016

el nivel del acuífero freático fue mayor en la parcela forestal (Figura 8).

En particular, no se registraron datos en la parcela herbácea durante la primavera del 2016 y el verano del 2017 dado que el nivel del acuífero freático estuvo por debajo de la profundidad del freatómetro instalado (6 m; Figura 2).

A una escala diaria, no se observaron fluctuaciones de los niveles del acuífero freático durante el día y la noche (Figuras 9A y B). El comportamiento para ambas parcelas fue muy similar, tanto cuando la profundidad fue menor en la parcela forestal (septiembre del 2017; Figura 9A) como cuando fue menor en la parcela herbácea (diciembre del 2017; Figura 9B).

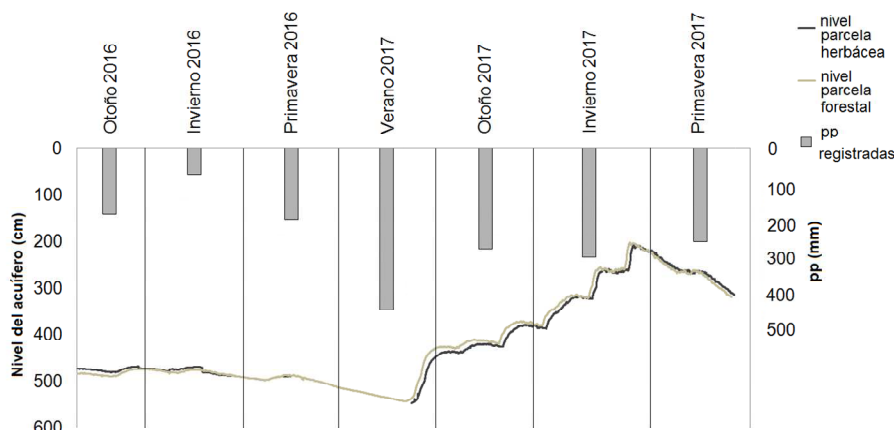


Figura 8. Nivel del acuífero freático (m) para la parcela herbácea y forestal y precipitaciones (pp; mm) registradas en cada estación del año, a lo largo de los dos años de muestreo.

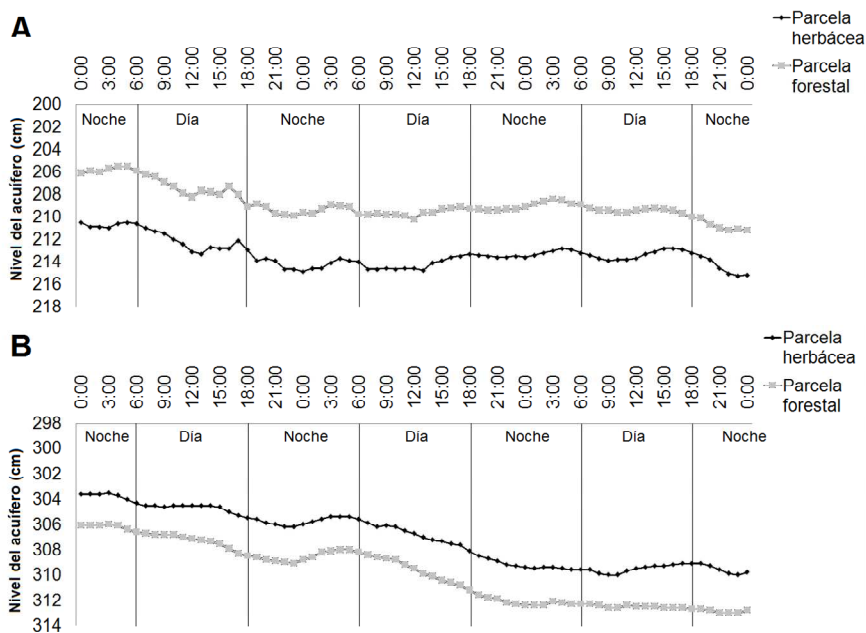


Figura 9. Niveles del acuífero freático (m), a una escala diaria, para la parcela herbácea y forestal. En "A" durante el mínimo nivel alcanzado en este estudio desde el 20/9/2017 al 22/9/17 y en "B" siendo el nivel menor en la parcela herbácea desde el 9/12/2017 al 11/12/2017

Características de la forestación, estimación de la transpiración individual y a nivel de rodal

La forestación bajo estudio carecía de manejo silvícola (podas y raleos). Las variables descriptoras del rodal se pueden observar en la Tabla 1.

