

Efecto del umbral de riego en la productividad hídrica de una pastura de alfalfa de segundo año

Effect of irrigation threshold on the water productivity of second-year grazed alfalfa

Elhordoy, A.¹; Puppo, L.¹; Beretta, A.³; Boggiano, P.².

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay.

² Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Recursos Naturales, Montevideo, Uruguay.

³ Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Animal y Pasturas, EEMAC, Uruguay.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24-06-2026

Accepted 17-08-2026

Keywords:

Water requirements

DM production

Irrigation scheduling

Medicago sativa

Original Article,

Agroecology and Sustainable
Agricultural Systems

*Corresponding author:

Elhordoy, A.

E-mail address:

aelhordoy@fagro.edu.uy

ABSTRACT

As a consequence of climate change, drought periods are becoming increasingly frequent, which leads to a significant decrease in forage production, exacerbated by the low water-holding capacity of soils in Uruguay. There is uncertainty in determining the volumes and timing of irrigation to maximize the use of precipitation without the crop limiting evapotranspiration or doing so within certain limits to optimize water productivity. The objective was to determine the irrigation management in terms of the amount and timing of water applied that best suits alfalfa under grazing. The trial was conducted at the South Regional Center, Faculty of Agronomy – Udelar, Uruguay, on a *Medicago sativa* cv Chaná pasture. The treatments were: rainfed (T0), irrigation when 30% of available water was depleted (T30), and irrigation when 65% of available water was depleted (T65). The timing of irrigation was determined by water balance, accompanied by soil moisture measurements using the FDR probe to verify irrigation thresholds. Grazing entry was determined based on the criterion of 8 knots on the main stem. There were significant differences in the second summer of evaluation in favor of the irrigated treatments. The T65 proved to be the most efficient alternative for pasture water management. There was no response in biomass increase above 500 mm per year of water consumed by the crop, with a maximum yield of 23,500 kg of DM ha⁻¹.

RESUMEN

Como consecuencia del cambio climático, los períodos de sequía son cada vez más frecuentes, lo que conduce a una disminución significativa en la producción de forraje, exacerbada por la baja capacidad de retención de agua de los suelos en Uruguay. Existe incertidumbre al determinar los volúmenes y el momento de riego para maximizar el uso de la precipitación sin que el cultivo limite la evapotranspiración o hacerlo dentro de ciertos límites para optimizar la productividad del agua. El objetivo fue determinar la gestión del riego en términos de la cantidad y el momento de aplicación del agua que mejor se adapte a la alfalfa bajo pastoreo. El ensayo se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía — Udelar, Uruguay, en una pradera de *Medicago sativa* cv Chaná. Los tratamientos fueron: secano (T0), riego cuando se agotara el 30% del agua disponible (T30) y riego cuando se agotara el 65% del agua disponible (T65). El momento de riego se determinó mediante el balance hídrico, acompañado de mediciones de humedad del suelo utilizando la sonda FDR para verificar los umbrales de riego. La entrada de pastoreo se determinó en base al criterio de 8 nudos en el tallo principal. Hubo diferencias significativas en el segundo verano de evaluación a favor de los tratamientos regados. El T65 demostró ser la alternativa más eficiente para la gestión del agua en pasturas. No hubo respuesta en el aumento de biomasa por encima de 500 mm por año del agua consumida por el cultivo, con un rendimiento máximo de 23.500 kg de MS ha⁻¹.

Palabras clave: Requerimientos hídricos; producción de materia seca; umbral de riego; *Medicago sativa*.

INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una leguminosa perenne de crecimiento estival, que se caracteriza por su elevado potencial de producción de materia seca (Demin y Aguilera, 2012; Moot et al., 2012; Jáuregui et al., 2022). Presenta un sistema radical profundo, lo que le confiere una elevada capacidad de exploración del perfil del suelo y una relativa tolerancia a condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, su expresión productiva está fuertemente condicionada por la disponibilidad de agua durante el ciclo de crecimiento, debido a su alta demanda evaporativa (Dorenboos y Kassam, 1979). En climas templados, la producción promedio alcanza aproximadamente 11.000 kg de MS ha⁻¹ (García, 1995; Rebuffo et al., 2000; Sawchik et al., 2000).

Desde una perspectiva de eficiencia en el uso del agua, la alfalfa se caracteriza por una elevada productividad del agua, definida como la relación entre el rendimiento de materia seca y el volumen total de agua consumida por el cultivo, incluyendo los aportes de riego neto, la precipitación efectiva y las variaciones en el contenido de humedad del suelo (Van Halsema y Vincent, 2012). En este marco, diversos autores han reportado valores de productividad del agua comprendidos entre 1 y 3.5 kg de MS m⁻³, lo que varía en función de las condiciones ambientales, la disponibilidad hídrica y las estrategias de manejo del riego (Grimmes et al., 1992; Godoy et al., 2003; Brown et al., 2005; Collino et al., 2007; Pembleton et al., 2010; Espinoza et al., 2018).

La producción de materia seca en alfalfa en función de la evapotranspiración real evidencia una respuesta directa del rendimiento al consumo de agua por parte del cultivo. (Montazar y Putnam, 2023). En ese sentido, se han reportado producciones de 25.000 kg de MS ha⁻¹ asociados a un consumo medio cercano a los 1.510 mm durante el ciclo de crecimiento. Por otra parte, (Fink et al., 2022) reportan una variación en el rendimiento 700 a 23.900 kg de MS ha⁻¹ asociada a una evapotranspiración real de entre 38 a 2016 mm, lo que resulta en una productividad con un rango de variación de 30 a 430 kg de MS ha⁻¹ m⁻³.

En Uruguay, una de las principales limitantes para la producción agropecuaria es la disponibilidad hídrica durante los meses estivales. Si bien las precipitaciones presentan una alta variabilidad interanual, en esta época del año suele registrarse un déficit hídrico asociado a la marcada estacionalidad de la evapotranspiración (Castaño et al., 2011). En este sentido, se ha demostrado que el riego constituye una tecnología eficaz para estabilizar e incluso incrementar la oferta forrajera (Pérez Gomar, 2004; Giorello et al., 2012).

En el contexto de la optimización del uso de los recursos en la agricultura, se han desarrollado diversas estrategias de riego, entre las que se destaca el manejo de umbrales de agotamiento del agua disponible (FAO,

1998), con el objetivo de satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos durante dicho período.

