



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# **Selección del umbral de riego en función de la productividad del agua en una pastura de *Medicago sativa* pastoreada**

Ana Laura Elhordoy Goyeche

Magíster en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias del Suelo

Mayo, 2026

**Selección del umbral de riego en función  
de la productividad del agua en una  
pastura de *Medicago sativa* pastoreada**

Ana Laura Elhordoy Goyeche

Magíster en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias del Suelo

Mayo, 2026

Esta Tesis de Maestría se distribuye bajo licencia  
**“Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada”**



Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. Dr. Javier García Favre (Presidente), Ing. Agr. Dr. Nicolas Caram (Vocal) e Ing. Agr. Dra. María Cristina Capurro (Vocal) el 20 de mayo de 2026. Autora: Ing. Agr. Ana Laura Elhordoy Goyeche. Director: Ing. Agr. Dr. Pablo Boggiano. Codirectora: Ing. Agr. Dra. Lucía Puppo.

(Dedico este trabajo a Julieta, mi bodoque)

### **Agradecimientos**

Quisiera agradecer de todo corazón a cada persona que fue parte de este arduo y extenso trabajo, no quiero mencionar a nadie en específico por temor a olvidarme de alguien, pero sepan que los tuve siempre presente en el trayecto de mi maestría. Sinceramente muchas gracias por su incondicional apoyo.

## Tabla de contenido

|                                                                                   |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><u>Página de aprobación.....</u></b>                                           | <b><u>iv</u></b> |
| <b><u>Agradecimientos.....</u></b>                                                | <b><u>vi</u></b> |
| <b><u>Lista de tablas y figuras.....</u></b>                                      | <b><u>ix</u></b> |
| <b><u>Resumen.....</u></b>                                                        | <b><u>x</u></b>  |
| <b><u>Summary.....</u></b>                                                        | <b><u>xi</u></b> |
| <b><u>1. Introducción.....</u></b>                                                | <b><u>1</u></b>  |
| <b>1.1. Consideraciones generales sobre el riego en pasturas.....</b>             | <b>1</b>         |
| <b>1.2 Planificación del riego .....</b>                                          | <b>2</b>         |
| <u>1.2.1. Evapotranspiración del cultivo bajo condición estándar (ETc).....</u>   | <u>3</u>         |
| <u>1.2.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo.....</u>               | <u>4</u>         |
| <u>1.2.3. Coeficiente del cultivo (Kc).....</u>                                   | <u>5</u>         |
| <u>1.2.4. Umbral de riego (p) .....</u>                                           | <u>6</u>         |
| <u>1.2.5 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés (Ks) .....</u> | <u>7</u>         |
| <b>1.3 Parámetros hídricos del suelo.....</b>                                     | <b>8</b>         |
| <b>1.4 Métodos para determinar contenido de humedad del suelo .....</b>           | <b>9</b>         |
| <u>1.4.1 Método directo.....</u>                                                  | <u>9</u>         |
| <u>1.4.2 Método indirecto Reflectometría en el dominio de la frecuencia</u>       |                  |
| <u>(FDR).....</u>                                                                 | <u>10</u>        |
| <b>1.5 Alfalfa .....</b>                                                          | <b>10</b>        |
| <u>1.5.1. Crecimiento y desarrollo.....</u>                                       | <u>11</u>        |
| <u>1.5.2. Producción de materia seca .....</u>                                    | <u>13</u>        |
| <u>1.5.3. Respuesta al agua.....</u>                                              | <u>14</u>        |
| <u>1.5.4. Productividad del agua en las pasturas .....</u>                        | <u>16</u>        |
| <u>1.5.5 Componentes del rendimiento condicionados por el agua .....</u>          | <u>18</u>        |
| <u>1.5.6 Relación hoja tallo .....</u>                                            | <u>18</u>        |
| <u>1.5.6 Composición química del forraje.....</u>                                 | <u>19</u>        |
| <b>1.6 Objetivos e hipótesis .....</b>                                            | <b>21</b>        |
| <u>1.6.1 Objetivo general.....</u>                                                | <u>21</u>        |
| <u>1.6.2 Objetivos específicos .....</u>                                          | <u>21</u>        |
| <u>1.6.3 Hipótesis .....</u>                                                      | <u>21</u>        |

|                                                                                     |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><u>2. Materiales y métodos .....</u></b>                                         | <b><u>22</u></b> |
| 2.1 Ubicación tempo-espacial.....                                                   | 22               |
| 2.2 Caracterización edáfica.....                                                    | 22               |
| 2.3 Diseño experimental .....                                                       | 23               |
| 2.4 Manejo del riego .....                                                          | 24               |
| 2.5 Manejo de la pastura .....                                                      | 26               |
| 2.6 Variables medidas.....                                                          | 27               |
| 2.7 Caracterización climática .....                                                 | 28               |
| 2.8 Análisis estadístico .....                                                      | 29               |
| <b><u>3. Resultados y discusión .....</u></b>                                       | <b><u>30</u></b> |
| 3.1 Caracterización climática .....                                                 | 30               |
| 3.2 Balance hídrico .....                                                           | 30               |
| 3.3 Producción de materia seca .....                                                | 34               |
| 3.4 Productividad del agua .....                                                    | 35               |
| 3.5 Relación entre biomasa producida y agua consumida .....                         | 37               |
| 3.6 Evolución de componentes de rendimiento .....                                   | 38               |
| 3.7 Relación hoja tallo y fracciones de la composición química del forraje<br>..... | 42               |
| <b><u>4. Consideraciones generales.....</u></b>                                     | <b><u>46</u></b> |
| <b><u>5. Conclusiones .....</u></b>                                                 | <b><u>47</u></b> |
| <b><u>6. Bibliografía .....</u></b>                                                 | <b><u>48</u></b> |
| <b><u>7. Anexo.....</u></b>                                                         | <b><u>59</u></b> |



## **Lista de tablas y figuras**

### Tablas

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 <i>Parámetros hídricos del suelo expresados por horizonte</i> .....                                                                                                            | 22 |
| Tabla 2 <i>Déficit acumulado para determinar el momento del riego y lámina neta aplicada en cada tratamiento de riego</i> .....                                                        | 25 |
| Tabla 3 <i>Registro de las precipitaciones totales y efectivas, riego, variación del contenido de humedad, agua consumida total y números de riego, expresados en milímetros</i> ..... | 33 |
| Tabla 4 <i>Producción estacional de materia seca (<math>\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math>) para los diferentes tratamientos evaluados</i> .....                                    | 35 |
| Tabla 5 <i>Productividad del agua total consumida y del agua de riego, a escala anual y estacional (verano 2022) para los umbrales de riego evaluados</i> .....                        | 36 |

### Figuras

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 <i>Representación gráfica de los conceptos implícitos en un balance hídrico del suelo</i> .....                                                        | 3  |
| Figura 2 <i>Croquis del ensayo expresando la ubicación de los tratamientos</i> .....                                                                            | 23 |
| Figura 3 <i>Evolución del déficit de humedad del suelo y riegos aplicados (2021–2022) en 0,40 m para T30–T65 y 0,50 m para T0</i> .....                         | 31 |
| Figura 4 <i>Relación entre producción de biomasa y agua consumida</i> .....                                                                                     | 37 |
| Figura 5 <i>Evolución de los componentes de rendimiento en función del umbral evaluado para las diferentes estaciones del año</i> .....                         | 40 |
| Figura 6 <i>Regresión entre la variable peso seco del tallo sobre el número de tallos por superficie y tallos por planta sobre plantas por superficie</i> ..... | 42 |
| Figura 7 <i>Evolución de la relación hoja tallo para los diferentes tratamientos evaluados a lo largo de las diferentes estaciones</i> .....                    | 43 |
| Figura 8 <i>Evolución de las diferentes fracciones de la composición química del forraje durante el periodo de evaluación</i> .....                             | 44 |

## **Resumen**

En Uruguay hay 2,6 millones de hectáreas con pasturas mejoradas de las cuales solo un 2,4% se encuentra bajo riego. Los períodos de sequía son cada vez más frecuentes y esto determina que la producción del forraje disminuya en forma notable, acentuado por la baja capacidad de almacenamiento de agua disponible de nuestros suelos. La alfalfa respondería al riego pudiendo alcanzar altos potenciales de producción por sobre una gran variedad de forrajeras, sin embargo, la información disponible es muy escasa. Existe incertidumbre en la determinación de los momentos oportunos de riego que permitan optimizar el aprovechamiento de las precipitaciones, sin inducir limitaciones significativas en la evapotranspiración del cultivo o admitiendo restricciones controladas que no comprometan la productividad. El objetivo de este trabajo fue determinar el manejo del riego más adecuado para alfalfa en pastoreo, en términos de cantidad y momento de agua aplicada. El ensayo se instaló en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía (Progreso, Canelones), donde se sembró alfalfa cv. Chaná a 20 kg.ha<sup>-1</sup>. El experimento incluyó tres tratamientos con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron: secano (sin riego): T0; riego al agotarse el 30% del agua disponible T30 y riego cuando se agotó el 65% del agua disponible T65. El momento de riego estuvo determinado por balance hídrico, acompañado por mediciones de humedad del suelo mediante la utilización de la sonda FDR para verificar los umbrales de riego. El momento del pastoreo estuvo determinado por el criterio de 8 nudos, con un corte de homogeneización a la salida del pastoreo a 5 cm de altura. Los niveles de significancia utilizados fueron de 0.05. El rendimiento acumulado anual no presentó diferencias significativas entre tratamientos, con un valor promedio de 23.500 ± 979 kg de MS ha<sup>-1</sup>. Se detectaron diferencias entre tratamientos en el segundo verano de evaluación a favor de los tratamientos regados, a pesar de categorizarse como un verano de baja demanda atmosférica. Con respecto a la variable productividad del agua el T0 y T65 presentaron diferencias significativas con respecto al T30 (5,2 – 4,1 vs 3,7 kg de MS m<sup>-3</sup>). Se determinó el umbral máximo de la relación entre biomasa producida y agua consumida en 500 mm.año<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** alfalfa, requerimientos hídricos, producción MS, programación del riego

## **Irrigation threshold selection based on water productivity in a grazed *Medicago sativa* pasture**

### **Summary**

In Uruguay, there are 2.6 million hectares of improved pastures, of which only 2.4% are under irrigation. Drought periods are becoming increasingly frequent, significantly reducing forage production an issue that is further aggravated by the low water-holding capacity of local soils. Alfalfa is expected to respond positively to irrigation, achieving high production potential compared to many other forage species; however, results have been inconsistent. There is uncertainty regarding the optimal timing of irrigation to make the best use of rainfall, either by preventing evapotranspiration limitations or allowing them within certain limits to maximize productivity. The objective of this study was to determine the most suitable irrigation management strategy for grazed alfalfa, in terms of both the amount and timing of water applied. The trial was conducted at the Southern Regional Center, Faculty of Agronomy (Progreso, Canelones), where alfalfa cv. Chaná was sown at a rate of 20 kg·ha<sup>-1</sup>. The experiment included three treatments and four replications. The treatments were: rainfed (no irrigation, T0); irrigation when 30% of available water was depleted (T30); and irrigation when 65% of available water was depleted (T65). Irrigation timing was determined by a water balance approach, supported by soil moisture measurements using an FDR probe to verify irrigation thresholds. Grazing timing was based on the 8-node criterion, with a uniformity cut at 5 cm height after grazing. The significance level used was 0.05. Annual cumulative yield showed no significant differences among treatments, with an average of 23,500 ± 979 kg DM·ha<sup>-1</sup>. Differences between treatments were detected during the second summer in favor of the irrigated treatments, despite it being classified as a summer with low atmospheric demand. Regarding water productivity, T0 and T65 showed significant differences compared to T30 (52–41 vs. 37 kg DM·mm<sup>-1</sup>). The maximum threshold for the relationship between biomass produced and water consumed was determined to be 500 mm·year<sup>-1</sup>.

**Keywords:** alfalfa, water requirements, dry matter production, irrigation scheduling

## **1. Introducción**

Históricamente, la ganadería ha sido el principal motor de ingresos del sector agropecuario en Uruguay. Sin embargo, en la primera década del 2000, el crecimiento de la forestación y la expansión del sector agrícola provocaron un desplazamiento significativo de las áreas destinadas a la ganadería. Este fenómeno, sumado a los efectos adversos de la sequía de 2008, impactó negativamente en varios indicadores del sector, como la disminución del área de pasturas sembradas y otros factores relacionados con la producción ganadera. Estos cambios evidencian como la reconfiguración del uso de la tierra afectó la dinámica productiva del país. A partir del año 2013, comienza a observarse un incremento sostenido del área de pasturas mejoradas. Las praderas instaladas, se incrementaron en un 30% a partir del año 2014, alcanzando en el 2020 un área de 1.280.000 hectáreas (Maranges y Rossi, 2021).

Al carecer de estadísticas anuales del área de siembra de alfalfa o en su defecto del volumen total de semilla comercializada en el país, es difícil estimar con precisión su importancia relativa en el transcurso de los años. Sin embargo, el análisis de los registros de importación de semilla indica algunas tendencias de mercado en alfalfa (Rebuffo, 2000).

En nuestro país una importante limitante productiva es la disponibilidad hídrica para los cultivos durante los meses estivales. Si bien las condiciones son de alta variabilidad interanual de lluvias, generalmente se presenta un déficit hídrico debido a los mayores valores de evapotranspiración del año y a la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos (Castaño et al., 2011; Giménez y García Petillo, 2011; Sawchik y Ceretta, 2005).

### **1.1. Consideraciones generales sobre el riego en pasturas**

Una opción tecnológica para incrementar y estabilizar la disponibilidad de forraje consiste en la introducción de riego en cultivos forrajeros. Esto se lograría mediante riegos suplementarios con el propósito de optimizar la producción de forrajes especializados en la generación de materia seca en la temporada estival o para

aumentar la persistencia de los pastizales. Para evaluar la viabilidad de implementar riego en pasturas, es esencial comprender los factores técnicos vinculados en la respuesta al agregado de agua en diferentes opciones forrajeras. En última instancia, la aplicación de la tecnología de riego dependerá de su rentabilidad, considerando el costo del volumen de agua aplicado (en mm) y la respuesta productiva de las distintas alternativas forrajeras sometidas al riego (Giorello et al., 2012).

El objetivo del riego según Tarjuelo (2005) es proporcionar agua adicional de manera eficiente a cultivos y pasturas, sin afectar la fertilidad del suelo, para garantizar su crecimiento óptimo asegurando la sostenibilidad del regadío.

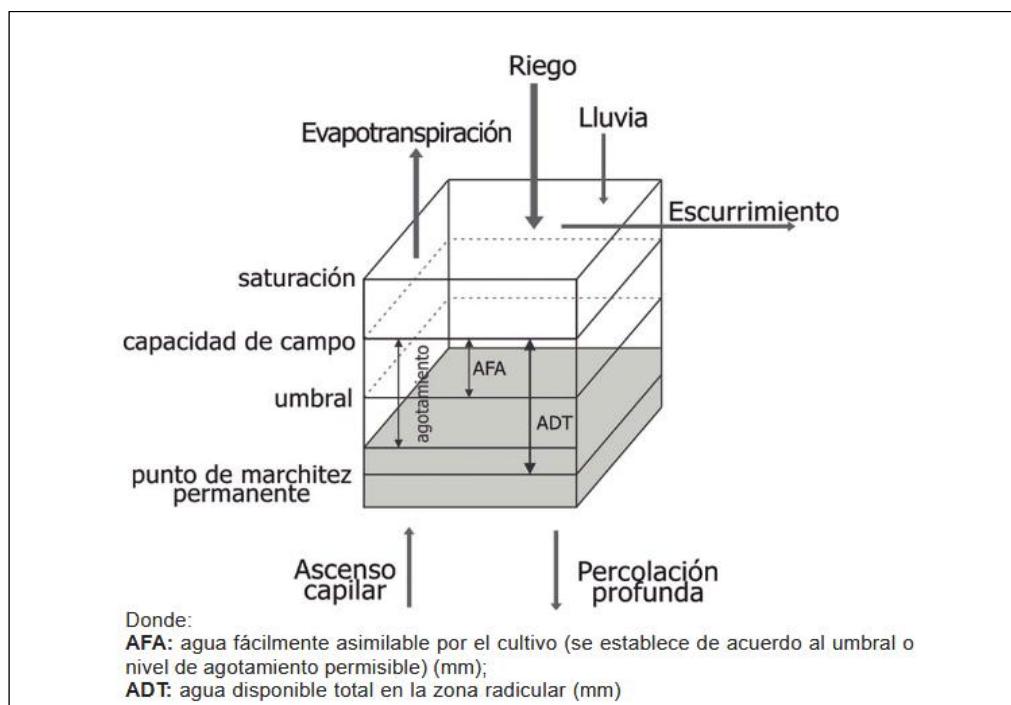
## **1.2 Planificación del riego**

Para Otero et al. (2017), la planificación del riego implica determinar el momento y la cantidad exacta de agua que se debe proporcionar al cultivo en cada riego. Este enfoque permite ajustar el manejo del riego según diversos criterios agronómicos, como maximizar la producción total, maximizar la productividad del agua o lograr el máximo beneficio económico. Para implementar esta técnica de manera efectiva, se requiere un conocimiento profundo de los factores que influyen en los diversos procesos agrícolas. Entre estos procesos, la evapotranspiración del cultivo destaca como el más significativo.

