

Impacto Hidrológico de la Forestación en Uruguay

Informe realizado por Marcel Achkar.

La Ley Forestal N.º 15.939 de 1987, estableció un régimen de fomento para la expansión de monocultivos exóticos. Esta normativa introdujo la categoría de "suelos de prioridad forestal", definidos originalmente bajo criterios de baja productividad ganadera, permitiendo que la Dirección General Forestal (DGF) y el Ministerio de Ambiente supervisen una superficie que hoy abarca aproximadamente 4.2 millones de hectáreas (26% del territorio agropecuario nacional). Según datos a 2022, la superficie forestada ha experimentado un crecimiento constante en las últimas 3 décadas, alcanzando una superficie total aproximada de 1.4 millones de hectáreas, lo que representa el 6% del territorio nacional, superando la cobertura del bosque nativo (4.8%). De la superficie forestada total en 2022, el 69% se localiza en SPF y el restante 31% en otros suelos. La estructura productiva está dominada por los géneros *Eucalyptus* (70%) y *Pinus*.

1. Análisis Comparativo del Balance Hídrico: Forestación vs. Pastizales

El balance hídrico de la pradera pampeana sufre alteraciones críticas bajo el régimen de plantaciones industriales. Un factor determinante es el umbral de precipitación de 1.500 mm. La literatura técnica internacional establece que, en regiones con precipitaciones anuales inferiores a este límite, la reducción del rendimiento hídrico es tan severa que puede provocar el secado de cursos de agua en distintos periodos de tiempo. Dado que el promedio pluviométrico de Uruguay oscila entorno a los 1.300 mm, el territorio se encuentra en una zona de alta vulnerabilidad hidrológica, frente al cambio de cobertura vegetal desde ecosistemas de praderas a cultivos forestales.

Evapotranspiración Real (ETa) y Método SAFER

El uso de sensores remotos ha permitido una precisión creciente en la cuantificación de la demanda hídrica. Mediante la aplicación del método SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) utilizando imágenes de los satélites Landsat 8 y 9 (Santarosa et al., 2025), se ha verificado que la ETa en áreas forestadas supera a los pastizales en un 26.5% y a los bosques ribereños en un 4.79%.

2. Impacto en el Régimen de Caudales y Aguas Subterráneas

La estructura del canopy de *Eucalyptus* y *Pinus* modifica la interceptación de precipitaciones, evaporando una fracción significativa del agua antes de que alcance el suelo. Estudios globales y locales, confirman que el rendimiento de agua en cuencas forestadas sufre una reducción sistemática del 20% en comparación con el pastizal natural. En términos absolutos, se estima una pérdida por interceptación de 250 mm anuales (2.500 m³ por hectárea/año).

La forestación no solo reduce el volumen total de agua, sino que altera su dinámica temporal y espacial.

- **Alteración de la Microbiología del Suelo:** La acumulación de materia orgánica de eucalipto fomenta la proliferación de microorganismos (hongos) que producen sustancias grasas. Este cambio en la microbiología genera hidrofobicidad, impidiendo la infiltración inicial del agua. Como consecuencia, ocurren "inundaciones", donde el agua escurre rápidamente sobre la superficie seca sin recargar el perfil del suelo.
- **Aguas Subterráneas:** Existe una disociación en la recarga. Mientras que los acuíferos profundos pueden mantenerse cuando corresponden a fallas geológicas, los acuíferos superficiales sufren un agotamiento severo. Esto compromete directamente el abastecimiento de la población rural que depende de pozos someros.
- **Precedente Internacional:** El caso de **Sudáfrica** es un ejemplo de la situación que se genera en la estabilidad hidrológica regional; este país prohibió las plantaciones en cuencas altas tras reconocer que los manantiales de las sierras son zonas de producción de agua crítica que deben ser protegidas de la demanda forestal.

3. Alteraciones Químicas y Degradación del Suelo

El impacto edáfico de la forestación con especies de rápido crecimiento es profundo y, en muchos casos, irreversible debido a los procesos de acidificación y lixiviación de minerales.