En el caso de la estimación de la transpiración, no fue posible lograr una serie anual completa, debido a la imposibilidad de visitar la forestación con la suficiente regularidad para hacer el mantenimiento que los sensores demandan.

Además de los 9 árboles medidos, solo 6 permitieron obtener series completas. Por dicho motivo, se desestimaron series incompletas y sólo fueron considerados para el análisis los meses de febrero y marzo del año 2016.

Durante este período, la T para el rodal fue de $4,89 \pm 1,03 \text{ mm día}^{-1}$, con valores máximo y mínimo de $7,05 \text{ mm día}^{-1}$ y $2,41 \text{ mm día}^{-1}$ respectivamente, siendo registrado un incremento de T luego de eventos de precipitaciones (Figura 10).

Sin embargo, se observó un retraso del incremento de la tasa de transpiración luego de los eventos de precipitación, a pesar que el DPV fue alto (p.e. 26, 27 y 28 de febrero del 2016, Figura 10).

Se obtuvo una buena correlación entre las variables DAP y transpiración individual promedio ($R^2 = 0,858$), observándose un incremento de la transpiración a medida que aumenta el diámetro a la altura del pecho (Figura 11).

Tabla 1. Variables descriptoras del rodal. Especie; δ = Densidad (árboles ha^{-1}); DAP = diámetro del fuste a 1,30 m; AB = área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$); H = altura promedio (m); Vol.sc = volumen sin corteza; Cob. = cobertura aérea del dosel arbóreo (%) y Edad en años desde la plantación.

Especie	δ ($\text{arb.}\text{ha}^{-1}$)	DAP (cm)	AB (m^2)	H (m)	Fallas (%)	Vol.sc (m^3ha^{-1})	Cob. (%)	Edad (años)
<i>E.viminalis</i>	1033,3	22,5 \pm 8,5	46,9	24,9 \pm 2,9	31,6	293,7	66,6 \pm 4,4	19

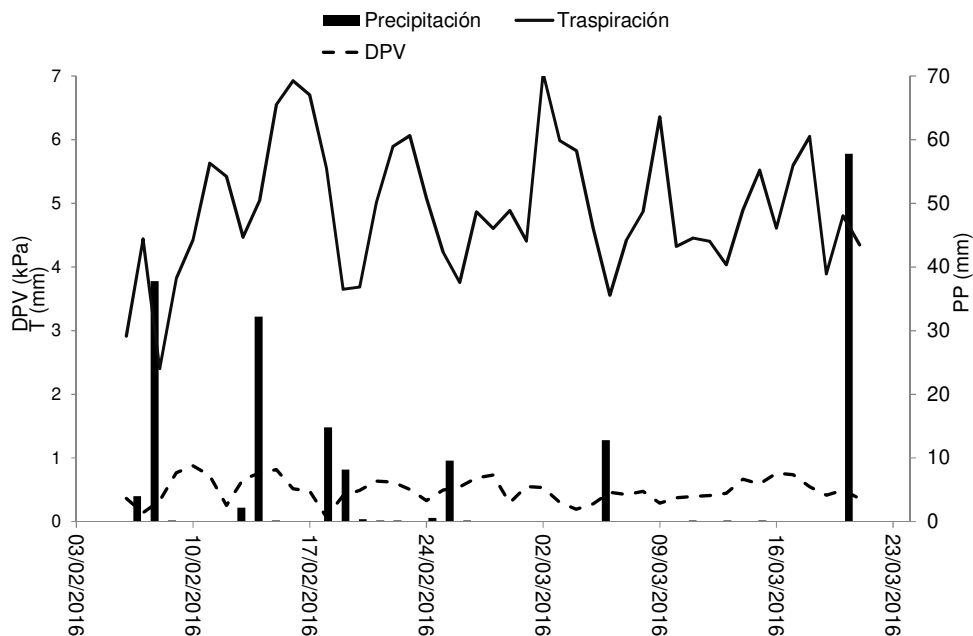


Figura 10. Precipitación (pp, mm), transpiración promedio (T; mm día^{-1}) y déficit de presión de vapor (DPV; kPa) durante los meses de febrero y marzo del 2016.