La programación del riego basado en diferentes niveles de agotamiento del agua disponible modifica la dinámica de producción de forraje de alfalfa y la productividad del agua. Un agotamiento menor del agua disponible mantiene una mayor disponibilidad hídrica para el cultivo, favoreciendo la producción de materia seca, mientras que, en un agotamiento mayor, incrementa la productividad del agua al reducir el volumen total aplicado sin provocar reducciones en la producción de forraje.

Este estudio tuvo como objetivo mejorar la gestión del riego en una pastura de alfalfa pastoreada de segundo año, a través del efecto de la cantidad y momento de aplicación del riego sobre la producción de MS, en relación con dos niveles de agotamiento del agua disponible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación tiempo-espacial del ensayo

La investigación se llevó a cabo en el campo experimental Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía- Udelar, Canelones, Uruguay, coordenadas 34°37'S, 56°13'O. El ensayo tuvo lugar durante el período de Diciembre del 2020 a Febrero del 2022, en la figura 1 se muestra información de carácter climático reportados en dicho período de evaluación.

Caracterización edáfica

El suelo predominante en el sitio corresponde a un Brunosol Eutricto Típico LAc, clasificado como Arguidol típico según la clasificación taxonómica del USDA (1999). A continuación, en la Tabla 1 se muestra el análisis de suelo realizado al inicio del ensayo, destacando la estratificación del suelo. Además, de los parámetros hídricos para los diferentes horizontes del suelo.

Se determinó la capacidad de campo (CC) de cada horizonte aplicando la metodología establecida por García Petillo et al., (2012). El punto de marchitez permanente (PMP) fue estimado mediante la regresión desarrollada por Silva et al., (1988), utilizando los datos de CC obtenidos en peso seco. La densidad aparente (Dap) por horizonte se midió con el método del cilindro muestreador, empleando muestras imperturbadas, según la técnica de Gabriels et al., (2006).

Diseño experimental

El experimento se instaló en un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con tres tratamientos y cuatro repeticiones (Figura 2), generando 12 unidades experimentales de 11 x 11 metros cada una, con un área

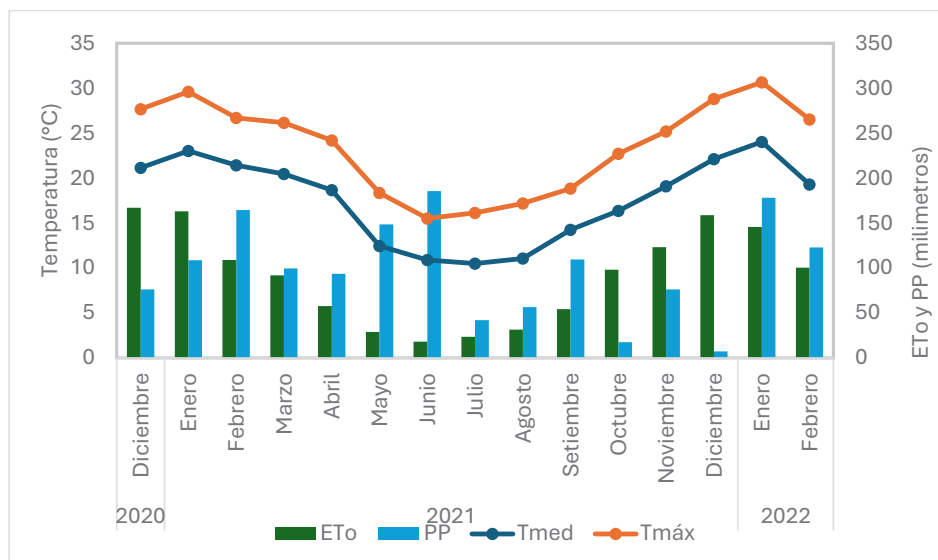


Figura 1. Temperatura máxima (Tmáx), temperatura media (Tmed), Precipitación acumulada mensual (PP) y evapotranspiración de referencia Penman- Monteith promedio mensual (ET0).

Tabla 1. Caracterización edáfica por horizontes de los parámetros hídricos del suelo.

Horizonte	Prof. cm	CC %ps	PMP %ps	DAp g cm ³	AD mm 10cm ¹	AD mm horizonte ¹	MO %
Ap	0 – 19	35	20,9	1,15	16,2	30,8	3.8
Bt	20 – 36	36	21,6	1,20	17,3	27,6	2.1
Btkss	37 – 80	36	21,6	1,40	20,16	88,7	0.5

Prof. = Profundidad; CC %ps = capacidad de campo en base a peso seco; PMP %ps = punto de marchitez permanente en base a peso seco; DAp = densidad aparente; AD= agua disponible; MO = Materia Orgánica.



Figura 2. Mapa del sitio experimental mostrando la disposición de las parcelas delimitadas.

de 121 m² por unidad. Con el fin de permitir el acceso de los animales durante el pastoreo, se reservó un corredor de 2 metros de ancho entre los bloques 1-2 y 3-4.

Los tratamientos fueron, T0 se llevó a cabo bajo condiciones de secano, sin riego adicional; el tratamiento T30 o riego frecuente, empleó un umbral de agotamiento del 30% del agua disponible, y el tratamiento T65, se basó en un umbral de agotamiento del 65% del agua disponible, lo que resultó en un riego más espaciado a lo largo del tiempo.

Manejo del riego

Los tratamientos se aplicaron utilizando un sistema de riego por aspersión fija, que incluía cuatro aspersores por parcela, marca K-Rain modelo RPS75 Pop-up. Estos aspersores sectorizados a 90°, estaban a nivel del suelo y emergían debido a la presión del agua cuando se encendía el sistema. Se ubicaron en las esquinas de cada parcela como medida de protección, para evitar posibles daños causados por el ganado en los períodos de pastoreo. Se determinó el coeficiente de uniformidad empleando la metodología descrita por Tarjuelo (2005), su valor fue de 70%, el cual es considerado aceptable para sistemas de aspersión fija, de acuerdo con dicho autor. La tasa de aplicación fue medida en 5,5 mm h⁻¹.