- **Mecanismo de Podzolización:** La acidificación extrema generada por las plantaciones ataca la estructura mineral del suelo, movilizand o sustancias complejizantes de aluminio y hierro. Este proceso destruye la base de la fertilidad natural de los suelos pampeanos, provocando una degradación que requeriría tiempo aún indeterminado para su recuperación natural.
- **Eutrofización:** La reducción del flujo base concentra los contaminantes agrícolas e industriales. La falta de agua fresca para dilución convierte a los cursos de agua en zonas de acumulación de nutrientes, facilitando la proliferación de algas tóxicas que afectan la cadena trófica.
- **Salinización:** El Grupo de Trabajo de la ONU sobre Empresas y Derechos Humanos ha identificado que, la causa subyacente de la salinidad en el agua potable es la sobreexplotación de las cuencas. El modelo de monocultivo actual es hidrológicamente consistente con el diagnóstico de estrés hídrico por sobreexplotación.

La forestación en Uruguay, caracterizada por la sustitución de pastizales naturales por plantaciones industriales de especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus* y *Pinus*, genera una reducción significativa en el caudal de agua de las cuencas (Cano et al., 2023; Silveira et al., 2016). Este fenómeno afecta tanto el rendimiento hídrico anual como el comportamiento de los caudales máximos ante eventos de lluvia (Silveira et al., 2006).

Disminución del rendimiento hídrico y la escorrentía

El cambio de cobertura vegetal altera profundamente el balance hídrico, reduciendo la cantidad de agua que llega a los cursos superficiales (Cano et al., 2023; Santarosa et al., 2025).

- **En macrocuencas:** Se ha documentado una tendencia de reducción del escurrimiento anual de entre un 22% y un 31% (Cano et al., 2023). Estudios específicos en la cuenca

del río Tacuarembó muestran que, para un mismo nivel de precipitación, el rendimiento hídrico bajó de 846 mm/año (antes de forestar) a 539 mm/año (después de forestar), lo que representa una pérdida del 36% (Cano et al., 2023).

- **En microcuencas:** El impacto es aún más drástico, con registros de reducción de la escorrentía específica de hasta un 64% debido al efecto de la forestación (Cano et al., 2023; Silveira et al., 2016).
- **Años promedio:** En años con precipitaciones medias, se ha cuantificado una disminución del caudal específico de aproximadamente el 17.2% (Silveira et al., 2016).

Reducción de caudales máximos y picos

Las plantaciones forestales amortiguan la respuesta de la cuenca ante tormentas intensas, aumentando o disminuyendo los volúmenes de escorrentía rápida (Silveira et al., 2006), dependiendo de las condiciones iniciales de agua en el suelo.

- En microcuencas, los caudales pico pueden disminuir hasta un 78% en comparación con áreas de pasturas (Silveira et al., 2006).
- En macro cuencas, esta reducción de los caudales máximos se sitúa en torno al 49% (Silveira et al., 2006).

Mecanismos de consumo y pérdida de agua

La reducción del caudal se explica por el aumento de la demanda biológica de agua por parte de los árboles (Cano et al., 2023).

- **Evapotranspiración (ET):** La tasa de evapotranspiración en áreas forestadas es significativamente superior a la de los pastizales, superándolos en un 26.5% (Santarosa et al., 2025). Esta mayor ET ocurre principalmente durante las épocas de crecimiento en primavera y verano (Walker et al., 2025).
- **Intercepción foliar:** Una parte considerable de la lluvia queda retenida en las copas de los árboles y se evapora antes de tocar el suelo (Silveira et al., 2016). En plantaciones de *Eucalyptus*, la intercepción promedio es del 18.3% de la lluvia incidente (Silveira et al., 2016).
- **Raíces profundas:** A diferencia de los pastizales, los árboles desarrollan sistemas radiculares que les permiten acceder a mayores reservas de agua en el subsuelo, captando recursos incluso de los acuíferos (Cano et al., 2023; Santarosa et al., 2025).

Impacto crítico en períodos secos

El efecto de la forestación sobre el caudal es más pronunciado durante las estaciones con menores precipitaciones (Silveira et al., 2016).

- En otoños e inviernos secos, la reducción del caudal específico puede alcanzar niveles de entre el **28% y el 32%** (Silveira et al., 2016).
- La competencia por el agua entre las plantaciones y otros usos río abajo se intensifica significativamente durante las sequías (Santarosa et al., 2025; Silveira et al., 2016).