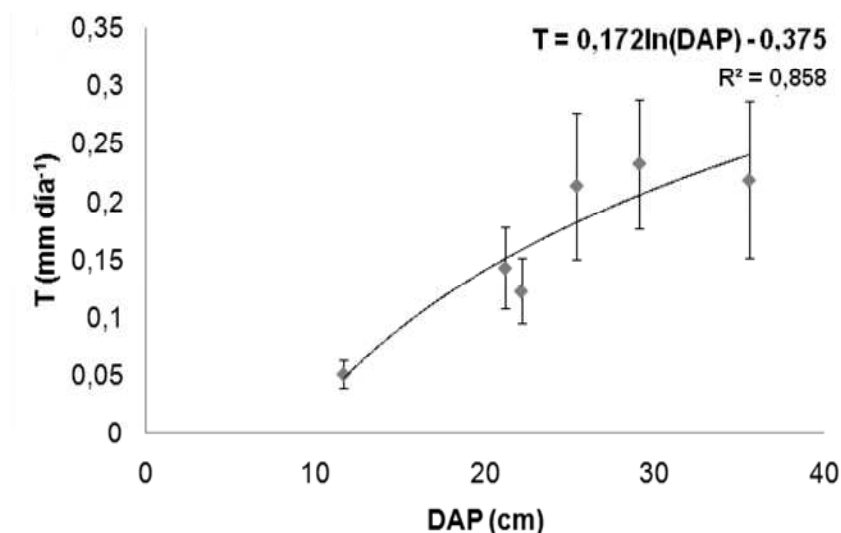


Figura 11. Transpiración individual promedio (T ; mm día^{-1}) en función de cada una de las clases diamétricas. Cada punto representa el promedio individual de T para cada uno de los 6 árboles medidos.

Transpiración de cultivos vs forestación

Para el período bajo estudio (del 6 de febrero al 21 de marzo del 2016), el modelo AquaCrop V5 arrojó una estimación promedio de T de distintos cultivos que fue desde aproximadamente 2 mm día^{-1} para *Zea mays* hasta unos $4,5 \text{ mm día}^{-1}$ para *Glycine max* (Tabla 2).

Así, con respecto al cultivo de *Glycine max*, quedurante el periodo bajo estudio no ha alcanzado la madurez fisiológica, se observa que la transpiración promedio no posee diferencias significativas a la medida en el rodal forestal (Tabla 2).

En el caso de *Zea mays* y *Helianthus annuus*, los valores son muy similares a los obtenidos en la forestación y *Glycine max*, hasta aproximadamente el 12 de Febrero del 2016, para luego alcanzar su madurez fisiológica (aproximadamente el 28 de febrero del 2016) con la consecuente caída de T (Figura 12). Además, en la Figura 12, se observa en la forestación un comportamiento oscilante para T , mientras que este es menos marcado en los cultivos.

Tabla 2. Transpiración promedio (mm día^{-1}) simulada para los cultivos agrícolas vs medida en la forestación. Letras diferentes indican diferencias significativas. Test LSD Fisher para un $p < 0,05$

Cultivo	T (mm día^{-1})
<i>Zea mays</i>	$2,10 \pm 1,41$ a
<i>Helianthus annuus</i>	$2,79 \pm 1,74$ b
<i>Glycine max</i>	$4,55 \pm 0,32$ c
<i>Eucalyptus viminalis</i>	$4,89 \pm 1,03$ c