Se definieron dos niveles de agotamiento de agua disponible, en 30% y 65% del contenido total de agua disponible (ADT) en una profundidad 40 cm, donde se estimó se encontraban la mayor densidad de las raíces absorbentes (Dardanelli et al., 2010). Mientras que en el tratamiento de secano fue de 50 cm. Estos niveles permitieron calcular el umbral de agotamiento de agua disponible en milímetros totales según la ecuación 1:

$$\text{Umbral mm} = (\text{CC \%ps} - \text{PMP \%ps}) \times \text{Dap} \times 40\text{cm}/10 \times \text{Umbral} \quad [1]$$

Luego se determinó la lámina neta a aplicar (ver tabla 2) para restablecer el agua del suelo desde el umbral hasta el 85% del ADT en la profundidad radicular, de forma de alejar al suelo de la condición de saturación si ocurriese una precipitación enseguida a un riego efectuado, por lo tanto, en cada uno de los tratamientos la lámina a aplicar se expresa en las ecuaciones 2 y 3:

$$\text{T30} = (\text{CC \%ps} - \text{PMP \%ps}) \times \text{Dap} \times 40\text{cm}/10 \times 0,15 \quad [2]$$

$$\text{T65} = (\text{CC \%ps} - \text{PMP \%ps}) \times \text{Dap} \times 40\text{cm}/10 \times 0,50 \quad [3]$$

A continuación Tabla 2, se presentan los valores obtenidos de estas ecuaciones, de acuerdo con los umbrales establecidos.

Tabla 2 Déficit acumulado para determinar el momento del riego y la lámina neta aplicada en cada tratamiento de riego.

Tratamiento	Déficit acumulado del agua disponible	Lámina neta
	mm	
T30	22	11
T65	47	36

La herramienta que se utilizó para evaluar el momento de riego fue balance hídrico de paso diario (Allen et al., 1998). Con la finalidad de verificar si se estaba cumpliendo con los umbrales preestablecidos se midió la humedad del suelo, previo al riego con una sonda FDR (Delta T Devices, PR2). Para ello, se instaló un tubo de acceso en cada parcela y se utilizó la calibración realizada en ensayos previos (Hayashi y Dogliotti, 2021) con el método gravimétrico para cada horizonte de suelo.

Cuando el balance indicaba que el déficit acumulado era igual o superior al valor umbral era momento de regar, expresado en la siguiente ecuación 4:

$$\text{RIEGO} = \text{Déficit acumulado} < \text{Umbral}; 0; \text{LN} \quad [4]$$

El déficit acumulado se calculó sumando el déficit del día anterior, la evapotranspiración del cultivo y restando las precipitaciones efectivas.

Para el cálculo de las precipitaciones efectivas (PP ef) se tuvo en cuenta el déficit acumulado y la cantidad máxima fue la correspondiente para llevar el suelo a capacidad de campo, considerando que el déficit acumulado en cada uno de los tratamientos es diferente frente a un mismo evento de precipitación. Este cálculo se expresa en la siguiente ecuación 5:

$$\text{Déficit acumulado (DAcu)} = \text{Déficit } d^{-1} - \text{PP ef} - \text{Riego} + \text{ETc} \quad [5]$$

La evapotranspiración se mide comúnmente en milímetros por unidad de tiempo, indicando la cantidad de agua que se pierde de una superficie cultivada. Allen et al., (1998) propusieron un método para estimar la ETo utilizando el modelo de Penman- Monteith modificado por FAO (2025), el cual ha sido validado a nivel internacional por la comunidad científica.

Los datos de ETo diaria, para el balance hídrico, se obtuvieron de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria INIA Las Brujas ubicado en ruta 48 km 10, (34° 40' S 56° 20' O), que se sitúa a 15 km en línea recta del lugar del ensayo. Mientras que las precipitaciones fueron las obtenidas de un pluviómetro ubicado a menos de 100 m del ensayo.

El coeficiente del cultivo (Kc) permitió estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del dato de ETo. De acuerdo con Allen et al., (1998) se asignaron los siguientes valores de Kc un valor de 0,4 inmediatamente después del pastoreo, mientras que el Kc inmediatamente previo al pastoreo el valor asignado fue de 1,1 dado que el cultivo presentaba un 10% menos de desarrollo con respecto al propuesto en dicha bibliografía.

El estrés hídrico del cultivo se describe a través del coeficiente de estrés (Ks). Cuando este coeficiente es igual a 1 indica confort hídrico, en la medida que este coeficiente es menor a 1 indica estrés hídrico y la evapotranspiración (ETc aj) se ve limitada como se indica en la ecuación 6:

$$ETc_{aj} = ETo * Kc * Ks \quad [6]$$

La magnitud del Ks se calculó en la ecuación 7:

$$Ks = \frac{ADT - DACu}{(1 - p) \times ADT} \quad [7]$$

Se obtiene al dividir la diferencia entre ADT y DACu por el producto de ADT y (1-p), donde p representa la fracción de agua disponible que la planta puede extraer sin estrés hídrico

Se midió la productividad estival del agua como el cociente entre la producción de materia seca y el agua consumida integrada por agua de precipitaciones, agua de riego y variaciones en el contenido de humedad en la zona radicular efectiva.

Manejo de la pastura

En marzo de 2020, se realizó un barbecho químico para preparar el terreno previo a la siembra, utilizando una mezcla de los herbicidas 2,4 DB a una dosis de 1 L ha⁻¹, glifosato a 2,5 L ha⁻¹ y fluroxipir a 400 cc ha⁻¹, para eliminar la vegetación preexistente de *Cichorium intybus*. Tras un mes se procedió a la siembra del cultivar *Chaná* de origen italiano, con grado de dormancia intermedia, con una densidad de 20 kg ha⁻¹, aplicando la semilla en líneas y realizando una inoculación previa para promover la fijación de nitrógeno en el suelo. Simultáneamente, se llevó a cabo una fertilización con 150 kg ha⁻¹ de fertilizante NPK 18-46/46-0, proporcionando los nutrientes esenciales para apoyar el desarrollo inicial de la alfalfa y asegurar un buen arranque del cultivo.

El momento de pastoreo fue determinado por fenología, cuando los tallos desarrollaron 8 nudos. Momento en que según (Kloster et al., 2022) la planta alcanza el número máximo de hojas verdes, donde la calidad y la producción son óptimas.