La planificación del riego se puede llevar a cabo mediante diferentes metodologías, una de ellas se basa en el conocimiento del estado hídrico del suelo a través de la medición del contenido de agua por medio de metodologías directas (gravimetría) o indirectas (sonda de neutrones o constante dieléctrica con sensores de reflectometría en el dominio de la frecuencia). Otra metodología es el estudio del balance del agua en el suelo, que utiliza las condiciones climáticas (demanda evaporativa de la atmósfera y precipitación), y que atiende las características físicas e hídricas del suelo así como aspectos relacionados con el desarrollo del cultivo.

**Figura 1**

*Representación gráfica de los conceptos implícitos en un balance hídrico del suelo*



*Nota.* Tomado de Allen et al. (1998).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** esquematiza el equilibrio hídrico en el suelo en la zona radicular, con el propósito de calcular el déficit de agua para un período específico, generalmente a nivel diario. En este cálculo, se consideran las entradas y salidas del sistema. La precipitación (P), el riego (R) y la ascensión capilar (CR) se contabilizan como entradas, reduciendo el agotamiento de humedad del suelo, mientras que las salidas son el escurrimiento (E) y la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la percolación profunda (DP) incrementando el agotamiento de humedad en la zona radicular (Allen et al., 1998).

#### 1.2.1. Evapotranspiración del cultivo bajo condición estándar (ETc)

Allen et al. (1998) definen a la ETc bajo condiciones estándar, como la cantidad de agua que un cultivo consume mediante los procesos de evaporación y transpiración cuando se encuentra en un ambiente óptimo. En este contexto, se considera que el cultivo se desarrolla de manera saludable, libre de enfermedades y plagas, recibe una fertilización adecuada y, bajo condiciones climáticas favorables. Para calcular la

ETc, se utiliza como base la evapotranspiración de referencia (ETo), ambas se expresan como  $\text{mm.d}^{-1}$ , la cual se multiplica por el coeficiente de cultivo (Kc), el cual es adimensional, un factor que ajusta las diferencias en el comportamiento de diferentes cultivos con relación al cultivo de referencia en las condiciones atmosféricas y ambientales específicas.

La evapotranspiración (ET) es una combinación entre dos procesos separados por los que el agua vuelve a la atmósfera a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. Ambos procesos ocurren de forma simultánea y no hay manera sencilla de medir por separado la cantidad de agua involucrada en estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación directa de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua regresa a la atmósfera principalmente por evaporación directa del suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen et al., 1998).

Comúnmente se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo, lo que indica la cantidad de agua que se evapotranspira desde una superficie cultivada en términos de altura de agua. Los factores que afectan la evapotranspiración incluyen el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo.

Así, mientras la ETo refleja la demanda climática, el valor de Kc depende principalmente de las características específicas del cultivo, con una variación menor debido a las condiciones climáticas.

#### 1.2.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo

La evapotranspiración de referencia representa la demanda evaporativa de la atmósfera, independientemente del cultivo, y se define como la evapotranspiración de una superficie de referencia hipotética, con cobertura completa, en activo crecimiento y sin limitaciones hídricas (Allen et al., 1998).

Allen et al. (1998) establecen como método estándar para su estimación la ecuación de Penman- Monteith modificado por FAO, la cual ha sido validada internacionalmente por la comunidad científica. Este parámetro se refiere a un cultivo hipotético completamente estandarizado, con una altura de 0,12 m, que sombrea totalmente el suelo, presenta una resistencia superficial de  $70 \text{ sm}^{-1}$  y un albedo de 0,23.

La mayoría de los efectos de los factores meteorológicos se incluyen en la estimación de  $ET_o$ . En cuanto a factores climáticos, los más influyentes son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

$ET_o$  Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $\text{mm/día}^{-1}$ )

$Rn$  radiación solar neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )

$G$  calor sensible desde la superficie al interior del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )

$T$  temperatura media diaria medida a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$u_2$  velocidad del viento media diaria medida a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$e$  presión de vapor a saturación (KPa)

$ea$  presión de vapor real del aire (KPa)

$e - ea$  déficit de presión de vapor (KPa)

$\Delta$  pendiente de la curva  $T$ -presión de vapor a saturación ( $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$  cte psicométrica del aire ( $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

### 1.2.3. Coeficiente del cultivo ( $K_c$ )

El coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) expresa los efectos de las características que diferencian un cultivo específico del pasto de referencia, el cual presenta una superficie uniforme y cobertura completa del suelo. En consecuencia, cada cultivo posee valores propios de  $K_c$ , determinados por sus particularidades morfológicas y fisiológicas.



Además de la especie, es necesario considerar la variedad y la etapa fenológica, ya que atributos como la altura del dosel, el grado de cobertura del suelo y la profundidad y distribución del sistema radicular pueden generar variaciones en la evapotranspiración, aun bajo condiciones ambientales similares.

El valor de  $K_c$  permite estimar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no limitantes de crecimiento. En este sentido, representa el potencial máximo de evapotranspiración cuando no existen restricciones tales como déficit hídrico y las condiciones agronómicas del cultivo sean excelentes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2006).

El comportamiento del  $K_c$  en los cultivos perennes, como la alfalfa, muestra un valor inicial poco después de la aparición de las nuevas hojas. A partir de este valor, el  $K_c$  comienza a aumentar debido al desarrollo progresivo de la planta, alcanzando su máximo valor luego que el cultivo completa su desarrollo. Sin embargo, en la etapa final de la temporada, el valor de  $K_c$  disminuye nuevamente, ya que las hojas comienzan a senescer como resultado de los procesos naturales de envejecimiento de la planta.

Para el cálculo de  $ET_c$  en un cultivo de alfalfa, FAO (2006) propone los siguientes valores de  $K_c$ , un valor inicial de  $K_c$  igual 0,4 y un valor máximo previo al corte 1,2. Este último se asocia o referencia a un cultivo de 0,70 m de altura.

#### 1.2.4. Umbral de riego (p)

Allen et al. (1998) lo definen como la fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada en la zona radicular antes de presentar control estomático. Esta fracción se denomina factor p el cual se establece de acuerdo con criterios agronómicos, asegurando así que la producción del cultivo no se vea afectada por la escasez del agua. Cuando se alcanza este umbral, se recomienda realizar un riego, asegurándose de que la lámina no sobrepase el agua fácilmente asimilable por el cultivo (AFA) siendo esta última producto de realizar la siguiente ecuación:

$$AFA = ADT \times p$$

Donde:

AFA agua fácilmente asimilable (extraíble) de la zona radicular del suelo en mm.

p fracción promedio total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada en la zona radicular antes de presentarse control estomático, es decir reducción de la ET.

En el caso de la alfalfa, el valor base del factor p es 0,55 cuando la ETc es de aproximadamente 5 mm.día<sup>-1</sup>. Este valor representa la AFA que la planta puede utilizar sin sufrir estrés hídrico. Sin embargo, dado que la demanda evaporativa varía, FAO 56 propone un ajuste dinámico del valor de p en función de ETc, mediante la fórmula:

$$p = p_{\text{tabla}} + 0,04 * (5 - ET_c)$$

Este ajuste permite reducir p cuando ETc es mayor de 5 mm.día<sup>-1</sup> (condiciones de alta demanda), y aumentarlo cuando hay condiciones de baja demanda, mejorando así la precisión en la estimación del momento en que se produce el estrés hídrico.

Para mejorar la productividad de cultivos y pasturas en relación con el riego, es fundamental determinar los umbrales críticos de humedad en el suelo. Estos umbrales indican el nivel mínimo de agua que se puede permitir sin afectar el crecimiento o rendimiento de las plantas. Al conocer estos límites, se puede predecir el estrés hídrico en cada etapa del cultivo y decidir de manera objetiva cuándo y cuánto regar, maximizando así el uso del agua (Capurro et al., 2017; Otero et al., 2017).

#### 1.2.5 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés (Ks)

Allen et al. (1998) definen AFA como la fracción del agua total disponible equivalente al agotamiento máximo permitido para evitar el control estomático y, por lo tanto, la reducción de la evapotranspiración. Cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo de este umbral, la evapotranspiración se reduce proporcionalmente mediante un coeficiente de estrés hídrico (Ks). A continuación, se presenta la ecuación utilizada para su estimación:

$$K_s = \frac{ADT - D_{\text{Acu}}}{(1 - p) * ADT}$$

Donde DAcu es el déficit acumulado en el suelo en un momento determinado.

### 1.3 Parámetros hídricos del suelo

El contenido de humedad del suelo define el crecimiento de las plantas, debido a que funciona como medio de transporte de los elementos a través de un mecanismo de flujo de masa. Dicho contenido de humedad se identifica con la capacidad de retención del suelo, la misma está directamente relacionada con las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del mismo por lo que su impacto sobre las plantas es indiscutible. La textura del suelo afecta el almacenamiento del agua así como en su movimiento (Portaj et al., 2003).

El ADT es el contenido de agua entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, equivale a la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular ( $\text{mm } 10\text{cm}^{-1}$ ) o en Hv (%) para cada horizonte.

La capacidad de campo (CC) expresa el contenido máximo de agua que el suelo puede retener en sus microporos, una vez que se ha eliminado el exceso de agua gravitacional tras una lluvia intensa o saturación del suelo. Generalmente se refiere al contenido de agua de dos días después de dicha precipitación intensa, dependiendo de la textura del suelo.

El punto de marchitez permanente (PMP) se define como el contenido de humedad del suelo en el que las plantas no logran recuperar la turgencia aun en condiciones de atmósfera saturada, debido a que el agua remanente se encuentra retenida con una energía tal que impide su absorción radicular.

El suelo constituye el principal reservorio de agua para la planta, y las propiedades físicas de sus horizontes juegan un papel crucial para definir tanto la capacidad de almacenamiento de agua como su disponibilidad para la planta.

La densidad aparente del suelo (D<sub>Ap</sub>) medida en  $\text{g.cm}^{-3}$ , influye en la habilidad de las raíces para explorar el suelo y presenta una alta variabilidad espacial en los suelos del Uruguay (Otero et al., 2017).

Este parámetro está estrechamente relacionado a la textura, de su estructura y de compactación de los horizontes del suelo. A mayor espacio poroso total menor va a ser la D<sub>Ap</sub> del horizonte. La pérdida de espacio poroso es una de las causas más

importantes en la pérdida de almacenamiento de agua por los horizontes del suelo, se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente del suelo (DAp)} = \frac{\text{Peso seco del suelo}}{\text{Volumen de suelo imperturbado}} \times 100$$

La humedad del suelo en un momento determinado se puede expresar como humedad gravimétrica y volumétrica

$$\text{Contenido gravimétrico de agua en el suelo (Hp\%)} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo seco}} \times 100$$

$$\text{Contenido volumétrico de agua en el suelo (Hv\%)} = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen del suelo (imperturbado)}} \times 100$$

La humedad, cuando se expresa en término de contenido volumétrico, puede determinarse a partir del contenido gravimétrico y de la densidad aparente del material. Este cálculo permite obtener una estimación precisa del agua presente en el suelo.

#### **1.4 Métodos para determinar contenido de humedad del suelo**

La determinación del contenido de humedad de agua del suelo se puede dividir en directo e indirecto, este último necesita calibración por horizonte.

##### **1.4.1 Método directo**

El método gravimétrico mide el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los métodos indirectos. Tiene una salvedad que, como toda medida realizada al suelo, tiene una gran variabilidad espacial, y al ser un método destructivo no permite repetir mediciones en el mismo sitio.

Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo por horizonte, y pesar lo antes posible previo a su ingreso a estufa 105° hasta lograr un peso constante que ocurre aproximadamente a las 48-72 h de su ingreso a la estufa, dependiendo del tamaño de la muestra (Radulovich, 2009).

#### 1.4.2 Método indirecto Reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR)

Existen diferentes sondas con distintos principios de funcionamiento, que permiten la medida del contenido de humedad en un mismo sitio asegurando el seguimiento de su evolución en el tiempo. En este trabajo se utilizó la sonda FDR cuyo principio de funcionamiento permite determinar el contenido de agua a partir de la medida de la capacitancia eléctrica del suelo que varía fundamentalmente en función de la humedad y que se determina por la variación que produce en la frecuencia de una onda electromagnética previamente emitida.

La sonda por sí misma puede ser utilizada para la planificación del riego (Gasque et al., 2011). Así como para la verificación del balance hídrico (Hayashi y Dogliotti, 2021; Puppo et al., 2024; Puppo Collazo, 2020).

### **1.5 Alfalfa**

*Medicago sativa* es una especie forrajera, leguminosa perenne de hábito erecto (Moot et al., 2012), cuyo ciclo productivo perdura varios años. Es de alto potencial productivo principalmente en primavera y verano, además de presentar un excelente comportamiento frente a períodos de sequía (Rebuffo, 2005).

Es uno de los cultivos forrajeros de mayor potencial de producción de materia seca en calidad y cantidad. Durante la temporada de crecimiento (estival) se realizan varios cortes de aprovechamiento y su número dependerá del objetivo de producción, del manejo, de cuestiones operativas y de las condiciones climáticas de cada temporada en particular (Cancio, 2016).

Diversos autores internacionales destacan las bondades del cultivo dada su capacidad de exploración de las raíces del suelo, mediante un extenso sistema radicular que puede llegar hasta los seis metros de profundidad en suelos profundos. Esta característica le permite acceder al agua de los horizontes más profundos del suelo e incluso, de la napa freática (Cancio, 2016). Coincidente con Rodríguez y Spada (2007), mencionan que de no existir impedimentos en el perfil (piso de arado, capa de tosca, horizontes muy densificados, etc.), sus raíces pueden extraer humedad

desde los 2 metros de profundidad a los dos años y desde los 4 metros a los tres años de vida.

En general, en los suelos uruguayos, la mayor parte de las raíces absorbentes se localiza alrededor de los 40 cm de profundidad (Sawchik et al., 2000).

En el manejo de la alfalfa, la latencia constituye un factor clave que determina el comportamiento productivo y el manejo del cultivo. Este concepto se refiere al grado de reposo invernal de la planta, es decir, su capacidad de reducir o detener el crecimiento durante los meses fríos. En Uruguay las variedades sin latencia o con reposo invernal corto son las que más se siembran ya que poseen un período de crecimiento más prolongado y una rápida capacidad de rebrote tras los cortes o pastoreos, esto permite obtener un mayor número de aprovechamientos al año dado que se modifica el potencial de producción de la especie (Rebuffo, 2000).

#### 1.5.1. Crecimiento y desarrollo

Formoso (2000) indica que su anatomía, morfología y fisiología está adaptada a esquemas de pastoreos rotativos poco frecuentes, intensos y de corta duración.

Presenta una fase vegetativa durante las estaciones de otoño, invierno y primavera, durante ese período una vez cortada o pastoreada la pastura, se reinicia el proceso denominado refoliación. Este consiste en formar una nueva masa de hojas generadas a partir de tallos “brotes” que emergen de la base de las plantas. La energía necesaria para estos procesos proviene de las reservas de los carbohidratos almacenados en la raíz, razón por la cual, durante esta etapa las raíces pierden peso.

Cuando el rebrote de la parte aérea alcanza los primeros 20 cm de altura, las reservas de los carbohidratos de la raíz se encuentran a un nivel mínimo, siendo en este momento un período muy crítico para las plantas. Por encima de los 20 cm las plantas siguen creciendo, rebrotando, refoliándose, de aquí en más la energía fijada por fotosíntesis excede lo que las plantas necesitan para seguir creciendo. Esta energía excedente es depositada en la raíz y se denominan reservas de carbohidratos (Formoso, 2000).