Factores Determinantes: Evapotranspiración e Intercepción El mecanismo principal detrás de la reducción de caudales es el aumento de la evapotranspiración (ET) en los sistemas forestales. Los árboles, especialmente los eucaliptos, poseen una alta demanda de agua debido a:

- **Crecimiento rápido y biomasa:** Tienen una productividad primaria mayor que los pastizales, lo que requiere un intercambio recíproco de agua con la atmósfera.
- **Sistemas radiculares profundos:** Permiten la extracción de agua de capas profundas del suelo e incluso de los acuíferos, limitando la recarga del flujo base de la cuenca.
- **Intercepción:** Las copas de los árboles interceptan la lluvia, provocando que una parte del agua se evapore antes de llegar al suelo; este déficit de escorrentía es equivalente a la intercepción media anual.

Alteraciones en la Hidrofobicidad y Retención del Suelo El cambio de uso de suelo afecta la capacidad del terreno para almacenar y/o procesar el agua superficial:

- **Desarrollo de hidrofobicidad:** La sustitución de pastizales por plantaciones de eucalipto y pinos incrementa significativamente la repelencia al agua de la superficie del suelo mineral.
- **Impacto diferencial por especie:** La hidrofobicidad es más pronunciada bajo *Eucalyptus grandis* que bajo *Pinus taeda*. En suelos con eucaliptos, la repelencia al agua puede aumentar entre un 820% y un 6.380% respecto al pastizal natural.
- **Retención de agua:** Los suelos bajo cobertura forestal muestran una menor capacidad de retención de agua en comparación con los pastizales, lo que afecta la dinámica del flujo y la disponibilidad de humedad en el perfil del suelo.

Impacto en la Calidad del Agua Además de la cantidad, la forestación puede alterar parámetros químicos del recurso hídrico:

- **Acidificación:** El elevado consumo de cationes (como el calcio) por parte de los árboles puede acidificar tanto el suelo como el agua de los arroyos cercanos.
- **Nutrientes:** En eventos de precipitaciones voluminosas, se ha observado un aumento en la concentración de fósforo total en arroyos forestados, probablemente debido a la erosión superficial y a la acidificación del suelo en las plantaciones.

Conclusiones:

La forestación en Uruguay genera una alteración medible y significativa del ciclo hidrológico. La conversión de pastizales a plantaciones forestales reduce la escorrentía y el caudal de los ríos debido a la alta tasa de evapotranspiración y los cambios en las propiedades de infiltración del suelo. Esto destaca la necesidad de integrar la gestión de cuencas y el ordenamiento territorial en la planificación forestal para garantizar la sustentabilidad del recurso hídrico.

La expansión forestal en Uruguay ha alcanzado un umbral que compromete la seguridad hídrica nacional. Los riesgos técnicos se resumen en tres amenazas críticas:

1. **Reducción sistemática del rendimiento hídrico:** El déficit de 250 mm/año por hectárea forestada disminuye de forma acumulativa la disponibilidad de agua dulce.
2. **Degradación química y física de suelos:** La acidificación extrema y la podzolización comprometen la productividad futura de las tierras.

3. **Conflictos de uso:** La competencia desigual por el agua afecta el consumo humano y desplaza actividades agropecuarias tradicionales.

En resumen, aunque la literatura internacional suele citar el 20% como umbral, la evidencia empírica en Uruguay sugiere que los efectos ya son estadísticamente detectables a partir del 15% de ocupación forestal en cuencas medianas, mientras que en microcuencas el impacto es proporcionalmente mucho mayor (Alonso, Silveira y Vervoort. 2024).

Referencias Bibliográficas

Alonso, J., Silveira, L., & Vervoort, R. W. (2024). Assessing effects of afforestation on streamflow in Uruguay: From small to large basins. *Hydrological Processes*, 38(9), e15272. <https://doi.org/10.1002/hyp.15272>

Brazeiro, A., Cravino, A., Fernández, P., & Haretche, F. (2018). Forestación en pastizales de Uruguay: Efectos sobre la diversidad de aves y mamíferos a escala de rodal y del paisaje. *Ecosistemas*, 27(3), 48-59.

Cabrera, L. (2016). *Efectos de la forestación sobre la calidad del agua: Desde una visión global a una local* (Tesina de grado). Universidad de la República, Maldonado, Uruguay.

Cano, D., Cacciuttolo, C., Custodio, M., & Noretto, M. (2023). Effects of Grassland Afforestation on Water Yield in Basins of Uruguay: A Spatio-Temporal Analysis of Historical Trends Using Remote Sensing and Field Measurements. *Land*, 12(185).

González-Sosa, M., González-Barrios, P., Bentancur, O. J., & Pérez-Bidegain, M. (2024). Differential effects on soil water repellency of Eucalyptus and Pinus plantations replacing natural pastures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*.