DISCUSIÓN

Mediciones meteorológicas e hidrológicas

La cantidad de trascolación y de interceptación estuvieron condicionadas principalmente por el monto de precipitación, tal como lo mencionan Rodrigo Domínguez & Ávila Castells (1997). Los valores estimados en este trabajo fueron similares a los encontrados para forestaciones situadas en el partido de La Plata (Provincia de Buenos Aires). Así, Besteiro & Rodríguez Vagaría (2012), estudiaron una forestación de *Eucalyptus viminalis* con un distanciamiento de 2,5 por 2,5 m, fallas del 10% y cobertura del 36,7%, estimando un valor porcentual con respecto a las precipitaciones totales de 4,7 % para el escurrimiento fustal, 12,2 % para la interceptación y 84,2 % para la trascolación, siendo esta la principal fuente que abastece de agua al ciclo hidrológico en un bosque (Besteiro & Rodríguez Vagaría 2012, Huber & Oyarzún, 1983). Sin embargo, al igual que en el presente trabajo, la interceptación y el flujo fustal cobrarían importancia en periodos de escasa pluviometría. De esta manera, en el caso de la interceptación, un mayor porcentaje del total de precipitaciones se perdería como evaporación directa desde el canopy y en el caso del escurrimiento fustal representaría un flujo vital de agua alrededor del tronco donde se localiza la mayor cantidad de raíces (Jobbágy et al. 2008, Besteiro & Rodríguez Vagaría 2012).

Agua en el perfil del suelo. Se observó en general, un menor contenido de humedad del suelo a lo largo de todo el año en la parcela forestal y para ambas profundidades. Estas diferencias se vieron acentuadas en el periodo de menor pluviometría (otoño-invierno 2016; ver Figuras 3, 6 y 7).

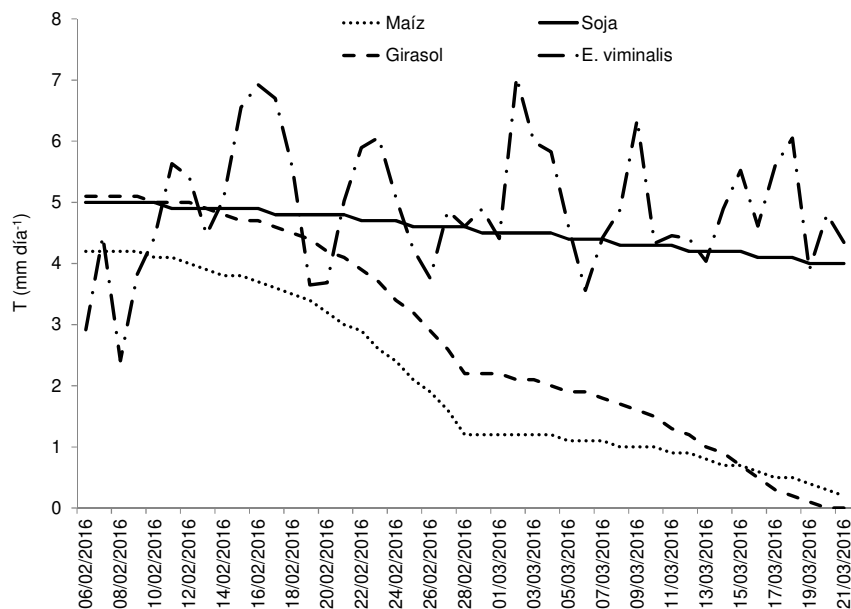


Figura 12. Transpiración diaria (T , mm día^{-1}) medida para *Eucalyptus viminalis* y simulada durante el mismo periodo para los cultivos de maíz (*Zea mays*), soja (*Glycine max*) y girasol (*Helianthus annuus*).

En este sentido las diferencias en la humedad del suelo entre las parcelas forestales y herbáceas (Figuras 6 y 7) se expresaron más durante el año 2016 dado que llovieron 657,4 mm menos que en el 2017 (Figura 3). Corroborando estos resultados, Jobbágy & Jackson (2004) mencionan que las forestaciones poseen una mayor superficie foliar, menor albedo y un canopeo más denso. Estos cambios usualmente resultan en un aumento de pérdida de agua por transpiración e interceptación y por lo tanto un menor contenido de humedad en el suelo. Otros estudios muestran que en forestaciones con *Pinus radiata* en el sur de Chile, las reservas de agua del suelo durante el periodo seco del verano, se agotan considerablemente y hasta mayores profundidades que en una pradera pareada (Huber *et al.* 1985). Sin embargo, estos mismos autores mencionan que el raleo, densidades de plantación adecuadas y las alternativas productivas como los sistemas silvopastoriles, son opciones para aumentar la reservas de agua del suelo.