Cuando la planta detecta por mecanismos internos que la cantidad de reservas almacenadas en la raíz son suficientes y previamente las plantas han restaurado su aparato foliar, se comienza a observar nuevos rebrotes. En ese momento la planta indica que está pronta para ser pastoreada o cortada.

Beguet y Bavera (2001) mencionan una fase vegetativa la cual está conformada por un tallo principal, originado en el embrión de la semilla, tiene en la parte terminal un meristema que da origen a hojas alternas con yemas axilares. Los entrenudos se elongan, elevando al meristema apical. Nacen nuevos tallos secundarios de las yemas de las hojas más bajas. A medida que estos tallos crecen se vuelven leñosos en la base, formando una corona a nivel de suelo, con yemas accesorias capaces de formar nuevos tallos.

Posteriormente Beguet y Bavera (2001) identifican una fase reproductiva donde las yemas de las axilas de las hojas pueden dar lugar a inflorescencias. Cada yema axilar diferenciada comienza a abultarse y forma una inflorescencia sostenida por un pedúnculo, dando inicio al proceso de floración. A partir de este momento, las reservas comienzan a disminuir como consecuencia del inicio de un nuevo rebrote basal. Teóricamente este momento ocurre cuando se logra la mejor condición fisiológica y por lo tanto es cuando se debería empezar a pastorear. Sin embargo, la recomendación de pastoreo es cuando el proceso de floración está en un 10 a 20% de haberse iniciado, esto surge de considerar simultáneamente calidad y cantidad de forraje (Formoso, 2000). Otra recomendación que surge de pastorear cuando la alfalfa se encuentra con 8 nudos (Kloster et al., 2022).

La alfalfa se considera la leguminosa de mayor tolerancia a la sequía; no obstante, requiere suelos bien drenados, con adecuado escurrimiento superficial y buena aireación, condiciones esenciales para el correcto funcionamiento del sistema radicular. Esto es esencial, ya que su sistema radicular es muy susceptible a la falta de oxígeno.

Otra de las características de relevancia para esta especie son los buenos niveles de fertilidad natural del suelo (Li et al., 2023; Wan et al., 2022) que nos permitan obtener alta producción de materia seca.

### 1.5.2. Producción de materia seca

La especie se caracteriza por presentar un elevado potencial de producción (Demin y Aguilera, 2012; Jáuregui et al., 2022; Moot et al., 2012), el cual puede expresarse plenamente cuando se minimizan o eliminan factores bióticos y abióticos que limitan la producción de materia seca. No obstante, la producción de esta especie presenta una amplia brecha productiva, con valores que pueden variar entre 1.000 y 28.000 kg de MS ha<sup>-1</sup>, dependiendo de las condiciones ambientales y de manejo (Moot et al., 2012).

A nivel regional, Collino et al. (2007) reportaron en Argentina una producción anual de 20.500 kg de MS ha<sup>-1</sup> bajo condiciones de secano y en un ambiente climático similar al de Uruguay. Los autores atribuyen dicho rendimiento, independientemente del tipo de suelo, a las variaciones en la disponibilidad de agua, radiación y temperatura, factores que condicionan la eficiencia en el uso de los recursos y el crecimiento del cultivo.

En Uruguay, Díaz Lago et al. (1996) observaron producciones anuales cercanas a 11.500 kg de MS ha<sup>-1</sup> en pasturas de alfalfa de segundo año bajo secano, en La Estanzuela, departamento de Colonia. Por su parte, en la región semiárida pampeana central, Fontana y Cabo (2019) reportaron producciones de entre 4.000 y 6.000 kg de MS ha<sup>-1</sup>, pudiendo alcanzar hasta 8.000 kg de MS ha<sup>-1</sup> en años con mayores precipitaciones. Estos resultados deben interpretarse considerando las características edafoclimáticas de la región, particularmente el régimen de lluvias, que oscila entre 100 y 400 mm anuales, así como las condiciones de fertilidad y estructura del suelo.

A nivel nacional, los estudios realizados por Rebuffo (2000) reportaron un rendimiento anual de 13.700 kg de MS ha<sup>-1</sup> bajo condiciones de secano, constituyendo un importante punto de referencia para la producción de alfalfa en Uruguay. Asimismo, investigaciones más recientes desarrolladas por Instituto Nacional de Semillas e Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INASE e INIA, 2023) informaron valores ligeramente superiores en alfalfa de segundo año, alcanzando producciones de 16.037 kg de MS ha<sup>-1</sup> bajo condiciones de secano.



### 1.5.3. Respuesta al agua

La cantidad de agua que utiliza el cultivo, en relación con su producción, es elevada en comparación con otros cultivos forrajeros, como señalan Doorenbos y Kassam (1979). Durante su fase de crecimiento más activa, que va de primavera a otoño, los valores diarios de evapotranspiración (ET) son influenciados por la interacción entre el ambiente y el manejo de la defoliación. La reducción del área foliar posterior al corte disminuye significativamente la transpiración, por lo que la evapotranspiración (ET) puede descender a valores inferiores a  $1 \text{ mm día}^{-1}$  durante inviernos fríos, estando dominada principalmente por la evaporación del suelo. Sin embargo, una vez que el cultivo alcanza un dosel completo, la ET puede incrementarse hasta superar los  $8 \text{ mm día}^{-1}$ .

El riego es clave para la estabilidad y productividad de las pasturas. Al garantizar un suministro constante de agua, se logra mantener la repetitividad de la curva productiva, lo que optimiza el rendimiento. En este sentido, el riego se convierte en una herramienta esencial para enfrentar variaciones climáticas y maximizar la sostenibilidad de estas pasturas (Formoso y Norbis, 2014).

Otero y García (2017) mencionan que la búsqueda de un incremento en la producción, ya sea de productos vegetales o animales, debe ir acompañada de un enfoque en la sostenibilidad. Para lograr este equilibrio, es crucial optimizar el uso de los recursos hídricos disponibles. Al adoptar prácticas más eficientes en la gestión del agua, no solo se puede potenciar la producción, sino también preservar el medio ambiente y garantizar la salud de los ecosistemas. Así, se establece un modelo de producción que no solo se centra en el rendimiento inmediato, sino que también considera el bienestar a largo plazo de nuestras tierras y comunidades.

El uso del riego ha demostrado ser un factor clave para incrementar la producción de forraje, especialmente en regiones con variabilidad climática. Su impacto es particularmente significativo durante los períodos de menor pluviosidad, cuando la disponibilidad de agua natural es insuficiente para mantener los niveles de productividad de los cultivos (Boggiano et al., 2014).

Plevich et al. (2012) reportaron valores de producción estival de entre 10.750 kg de MS ha<sup>-1</sup> en secano y 11.500 – 14.178 kg de MS ha<sup>-1</sup> bajo riego ya sea agua proveniente de perforación o residuales urbanas respectivamente, en líneas generales la producción bajo riego fue superior en un 24% a la producción en secano (contemplando únicamente el aporte de las precipitaciones). Por otro lado, Barberis et al. (2019) reportaron rendimientos de 22.500 kg de MS ha<sup>-1</sup> en condiciones de riego. De manera similar, Spada (2014) logró obtener 27.760 kg de MS ha<sup>-1</sup> en situaciones donde el agua y las condiciones edáficas no son limitantes.

Según los datos preliminares presentados por Giorello et al. (2012), se concluye que cualquier opción forrajera, ya sea una pradera compuesta exclusivamente por gramíneas o por mezclas de leguminosas, muestra una respuesta positiva a la aplicación del riego en términos de productividad. Aunque estos hallazgos se centraron en la región de basalto, sus conclusiones son aplicables a otras áreas del país.

En relación con los rendimientos asociado a la adopción de la tecnología del riego, Formoso y Norbis (2014) señalan que la producción bajo riego puede llegar a duplicar los valores registrados en pasturas en condiciones de secano.

A nivel nacional, Hofstadter (1985) evaluó durante tres años la producción total acumulada de alfalfa bajo distintos umbrales de riego, los resultados sugieren que el manejo del riego basado en umbrales de disponibilidad de agua puede optimizar los rendimientos con respecto al secano.

Siguiendo en la misma línea del manejo del riego mediante umbrales, Sawchik et al. (2000) evaluaron umbrales similares a los del presente trabajo. En su estudio de la alfalfa, concluyeron que, a pesar de su capacidad para explorar agua a profundidades significativas, sus altas tasas de crecimiento en verano resultan en un mayor consumo de agua en comparación con otras especies estudiadas. Sin embargo, el riego potenció su capacidad para producir forraje de manera significativa. En el mismo estudio se deja constancia de la relevancia de la alfalfa en los sistemas forrajeros de nuestro país es evidente, especialmente considerando los resultados obtenidos, ya que puede ayudar a mitigar los déficits de forraje en situaciones de escasez de agua.

De hecho, en un año extremo como 1999-2000, el rendimiento de la alfalfa bajo secano superó al de los tratamientos regados de otras especies. Sawchik et al. (2000) concretamente reportan rendimientos en secano, para el periodo primavera-verano en el segundo año de la pastura, de 8.500 kg de MS ha<sup>-1</sup>, mientras que los tratamientos regados presentaron un rendimiento de 14.200 kg de MS ha<sup>-1</sup>.

El consumo potencial de 1.464 mm por año registrado en Córdoba representa el 90% de la evapotranspiración potencial de referencia, calculada por Allen et al. (1998). Este consumo potencial del cultivo se encuentra dentro del rango de 400 a 1.800 mm mencionado por Doorenbos y Kassam (1979). Las variaciones en el consumo potencial anual de agua del cultivo entre diferentes localidades se deben a las diferencias en la demanda atmosférica, la cual se compone de dos elementos: el componente de radiación solar, un factor que influye directamente en la producción de materia seca, el componente advectivo, que se asocia con la sequedad del aire, afectada por la temperatura y la humedad relativa. Para que cualquier cultivo mantenga los estomas abiertos y facilite el proceso de fotosíntesis, es esencial que transpire, lo que depende de la radiación y está directamente ligado a la producción de forraje.

#### 1.5.4. Productividad del agua en las pasturas

Las plantas perennes suelen presentar adaptaciones al déficit hídrico, pudiendo comprender diversas estrategias como lo es la mejora en la absorción de agua y mejora en la eficiencia en el uso del agua entre otras (Moreno et al., 2008).

Para medir que tan eficientemente se utiliza el agua, se emplea el concepto de eficiencia en el uso del agua (EUA), el cual hace referencia a la relación entre carbono y agua transpirada, pero la definición puede modificarse de acuerdo con el ámbito o área de estudio que nos refiramos. En la agronomía hace referencia a la productividad del cultivo y es el producto de la relación entre producción y agua consumida. Cuando hablamos de un sistema productivo que incorpora al riego como factor determinante, la EUA se estima para evaluar a dicha tecnología (Hayashi y Dogliotti, 2021).

Recientemente, se ha propuesto el uso del término de productividad del agua (PA), Van Halsema y Vincent (2012) definen como la relación entre la producción de un cultivo y la cantidad de agua consumida, expresada en la siguiente fórmula:  $PA = [\text{kg de producto}] / [ETa]$ . En este contexto, ETa se refiere a la evapotranspiración real, que se mide de manera precisa, dado que involucra al agua consumida producto de la sumatoria de los riegos netos, las precipitaciones efectivas y la variación del contenido de humedad.

Esta definición permite analizar la eficiencia con la que un cultivo utiliza el agua disponible para generar rendimiento. Al optimizar la PA, los agricultores pueden mejorar la producción mientras reducen el consumo de agua, un aspecto fundamental en áreas donde el agua es un recurso limitado.

De acuerdo con diversos enfoques científicos, la eficiencia en la conversión del agua en biomasa puede evaluarse a partir de la pendiente que vincula el rendimiento acumulado de la vegetación con el uso acumulado del agua, la cual ofrece una indicación de la productividad del agua. Diversos autores a nivel internacional reportan valores que generalmente se sitúan entre 1,0 y 2,6 kg de MS  $m^{-3}$  (Grimes et al., 1992), aunque se han registrado valores que alcanzan hasta 2,9 kg de MS  $m^{-3}$  (Brown et al., 2005). Por otro lado, Márquez Ortiz et al. (1995) informan valores de productividad del agua que varían entre 2,82 y 4,93 kg de MS  $m^{-3}$ , según los diferentes niveles de humedad del suelo.

A nivel regional, del Pozo et al. (2017) obtuvieron mayores valores de productividad del agua en condiciones de regadío con respecto a secano 1,57 vs 1,04 kg de MS  $m^{-3}$ . A nivel local, Giorello et al. (2012) sostienen que la eficiencia en el uso del agua es un indicador del correcto manejo de los recursos hídricos. Dichos autores reportaron productividades totales de leguminosas del género *Trifolium* que oscilaron entre 6,2 y 13,3 kg de MS  $m^{-3}$ , dependiendo de la especie. Este rango de productividad resalta la variabilidad en la eficiencia del uso del agua entre diferentes leguminosas forrajeras.

### 1.5.5 Componentes del rendimiento condicionados por el agua

El rendimiento de una pastura está determinado principalmente por el número de tallos por unidad de superficie y la densidad de plantas, siendo necesario para comprender su comportamiento considerar tanto el número de tallos por planta como su peso seco individual. En este sentido, la estructura del rendimiento surge de la interacción entre la densidad poblacional y la capacidad de crecimiento de cada individuo, lo que determina la acumulación final de biomasa (Champan y Lemaire, 1993; Lemaire y Champan, 1996).

En condiciones de déficit hídrico, las plantas activan una serie de ajustes morfo-fisiológicos para enfrentar el estrés. Según Tuberosa (2012) y Erice et al. (2010), estos mecanismos incluyen la reducción de la biomasa y del área foliar, entre otros caracteres adaptativos. En esta misma línea, Blum (1996) señala que la respuesta más frecuente ante un déficit hídrico progresivo es la disminución del crecimiento, afectando en mayor medida la parte aérea que el sistema radicular, lo que conduce a un incremento en la relación biomasa radicular/biomasa aérea. Por su parte, Martín (2020) indica que el aumento en la producción de biomasa aérea se asocia principalmente al incremento del peso individual de los tallos más que al aumento en su número. Asimismo, Wissuwa et al. (1997) reportan que el déficit hídrico puede incrementar la mortalidad de plantas, reduciendo la densidad poblacional, particularmente a través de efectos sobre el contenido de humedad en la corona, estructura clave donde se localizan las yemas axilares responsables de la emisión de nuevos tallos.

### 1.5.6 Relación hoja tallo

La relación hoja:tallo es un indicador de estructura, ya que refleja la partición de biomasa entre órganos fotosintéticos y de sostén, influyendo directamente en la producción de materia seca y en la calidad del forraje. Esta relación determina en gran medida la capacidad del dosel para interceptar radiación y sostener el crecimiento del cultivo (Hodgson, 1990).

La disponibilidad de agua modifica esta relación, ya que el déficit hídrico suele afectar en mayor medida el crecimiento foliar que el desarrollo de los tallos, reduciendo la proporción de hojas en la biomasa total. Este patrón ha sido asociado a cambios en la partición de asimilados y en la expansión celular bajo estrés hídrico, lo que conduce a una disminución de la relación hoja:tallo y, en consecuencia, de la calidad y productividad del forraje (Blum, 1996; Brown y Tanner, 1983; Luo et al., 2020).

#### 1.5.7 Composición química del forraje

Los forrajes contienen componentes químicas que los animales consumen, descomponen, transforman y aprovechan para sustentar la producción de carne, lana y leche. Entre los componentes que se analizan en el forraje se encuentran la proteína cruda (PC), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA) y cenizas, entre otros (Martínez y Leiva, 2018).

##### 1.5.6.1 Fibra Detergente Neutro (FDN)

De acuerdo con Van Soest et al. (1991), la fibra detergente neutra representa la fracción del forraje que permanece tras hervir la muestra durante una hora en una solución de detergente neutro compuesta por lauril sulfato de sodio y ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Durante este proceso, se disuelve el contenido celular, quedando los principales componentes estructurales de la pared celular, como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

Martínez y Leiva (2018) no reportaron diferencias significativas entre variedades de alfalfa oscilando esta variable entre 27 – 30%. Por otro lado, Capacho-Mogollón et al. (2018) reportan valores algo superiores que rondan en 45 - 53%. Según Correa Cardona (2001), la dieta de los rumiantes necesariamente debe contener entre 25 a 35% de FDN para asegurar un correcto funcionamiento del rumen.