Las mediciones de producción de MS se realizaron con el método de doble muestreo (Haydock y Shaw,

1975), con una escala numérica de disponibilidad de forraje del 1 al 3 para todas las parcelas a pastorearse. Se cortaron tres muestras de cada nivel de la escala utilizando marcos de 0,3 x 0,3m. Luego fueron procesadas en laboratorio mediante pesado y secado en estufa de circulación forzada de aire a 60 °C, hasta alcanzar un peso constante. Para determinar la masa de forraje en cada parcela se realizaron 15 estimaciones visuales basadas en la escala previamente establecida. Luego se introdujeron los animales, dos vacas por parcela, con un peso de 600-700 kg cada una. El momento de salida de estos se definió en base a altura, cuando la misma alcanzó los 5 cm. Inmediatamente se llevó a cabo un corte de homogeneización a 5 cm de altura, utilizando un tractor de jardín.

Para el cálculo de la producción de forraje por estación se tuvo en cuenta la tasa de crecimiento y los días transcurridos entre pastoreos. La tasa de crecimiento (kg ha⁻¹ día⁻¹) se determinó dividiendo la diferencia de MS obtenida en los muestreos previos a cada pastoreo y el número de días entre los mismos. Posteriormente, los kg ha⁻¹día⁻¹ se calcularon multiplicando esta tasa de crecimiento por la cantidad total de días de la temporada, abarcando todo el período de la estación (Campbell, 1966; Puppo et al., 2024).

Caracterización climática

La caracterización climática realizada en este estudio se centró en las variables de Evapotranspiración de referencia (ETo) y precipitaciones efectivas (PP ef), abarcando un período de 43 veranos, desde 1980 hasta 2022. Esta serie contiene los períodos de estudio 2020/21 y 2021/22.

Análisis estadístico

Para analizar la variable de producción de MS, se aplicó el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \mu + \text{bloque} + \text{umbral de riego} + \varepsilon \quad (0; \sigma)$$

Para el análisis por estación de la productividad del agua con el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \mu + \text{bloque} + \text{umbral de riego} + \varepsilon A + \text{estación} + \text{umbral de riego} * \text{estación} + \varepsilon(0; \sigma)$$

Para ambos modelos se utilizó InfoStat/L (con paquete R instalado), se asumieron errores independientes y varianzas desiguales entre tratamientos. Se calculó una diferencia mínima significativa con un nivel de probabilidad del 5%.

RESULTADOS

Caracterización climática

Se analizaron 43 temporadas estivales comprendidas entre los años 1980 y 2022, obteniéndose un valor de evapotranspiración con una probabilidad de excedencia del 20% (P80) de 527 mm, lo que representa la demanda evaporativa máxima esperada en condiciones frecuentes. En contraste, los ciclos 2020/21 y 2021/22 registraron valores de evapotranspiración sensiblemente inferiores, de 412 mm y 444 mm respectivamente, evidenciando una menor demanda atmosférica de agua en dichos períodos. Por otra parte, las PP ef correspondientes a esos mismos ciclos fueron de 295 mm y 264 mm, posicionándose en el tercio superior de la serie.

Balances hídricos

Se presentan los balances hídricos correspondientes a los tres tratamientos, comenzando desde el 1 de octubre de 2020, permitiendo visualizar la disponibilidad hídrica a través del déficit acumulado. Cada balance hídrico por tratamiento incluye un desglose detallado de las entradas, precipitación y riegos efectuados, así como las salidas que refieren exclusivamente evapotranspiración.

En los tratamientos T0 y T65 tanto en el verano 2021 como en el verano 2022, la pastura presentó ajuste estomático evidenciándose a través del descenso del valor de K_s por debajo de 1, (Figura 3). Sin embargo, el tratamiento T30 mantuvo el contenido de agua disponible dentro del agua fácilmente disponible, sin evidenciarse valores menores a 1 en el coeficiente de estrés.

A continuación, la tabla 3 muestra los valores de agua total consumida, calculados a partir de la sumatoria de las PP ef, los riegos netos y la variación de humedad (ΔH) entre el inicio y el final de cada estación. Un ΔH positivo sugiere una acumulación de agua incrementando así el agua disponible (AD) en la profundidad radicular, mientras que un ΔH negativo indicaría que el agua en el suelo disminuye incrementando el consumo por parte del cultivo.

Durante el invierno no fue necesario realizar riegos. Los requerimientos de agua se concentraron principalmente en la estación estival, seguidos por la primavera y otoño. El T65 redujo la lámina neta en 89 mm (Tabla 3) y a su vez el número de eventos de riego de 41 a 9 respecto de T30.

Respuesta al riego en producción de MS

Como se puede apreciar en (Tabla 4), no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos

en la producción anual del segundo año de la pastura, ni en la producción acumulada durante el período de evaluación. No obstante, se destacan los altos valores absolutos obtenidos, mientras que los tratamientos regados alcanzaron una producción de hasta 24553 kg de MS ha^{-1} en el tratamiento T0 se alcanzaron 23352 kg de MS ha^{-1} . A partir de este comportamiento, surge la necesidad de analizar la producción de materia seca a nivel estacional.

Respuesta al riego en producción de MS estacional

Durante el período de evaluación, que abarcó desde el 1 de diciembre de 2020 hasta el 28 de febrero de 2022, se realizaron un total de 27 pastoreos, sin presentar diferencias entre tratamientos.

De acuerdo con los datos presentados en (Tabla 5), diferencias significativas fueron detectadas en otoño de 2021 y verano de 2022. En otoño el tratamiento T30 presentó rendimientos significativamente superiores a T65, lo cual se explicaría con el número de eventos de riegos ocurridos en dicha estación 4 vs 1. En el verano de 2022 los rendimientos significativamente mayores se obtuvieron de los tratamientos regados con respecto al T0. En promedio los tratamientos regados rindieron 43% más que el T0.

La distribución anual de forraje reveló que la mayor producción se dio durante el verano, con un 39%, seguida de la primavera con un 27%, el otoño con un 20% y, finalmente, el invierno, que contribuyó con la menor cantidad de materia seca.

Tasa de crecimiento estacional

Las tasas de crecimiento para los diferentes tratamientos a lo largo del período de evaluación presentaron diferencias significativas entre los tratamientos T0 y T65 frente al T30 para el otoño (Tabla 6)

Mientras que para las demás estaciones no hay diferencias estadísticas entre tratamientos. Se puede visualizar que en términos absolutos la tasa de acumulación en el verano del 2022 es elevadas y contrastantes a las obtenidas en el verano 2021, el primer verano de evaluación.