Nivel del acuífero freático

El acuífero freático, en ambas parcelas, claramente varió su nivel en respuesta a las precipitaciones (Figura 8). Así durante el año más seco (2016) alcanzó las mayores profundidades y durante el año más húmedo (2017) tuvo un progresivo ascenso (ver Figura 8). Por otro lado, en este estudio, el nivel del acuífero freático no dependió del tipo de vegetación. Esto se diferencia con lo detallado por otros autores como Noretto *et al.* (2007), Jobbágy *et al.* (2008), Jobbágy

(2009), entre otros. El mayor uso de agua de la parcela forestal en comparación con la parcela herbácea (evidenciado por el menor contenido de humedad del suelo a lo largo de todo el periodo bajo estudio, ver Figuras 6 y 7) no generó variaciones apreciables en el nivel del acuífero freático. De esta manera, incluso en el momento que estuvo más cerca de la superficie (a unos 2 metros durante la primavera del 2017) la profundidad fue mayor en la parcela herbácea (Figura 8). Esta independencia del comportamiento del acuífero freático en relación a la vegetación dominante se puede corroborar observando las Figuras 9 A y B elaboradas en dos momentos contrastantes (profundidad del acuífero freático mayor o menor en la parcela forestal con respecto a la herbácea). Aun cuando el acuífero freático se encontraba más cerca de la superficie, claramente no se registraron ascensos nocturnos y descensos diurnos, como fueron mencionados por ejemplo en Jobbágy 2009. La desconexión entre el acuífero freático y la vegetación dominante, probablemente se deba a la presencia de tosca a menos de 1 m de profundidad (horizonte petrocálcico formado por carbonato de calcio cementado) sumado a un horizonte Bt (alto contenido de arcillas), lo que dificulta el acceso de las raíces a la misma (Schwinning 2008, Noretto *et al.* 2009). Esto es sugerido por Mujica *et al.* (2019a) y Mujica *et al.* (2019b), quienes mediante simulaciones llevadas a cabo con el modelo de simulación numérica MIN3P code (swMATH; www.swmath.org/software/11519) muestran que la forestación utiliza la mayor parte del agua necesaria para transpirar del perfil de suelo que se encuentra por

encima del horizonte petrocálcico. A pesar de estos patrones la aseveración de que la vegetación leñosa no se encuentra conectada a la freática debe ser tomada con precaución. Sería importante un estudio más detallado de los flujos subterráneos mediante la instalación de un mayor número de freátímetros o incluso, mediante el uso de firmas isotópicas que permitan establecer el origen del agua usada por los árboles (Fernández et al. 2008).

Estimación de la transpiración individual y a nivel de rodal

Engel et al. (2005) y Rébora et al. (2001) estimaron, para la región de estudio, una tasa de transpiración promedio anual de 2 y 3,8 mm día⁻¹ para *Eucalyptus dunnii* y *Eucalyptus camaldulensis* respectivamente. Si bien la transpiración medida para el rodal de *Eucalyptus viminalis* bajo estudio ($4,89 \pm 1,03$ mm día⁻¹) difiere de aquellos valores, se trata de otra especie forestal y los promedios obtenidos solo incluyen dos meses estivales, donde la demanda por evapotranspiración es más alta. Asimismo, estos valores no sugieren un consumo excesivo de agua, ya que, en términos comparativos, se corresponden con los estimados por Rivas y Carmona (2013) y Sakalauskas et al. 2001 para lotes de *Glycine max* y pastizal en la misma región (3 y 4 mm día⁻¹ respectivamente).

Por otro lado, como se observó en la Figura 10, existe un retraso del incremento de T luego de los eventos de lluvia. En este sentido Lambers et al. (2008), menciona que después de un estímulo negativo de horas o de días el desempeño fisiológico de las especies forestales disminuye, y si las condiciones vuelven a ser favorables, recuperan poco a poco su desempeño, aclimatándose. Otro trabajo, llevado a cabo en Norte América sobre rodales de *Pinus banksiana*, confirma que existe poca respuesta a los eventos de precipitación cuando la sequía se vuelve crónica (Baldocchi et al. 1997). De esta manera es probable que la forestación se haya encontrado en un estado de estrés hídrico, dado que fue observada una demora para recuperar su máxima tasa evapotranspirativa luego de un evento de precipitación (Figura 10). Durante este período los contenidos de agua en el suelo fueron muy bajos (Figura 6 y Figura 7), y a esto podría sumarse la falta de conexión de la vegetación con el acuífero freático (Mujica et al. 2019b). De esta manera, aun cuando la demanda evapotranspirativa fuese alta, el rodal no transpira con iguales tasas.