##### 1.5.6.2 Fibra Detergente Ácida (FDA)

Es la fibra que permanece después de tratar el forraje con una solución de detergente ácido (compuesta por ácido sulfúrico y bromuro de acetiltrimetilamonio). Durante

este procedimiento se elimina la hemicelulosa, por lo que la fibra que queda está formada por celulosa y lignina.

Según National Research Council (NRC, 2007) los contenidos adecuados para esta fracción del forraje deberían ubicarse entre 21 – 27% para un rumiante. Martinez y Leiva (2018) reportan valores algo inferiores a los mencionados anteriormente, los mismos oscilan en los 18 – 19%, además de que no presentan diferencias significativas entre variedades evaluadas.

#### 1.5.6.3 Proteína Cruda (PC)

Corresponde al contenido de nitrógeno total determinado por el método de Kjeldahl multiplicado por el coeficiente 6,25 (Jones, 1931).

Martinez y Leiva (2018) reportaron valores en torno al 24% sin presentar diferencias significativas entre cultivares. Por otro lado, Capacho-Mogollón et al. (2018) encontraron que para diferentes variedades de alfalfa los valores reportados oscilan entre 18 – 21 %.

#### 1.5.6.4 Cenizas

Es la fracción de la muestra que representa a los minerales, y se obtiene por incineración de esta a 550°C en una mufla u horno durante 3 horas. Pigurina et al. (1991) obtuvieron valores de 10,1% en inicio de floración. Por otro lado, Feng et al. (2022) en alfalfa libre de condiciones de estrés hídrico presentó valores de cenizas de 9,49%. Mientras que Soplin (2021) obtuvo valores superiores de cenizas 13,8% en una alfalfa con una densidad de siembra de 200 plantas.m<sup>-2</sup>.

La calidad química del forraje favorece a la producción de carne y/o leche a medida que se cubren los requerimientos energéticos del animal. Lo deseable sería disponer de un forraje con alto contenido de proteína bruta y energía metabolizable, junto con una baja proporción de fibra poco digestible (como la FDN), porque esto está directamente relacionado con una mayor ingesta de materia seca, mayor digestibilidad y mejor rendimiento productivo en rumiantes. Las proteínas y la energía del forraje son a menudo los factores más limitantes de la producción animal y su mejora incrementa el potencial productivo de forraje (Van Soest et al., 1991).

## **1.6 Objetivos e hipótesis**

### 1.6.1 Objetivo general

Establecer una estrategia de riego basada en umbrales de agotamiento del agua en el suelo para la alfalfa, que maximice la producción de materia seca (MS), de manera que justifique su incorporación en un sistema productivo con pastoreo, optimizando al mismo tiempo el aprovechamiento de las precipitaciones y mejorar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico.

### 1.6.2 Objetivos específicos

Producción de materia seca y componentes del rendimiento en alfalfa bajo diferentes umbrales de riego.

Productividad del agua y relación entre producción de materia seca y consumo hídrico del cultivo.

Calidad del forraje producida bajo distintos manejos de riego, considerando relación hoja/tallo y composición química de la materia seca.

### 1.6.3 Hipótesis

Las diferencias en disponibilidad hídrica modifican la tasa de crecimiento de la pastura, afectando la acumulación de materia seca y sus componentes del rendimiento.

La magnitud del agotamiento del agua disponible condiciona la evapotranspiración y la capacidad del cultivo de transformar el agua consumida en biomasa, modificando la eficiencia en el uso del agua.

Las variaciones en la disponibilidad de agua alteran la dinámica de crecimiento y la proporción de órganos vegetativos de la planta, modificando la relación hoja/tallo y la composición química del forraje producido.



## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Ubicación tempo-espacial**

El ensayo tuvo lugar en el campo experimental de la Facultad de Agronomía Udelar, Centro Regional Sur, en la localidad de Progreso, Canelones. Con las coordenadas 34°37'S, 56°13'O. El período de evaluación estuvo comprendido entre el 1 de diciembre del 2020 al 28 de febrero del 2022, incluyendo todas las estaciones del año. Para la definición de las estaciones, se consideró que el verano comprende al período del 1 de diciembre al 28 de febrero, el otoño del 1 de marzo al 30 de mayo, el invierno del 1 de junio al 31 de agosto y la primavera del 1 de setiembre al 30 de noviembre.

### **2.2 Caracterización edáfica**

El componente edáfico predominante fue un Brunosol Eutrico Lac, clasificado como Arguidol típico según la clasificación taxonómica del United States Department of Agriculture (USDA, 1999). Los parámetros hídricos de los horizontes del suelo se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Parámetros hídricos del suelo expresados por horizonte*

| <b>Profundidad</b> | <b>CC</b>  | <b>PMP</b> | <b>D<sub>Ap</sub></b>    | <b>AD</b>                   | <b>ADT</b>                       |
|--------------------|------------|------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| <b>Cm</b>          | <b>%ps</b> |            | <b>g cm<sup>-3</sup></b> | <b>mm 10cm<sup>-1</sup></b> | <b>mm horizonte<sup>-1</sup></b> |
| <b>0 – 19</b>      | 35         | 20,9       | 1,15                     | 16,2                        | 30,8                             |
| <b>20 – 36</b>     | 36         | 21,6       | 1,20                     | 17,3                        | 27,6                             |
| <b>37 – 80</b>     | 36         | 21,6       | 1,40                     | 20,16                       | 88,7                             |

*Nota.* CC %ps = capacidad de campo en base a peso seco; PMP %ps = punto de marchitez permanente en base a peso seco; D<sub>Ap</sub> = densidad aparente; ADT= agua disponible total.

El parámetro de capacidad de campo se determinó para cada horizonte aplicando la metodología descrita por García Petillo et al. (2011). El punto de marchitez permanente (PMP) fue calculado mediante la regresión desarrollada por Silva et al. (1988), empleando los datos de capacidad de campo obtenidos en peso seco. Por

último la densidad aparente (D<sub>Ap</sub>) establecida por horizonte se midió a través del método del cilindro muestreador, obteniendo muestras imperturbadas, según la técnica de Gabriels y Lobo (2006).

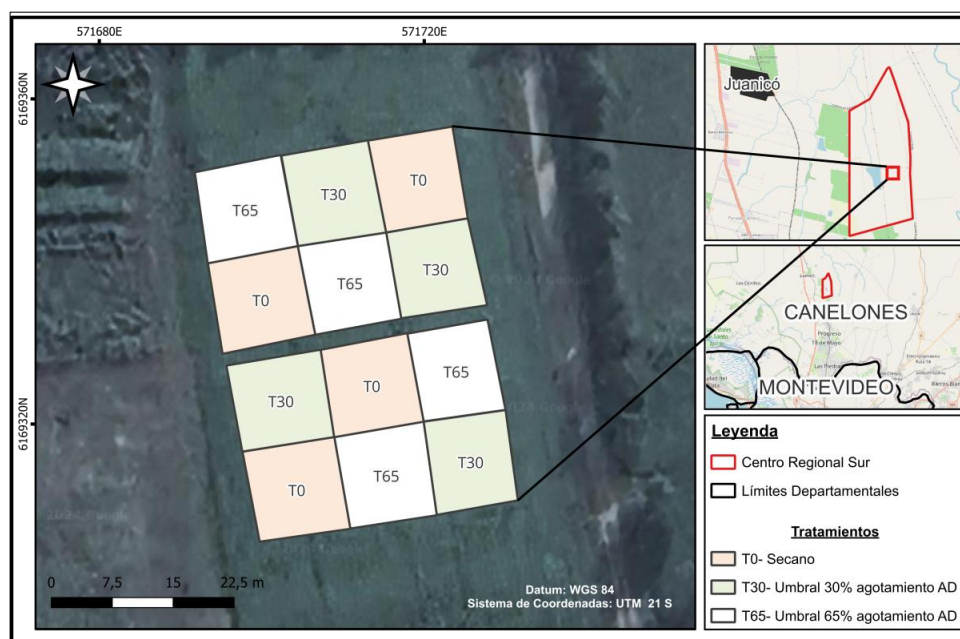
### 2.3 Diseño experimental

El ensayo se formuló como un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres tratamientos y cuatro repeticiones, obteniendo 12 unidades experimentales de dimensión de 11 x 11 metros cada una, con un área de 121 m<sup>2</sup> por unidad. Con la finalidad de permitir el ingreso de los animales durante el período de pastoreo, se realizó un corredor de 2 metros de ancho entre los bloques 2 y 3 (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**ura 2).

Los tratamientos evaluados fueron T0 se llevó a cabo mediante condiciones de secano, sin riego adicional pero que contempla el aporte de las precipitaciones; el tratamiento T30 o riego frecuente, con el umbral de agotamiento del 30% del agua disponible y el tratamiento T65 con el umbral de agotamiento del 65% del agua disponible, lo que resultó en un riego menos frecuente.

### Figura 2

*Croquis del ensayo expresando la ubicación de los tratamientos*



*Nota.* Imagen elaborada en Qgis 3.30, Imagen Landsat coordenadas 34°36'55.96"S 56°13'03.64" O.

## 2.4 Manejo del riego

El ensayo se llevó a cabo mediante riego por aspersión fija, que se conformaba por cuatro aspersores en cada vértice de la parcela, marca K-Rain modelo RPS75 Pop-up. Los mismos fueron sectorizados a 90°, a nivel del suelo y emergían debido a la presión del agua cuando se encendía el equipo. La ubicación de los aspersores fue meramente estratégica a modo de protegerlos de posibles daños causados por el pisoteo del ganado en los períodos de pastoreo. Se logró determinar el coeficiente de uniformidad utilizando la metodología propuesta por Tarjuelo (2005), su valor fue de 70%, el cual es considerado como aceptable para sistemas de aspersión fija. Por otro lado, la tasa de aplicación fue medida en 5,5 mm hora<sup>-1</sup>.

Se establecieron de antemano dos niveles de agotamiento del agua disponible total (ADT) 30% y 65% (Ecuación 1), considerando una profundidad efectiva de raíces de 40 cm, donde se estimó se ubicaba la mayor densidad de raíces absorbentes (Dardanelli et al., 2010). En el tratamiento de secano, la profundidad radicular efectiva fue considerada de 50 cm. Estos niveles permitieron calcular el umbral de agotamiento de agua disponible en milímetros totales según la siguiente relación:

$$\text{Umbral (mm)} = (\text{CC}\% \text{ps} - \text{PMP}\% \text{ps}) * \text{DAp} * \frac{40\text{cm}}{10} * \text{umbral}$$

Seguidamente, se calculó la lámina neta a aplicar para restablecer el agua del suelo desde el umbral hasta el 85% del ADT en la profundidad radicular, con el objetivo de evitar la condición de saturación del suelo en caso de producirse una precipitación inmediatamente después del riego. Por lo tanto, en cada uno de los tratamientos, la lámina a ser aplicada se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\text{T30} = (\text{CC}\% \text{ps} - \text{PMP}\% \text{ps}) * \text{DAp} * \frac{40\text{cm}}{10} * 0,15$$

$$\text{T65} = (\text{CC}\% \text{ps} - \text{PMP}\% \text{ps}) * \text{DAp} * \frac{40\text{cm}}{10} * 0,50$$

A partir del balance hídrico se calculó la evolución del déficit acumulado, y cuando p este era igual o superior al valor umbral era momento de regar, expresado en la siguiente ecuación.

$$\text{Riego} = \text{Deficit acumulado} < \text{Umbral}; 0; \text{LN}$$

El déficit acumulado se calculó sumando el déficit del día anterior, la evapotranspiración del cultivo y restando las precipitaciones efectivas y el riego, siendo entonces la cantidad de milímetros necesarios para llevar el suelo a capacidad de campo.

Para el cálculo de las precipitaciones (PP efectivas) se tomó en cuenta el déficit hídrico acumulado, así como la cantidad máxima de agua de lluvia que puede infiltrar hasta alcanzar la capacidad de campo, teniendo en cuenta que el déficit acumulado en cada uno de los tratamientos es diferente frente a un mismo evento de precipitación. Dicho cálculo se expresa:

$$\text{Deficit aumulado (DAcu)} = \text{Deficit d} - 1 - \text{pp efectivas} - \text{Riego} + \text{ETc}$$

El momento de riego estuvo definido por el déficit acumulado del balance hídrico acumulado. Cuando el suelo alcanzaba los 21,6 mm y 46,8 mm era momento de efectuar el riego en los tratamientos T30 y T65, respectivamente.

Se presentan los valores obtenidos para el déficit acumulado y la lámina neta aplicada en cada tratamiento (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Déficit acumulado para determinar el momento del riego y lámina neta aplicada en cada tratamiento de riego*

| Tratamiento | Déficit acumulado del agua disponible (mm) | Lámina neta (mm) |
|-------------|--------------------------------------------|------------------|
| T30         | 22                                         | 11               |
| T65         | 47                                         | 36               |

Para verificar el cumplimiento de los umbrales preestablecidos se empleó una herramienta de balance hídrico de paso diario, complementada con mediciones de humedad del suelo realizadas antes de cada riego mediante una sonda FDR (Delta T Devices, PR2). Previamente, se debieron instalar tubos de acceso en cada parcela y se utilizó la calibración realizada en ensayos previos en el mismo sitio (Hayashi y Dogliotti, 2021) empleando el método gravimétrico y la densidad aparente para cada horizonte de suelo.

Los datos de ETo Penman-Monteith fueron obtenidos de la estación del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Las Brujas, ubicado en ruta 48 km 10, con coordenadas 34°40'S 56° 20' O), a 15 km en línea recta del lugar del ensayo, mientras que las precipitaciones se registraron en un pluviómetro en las proximidades del ensayo.

Para el cálculo de ETc, se asignaron valores de Kc de 0,4 inmediatamente después del pastoreo, mientras que el Kc inmediatamente previo al pastoreo el valor fue de 1.1 (FAO 56), la evolución de dicho parámetro se consideró lineal entre un pastoreo y otro.

El Ks hace referencia al estrés hídrico de la planta se identifica en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{ETc_{aj} = ETo * Kc * Ks}$$

Donde ETc aj corresponde a la evapotranspiración del cultivo ajustada, cuyo valor se encuentra limitado cuando el coeficiente de estrés hídrico (Ks) es inferior a 1.

La magnitud del Ks se calcula de la siguiente manera en la ecuación:

$$Ks = \frac{ADT - DAcu}{(1 - p) * ADT}$$

Donde DAcu es el déficit acumulado en el suelo. De esta manera, se obtiene la diferencia entre ADT y DAcu en función de la fracción de agua (p) que la planta puede extraer sin experimentar estrés hídrico.

## 2.5 Manejo de la pastura

Se realizó un barbecho químico para preparar el terreno para la siembra en marzo del 2020. El mismo consistió en aplicar una mezcla de los herbicidas 2,4 DB a una dosis de  $1 \text{ L ha}^{-1}$ , glifosato a  $2,5 \text{ L ha}^{-1}$  y fluroxipir a  $400 \text{ cc ha}^{-1}$ , para eliminar la vegetación preexistente de *Cichorium intybus*. Transcurridos 30 días, se realizó la siembra de alfalfa del cultivar *Chaná* a razón de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ , aplicando la semilla en líneas y realizando una previa inoculación para promover la fijación simbiótica de nitrógeno para la planta. En forma simultánea, se llevó a cabo una fertilización inicial con  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de Fosfato di amonio, proporcionando así los nutrientes esenciales para el establecimiento de la pastura en las etapas iniciales.

El momento de pastoreo estuvo determinado por fenología, es decir cuando los tallos de la alfalfa desarrollaban ocho nudos, momento en que, según (Kloster et al., 2022), la planta alcanza su número máximo de hojas verdes, donde además la calidad y la producción son óptimas. Luego de cada pastoreo se realizaba un corte de homogeneización a 5 cm de altura, utilizando un tractor de jardín.

## 2.6 Variables medidas

Se midió la producción de materia seca (MS), los componentes demográficos de la pastura (plantas por metro cuadrado, número de tallos por metro cuadrado). Además, se midieron componentes de calidad por composición química, contenido de proteína cruda  $\text{g.kg}^{-1}$  (PC), fibra detergente ácido  $\text{g.kg}^{-1}$  (FDA) y fibra detergente neutro  $\text{g.kg}^{-1}$  (FDN). Como también la calidad física expresada a través de la relación hoja tallo.