Productividad del agua estival

La Tabla 7 presenta los valores anuales de productividad del agua tanto de agua consumida total como agua de riego para los diferentes tratamientos evaluados.

El T65 presentó mayor productividad del agua que T30 y mayor productividad del agua de riego, sin diferenciarse estadísticamente de T0 en productividad respecto del agua total consumida.

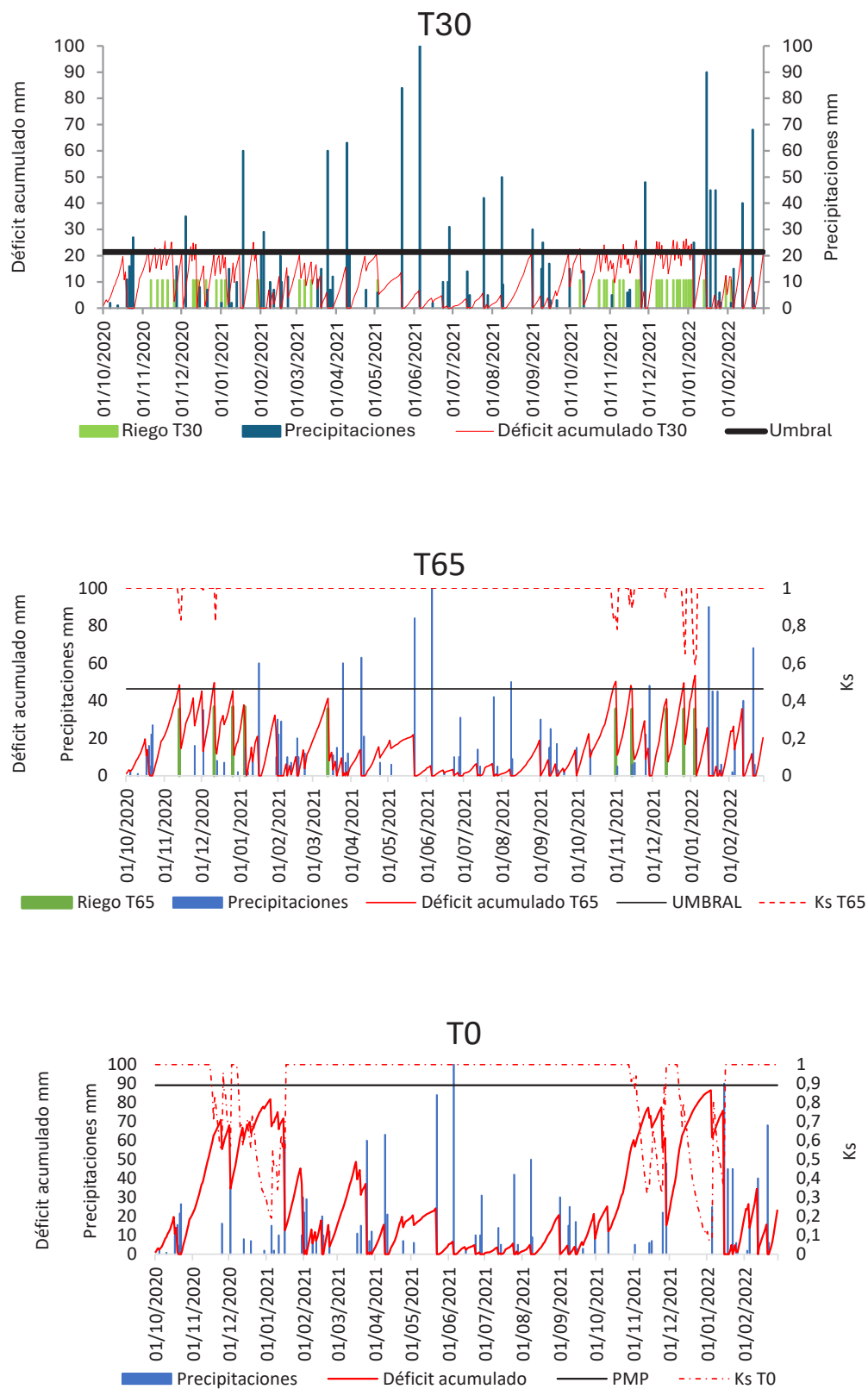


Figura 3. Evolución del déficit acumulado de humedad del suelo en 0,50 m de profundidad (T0) y 0,40 m de profundidad (T30 y T65) riegos aplicados y precipitaciones desde 1 de octubre del 2020 al 28 de febrero del 2022.

Tabla 3. Registro de las precipitaciones totales y efectivas, riego, variación del contenido de humedad, agua consumida total y números de riego, expresados en milímetros.

	PP total mm	PP ef mm		Riego neto mm			ΔH mm			Agua total consumida mm			N° de riegos	
		T30	T65	T0	T30	T65	T30	T65	T0	T30	T65	T0	T30	T65
Verano 2021	289	142	174	242	107	72	-3,6	-24,6	5,5	245	270	295	16	3
Otoño 2021	286	75	82	122	43	36	20,2	15,9	12,3	136	133	134	4	1
Invierno 2021	328	30	37	42	0	0	-11	-13,1	-2,7	24	24	39	0	0
Primavera 2021	210	106	126	147	75	71	-5,0	0,0	-20,9	204	197	126	7	2
Verano 2022	338	112	111	198	150	107	4,6	-1,2	19,9	246	217	227	14	3
Total	1451	465	530	751	375	286				855	841	821	41	9

Nota: PP total precipitaciones totales; PP ef precipitaciones efectivas; ΔH variación en el contenido de humedad; N° de riegos número de riegos.

Tabla 4. Producción anual y acumulada de kg de MS ha⁻¹ para los diferentes tratamientos evaluados.

	Producción anual 2 ^{do} año	Producción acumulada (Verano 2021 a Verano 2022)
T0	23.352 ^A	32.152 ^A
T30	22.969 ^A	32.450 ^A
T65	24.553 ^A	33.419 ^A

Las letras diferentes dentro de las columnas indican diferencias entre medias p-valor < 0,05.