Jobbágy, E. G., Vasallo, M., Farley, K., Piñeiro, G., Garbulsky, M., Noretto, M., Jackson, R., & Paruelo, J. (2006). Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia Uruguay*, 10(2), 109-124.

Santarosa, L. V., Silva, C. O. F., Hirigoyen, A., & Quaggio, C. S. (2025). Water Consumption Assessment of Afforestation and Natural Vegetation Areas with a Remote Sensing Approach. *Water*, 17(1597).

Silveira, L., Alonso, J., & Martínez, L. (2006). Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 10(2), 75-93.

Silveira, L., Gamazo, P., Alonso, J., & Martínez, L. (2016). Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes*, 30, 3596-3608.

A continuación, se presentan las 50 fuentes bibliográficas claves identificadas. Estas fuentes abarcan investigaciones sobre hidrología, suelos, biodiversidad e impactos socioeconómicos de la forestación en Uruguay y la región:

1. **Acosta Manuel, L. M.** (2016). *Integración productiva: el caso de los Clubes Agrarios “Dos Divisas” y “Bañado Grande” con la empresa Montes del Plata en el departamento de Durazno*. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, UdelaR.

2. **Alonso, J., Silveira, L., & Vervoort, R. W.** (2024). *Assessing effects of afforestation on streamflow in Uruguay: From small to large basins*. Hydrological Processes.
3. **Altesor, A., Oesterheld, M., et al.** (2005). *Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland*. Plant Ecology.
4. **Andrade-Núñez, M. J., & Aide, M. T.** (2010). *Effects of habitat and landscape characteristics on medium and large mammal species richness and composition in northern Uruguay*. Zoologia.
5. **Aparicio Mijares, F. J.** (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ed. Limusa.
6. **Arbeletche, P., Courdin, V., & Oliveira, G.** (2007). *Cambios en la ganadería del litoral-oeste a causa de la expansión de la agricultura y la forestación*. XXXV Jornadas Uruguayas de Buiatría.
7. **Azpiroz, A. B.** (2003). *Aves del Uruguay. Lista e introducción a su biología y conservación*. GUPECA.
8. **Azpiroz, A. B., Alfaro, M., & Jiménez, S.** (2012). *Lista Roja de las Aves del Uruguay*. MVOTMA-UICN.
9. **Baldi, G., & Paruelo, J. M.** (2008). *Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands*. Ecology and Society.
10. **Barboza, N., Laguna, H., & Mila, F.** (2021). *Apoyos y Gravámenes En La Actividad Forestal*. Anuario OPYPA.
11. **Barreto, P., Piñeiro, V., et al.** (2010). *Efectos de la aforestación sobre la calidad del agua de escurrimiento en una cuenca del río Tacuarembó*. Facultad de Agronomía.
12. **Brazeiro, A. (Comp.).** (2019). *Biodiversidad en paisajes forestados de Uruguay*. Universidad de la República, CSIC.
13. **Brazeiro, A., Achkar, M., et al.** (2020). *Agricultural expansion in Uruguayan grasslands and priority areas for vertebrate and woody plant conservation*. Ecology and Society.
14. **Brazeiro, A., Fernández, P., et al.** (2018). *Forestación en pastizales de Uruguay: Efectos sobre la diversidad de aves y mamíferos a escala de rodal y del paisaje*. Ecosistemas.
15. **Brussa, C. A.** (1994). *Eucalyptus. Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Editorial Hemisferio Sur.
16. **Bussoni, A. T.** (2021). *Diversas estrategias para la integración de la producción forestal y ganadera*. Tesis de Doctorado, Facultad de Agronomía, UdelaR.
17. **Bussoni, A., Cabris, J., et al.** (2015). *Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations*. Agroforestry Systems.
18. **Caffera, M., & D'Agosti, N.** (2017). *Estimación del valor económico de la captura de carbono por efecto de la forestación en el Uruguay*. CEPAL.
19. **Caldevilla, G.** (1940). *La desecación de los bañados de Carrasco*. Revista de la Facultad de Agronomía.
20. **Calder, I. R.** (1998). *Water use by forests, limits and controls*. Tree Physiology.