En relación con la producción de MS, se realizaron muestreos previos a cada pastoreo mediante el método de doble muestreo (Haydock y Shaw, 1975). Este procedimiento consiste en asignar una escala numérica de disponibilidad de forraje del 1 al 3 a todas las parcelas a ser pastoreadas, complementando las estimaciones visuales con cortes de calibración para la determinación de MS. Se cortaron dejando un remanente de cinco centímetros de altura, tres muestras de cada nivel de la escala utilizando marcos de  $0,3 \times 0,3 \text{ m}$ . Luego fueron pesadas en laboratorio y secas en estufa de circulación forzada de aire a  $60^\circ$ , hasta alcanzar un peso constante. Con

esta información se calculó la masa de MS en  $\text{kg. ha}^{-1}$  para cada escala. Finalmente, para determinar la masa de forraje en cada parcela se realizaron 15 estimaciones visuales basadas en la escala previamente conformada y se obtuvo la media por parcela. Seguidamente se ingresaron los animales, 2 animales por parcela con un peso de 600 – 700 kg, a los cuales se les permitía pastorear hasta dejar un remanente de aproximadamente 5 cm o más.

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 expresada en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  se determinó dividiendo la MS acumulada por encima de los cinco cm, obtenida en los muestreos previos a cada pastoreo y el número de días entre los mismos. Seguidamente, la tasa de crecimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$ ) se multiplicó por la cantidad total de días de la temporada, abarcando todo el período de estudio (Campbell, 1966; Puppo et al., 2024).

Las características demográficas de la pastura se evaluaron con cuadros de 0.3 x 0.3 m, realizando tres repeticiones por parcela al inicio de cada estación y en ubicaciones variables. En cada cuadro, se contabilizó el número de plantas y el número de tallos, con el fin de determinar la densidad de tallos por metro cuadrado. Se registró el peso fresco de las muestras, las cuales fueron posteriormente secadas en estufa a 60°C durante 72 horas, para luego determinar su peso seco.

Para la evaluación de los componentes químicos de la pastura, se obtuvo una submuestra compuesta para cada estación. Las muestras se secaron en estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante, luego se molieron con malla de 1mm y se analizaron para determinar el contenido de PC (Jones, 1931) FDA, FDN y Cenizas estas últimas según metodología de Van Soest et al. (1991).

La productividad del agua se determinó mediante la relación entre el rendimiento del cultivo, expresado en  $\text{kg de MS ha}^{-1}$  y el volumen de agua utilizado en cada tratamiento en el período de evaluación. El uso total de agua (mm) se obtuvo de la suma del riego neto aplicado, la precipitación efectiva (estimada a partir del balance hídrico) y la variación en el contenido de humedad del suelo (considerada como

déficit acumulado) entre el inicio y el final del período analizado. El incremento en el déficit fue interpretado como agua efectivamente utilizada por el cultivo.

## 2.7 Caracterización climática

La caracterización climática incluyó las variables de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y precipitaciones totales (PP), correspondientes a los veranos del período 1980-2022, con datos provenientes de la estación de INIA Las Brujas. Se determinó la posición relativa de los períodos 2020/21 y 2021/22, en los cuales se realizó el ensayo en cuestión, dentro de la serie histórica analizada.

## 2.8 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para comparar las medias de los tratamientos, utilizando la diferencia mínima significativa con un nivel de probabilidad del 5%.

La producción de MS, se analizó aplicando el siguiente modelo estadístico

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

Mientras que para el análisis por estación de las variables plantas m<sup>2</sup>, tallos m<sup>2</sup> y peso seco de tallo y productividad del agua se analizó con el siguiente modelo estadístico:

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

La producción acumulada de biomasa a lo largo de las estaciones del año se analizó en función del consumo anual de agua, considerando una relación lineal mediante análisis de regresión. El modelo de regresión se consideró estadísticamente significativo cuando presentó un valor de p inferior a 0,05. Asimismo, se calculó el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) para evaluar el ajuste del modelo.



### **3. Resultados y discusión**

#### **3.1 Caracterización climática**

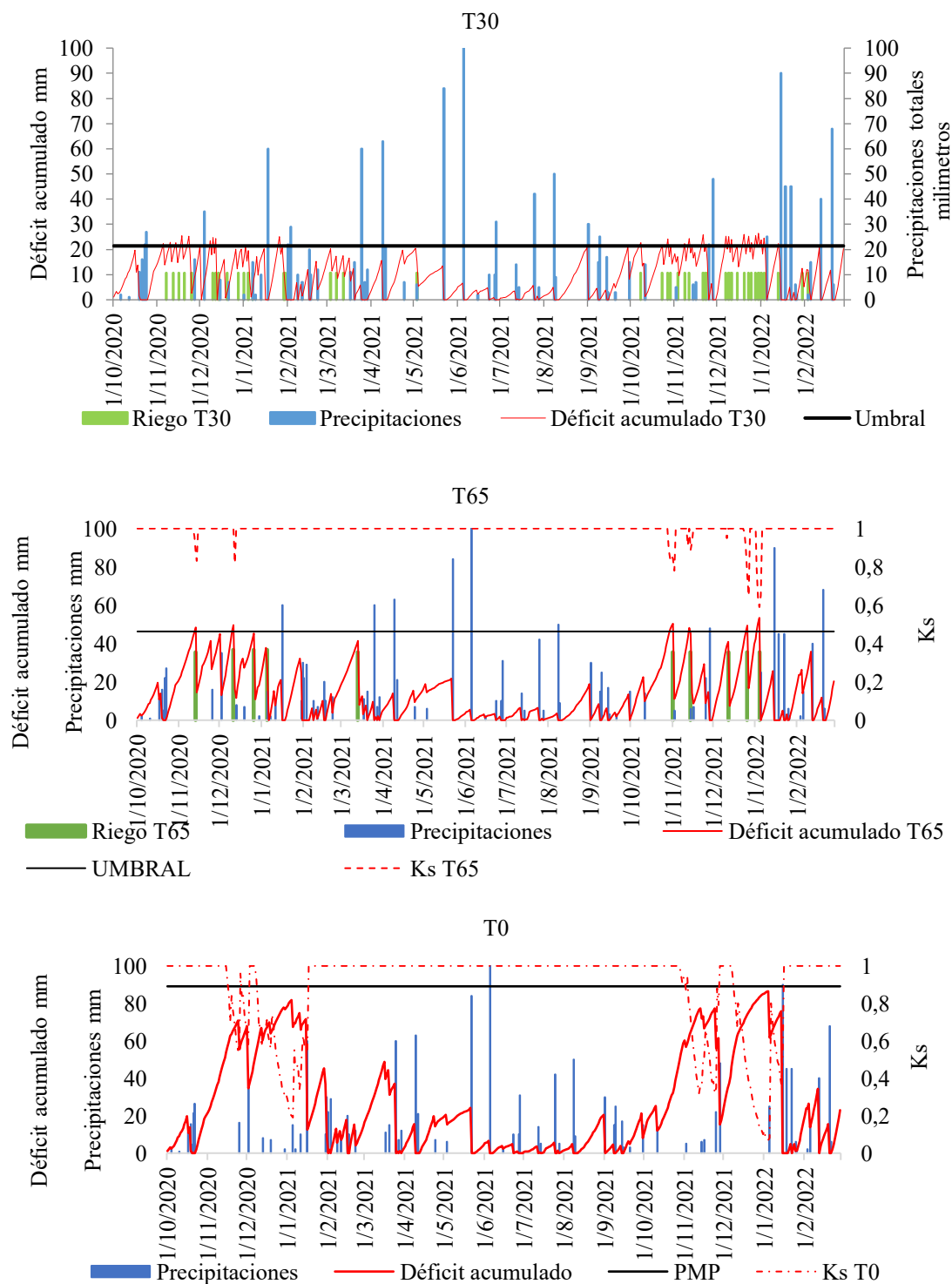
En los períodos estivales de 2020/21 y 2021/22 la demanda atmosférica ocupó los valores más bajos en la serie histórica con 440 mm en 2020/21 y 408 mm en 2021/22 siendo este el más bajo. En cuanto a las precipitaciones estivales estas se ubicaron dentro del primer cuartil de los valores más altos con 295 mm en 2020/21 y 264 mm en 2021/22 en el décimo quinto lugar. Estas condiciones climáticas, baja demanda atmosférica y precipitaciones, redujeron el estrés hídrico en las plantas, homogeneizando las respuestas y dificultando la diferenciación entre tratamientos en términos de rendimiento.

#### **3.2 Balance hídrico**

A continuación, se presentan los tres balances hídricos elaborados para los diferentes tratamientos evaluados. La evaluación de los tratamientos comenzó el 1 de octubre del 2020 permitiendo visualizar la evolución de la disponibilidad hídrica en cada tratamiento. En cada figura se incluye un desglose detallado de la evolución de las entradas de agua determinadas por la precipitación y riegos efectuados, así como la salida que refiere exclusivamente a la evapotranspiración. El déficit acumulado corresponde a los mm ADT agotados es decir la diferencia desde CC y PMP en la profundidad radical efectiva.

**Figura 3**

*Evolución del déficit de humedad del suelo y riegos aplicados (2021–2022) en 0,40 m para T30–T65 y 0,50 m para T0*



En las gráficas anteriores se puede observar que las precipitaciones registradas presentaron una distribución homogénea en el tiempo, dado que ocurrieron en un intervalo corto de tiempo que va desde los 4 días hasta 15 días y que además estas fueron significativas es decir superior a los 10 mm y por ende se podría inferir que hubo un mayor aprovechamiento de estas, lo cual determinó que los rendimientos en seco fueron elevados a igual que los tratamientos regados.

En relación con los riegos realizados, y considerando la distribución de las precipitaciones, se observó que el tratamiento T30 al ser un umbral de muy bajo agotamiento hídrico, presentara durante la temporada estival riegos día por medio. Por su parte, el tratamiento T65, al permitir un mayor agotamiento del agua disponible en el suelo, requirió una frecuencia de riego distinta, en este caso, menor.

Del análisis del balance hídrico se puede visualizar que durante el invierno no fue necesario regar.

Cabe mencionar que, independientemente de la estación, en los tratamientos regados, es posible visualizar el número de riegos diferencial repercutiendo directamente en un ahorro de agua del 30% (El análisis del Ks permitió evidenciar una respuesta diferencial de la pastura en función de la disponibilidad hídrica entre los tratamientos regados y el tratamiento de seco. En los tratamientos con riego, tanto durante el verano de 2021 como en el de 2022, se registraron valores puntuales de Ks inferiores a 1, aunque restringidos a períodos breves, de no más de 5 días, que se revertían una vez aplicado el riego indicado por el balance hídrico.

Por el contrario, el tratamiento T0 presentó ajuste estomático en dos períodos prolongados: uno de 30 días, entre el 29/10/2021 y el 26/11/2021, y otro de 39 días, entre el 8/12/2021 y el 15/01/2022. Estos resultados evidencian la ocurrencia de respuestas fisiológicas de la planta asociadas a condiciones de estrés hídrico sostenido.

Tabla 3) e indirectamente en menor costo operativo, costo humano, etc.

El análisis del  $K_s$  permitió evidenciar una respuesta diferencial de la pastura en función de la disponibilidad hídrica entre los tratamientos regados y el tratamiento de seco. En los tratamientos con riego, tanto durante el verano de 2021 como en el de 2022, se registraron valores puntuales de  $K_s$  inferiores a 1, aunque restringidos a períodos breves, de no más de 5 días, que se revertían una vez aplicado el riego indicado por el balance hídrico.

Por el contrario, el tratamiento T0 presentó ajuste estomático en dos períodos prolongados: uno de 30 días, entre el 29/10/2021 y el 26/11/2021, y otro de 39 días, entre el 8/12/2021 y el 15/01/2022. Estos resultados evidencian la ocurrencia de respuestas fisiológicas de la planta asociadas a condiciones de estrés hídrico sostenido.

**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<br>total<br>(mm) | PP efectiva<br>(mm) |     |     | Riego<br>(mm) |     | $\Delta H$<br>(mm) |       |       | Agua consumida total<br>(mm) |     |     | N° riegos |     |
|----------------|---------------------|---------------------|-----|-----|---------------|-----|--------------------|-------|-------|------------------------------|-----|-----|-----------|-----|
|                |                     | T30                 | T65 | T0  | T30           | T65 | T30                | T65   | T0    | T30                          | T65 | T0  | T30       | T65 |
| <b>Ver 21</b>  | 289                 | 142                 | 174 | 242 | 107           | 72  | -3,6               | -24.6 | 53.5  | 245                          | 270 | 295 | 16        | 3   |
| <b>Oto 21</b>  | 286                 | 75                  | 82  | 122 | 43            | 36  | 20,2               | 15.9  | 12.3  | 136                          | 133 | 134 | 4         | 1   |
| <b>Inv 21</b>  | 328                 | 30                  | 37  | 42  | 0             | 0   | -10,9              | -13.1 | -2.7  | 24                           | 24  | 39  | 0         | 0   |
| <b>Prim 21</b> | 210                 | 106                 | 126 | 147 | 75            | 71  | -5,0               | 0,0   | -20.9 | 204                          | 197 | 126 | 7         | 2   |
| <b>Ver 22</b>  | 338                 | 112                 | 111 | 198 | 150           | 107 | 4,6                | -1.17 | 19.9  | 246                          | 217 | 227 | 14        | 3   |
| <b>Total</b>   | 1451                | 465                 | 530 | 751 | 375           | 286 |                    |       |       | 855                          | 841 | 821 | 41        | 9   |

*Nota.* Precipitaciones totales (PP total); precipitaciones efectivas (PP efectiva); variación en el contenido de humedad ( $\Delta H$ ); número de riegos (N° riegos).

### 3.3 Producción de materia seca

La producción anual del segundo año de la pastura presentó valores de 22.969 – 24.553 kg de MS ha<sup>-1</sup> sin presentar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, pero lo que es necesario remarcar aquí son los altos valores obtenidos independientemente del tratamiento en estudio.

Los valores aquí reportados a nivel del 2do año de la pastura son superiores a los obtenidos la evaluación de cultivares de INASE e INIA (2023) de 16.037 kg de MS ha<sup>-1</sup> en condiciones de secano, de igual manera a los reportados por García (1996) con 11.500 kg de MS ha<sup>-1</sup> y Formoso (2000) en una pastura de tercer año, obtuvo valores de producción anual de 13.800 kg de MS ha<sup>-1</sup> a nivel nacional.

Mientras que a escala regional Plevich et al. (2012) reportan que los rendimientos de alfalfa regada supera en un 24% a la alfalfa en secano. Sin embargo, Rojas-García et al. (2017), a nivel internacional, evaluaron cinco variedades comerciales de alfalfa con riego y obtuvieron rendimientos levemente inferiores a los reportados en este estudio, valores que van desde los 13.350 kg de MS ha<sup>-1</sup> a 20.275 kg de MS ha<sup>-1</sup>.

Por otro lado, también se reporta la producción acumulada para el período de evaluación con 32.152 – 33.149 kg de MS ha<sup>-1</sup> que no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Dado lo mencionado anteriormente surge la necesidad de estudiar la producción a nivel estacional, es así que, en el segundo verano estudiado, si se lograron encontrar diferencias significativas entre los tratamientos regados y el secano (

Tabla 4), a pesar de los 338 milímetros ocurridos en dicha estación, el riego hizo la diferencia en la producción de alfalfa, es decir que la alfalfa responde a dicha tecnología pero sobre todo en el verano.

**Tabla 4**

*Producción estacional de materia seca (kg.ha<sup>-1</sup>) para los diferentes tratamientos evaluados*

|     | Año            |                |               |                |                 |
|-----|----------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|
|     | 2021           |                |               |                | 2022            |
|     | Verano         | Otoño          | Invierno      | Primavera      | Verano          |
| T0  | 9.134 ± 648 A  | 5.627 ± 664 AB | 3.709 ± 398 A | 6.532 ± 428 A  | 7.590 ± 421 B   |
| T30 | 10.513 ± 861 A | 6.855 ± 1062 A | 3.586 ± 350 A | 5.744 ± 1166 A | 10.604 ± 1398 A |
| T65 | 9.465 ± 584 A  | 4.917 ± 435 B  | 3.161 ± 398 A | 6.418 ± 838 A  | 11.123 ± 2190A  |

A partir de las producciones de materia seca obtenidas se calculó la tasa diaria de crecimiento de la pastura. Los valores obtenidos oscilan entre 92 kg de MS há<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y 119 kg de MS há<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> sin presentar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, siendo similares a los reportados por Sawchik et al. (2010) en condiciones de regadío. Sin embargo, son superiores a los reportados por Otero y Castro (2019) y Díaz Lago et al. (1996).