Tabla 5. Producción estacional de kg de MS ha⁻¹ de los tratamientos (T0, T30 y T65)

	Año				
	2021				2022
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
T0	9.134 ^A	5.627 ^{AB}	3.709 ^A	6.532 ^A	7.590 ^B
T30	10.513 ^A	6.855 ^A	3.586 ^A	5.744 ^A	10.604 ^A
T65	9.465 ^A	4.917 ^B	3.161 ^A	6.418 ^A	11.123 ^A

Las letras diferentes dentro de las columnas indican diferencias entre medias p-valor < 0,05.

Tabla 6. Tasa de crecimiento estacional expresada en kg de MS ha⁻¹

	2021				2022
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
T0	102 ^A	62 ^B	40 ^A	69 ^A	92 ^A
T30	109 ^A	80 ^A	34 ^A	59 ^A	116 ^A
T65	97 ^A	57 ^B	34 ^A	65 ^A	119 ^A

Las letras diferentes dentro de las columnas indican diferencias entre medias p-valor < 0,05.

Tabla 7. Productividad del agua estival para los diferentes tratamientos evaluados expresados en kg de MS m⁻³

	Agua consumida total	Agua de riego
	kg de MS m ⁻³	
T0	5,20 ^A	NC
T30	3,71 ^B	7,95 ^B
T65	4,14 ^A	11,5 ^A

Las letras diferentes dentro de las columnas indican diferencias entre medias p-valor < 0,05.

NC No corresponde

Relación biomasa producida y agua consumida

La siguiente figura muestra la relación entre consumo de agua total anual de la alfalfa y la producción de MS anual

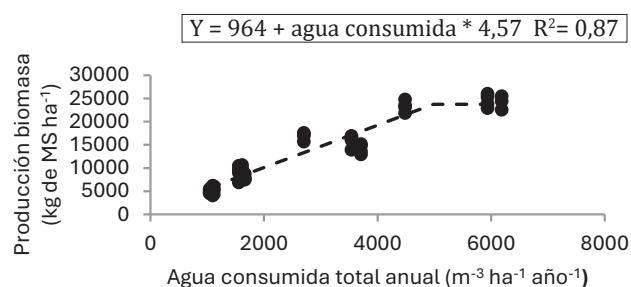


Figura 4. Producción de biomasa en alfalfa (kg de MS ha⁻¹) en función del agua consumida por la pastura (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

Durante el período de evaluación, cada metro cúbico de agua consumido por el cultivo de alfalfa incrementó el rendimiento en 4,57 kg de MS ha⁻¹. El agua, identificada como el principal factor productivo, explicó el 87 % de la variación en el rendimiento de MS ha⁻¹. Se observó que, a partir de una dotación de 5000 m³ ha⁻¹ año⁻¹, no se produjeron aumentos adicionales en la productividad, alcanzando un rendimiento máximo de 23.500 kg de MS ha⁻¹. El modelo ajustado fue estadísticamente significativo (F crítico $1,7 \times 10^{-18}$), y los parámetros β y γ resultaron significativos con un valor de $p < 0,001$.

DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos en este estudio, del orden de 23.500 a 24.500 kg de MS ha⁻¹, superan ampliamente los valores reportados por INASE e INIA (2023) y Plevich et al., (2012) para alfalfa de segundo año, en la que se registraron menores niveles productivos, asociados principalmente a condiciones de secano. A nivel

regional, Rojas-García et al. (2017) reportaron rendimientos de hasta 17.313 kg de MS ha⁻¹ en suelos de características edáficas similares y bajo condiciones de secano, lo que evidencia una marcada influencia en la disponibilidad hídrica sobre la productividad del cultivo. Por su parte, en sistemas bajo riego, Demin y Aguilera (2012) informaron rendimientos entre 24.215 – 25.679 kg de MS ha⁻¹, según el umbral de agotamiento de agua en el suelo considerado, valores cercanos a los obtenidos en este estudio. Asimismo, Jáuregui et al. (2022) reportaron producciones de entre 25.000 – 35.000 kg de MS ha⁻¹ bajo riego.

Dado los rendimientos obtenidos es necesario visualizar el comportamiento de la tasa de crecimiento que, si bien no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, si se destacan los altos valores obtenidos, que fueron similares a los reportados por Sawchik et al. (2010) para la estación estival concretamente, de 120 kg de MS ha⁻¹ bajo riego. Por otro lado, Otero et al., (2019) y Diaz Lago et al., (1996) reportan valores de 49,8 kg de MS ha⁻¹ día⁻¹ y 68 kg de MS ha⁻¹ día⁻¹ respectivamente, pero en condiciones de secano. En cuanto a la distribución de la producción de forraje, no se observó una afectación significativa debido al riego, aunque si se evidenció una tendencia a que el máximo se de en la primavera como lo señaló Formoso (2000).

Utilizar el balance hídrico del suelo en la zona radicular como herramienta es esencial para una buena gestión del riego (Pereira et al., 2010). Cada balance refleja el déficit acumulado de cada tratamiento (Figura 1), lo que explica las diferencias en la efectividad de las lluvias entre tratamientos, es decir una misma precipitación encuentra al suelo con un contenido de humedad diferente, dependiendo de cuál sea el tratamiento como se muestra en la Tabla 3. Además, la evapotranspiración del cultivo no solo depende de las condiciones climáticas del período, sino también del desarrollo fenológico de la pastura entre cortes.

En el verano de 2022, el tratamiento T30 experimentó una alta concentración de riegos debido a que el déficit hídrico acumulado alcanzó rápidamente el umbral preestablecido. Sin embargo, las precipitaciones acumuladas en febrero alteraron considerablemente la dinámica hídrica del área, lo que impidió detectar diferencias significativas en la producción de biomasa entre los tratamientos con riego. Dicho registro pluviométrico enmascaró las diferencias estadísticas entre los tratamientos regados, aunque no fue suficiente para evitar que el tratamiento T0 presentara un rendimiento inferior.

Los resultados obtenidos permiten inferir que T65 constituye una estrategia eficiente en términos de productividad del agua en alfalfa. Los valores alcanzados son comparables a los reportados por (Brown et al., 2005; Márquez et al., 1995) quienes registraron 2.9 kg MS m⁻³, así como a los obtenidos a nivel local por

(Sawchik et al., 2010) de 3.5 kg MS m³, en condiciones bajo riego.