Finalmente en la Figura 11, se observa una buena correlación entre el DAP y la transpiración promedio. De esta manera, los individuos dominados de bajo DAP, tendrían un menor tiempo expuestos a la radiación directa, menor rugosidad y por ende menor captura de energía advectiva (menor área foliar), lo cual implicaría una menor transpiración que en el caso de los individuos dominantes con un alto DAP (Calder 1998, Kelliher et al. 1993, Anandacoomaraswamy et al. 2000, Vertessy et al. 1997).

Transpiración de cultivos vs forestación

Los valores de tasas transpiratorias similares estimados por el modelo AquaCrop V5 (Figura 12), pueden deberse, a que la forestación posee una limitación en la exploración del sistema radical a causa de horizonte

petrocálcico (Figura 2). A pesar del menor albedo, mayor rugosidad y capacidad de explorar perfiles más profundos de las forestaciones (Zhang et al. 2001), en estas condiciones de sitio donde los cultivos (forestales y herbáceos) se encuentran con una limitante a la penetración radicular y con pocas posibilidades de hacer uso del acuífero freático, la capacidad de transpirar sería dependiente de las precipitaciones y estaría limitada por la humedad de los horizontes que se encuentran sobre la tosca (Poore & Fries 1987, Schwinning 2008, Mujica et al. 2019a). Por último el comportamiento marcadamente oscilante de T en la forestación con respecto a los cultivos herbáceos, se debe a las características ecofisiológicas de las mismas que le permiten hacer un uso más exhaustivo de las precipitaciones (Zhang et al. 2001). Así los niveles de humedad del suelo en la forestación se reducen bruscamente haciendo que los valores de T caigan rápidamente, este proceso es más lento y menos pronunciado en los cultivos herbáceos (Figura 12).

CONCLUSIONES

El consumo de agua por parte de la forestación, debido a sus características ecofisiológicas, provoca un mayor agotamiento del agua del suelo a lo largo del año en relación a un pastizal natural, sin embargo esto no genera un impacto significativo sobre el acuífero freático. Así, en este estudio, se evidenció que el nivel del acuífero freático responde a las precipitaciones independientemente del tipo de vegetación. Por otro lado, la forestación a pesar de su mayor potencial transpirativo, realiza un consumo medio de agua similar a un cultivo agrícola estival, al estar restringido el uso de agua a la porción del suelo que se encuentra por encima del horizonte petrocálcico. Este trabajo permite inferir el rol fundamental de este horizonte en el ciclo hidrológico de los sistemas donde la vegetación original herbácea es reemplazada por forestaciones o cultivos agrícolas. Estos sistemas, comunes en la región Pampeana, permiten el uso forestal sin esperar un impacto negativo en las reservas de agua del acuífero freático.

Dada la heterogeneidad de los suelos presentes en la llanura Pampeana, resultaría necesario contar con la instalación de mayor número de freátímetros formando una red de flujo subterráneo en las parcelas estudiadas. Por otro lado, serían necesarios más estudios para evaluar casos donde el acuífero freático se encuentre sobre el horizonte petrocálcico, en el perfil de suelo más explorado por el sistema radical de las forestaciones y cultivos herbáceos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) por brindarnos los medios para las mediciones a campo y laboratorio. Agradecemos también a los propietarios de la Ea. El Colorado, especialmente a Bernardo Lamas, por permitir el establecimiento y monitoreo de las parcelas por un período de dos años. Este proyecto fue financiado por PICT 2013 1223 Prést.