### 3.4 Productividad del agua

Desde una perspectiva del manejo del riego durante el verano 2022, el tratamiento T30 presentó una alta concentración de eventos de riego. Esta condición generó una frecuencia elevada de reposición hídrica. No obstante, las precipitaciones registradas durante el mes de febrero modificaron significativamente el balance hídrico del sistema, reduciendo la expresión de diferencias estadísticas en la producción de biomasa entre los tratamientos con aporte de agua. A pesar de este efecto enmascarador de las lluvias, el tratamiento T0 evidenció un rendimiento inferior, reflejando su limitada capacidad de compensación ante condiciones de estrés hídrico.

En cuanto a la productividad del T30 hay que mencionar que fue baja con respecto a los demás tratamientos que simulan estar más alejados de las posibilidades de generarse exceso hídrico como lo son el T0 y T65. Como mencionan diversos autores como, Irmak et al. sp, la alfalfa es susceptible a condiciones de exceso de humedad lo que podría estar influyendo en la baja eficiencia del T30.



**Tabla 5**

*Productividad del agua total consumida y del agua de riego del verano 2022 para los umbrales de riego evaluados*

|     | Agua consumida total    | Agua de riego | Productividad<br>Verano 2022 |
|-----|-------------------------|---------------|------------------------------|
|     | kg de MS m <sup>3</sup> |               |                              |
| T0  | 5,20 A                  | NC            | 4.25 B                       |
| T30 | 3,71 B                  | 7,95 B        | 4.27 B                       |
| T65 | 4,14 A                  | 11,5 A        | 5.07 A                       |

*Nota.* El agua consumida total se calculó como la suma de las precipitaciones efectivas, el riego y la variación en el contenido de humedad del suelo.

De acuerdo con la Tabla 5, tanto el tratamiento T0 como el T65 mostraron una eficiencia similar en términos de agua consumida, superando al tratamiento T30. En cuanto al uso del agua de riego, el tratamiento T65 presentó una mayor eficiencia, con una superioridad del 44% respecto a T30.

Durante el verano de 2022 se observaron diferencias significativas en la producción de MS entre los tratamientos con riego y el seco. Con el fin de profundizar el análisis, se estimó la productividad del agua. La respuesta fue particularmente clara en ese verano, donde el tratamiento T65 presentó la mayor eficiencia. Dado que las diferencias significativas entre tratamientos se registraron únicamente en el segundo verano, el cálculo de la productividad del agua se realizó específicamente para esa estación. Como muestra en la Tabla 5, el T65 superó ampliamente al resto de los tratamientos en términos de eficiencia en el uso del agua. Los resultados aquí presentados son superiores a los de Metochis y Orphanos (1981), 1,41 kg de MS m<sup>3</sup> de igual manera que Quiroga Garza y Faz Contreras (2008) con 1,18 kg de MS m<sup>3</sup> ambos trabajos utilizaron la evapotranspiración estimada para el cálculo de productividad del agua.

A nivel internacional, Brown et al. (2005) reportaron valores de productividad del agua cercanos a 2,9 kg de MS·m<sup>3</sup>, mientras que a nivel nacional Sawchik et al. (2010) registraron valores de hasta 3,5 kg de MS·m<sup>3</sup> en base a agua consumida.

Mientras que Pedroza Sandoval et al. (2014) obtuvieron valores de productividad similares a los obtenidos en este estudio, al evaluar la productividad en base al agua de riego únicamente, presentando valores de 4,66 kg de MS m<sup>3</sup> y Espinoza et al. (2018) reportan valores de 4,02 kg de MS m<sup>3</sup> para el tratamiento con 80% de aprovechamiento de la humedad.

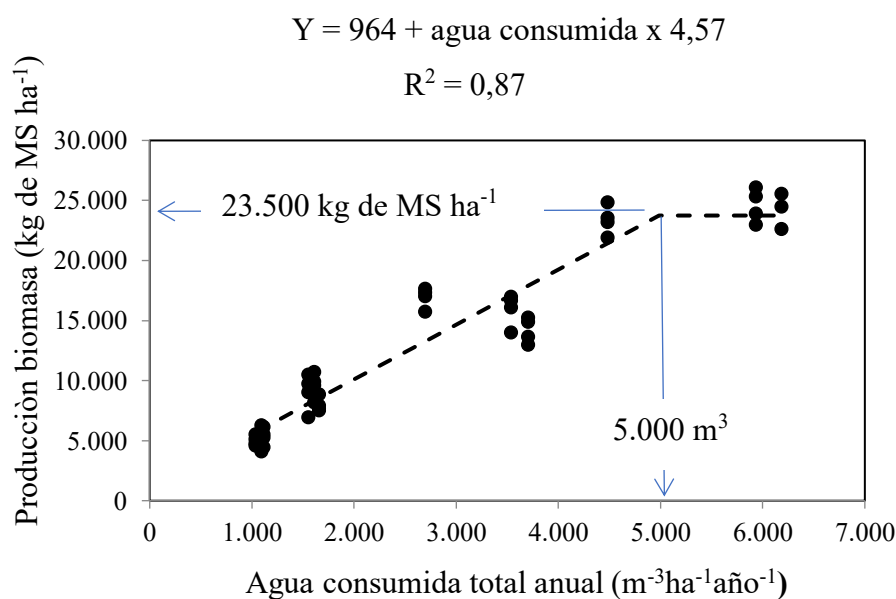
Del tratamiento T30 corresponde mencionar que su baja productividad podría atribuírsele a que la alfalfa es susceptible a condiciones de exceso de humedad. O bien podría analizarse desde un punto de vista fisiológicos, donde al presentar un metabolismo fotosintético del tipo C3 posee una baja eficiencia fotosintética lo cual repercute en menores niveles de tasa de crecimiento a igual cantidad de luz absorbida con relación a las especies que poseen metabolismo fotosintético del tipo C4 (Pereyra et al., 2019).

### 3.5 Relación entre biomasa producida y agua consumida

A continuación, se presenta la relación entre biomasa producida y agua consumida, ver Figura 4 donde el modelo ajusta con un coeficiente de determinación del 87%.

**Figura 4**

*Relación entre producción de biomasa y agua consumida*



Durante el tiempo de evaluación, cada metro cúbico de agua utilizado por la alfalfa aumentó la producción en 4,57 kg de MS ha<sup>-1</sup>. El agua fue responsable del 87% de la variabilidad en el rendimiento de materia seca por hectárea, y se estableció que a partir de un consumo de 5.000 m<sup>3</sup> por ha<sup>-1</sup> al año, la productividad no se incrementaría más, alcanzando un máximo de 23.500 kg de MS ha<sup>-1</sup>.

En el caso de alfalfa con corto reposo invernal de metabolismo fotosintético C3 (Quiroga Garza, 2013), se evaluó la relación funcional entre la producción de materia seca y la productividad del agua, considerando lámina neta de riego aplicada y las precipitaciones efectivas. A partir de dicho análisis se ajustó un modelo de optimización de la producción, el cual indica que el máximo rendimiento se alcanza con una producción estimada de 7.400 kg de MS ha<sup>-1</sup>, asociada a un consumo hídrico total de 2.075 m<sup>3</sup> (Servín Palestina et al., 2017). El carácter fisiológico C3 de la alfalfa conlleva una mayor incidencia de la fotorrespiración, en comparación con especies de metabolismo C4. Sin embargo, esta limitación fisiológica se ve atenuada por la presencia de un sistema radical profundo y extensamente ramificado, que incrementa la capacidad de exploración del perfil del suelo y el acceso a reservas hídricas subsuperficiales, contribuyendo a sostener la productividad de materia seca bajo condiciones de variabilidad hídrica.

Los resultados obtenidos se alinean con lo reportado por Collino et al. (2007) y Ayanz (2007), quienes establecen que el potencial máximo de producción de alfalfa se alcanza con una precipitación anual comprendida de 1.500 a 1.550 mm anuales. Asimismo, Romero (2008) documenta un valor promedio de producción anual potencial de 32.850 kg de MS ha<sup>-1</sup>, evidenciando el elevado rendimiento que puede alcanzarse bajo condiciones óptimas de disponibilidad hídrica y manejo agronómico.

### **3.6 Evolución de componentes de rendimiento**

La densidad de plantas en verano no evidenció diferencias significativas entre tratamientos, estabilizándose en torno a 60 plantas.m<sup>2</sup>. Dicha estabilización podría surgir por las bajas temperaturas predominantes del invierno, estación en la cual generalmente ocurren períodos donde el crecimiento vegetal se ve limitado (Formoso, 2000).

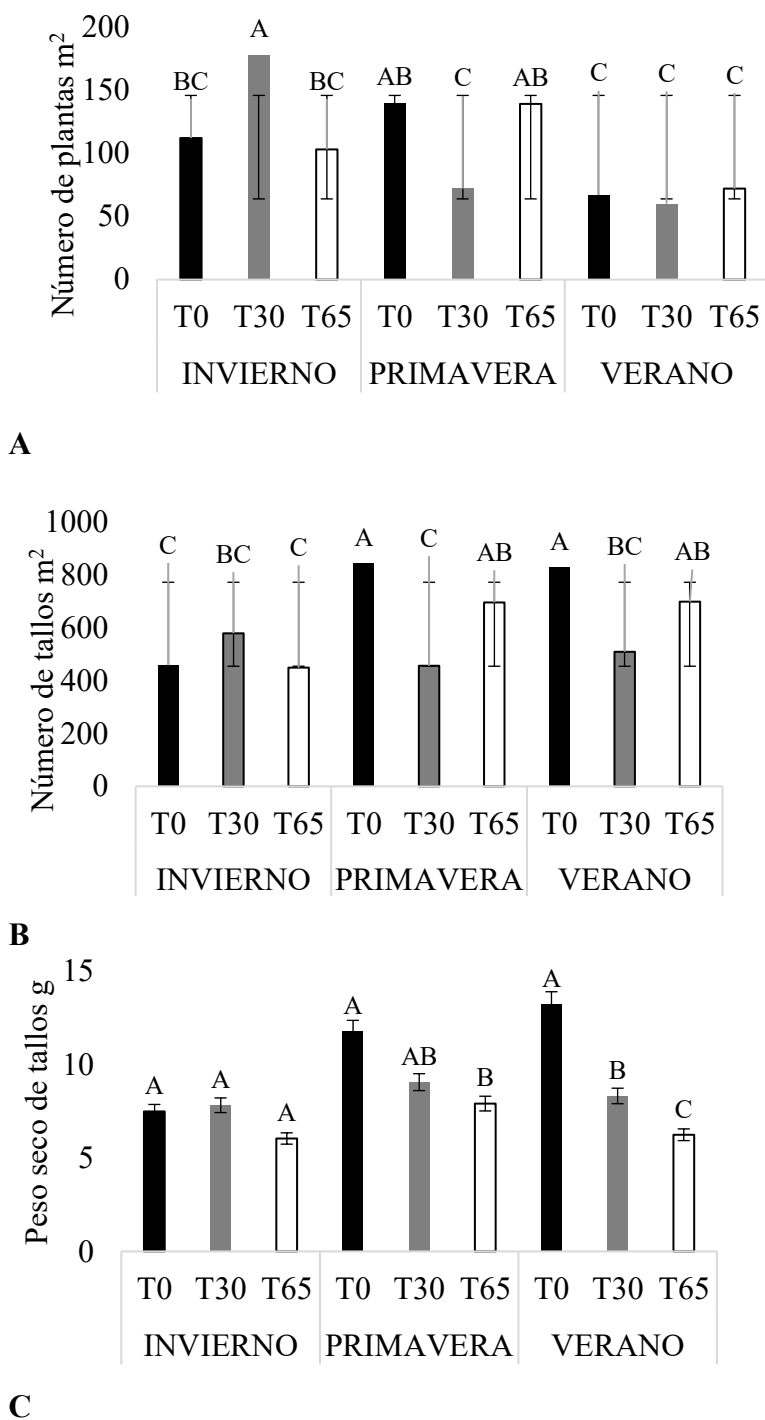
A pesar de la disminución poblacional registrada en verano, esta se mantuvo por encima del umbral funcional de 30 plantas·m<sup>-2</sup> propuesto por diversos autores de índole internacional (Dolling et al., 2011; Rojas-García et al., 2017; Romero et al., 1995; Sevilla et al., 2002). Mientras que Moot et al. (2012) sostienen que para lograr altos rendimientos es necesario contar con más de 40 plantas·m<sup>-2</sup>.

A nivel regional, Martín (2020) propone un umbral mínimo de 60 plantas m<sup>2</sup> para que no repercuta en pérdidas en el rendimiento, coinciden con los valores obtenidos aquí. La caída en densidad concuerda con lo reportado por Mendoza-Pedroza et al. (2018), quien la atribuye a una mayor mortalidad estacional. No obstante, los resultados indican que la densidad poblacional no explica por sí sola las variaciones en la producción de materia seca observadas en el verano de 2022.

Rebuffo (1996) menciona que la alfalfa es particularmente sensible a condiciones de exceso de humedad o incluso anegamiento, lo que podría estar ocurriendo en el T30 a lo largo de las estaciones dado que es el tratamiento de riego frecuente y por ende esté sometido a estas condiciones.

**Figura 5**

*Evolución de los componentes de rendimiento en función del umbral evaluado para las diferentes estaciones del año*



*Nota.* Barras negras T0, barras grises T30 y barras blancas T65. Letras distintas entre sí con p-valor <0,05.

Formoso (2000) menciona con respecto al número de tallos, este es un buen indicador de vigor de la pastura, producto de un adecuado manejo del pastoreo, nutricional, sanitario, etc.

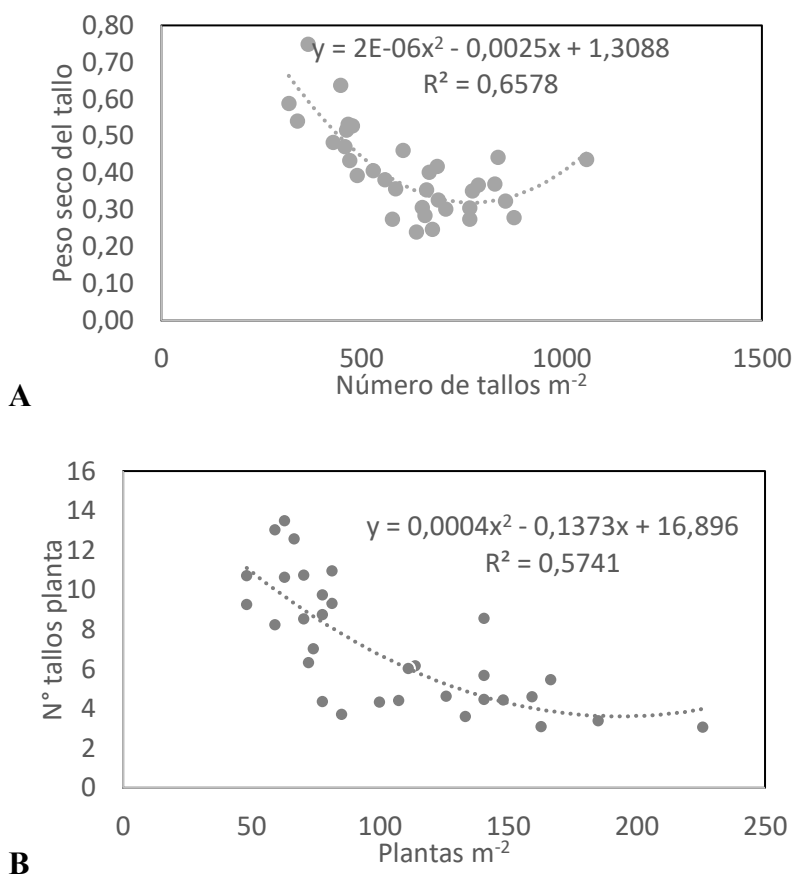
En concordancia con lo reportado por Olivo et al. (2021), en condiciones de secano se registraron mayores pesos secos de tallos. La mayor biomasa aérea observada en el T0 en verano sugiere que este estaría asociado principalmente a una mayor contribución de los tallos, tanto por su peso seco como por su número, lo cual se refleja en la disminución de la relación hoja: tallo.

Durante el verano hay un descenso del número de plantas para todos los tratamientos evaluados, existe un efecto compensatorio por parte del número de tallos de aumentar para contrarrestar esa reducción en la población y contribuir al rendimiento de materia seca (Croll et al., 1993; Rodríguez et al., 1992; Sevilla et al., 2002).