El tratamiento con un umbral del 30% de agotamiento del agua disponible requirió un total de 41 riegos, que acumularon 375 mm durante todo el período de evaluación. En contraste, el tratamiento con un umbral del 65% de agotamiento del agua disponible requirió únicamente 9 riegos, con un volumen acumulado de 286 mm. Si bien el T65 implicó una menor frecuencia de riego y, por tanto, una operativa más sencilla, también favoreció un mayor aprovechamiento de las precipitaciones. Al permitir un mayor agotamiento del agua precipitada, al tiempo que redujo las pérdidas asociadas a precipitaciones sobre un suelo con mayor contenido de agua. De este modo, el T65 permitió cubrir una mayor proporción de la demanda hídrica mediante las precipitaciones y, en consecuencia, reducir la necesidad de reposición mediante riego.

Desde una perspectiva económica, la aplicación de agua mediante riego depende de las características y el manejo del sistema. Hayashi (2021) señala que los costos de amortización y mantenimiento de la estructura de riego son relevantes en el análisis económico, debido a la cantidad de variables involucradas. En este estudio, el T65 redujo el volumen total de agua aplicada y las horas de funcionamiento de la bomba durante el período de evaluación. En términos económicos, el T65 presentó un costo de 157 USD/mm aplicado, mientras que el T30 alcanzó 206 USD/mm aplicado, según los valores tomados de Hayashi (2021).

La relación positiva entre biomasa producida y agua consumida observada en este estudio coincide con el concepto de productividad hídrica propuesto por Steduto et al. (2007), quienes establecen que la acumulación de biomasa está directamente asociada a la cantidad de agua transpirada por el cultivo. En este sentido, la alfalfa presentó un umbral crítico de respuesta al agua de aproximadamente 500 mm de consumo, asociado a una producción de 23.500 de kg MS ha⁻¹, a partir del cual la respuesta productiva tendió a estabilizarse. Este comportamiento resulta consistente con antecedentes reportados para la especie en diferentes ambientes productivos. Por ejemplo, Montazar y Putnam (2023) en un entorno árido y ventoso con temperaturas media del aire en 22°C, informaron producciones medias cercanas a 25.000 kg de MS ha⁻¹ con consumos promedio de 1.510 mm, mientras que Fink et al. (2022) registraron una amplia variabilidad en la producción, desde 700 hasta 23.900 kg de MS ha⁻¹, asociada a consumos de agua comprendidos entre 38 y 2.016 mm. De forma similar, Servín et al. (2017) reportaron una producción de 6.950 kg de MS ha⁻¹ para un consumo de 288 mm, evidenciando que incrementos en la disponibilidad hídrica se traducen en mayores niveles de acumulación de materia seca. En conjunto, estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos en

el presente estudio y sugieren que, si bien la relación entre biomasa y agua consumida es marcadamente positiva, la magnitud de la respuesta depende de factores como las condiciones climáticas, el potencial productivo del ambiente, la duración del período evaluado y las prácticas de manejo empleadas.

CONCLUSIÓN

Los tratamientos con riego mostraron un rendimiento estival superior. Aunque no hubo diferencias significativas entre los umbrales evaluados, el tratamiento T65 sobresalió frente al T30 en términos de productividad del agua de riego y consumo total de agua. Estos resultados posicionan al T65 como una opción más eficiente y sostenible para el correcto manejo del agua.

El T65 determinó un ahorro de mm aplicados debido a una mayor efectividad de las precipitaciones ocurridas, traducándose en un ahorro energético y una mayor eficiencia en la logística del riego, lo que contribuye a optimizar tanto el consumo de recursos como los procesos operativos.

La relación entre biomasa producida y agua consumida mostró una respuesta creciente hasta alcanzar un umbral de aproximadamente 500 mm. A partir de dicho punto, la producción de materia seca tendió a estabilizarse, indicando que consumos adicionales de agua no generaron incrementos proporcionales en la productividad del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

El ensayo fue financiado por el proyecto "Optimización del manejo del riego suplementario en pasturas, hacia una intensificación sostenible de los sistemas productivos en pastoreo directo" de la Agencia Nacional de investigación e Innovación (ANII).

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO. (Irrigations and Drainage: 56) 300p.
- Brown, H. E., Moot, D. J. & Pollock, K. M. (2005). Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. New Zealand Journal of Agricultural Research, 48, 423-439.
- Campbell G. (1966). Grazed pasture parameters. I pasture dry-matter production and availability in a stocking rate and grazing management experiment with dairy cows. J. Agric. Sci., Camb. 67: 119-210
- Castañó J; Gimenez A; Furest J; Aunchayna R; Bidegain M. (2011) caracterización climática: 1980-2009. Mdeo. INIA Unidad de comunicación y transferencia de tecnología. 2011. 34p.