BID de FONCYT-MINCYT e INTA (PNFOR 1104073), Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- Anandacoomaraswamy, A.; W.A.J.M. De Costa; H.W. Shyamalie & G.S. Campbell.** 2000. Factors controlling transpiration of mature field-grown tea and its relationship with yield. *Agric. For. Meteorol.* 103: 375-386.
- Baldocchi, D.D.; C.A. Vogel & B. Hall.** 1997. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy. *J. Geophys. Research* 102(D24): 939-951.
- Barros, V.; C. Vera; E. Agosta; D. Araneo; I. Camilloni; A. Carril; M. Doyle; O. Frumento; M. Nuñez; M. I. Ortiz de Zárate; O. Penalba; M. Rusticucci; C. Saulo & S. Solman.** 2013. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Cap. 2 y 5.
- Benyon, R.G.; S. Theiveyanathan & T.M. Doody.** 2006. Impacts of tree plantations on groundwater in south-eastern Australia. *Australian Journal of Botany* 54: 181-192.
- Besteiro & Rodríguez Vagaría.** 2012. Redistribución de las precipitaciones sobre plantaciones forestales en un predio del partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista Facultad de Agronomía* 111: 75-82.
- Bosch, J.M. & J.D. Hewlett.** 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evaporation. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Brown, A.E.; L. Zhang; T.A. McMahon; A.W. Western & R.A. Vertessy.** 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310:28-61.
- Calder, I.A.** 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology* 18: 625-631.
- Cao, C.Y.; S.Y. Jiang; Y. Zhang; F.X. Zhang & X.S. Han.** 2011. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China. *Ecol. Eng.* 37: 1467-1475
- Cozzo, D.** 1976. Tecnología de la forestación en Argentina y América Latina. Primera edición, editorial Hemisferio Sur, Argentina. 31pp.
- Engel, V.; E.G. Jobbágy; M. Stieglitz; M. Williams & R.B. Jackson.** 2005. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas, *Water resources research* 41, W10409
- Fernández, M.E.; J.E. Gyenge; J. Licata; T. Schlichter & B.J. Bond.** 2008. Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system. *Agroforestry Systems* 74: 185-197.
- Granier A.** 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annals of Forest Science* 42: 193-200.
- Granier A.** 1987. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annals of Forest Science* 44: 1-14.
- Granier, A.; V. Bobay; J.H.C. Gash; J. Gelpe; B. Saugier & W.J. Shuttleworth.** 1990. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 51: 309-319.
- Gyenge, J.E.; M.E. Fernández & T. M. Schlichter.** 2003. Water relations of ponderosa pines in patagonia Argentina: implications for local water resources and individual growth. *Trees* 17: 417-423.
- Gyenge, J.E.; N. Tesón; J. Licata & A. Keller.** 2010. Cap. 3: Flujo de savia mediante el método de disipación de calor. En: Fernández ME y Gyenge JE. Eds. En: Técnicas de medición en ecofisiología vegetal: conceptos y procedimientos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp 35-52.
- Hibbert, A.R.** 1967. Forest treatment effects on water yield. In: International symposium on forest hydrology. Eds WE Sopper, HW Lull. Pergamon, Oxford, pp 527-543.
- Huber, J. A. & C.O. Oyarzún.** 1983. Precipitación neta e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). *Bosque* 5(1):13-20.
- Huber, A.; C. Oyarzún & E. Ellies.** 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6(2): 74-82.
- Huber, A.; A. Iroumé; C. Mohrc & C. Frénea.** 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque* 31(3): 219-230.
- Jobbágy, E.G.** 2009. Regímenes hidrológicos según usos de la tierra: Efectos de la actividad forestal en sistemas semiáridos y húmedos. en: PJ Donoso (editor) *Tala Rasa: Implicancias y desafíos*. Universidad Austral de Chile, Valdivia. pp: 7-16
- Jobbágy, E.G. & R. B. Jackson.** 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10: 1299-1312
- Jobbágy, E.G.; M. Vasallo; K. A. Farley; G. Piñeiro; M. F. Garbulsky; M. D. Noretto; R. B. Jackson & J. M. Paruelo.** 2006. Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia*. Vol. X N° 2 pp 109-124.
- Jobbágy, E.G.; M. Noretto; C. Santoni & G. Baldi.** 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Kelliher, F.M.; R. Leuning & E.D. Schulze.** 1993. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia* 95: 153-163.
- Lambers, H.; S. Chapin & T. Pons.** 2008. *Plant physiological ecology*. Springer. New York. 604 pp.
- Lane, D. R. & BassiriRad, H.** 2005. Diminishing spatial heterogeneity in soil organic matter across a prairie restoration chronosequence. *Restoration Ecology* 13: 403-412.
- Le Maitre, D.C.; D.B. Versfeld & R.A. Chapman.** 2000. The impact of invading alien plants on surface water resources in South Africa: A preliminary assessment. *Water SA* Vol. 26 No. 3.
- Montoya Oliver, J. & M. Mesón García.** 2004. *Selvicultura*. Coedición fundación Conde del Valle de Salazar y ediciones Mundi-Prensa, escuela técnica

superior de ingenieros de montes de Madrid, España. 320 pp.