En el verano el mayor peso de tallos puede estar explicado por qué la alfalfa está en estado reproductivo, y seguramente perdió muchas hojas en el estrato inferior, razón por la cual, en el forraje acumulado, disminuye la proporción de hojas (Figura 77) donde consecuentemente aumenta la de tallos disminuyendo por ende la calidad del forraje (Formoso, 2000).

**Figura 6**

*Regresión entre la variable peso seco del tallo sobre el número de tallos por superficie y tallos por planta sobre plantas por superficie*



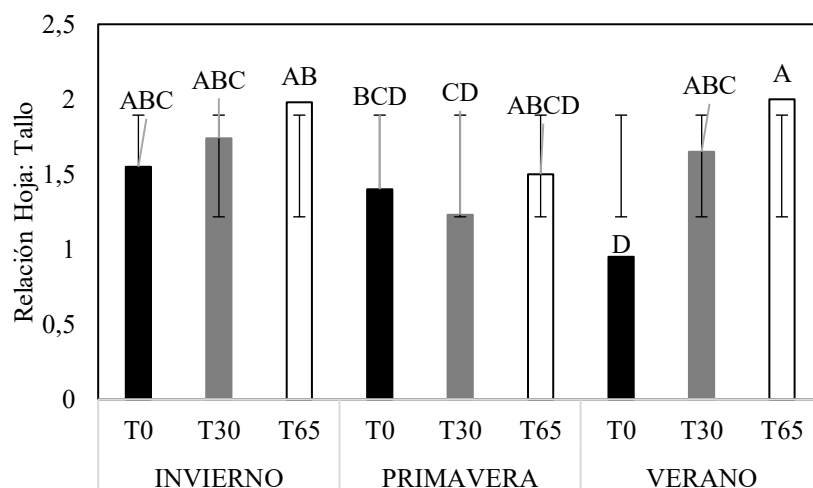
Al observar las gráficas se ve que existe un comportamiento de a mayor peso de tallos haya un menor número de tallos por superficie, es decir tallos más pesados pero menor densidad. Por otro lado, el mismo comportamiento se da cuando observamos los tallos por planta a mayor cantidad de tallos hay una menor población de plantas por superficie.

### 3.7 Relación hoja tallo y fracciones de la composición química del forraje

La relación hoja tallo fue estudiada con el fin de comprender el comportamiento morfológico de la planta cuando la misma es sometida a diferentes niveles de disponibilidad hídrica (Figura 7).

**Figura 7**

*Evolución de la relación hoja tallo para los diferentes tratamientos evaluados a lo largo de las diferentes estaciones*



*Nota.* Barras negras T0, barras grises T30 y barras blancas T65. Letras diferentes presentan diferencias significativas  $p$ -valor  $< 0,05$ .

Durante el desarrollo del experimento se logró obtener un comportamiento diferencial en la relación hoja-tallo, donde el T65 mostró un desempeño notablemente superior durante el verano, con un valor de 2, en contraste con los valores de 0,95 y 1,65 registrados para los tratamientos T0 y T30, respectivamente. Aquí podría estar operando el déficit hídrico como uno de los factores ambientales más limitantes en cuanto al proceso de fotosíntesis directamente a través de la disminución en la difusión de  $\text{CO}_2$  al cloroplasto (Wang et al., 2020) y por ende el crecimiento y productividad de las plantas (Valliyodan y Nguyen, 2006).

Si evaluamos de manera estacional, invierno y verano muestran patrones similares, observándose diferencias significativas únicamente durante el verano. Esto podría estar relacionado con un cambio en la partición de fotoasimilados (Brown et al., 2006), ya que, al tratarse de una especie estival, el flujo de recursos se dirige no hacia la producción de hojas, sino hacia la formación de estructuras florales, priorizando la reproducción y la generación de descendencia futura.



Esta partición puede verse afectada en caso de presentarse un déficit hídrico, dado que la morfogénesis de la parte aérea explica entre el 80 y 100% de las diferencias logradas en producción de biomasa aérea (Durand et al., 1989).

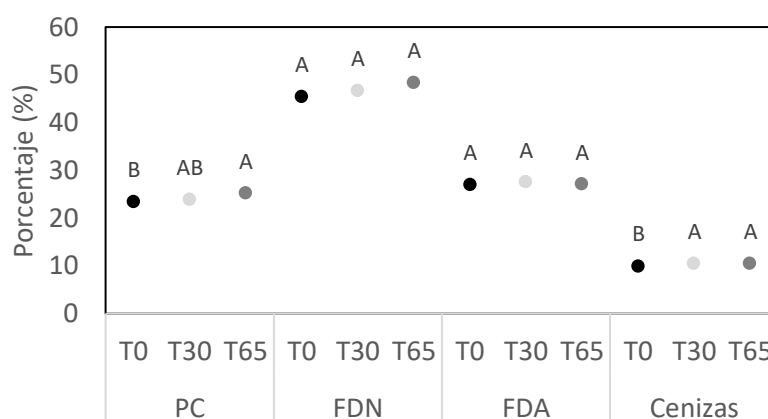
Sheaffer et al. (1988) sostienen que, en algunos casos, como consecuencia del estrés hídrico se da un aumento en la calidad del forraje evidenciado a través del aumento de la relación hoja tallo y a la menor proporción de componentes estructurales, en este estudio estaría sucediendo exactamente lo contrario.

La relación obtenida concuerda con la obtenida por Pecetti et al. (2017) en condiciones sin estrés hídrico 1,27. Al analizar esta relación junto con el contenido de proteína cruda, ver

Figura 8, se observa un efecto simultáneo y contrastante: una mayor proporción de hojas, que contienen más proteína que los tallos, explica el comportamiento nutricional registrado, evidenciando la importancia de la estructura y composición del forraje en la calidad bajo diferentes tratamientos.

### Figura 8

*Evolución de las diferentes fracciones de la composición química del forraje durante el período de evaluación*



En líneas generales Rebuffo (1996) sostiene que a medida que la planta llega a estado reproductivo la calidad del forraje disminuye, es lo que podría estar operando

en la variable de PC, como se visualiza en la gráfica hay diferencias significativas a favor del tratamiento menos frecuentemente regado.

Continuando con proteína, los valores aquí reportados son ligeramente superiores a los de Capacho-Mogollón et al. (2018) presentaron un rango de variación de 18,8 a 21,1% con una media de 20,02%, mientras que con respecto a los reportados por Arias et al. (2021) son valores muy similares 24% para todas las variedades evaluadas.

Al observar el gráfico, se aprecia que la FDN presenta valores más altos en relación con la FDA. Los resultados obtenidos para la FDN coinciden con los reportados por (Cangiano, 2007), quienes registraron un rango entre 40 - 48%. En contraste, González (2012) informó valores ligeramente superiores, alcanzando el 51%. Capacho-Mogollón et al. (2018) evaluaron distintas variedades y obtuvieron un rango de 45 a 53%, sin encontrar diferencias significativas entre ellas. De manera similar, Arias et al. (2021) analizaron diversas variedades bajo las mismas condiciones ambientales, sin detectar diferencias significativas, con valores que oscilaron entre 27 y 30%.

Los valores aquí reportados para la variable cenizas son inferiores a los reportados por Soplin (2021), que obtuvo valores en el entorno del 13% para diferentes variedades de alfalfa sembradas a diferentes densidades de siembra sin restricción de agua y nutrientes.

#### **4. Consideraciones generales**

El riego mejoró el rendimiento de materia seca durante el verano, aunque sin diferencias significativas entre los tratamientos con riego evaluados. No obstante, su impacto podría ser mayor en condiciones de mayor demanda atmosférica y menor disponibilidad hídrica. En este contexto, resulta relevante continuar evaluando el riego frente a escenarios climáticos más restrictivos.

El T65 se destaca como la alternativa más eficiente y sostenible para el manejo hídrico. El análisis de la relación entre producción de biomasa y agua consumida permitió cuantificar el incremento productivo por unidad de agua utilizada.

Se identificó un umbral de consumo de agua a partir del cual el aporte adicional de agua no incrementa la producción.

La composición química de la pastura se ve afectada significativamente por el estado fenológico de la pastura y la frecuencia de riego evidenciándose una disminución en PC cuando la pastura tiene una alta frecuencia de riego.

## **5. Conclusiones**

Los tratamientos con riego presentaron mayores rendimientos estivales que la condición de secano, independientemente del umbral de riego aplicado. Si bien no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los umbrales evaluados, el tratamiento T65 superó al T30 en términos de productividad del agua de riego y consumo total de agua, lo que indica un uso más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

El umbral T65 permitió aplicar menor cantidad de agua de riego, como consecuencia de una mayor efectividad de las precipitaciones durante el período de estudio, lo que podría traducirse en una reducción de los requerimientos energéticos y en una mejora de la eficiencia operativa de los sistemas de riego. Asimismo, las mayores tasas de crecimiento se registraron durante la estación estival bajo condiciones de riego, lo que resalta el papel clave del riego para sostener la productividad de las pasturas durante períodos de mayor demanda hídrica.

La relación establecida entre la producción de biomasa y el consumo de agua permitió identificar un umbral crítico de respuesta de la pastura, proporcionando una herramienta práctica para evaluar la eficiencia en el uso del agua y optimizar la programación del riego. Estos resultados contribuyen al desarrollo de estrategias de manejo del riego orientadas a mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción forrajera.

La composición química de la pastura está significativamente influenciada por la frecuencia de riego, observándose que una mayor frecuencia de riego se asocia con una disminución del contenido de PC.

## **6. Bibliografía**

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO.
- Arias, A., Cruz, J., Pantoja, C., Lopez, M., Bermúdez, W. y Morales, E. (2021). Estudio comparativo de la producción de forraje y calidad nutricional de variedades de cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), en la puna húmeda y seca del Perú. *Compendio de Ciencias Veterinarias*, 11(2), 7-12.  
<https://doi.org/10.18004/compend.cienc.vet.2021.11.02.7>
- Ayanz, A. S. M. (2007). *Leguminosas de interés para la implantación de praderas: Ecología y pautas básicas de utilización*. Universidad Politécnica de Madrid. [https://www2.montes.upm.es/dptos/dsrn/sanmiguel/asanmiguel/APUNTES\\_PRESENTACIONES/PASCICULTURA%20Y%20SAF/Leguminosas\\_de\\_inter%C3%A9s\\_para\\_praderas.pdf](https://www2.montes.upm.es/dptos/dsrn/sanmiguel/asanmiguel/APUNTES_PRESENTACIONES/PASCICULTURA%20Y%20SAF/Leguminosas_de_inter%C3%A9s_para_praderas.pdf)
- Barberis, N., Odorizzi, A., Arolfo, V., Urrets Zavalía, G. y Basigalup, D. (2019). *Comparación entre resultados económicos en secano y con riego suplementario del cultivo de alfalfa (Medicago sativa L.) para henificación en el centro de la provincia de Córdoba*. INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/4885>
- Beguet, H. A. y Bavera, G. A. (2001). *Fisiología de la planta pastoreada*. Sitio Argentino de Producción Animal. [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pastoreo%20sistemas/04-fisiologia\\_de\\_la\\_planta\\_pastoreada.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/04-fisiologia_de_la_planta_pastoreada.pdf)
- Blum, A. (1996). Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20(2), 135-148. <https://doi.org/10.1007/BF00024010>
- Boggiano, P., Zanoniani, R., Cadenazzi, M., Giménez, L., Formoso, D., Aguirre, S., Irazabal, N., Otegui, I., Arce, M., Fernández, P. y Riccetto, S. (2014). Evaluación de la respuesta al riego suplementario de gramíneas perennes durante el período estival. En L. Giménez (Ed.) *Riego suplementario en cultivos y pasturas* (pp. 29-41). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8822/1/fpta-55.p.29-43.pdf>
- Brown, H. E., Moot, D. J. y Pollock, K. (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(4), 423-439. <https://doi.org/10.1080/00288233.2005.9513677>

- Brown, H. E., Moot, D. J. y Teixeira, E. I. (2006) Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *European Journal of Agronomy*, 25(4), 319-327.  
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.008>
- Brown, P. y Tanner, C. (1983). Alfalfa stem and leaf growth during water stress. *Agronomy Journal*, 75(5), 799-805.  
<https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500050017x>
- Campbell, G. (1966). Grazed pasture parameters: I. Pasture dry-matter production and availability in a stocking rate and grazing management experiment with dairy cows. *The Journal Agricultural Science*, 67(2), 199-210.  
<https://doi.org/10.1017/S0021859600068283>
- Cancio, H. (2016). *Cultivo de alfalfa*. INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/16767>
- Cangiano, C. (2007). Crecimiento y manejo de la defoliación. En D. Basigalup (Ed.), *El cultivo de la alfalfa en la Argentina* (pp. 249-271). INTA.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/15452>
- Capacho-Mogollón, A., Flórez-Delgado, D. y Hoyos-Patiño, J. (2018). Biomasa y calidad nutricional de cuatro variedades de alfalfa para introducir en Pamplona, Colombia. *Ciencia y Agricultura*, 15(1), 61-67.  
<http://doi.org/10.19053/01228420.v15.n1.2018.7757>
- Capurro, M. C., Beretta, A., García, C., Sawchik, J. y Puppo, L. (2017). Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 65-76. <https://doi.org/10.31285/AGRO.21.2.9>
- Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J. y Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay: 1980-2009*. INIA.  
<https://inia.uy/sites/default/files/gras/contenidogras/Reportes/DocumentosVarios/CaracterizacionAgroclimatica/carac-agro-2010.pdf>
- Champan, D. y Lemaire, G. (1993). Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. En *Proceedings of the XVII International Grassland Congress* (pp. 95-104). University of Kentucky.  
<https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7604&context=igc>
- Collino, D., Darnanelli, J. y De Luca, M. (2007). Uso del agua y la radiación para producción de forraje. En D. Basigalup (Ed.), *El cultivo de alfalfa en la Argentina* (pp. 47-63). INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/15452>
- Correa Cardona, H. J. (2001). *El modelo NRC 2001*. Universidad Nacional de Colombia. [http://www.ucv.ve/fileadmin/user\\_upload/facultad\\_agronomia/Modelo\\_NRC\\_2001.pdf](http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Modelo_NRC_2001.pdf)

- Croll, W., Bayá, E., Saucedo, M. y Colombino, A. (1993). Comportamiento de cultivares de alfalfa en pasturas consociadas a distintas densidades durante el año de implantación: 2. Vigor de plántulas. *Revista Argentina de Producción Animal*, 13, 191-199.
- Dardanelli, J., Severina, I. y Andriani, J. (2010). Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: Su rol en la optimización del riego suplementario. En L. Giménez, B. Böcking, M. Gacía Petillo, C. García y J. Sawchik (Orgs.), *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas: 1<sup>er</sup> Seminario internacional* (pp. 19-28). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11828/1/Dardanelli-J.-2010.pdf>
- del Pozo, A., Ovalle, C., Espinoza, S., Barahona, V., Gerding, M. y Humphries, M. (2017). Water relations and use-efficiency, plant survival and productivity of nine alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars in dryland Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 84, 16-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.002>
- Demin, P., y Aguilera, 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. Universidad Nacional de Cuyo*, 44(1), 173-181.
- Díaz Lago, J., García, J. y Rebuffo, M. (1996). *Crecimiento de leguminosas en La Estanzuela*. INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2025-11/st-71-1996.pdf>
- Dolling, P. J., Lyons, A. M. y Latta, R. A. (2011). Optimal plant densities of lucerne (*Medicago sativa*) for pasture production and soil water extraction in mixed pastures in south-western Australia. *Plant and Soil*, 348(1), 315-327. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0795-x>
- 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](https://www.researchgate.net/publication/230888005_Efectos_del_agua_sobre_el_rendimiento_de_los_cultivos)
- Durand, J. L., Lemaire, G., Gosse, G. y Chartier, M. (1989). Analyse de la conversion de l'énergie solaire en matière sèche par un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.) soumis à un déficit hydrique. *Agronomie*, 9, 599-607. <https://hal.science/hal-00885230v1>
- Erice, G., Louahlia, S., Irigoyen, J., Sanchez-Diaz, J. y Avice, J. (2010). Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Journal of Plant Physiology*, 167(2), 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.016>