- Collino, D; Darnanelli, J; De Luca, M. (2007). Uso del agua y la radiación para producción de forraje. In: El cultivo de alfalfa en la Argentina. Ed Basigalup, D. Ediciones INTA. Argentina. 47-63 pp.
- Dardanelli J; Severina I; Andriani J. (2010). Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol suplementario. In: Grupo de desarrollo de riego. Seminario internacional. Agosto 2010. Paysandú, Uruguay. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, Uruguay. INIA 2010. 19-28.
- Demin, P. E., & Aguilera, J. J. (2012). Efecto del régimen de riego en el rendimiento de alfalfa para corte en el Valle Central de Catamarca, Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(1), 173-181.
- Díaz, J. E., García, J., & Rebuffo, M. (1996). Crecimiento de leguminosas en La Estanzuela. INIA Serie Técnica, (71).
- Doorenbos, J. y Kassam, A. (1979). *Yield response to water*. FAO. https://www.researchgate.net/publication/230888005-Efectos_del_agua_sobre_el_rendimiento_de_los_cultivos
- Espinoza, G., Servín, M., Olvera, C., De la Rosa, J., García, M. y Moreno, M. (2018). Optimización de agua de riego en alfalfa (*Medicago sativa*) utilizando sensores de humedad en el suelo. En F. Pérez Soto, E. Figueroa Hernández, L. Godínez Montoya, R. M. García Núñez y J. Rocha Quiroz (Comps.), *Sistemas de producción y cultivos agrícolas en México* (pp. 31-41). ASMIA. <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.11845/1611/2018%20CapLib%20Espinoza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- FAO. 2025. *Sustainable nitrogen management in agrifood systems*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/cd3388en
- Fink, K., Grassini, P., Rocateli, A., Bastos, L., Kastens, J., Ryan, L., Lin, X., Patrignani, A., Lollato, R. (2022). Alfalfa water productivity and yield gaps in the U.S central Great Plains. *Field Crops Research*. Volumen 289.
- Formoso, F; Sawchik, J. (2000). Producción de semillas de leguminosas forrajeras con riego. INIA Serie de Actividades de Difusión N° 227, pp 27-46.
- Gabriels, D., Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*. 14 (1), 37-48.
- García Petillo, M., Puppo, L., Hayashi, R., Morales, P. (2012). Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo.
- García, J. (1995). Producción de forraje de pasturas cultivadas en la Región Litoral Sur In: Risso, D.; Berretta, E.J.; Moron A. (Eds.). *Producción y manejo de pasturas*. Seminario técnico, 17-19 octubre 1995, INIA Tacuarembó. Montevideo (Uruguay): INIA, 1995. P 163-168 (INIA Serie Técnica; 80).
- Giorello, D., Jaurena, M., Boggiano, P. y Perez Gomar, E. (2012). Respuesta al riego suplementario en pasturas y forrajes. En Grupo de Desarrollo de Riego (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas: 2do. Seminario Internacional* (pp. 43-53). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11845/1/Giorello-D-2012.pdf>
- Godoy-Avila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes, I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 37(2), 107-115.
- Grimes, D. W., Wiley, P. L. & Sheesley, W. R. (1992). Alfalfa Yield and Plant Water Relations with Variable Irrigation. *Crop Science* 32: 1381-1387.
- Hayashi, R., Dogliotti, S. (2021). Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrociencia Uruguay*. 2021:25:390 Doi: 10.31285/AGRO.25.390.
- Haydock, K., Shaw, H. (1975). The comparative yield method for estimations dry matter yield of pasture. *Aust. J. Exp. Agr. Anim. Husb.* 15: 663
- Instituto Nacional de Semillas e Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2023). Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras: Anuales, bianuales y perennes: Período 2022. https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17925/1/Inase-Inia-Evaluacion-EF_PubForrajesPeriodo2022.pdf
- Jáuregui, J. M., Ojeda, J. J., Berone, G. D., Lattanzi, F. A., Baudracco, J., Fariña, S. R., & Moot, D. J. (2022). Yield gaps of lucerne (*Medicago sativa* L.) in livestock systems of Argentina. *Annals of Applied Biology*, 181(1), 22-32. <https://doi.org.proxy.timbo.org.uy/10.1111/aab.12745>
- Kloster AM, Zaniboni CM, Sardiña C. (2022). Manejo y utilización de pasturas de alfalfa para producción de carne. In: Basigalup DH, editor. *Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argentina*. Buenos Aires: INTA; 2022. p. 507-49.
- Márquez Ortiz, J., Currier, C. y Núñez, G. (1995). Eficiencia en el uso del agua en alfalfa bajo un sistema de aspersión lineal. *ITEA*, 91(2), 110-119. https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/1995/91V-2/91V2_04.pdf
- Montazar, A., y Putnam, D. (2023). Herramientas de evapotranspiración e impacto en el rendimiento para una producción de alfalfa más eficiente en el uso del agua en entornos desérticos. *Agricultura*, 13(11), 2098. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112098>
- Moot, D; Texeira, E; Brown, H. (2012). Alfalfa. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Otero, Á., García, C. (2019). Eficiencia en el uso del agua: estrategias de. En: *Aportes científicos y tecnológicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay a las trayectorias agroecológicas*, 199- 213.
- Pembleton, K. G., Volenc, J. J., Rawnsley, R. P., & Donaghy, D. J. (2010). Partitioning of taproot constituents and crown bud development are affected by water deficit in regrowing alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Crop science*, 50(3), 989-999.
- Pereira, L; Juan Valero, J; Picornel, M; Tarjuelo, J. (2010). El riego y sus tecnologías. Lisboa: Europa América. 296p.
- Pérez Gomar E. (2004). Respuesta al agua en un mejoramiento forrajero en suelos profundos de Basalto bajo diferentes condiciones de pastoreo. INIA. Serie de Actividades de Difusión 364, pp. 23-30.
- Plevich, J., Delgado A., Saroff, C., Tarico, J. C., Crespi, R. J. y Barotto, O. M. (2012). El cultivo de alfalfa utilizando agua de perforación, agua residual urbana y precipitaciones. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(12), 1353-1358. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001200013>

- Puppo, L; Hayashi, R; Beretta, A; Morales, P. 2024. Efecto del riego y el pastoreo sobre la producción de una pastura de alfalfa (*Medicago sativa*. L). Agrociencia, Uruguay 2024. Volumen 28. 17p.
- Rebuffo, M., Risso, D., Restaino, E. (2000). Tecnología en alfalfa. Boletín de divulgación N° 69. 165pp.
- Rojas-García, A., Torres- Salado, N., Joaquín-Cancino, S., Hernández-Garay, A., Maldonado-Peralta, M. y Sánchez-Santillán, P. (2017). Componentes del rendimiento en variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) *Agrociencia*, 51(7), 697-708. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n7/1405-3195-agro-51-07-00697.pdf>
- Sawchik, J., Formoso, F. y Romero, R. (2000). Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. *El País Agropecuario*, 25-27. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/10424/1/70.pdf>
- Sawchik J; Mas C; Pérez Gomar E; Bermúdez R; Pravia V; Giorello D; Ayala W. (2010). Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. In: Grupo de desarrollo de riego. Seminario internacional. Agosto 2010. Paysandú, Uruguay. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, Uruguay. INIA 2010. 141-153.
- Servín Palestina, S., Espinoza García, E., Sánchez Gutiérrez, S. y Gutiérrez Bañuelos, G. (2017, 28-30 de noviembre). *Modelos para optimización de agua de riego en alfalfa con reposo invernal* [Contribución]. III Congreso nacional de riego y drenaje COMEII 2017, Puebla. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2017/assets/documentos/ponencias/extenso/COMEII-17026.pdf>
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F. y Durán, A. (1988). *Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay*. Universidad de la República. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31373>
- Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25, 189–207 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- Tarjuelo, M. Benito, M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. 3era edición. 581 pp.
- Van Halsema, G. y Vincent, L. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*, 108, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.016>