21. **Cano, D., Cacciuttolo, C., et al.** (2023). *Effects of Grassland Afforestation on Water Yield in Basins of Uruguay: A Spatio-Temporal Analysis of Historical Trends Using Remote Sensing and Field Measurements*. Land.
22. **Carámbula, M., & Piñeiro, D.** (2006). *La forestación en Uruguay: cambio demográfico y empleo en tres localidades*. Agrociencia.
23. **Carrasco-Letelier, L., Eguren, G., et al.** (2004). *Preliminary study of prairies forested with Eucalyptus sp. at the northwestern Uruguayan soils*. Environmental Pollution.
24. **Céspedes-Payret, C.** (2012). *Plantación de eucalipto en bioma de pradera templada (Uruguay)*. Editorial Académica Española.
25. **Céspedes-Payret, C., Piñeiro, G., et al.** (2009). *The irruption of new agro-industrial technologies in Uruguay and their environmental impacts*. International Journal of Environment and Health.
26. **Céspedes-Payret, C., Piñeiro, G., et al.** (2012). *Land use change in a temperate grassland soil: afforestation effects on chemical properties*. Science of the Total Environment.
27. **Christina, M., Nouvellon, Y., et al.** (2017). *Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest*. Functional Ecology.
28. **Cravino, A., & Brazeiro, A.** (2021). *Grassland afforestation in South America: Local scale impacts of eucalyptus plantations on Uruguayan mammals*. Forest Ecology and Management.
29. **Delgado, S., Alliaume, F., et al.** (2006). *Efecto de las plantaciones de Eucalyptus SP. sobre el recurso suelo en Uruguay*. Agrociencia.
30. **Durán, A., García Préchac, F., et al.** (2001). *Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Parte B: Suelos*. Universidad de la República.
31. **Durán, P., Silveira, L., et al.** (2001). *Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Parte A: Hidrología*. Universidad de la República.
32. **Farley, K. A., Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B.** (2005). *Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy*. Global Change Biology.
33. **Farley, K. A., Piñeiro, G., et al.** (2008). *Stream acidification and base cation losses with grassland afforestation*. Water Resources Research.
34. **Gallardo Silveira, P.** (2023). *Forestación en suelos de pradera templada: alteración biogeoquímica de minerales arcillosos*. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Udelar.
35. **Gautreau, P.** (2014). *Forestación, territorio y ambiente. 25 años de silvicultura transnacional en Uruguay, Brasil y Argentina*. Editorial Trilce.
36. **Geary, T. F.** (2001). *Afforestation in Uruguay – Study of a changing landscape*. Journal of Forestry.
37. **González-Sosa, M., González-Barrios, P., et al.** (2024). *Differential effects on soil water repellency of Eucalyptus and Pinus plantations replacing natural pastures*. Rev Bras Cienc Solo.

38. **González Sosa, M.** (2019). *Efectos de la forestación en la repelencia al agua del suelo*. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, UdelaR.
39. **Graziano, A.** (2010). *Raíces fragmentadas: acción colectiva, movimientos sociales y modelo forestal en Uruguay*. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Sociales, UdelaR.
40. **Hernández, J., del Pino, A., et al.** (2009). *Nutrient export and harvest residue decomposition of an Eucalyptus dunnii Maiden plantation in Uruguay*. Forest Ecology and Management.
41. **Jackson, R. B., Jobbágy, E. G., et al.** (2005). *Trading water for carbon with biological carbon sequestration*. Science.
42. **Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B.** (2004). *Groundwater use and salinization with grassland afforestation*. Global Change Biology.
43. **Jobbágy, E. G., Vasallo, M., et al.** (2006). *Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos*. Agrociencia.
44. **Marchesi, E., et al.** (2013). *Plantas vasculares prioritarias para la conservación en Uruguay*. MVOTMA-SNAP.
45. **MVOTMA.** (2016). *Guía Pautas para la Gestión Ambiental Forestal*. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.
46. **Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M.** (2005). *Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina*. Global Change Biology.
47. **Panario, D., Mazzeo, N., et al.** (2006). *Síntesis de los efectos ambientales de las plantas de celulosa y del modelo forestal en Uruguay*. Facultad de Ciencias, UdelaR.
48. **Pérez Arrarte, C.** (2007). *Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua: Un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay*. Grupo Guayubira.
49. **Silveira, L., Alonso, J., & Martínez, L.** (2006). *Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay*. Agrociencia.
50. **von Stackelberg, N. O., Chescheir, G. M., & Skaggs, R. W.** (2007). *Simulation of the hydrologic effect of afforestation in the Tacuarembó River basin, Uruguay*. Trans ASABE.