Mujica, C. R.; G. M. Milione; S. A. Bea & J. E. Gyenge. 2019a. Impacto en los flujos hídricos por la presencia de horizontes petrocálcicos en parcelas forestadas en ambientes de llanura. *Revista de investigaciones agropecuarias (RIA)*. Vol. 45 N°3: 426-436.

Mujica, C. R.; G. M. Milione; S. A. Bea & J. E. Gyenge. 2019b. A process-based numerical approach to estimate forest groundwater consumption in flatland petrocalcic soils. *Journal of Hydroinformatics*. Vol. 21(6): 1130-1146.

Nosetto, M.; E. Jobbágy; T. Tóth & C. Di Bella. 2007. The effects of tree establishment on water and salt dynamics in naturally salt-affected grasslands. *Oecologia* (2007) 152: 695–705.

Nosetto, M.; E. Jobbágy; T. Tóth & R. Jackson. 2008. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. *Global Biogeochemical Cycles* 22 (2) GB2015.

Nosetto, M.; E. Jobbágy; R. Jackson & G. Sznajder. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.

Poore, M.E. & C. Fries. 1987. Efectos ecológicos de los eucaliptos. *Estudio FAO Montes 59*, Roma. 106 pp.

Raes, D.; P. Steduto; T.C. Hsiao & E. Fereres. 2009. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101(3): 438-447.

Raes, D.; P. Steduto; T.C. Hsiao & E. Fereres. 2012. Reference manual AquaCrop 4.0, FAO, Rome.

Rébori, G.; F. Damiano; R.A. Díaz; J. Rodríguez Traverso & A. Grassi. 2001. Requerimientos de agua del *Eucalyptus dunnii* en su implantación y monte adulto. Medición y contribución al balance hídrico regional. Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. 8 al 12 de octubre, Rosario, Santa Fe. Resúmenes: 85-86 pp.

Rivas, R.E. & F. Carmona. 2013. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. *Physics and Chemistry of the Earth* 55-57: 27-34.

Robins, L. 2004. *Dryland Salinity and Catchment Management — A Resource Directory and Action Manual for Catchment Managers*, National Dryland Salinity Program, Land and Water Australia, Canberra ACT.

Rodrigo Domínguez & Ávila Castells. 1997. Trascología y escorrentía cortical en dos encinares (*quercus ilex* L) del macizo del montseny (Barcelona). Congreso Forestal Español, Barcelona, España.

SAGPyA. 2001. Argentina investment opportunities in plantation forest. Edited by Secretariat of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food. Buenos Aires, Argentina. 212 pp.

Sakalauskas, K. M.; J. L. Costa; P. Laterra; L. Hidalgo & L. Aguirrezabal. 2001. Effects of burning on soil-water content and water use in a *Paspalum quadrifarium* grassland. *Agricultural Water Management* 50: 97–108.

Scanlon, B.R.; K.E. Keese; A.L. Flint; L.E. Flint & C.B. Gaye. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20: 3335-3370.

Schwinning, S. 2008. The water relations of two evergreen tree species in a karst savanna. *Oecologia* 158(3): 373-83.

van Dijk A. & R.J. Keenan. 2007. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management* 251:1-9.

Varni, M.R. & E.J. Usunoff. 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 7(2): 180-187.

Vertessy, R. A.; R. G. Benyon; S. K. O'Sullivan & P. R. Gribben. 1997. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology* 15: 559-567

World Climate 2013. Climate data for 36°S 59°W. <http://www.worldclimate.com/cgi-bin/grid.pl?gr=S36W059>. Último acceso: octubre de 2017.

Zhang, L.; W.R. Dawes & G.R. Walker. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. (Co-operative Research Centre for Catchment Hydrology: Canberra).

Zhang, L.; W.R. Dawes & G.R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resource Research* 37: 701