- 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>
- Feng, Y., Shi, Y., Zhao, M., Shen, H., Xu, L., Luo, Y., Liu, Y., Xing, A., Kang, J., Jing, H. y Fang, J. (2022). Yield and quality properties of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and their influencing factors in China. *European Journal of Agronomy*, 141, Artículo e126637. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126637>
- Fontana, L. y Cabo, S. (2019). Alfalfa. En F. S. Kent (Ed.), *Forrajeras cultivadas anuales y perennes más difundidas en la provincia de La Pampa* (pp. 11-16). INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/6054>
- Formoso, D. y Norbis, H. (2014). El riego en pasturas en la producción animal. En L. Giménez (Coord.), *Riego en cultivos y pasturas: 3er Seminario Internacional* (pp. 96-108). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4496/1/Riego-en-cultivos-y-pasturas-2014.pdf>
- Formoso, F. (2000). Manejo de alfalfa para producción de forraje. En M. Rebuffo, D. F. Risso y E. Restaino (Eds.), *Tecnología en alfalfa* (pp. 53-74). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2767/1/111219240807160703.pdf>
- Gabriels, D. y Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48. [https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_venes/article/view/982/911](https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982/911)
- García, J. (1996). Producción de forraje de pasturas cultivadas en la Región Litoral Sur. En D. Risso, E. J. Berretta y A. Moron (Eds.), *Producción y manejo de pasturas* (pp. 163-168). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8491/1/ST80-p.163-168.pdf>
- García Petillo, M., Puppo, L., Hayashi, R. y Morales, P. (2011). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-continental/historia-contemporanea/li9-es-historia/38238325>
- Gasque, M., Granero, B., Martí, P., Turégano, J. y González-Altozano, P. (2011). Sondas de humedad FDR como herramienta de apoyo en la programación del riego. *Agricultura: Revista agropecuaria*, (941), 396-400. [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_Agri/Agri\\_2011\\_941\\_396\\_400.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agri/Agri_2011_941_396_400.pdf)



- Giménez, L. y García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de los cultivos de verano para dos regiones contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.598>
- 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>
- González, R. (2012). *Ensilaje de alfalfa (Medicago sativa L.) y ovillo (Dactylis glomerata L.) en contenedores de 200 litros durante la época de lluvias* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/279cfb9f-ea71-465e-bf3c-3cdfb10f74f7/content>
- Grimes, D., Wiley, P. y Sheesley, W. (1992). Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. *Crop Science*, 32(6), 1381-1387. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200060015x>
- Hayashi, R. y Dogliotti, S. (2021). Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrociencia Uruguay*, 25(1), Artículo e390. <https://doi.org/10.31285/AGRO.25.390>
- Haydock, K. y Shaw, N. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15(76), 663-670. <https://doi.org/10.1071/EA9750663>
- Hodgson, J. (1990). *Grazing management: Science into practice*. Longman Scientific & Technical.
- Hofstadter, R. (1985). Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego. *Arroz*, 4(9), 17-25.
- 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-PubForrajerasPeriodo2022.pdf>
- Jáuregui, J. M., Ojeda, J. J., Berone, G. D., Lattanzi, F. A., Baudracco, J., Fariña, S. R. y 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/10.1111/aab.12745>

- Jones, D. B. (1931). *Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of proteins*. USDA.  
<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/80400525/Data/Classics/cir183.pdf>
- Kloster, A. M., Zaniboni, C. y Sardiña, C. (2022). Manejo y utilización de pasturas de alfalfa para producción de carne. En D. H. Basigalup (Comp.), *Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argentina* (pp. 507-549). INTA.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/14007>
- Lemaire, G. y Champan, D. (1996). Tissue flows in grazed plant communities. En J. Hodgson y A. W. Illius (Eds.), *The ecology and management of grazing systems* (pp. 3-36). CABI.
- Li, X., An, J. y Hou, X. (2023). Effects of six consecutive years of irrigation and phosphorus fertilization on alfalfa yield. *Plants*, 12(11), Artículo e2227.  
<https://doi.org/10.3390/plants12112227>
- Luo, Y., Li, G., Yan, G., Liu, H. y Turner, N. C. (2020). Morphological features and biomass partitioning of lucerne plants (*Medicago sativa* L.) subjected to water stress. *Agronomy*, 10(3), Artículo e322.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy10030322>
- Maranges, F. y Rossi, C. (2021). Intensiva revolución forrajera: La década “ganado”. *Revista INIA*, (66), 63-67.  
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16010/1/Revista-INIA-66-Setiembre-2021-17.pdf>
- 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-2/91V-2\\_04.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/1995/91V-2/91V-2_04.pdf)
- Martín, B. (2020). *Estimación de la producción de forraje de Medicago sativa L. a partir de variables climáticas y edáficas; y desarrollo de un índice de valoración forrajero, en la región pampeana argentina* [Disertación doctoral, Universidad Nacional de Rosario]. RepHip UNR. <http://hdl.handle.net/2133/23651>
- Martinez, B. y Leiva, M. (2018). *Estudio comparativo de la producción de forraje y calidad nutricional de variedades de cultivo de alfalfa (Medicago sativa), en la sierra central* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.  
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/599>

- Mendoza-Pedroza, S., Cadena-Villegas, S., Hernández-Garay, A., Vaquera-Huerta, H., Villareal-González, J. y Flores-Santiago, E. (2018). Cambios en la frecuencia de defoliación para recuperar la densidad de plantas en una pradera de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Agroproductividad*, 11(5), 51-55. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/372/260>
- Metochis, C. y Orphanos, P. (1981). Alfalfa yield and water use when forced into dormancy by withholding water during the summer. *Agronomy Journal*, 73(6), 1048-1050. <https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300060033x>
- Moot, D., Teixeira, E. y Brown, H. (2012). Alfalfa. En P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Ferreres y D. Raes (Eds.), *Crop yield response to water* (pp. 212-219). FAO. [https://www.researchgate.net/publication/260164750\\_Alfalfa](https://www.researchgate.net/publication/260164750_Alfalfa)
- Moreno, M., Gulías, J., Lazaridou, M., Medrano, H. y Cifre, J. (2008). Ecophysiological strategies to overcome water deficit in herbaceous species under Mediterranean conditions. En C. Porqueddu y M. M. Tavares de Sousa (Eds.), *Sustainable Mediterranean grasslands and their multi-functions* (pp. 247-256). CIHEAM; FAO; ENMP; SPPF. <https://ressources.ciheam.org/ressources/om/pdf/a79/00800656.pdf>
- National Research Council. (2007). *Nutrient requirement of small ruminants: Sheep, goats, cervids, and new world camelids*. NAP. <https://doi.org/10.17226/11654>
- Olivo, S., Arolfo, V. y Odorizzi, A. (2021). *Caracterización de poblaciones de alfalfa por tolerancia a sequía*. INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/9212>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f3660258-d07f-487e-b3c1-01661c83cb16/content>
- Otero, A. y Castro M. (2019). Variability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seasonal forage production in the Southwest of Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 23(1), Artículo e65. <https://doi.org/10.31285/AGRO.23.1.9>
- Otero, A. y García, C. (2017). El riego suplementario en pasturas y cultivos. *Revista INIA*, (48), 73-77. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6568/1/Rev.INIA-2017-No48-p.73-75.pdf>
- Otero, A., Montoya, F. y García, C. (2017). *Programación del riego*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7329/1/st-232-2017.pdf>

- Pecetti, L., Annicchiarico, P., Scotti, C., Paolini, M., Nanni, V. y Palmonari, A. (2017). Effects of plant architecture and drought stress level on lucerne forage quality. *Grass and Forage Science*, 72(4), 714-722. <https://doi.org/10.1111/gfs.12272>
- Pedroza Sandoval, A., Ríos Flores, J., Torres Moreno, M., Cantú Brito, J. E., Piceno Sagarnaga, C. y Yáñez Chávez, L. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays L.*) y alfalfa (*Medicago sativa*): Impacto social y económico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 231-239. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v32n3/2395-8030-tl-32-03-00231.pdf>
- Pereyra, T., Ohanian, A. E. y Salusso, N. (2019). Eficiencia en el uso de radiación y agua, en alfalfa (*Medicago sativa L.*) intercalada con pasto de Sudán (*Sorghum sudanense*) y mijo perla (*Pennisetum americanum*). *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 27(1-4), 13-19. <https://revista.alpaenlinea.org/index.php/alpa/article/view/2774>
- Pigurina, G., Methol, M., Acosta, Y., Bassewitz, Y. y Mieres, J. (1991) *Guía para la alimentación de rumiantes*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2955/1/111219220807113951.pdf>
- 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>
- Portaj, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (2003). *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.
- Puppo, L., Hayashi, R., Beretta, A. y Morales, P. (2024). Effect of irrigation and grazing on the production of an alfalfa pasture (*Medicago sativa L.*). *Agrociencia Uruguay*, 28, Artículo e1422. <https://doi.org/10.31285/AGRO.28.1422>
- Puppo Collazo, L. (2020). *Determinación de las necesidades hídricas del olivo mediante lisimetría* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29319>
- Quiroga Garza, H. M. (2013). Tasa de acumulación de materia seca de alfalfa en respuesta a variables climatológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 503-516. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342013000400002&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000400002&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

- Quiroga Garza, H. M. y Faz Contreras, R. (2008). Incremento de la eficiencia en el uso del agua por la alfalfa mediante la suspensión de riegos en el verano. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 111-117.  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v26n2/v26n2a3.pdf>
- Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 121-124.  
<https://www.redalyc.org/pdf/436/43612054010.pdf>
- Rebuffo, M. (1996). Aspectos agronómicos del cultivo de alfalfa. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada de producción animal: Lechería y pasturas* (pp. 1-5). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8525/1/SAD-100-1996-Rebuffo-p.1-5.pdf>
- Rebuffo, M. (2000). Adopción de variedades en Uruguay. En M. Rebuffo, D. F. Risso y E. Restaino (Eds.), *Tecnología en alfalfa* (pp. 5-16). INIA.  
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2767/1/111219240807160703.pdf>
- Rebuffo, M. (2005). Alfalfa: Principios de manejo del pastoreo. *Revista INIA*, (5), 2-4. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6821/1/re-5-Rebuffo-M.-p.2-4.pdf>
- Rodríguez, A. C., Colombino, A. y Saucedo, M. C. (1992). Performance of lucerne cultivars (*Medicago sativa*) in mixtures with tall fescue (*Festuca arundinacea*) at different sowing rates during the year of establishment: I. Population dynamics. *Revista Argentina de Producción Animal*, 12(1), 39-45.
- Rodríguez, N. y Spada, M. (2007). Morfología de la alfalfa. En D. Basigalup (Ed.), *El cultivo de la alfalfa en la Argentina* (pp. 29-43). INTA.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/15452>
- 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>
- Romero, L. (2008). Pasturas templadas y tropicales. En *XXI Curso Internacional de Lechería para Profesionales de América Latina* (pp. 37-60). INTA.
- Romero, N., Comerón, E. y Ustarroz, E. (1995). *Manejo y utilización de la alfalfa*. Sitio Argentino de Producción Animal. [https://produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pasturas\\_cultivadas\\_alfalfa/26-crecimiento\\_y\\_utilizacion.pdf](https://produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/26-crecimiento_y_utilizacion.pdf)

- Sawchik, J. y Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSD-INIA). En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada técnica de cultivos de verano* (pp. 41-49). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/439/1/111219230807174556.pdf#page=37>
- 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. P., Bermúdez, R., Pravia, V., Giorello, D. y Ayala, W. (2010). Riego suplementario en pasturas: Antecedentes de investigación nacional. En L. Giménez, B. Böcking, M. Gacia Petillo, C. García y J. Sawchik (Orgs.), *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas: 1er Seminario Internacoinal* (pp. 141-153). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11824/1/Sawchik-J.-et-al.-2010.pdf>
- 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>
- Sevilla, G., Pasinato, A. y García, J. (2002). Producción de forraje y densidad de plantas de alfalfa irrigada comparando distintas densidades de siembra. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 10(3), 164-170. <https://repositorio7.inta.gob.ar/server/api/core/bitstreams/22813d35-bc13-4c6c-9204-0baf26c260f7/content>
- Sheaffer, C., Lacefield, G. y Marble, L. (1988). Cutting schedules and stands. En A. A. Hanson, D. K. Barnes, y R. R. Hill, Jr. (Eds.) *Alfalfa and Alfalfa improvement* (pp. 411-437). ASA; CSSA; SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr29.c12>
- 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>
- Soplin, D. (2021). *Características agronómicas y valor nutricional de cuatro variedades de alfalfa (Medicago sativa L.) bajo diferentes densidades de siembra* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/2353/Soplin%20Cruz%20Dolores.pdf?sequence=2&isAllowed=y>



- Spada, M. C. (2014). *Avances en alfalfa*. Sitio Argentino de Producción Animal. [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pasturas\\_cultivadas\\_alfalfa/162-RevistaAvancesenAlfalfa24.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/162-RevistaAvancesenAlfalfa24.pdf)
- Tarjuelo, J. (2005). *El riego por aspersión y su tecnología* (3ª ed.). Mundi-Prensa.
- Tuberosa, R. (2012). Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Frontiers in Physiology*, 3, Artículo e347. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00347>
- United States Department of Agriculture. (1999). *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2<sup>nd</sup> ed.). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>
- Valliyodan, B. y Nguyen H. T. (2006). Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 9(2), 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.019>
- 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>
- Van Soest, J., Robertson, B. y Lewis, A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Wan, W., Li, Y. y Li, H. (2022). Yield and quality of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to fertilizer application in China: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 13, Artículo e1051725. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1051725>
- Wang, H., Zhou, Q. y Mao, P. (2020). Ultrastructural and photosynthetic responses of pod walls in alfalfa to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(12), Artículo e4457. <https://doi.org/10.3390/ijms21124457>
- Wissuwa, M., Smith, S. E. y Ottman, M. J. (1997). Humedad de la corona y predicción de la mortalidad vegetal en alfalfa sometida a estrés por sequía. *Irrigation Science*, 17(2), 87-91. <https://doi.org/10.1007/s002710050026>

## **7. Anexo**

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

**Elhordoy, A; Boggiano, P; Beretta, A; Puppo, L.**

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

#### **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<sup>-1</sup>.

**Keywords:** water requirements, DM production, irrigation scheduling, *Medicago sativa*

## 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<sup>-1</sup>.

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

## INTRODUCCIÓN

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 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, 2025), con el objetivo de satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos durante dicho período. En este sentido, diversos estudios nacionales han demostrado que el riego constituye una tecnología eficaz para estabilizar e incluso incrementar la oferta forrajera (Pérez Gomar et al., 2004).

La alfalfa se caracteriza por su elevado potencial de producción de materia seca (Demin y Aguilera, 2012; Moot *et al.*, 2012; Jáuregui *et al.*, 2022). Sin embargo, a nivel nacional, la producción promedio alcanza aproximadamente 11.000 kg de MS ha<sup>-1</sup> (García, 1995). Asimismo, presenta una alta productividad del agua, entendida como la relación entre el rendimiento de materia seca y el agua consumida por el cultivo, considerando los aportes de riego neto, precipitaciones efectivas y la variación del contenido de humedad del suelo (Van Halsema et al., 2012). En este

sentido, diversos autores (Grimes et al., 1992; Godoy et al., 2003; Brown et al., 2005; Collino et al., 2007; Pembleton et al., 2010; Espinoza et al., 2018) han reportado valores de productividad del agua que oscilan entre 1 y 3,5 kg de MS m<sup>-3</sup>, dependiendo de las condiciones ambientales y del manejo del riego.

El rendimiento de una pradera de alfalfa depende principalmente de la densidad de plantas y del peso individual de las mismas (Hernández Garay *et al.*, 2000). Diversos autores (Romero *et al.*, 1995; Sevilla *et al.*, 2002; Dolling *et al.*, 2011; Moot *et al.*, 2012; Martin, 2020) establecen una densidad de plantas crítica de 30 - 60 plantas m<sup>-2</sup>, por debajo de la cual la producción forrajera disminuye significativamente. El déficit hídrico modifica distintos caracteres morfofisiológicos de la planta y reduce su crecimiento, afectando principalmente la parte aérea y, en consecuencia, el rendimiento (Blum, 1996; Tuberosa, 2011).

En cuanto a composición química del forraje integrada por Proteína cruda, Fibra detergente ácido, Fibra detergente neutra y cenizas diversos autores a nivel internacional (Capacho *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2018; Soplin, 2021) como a nivel local (Pigurina et al., 1991) reportan valores similares sin encontrar un efecto atribuible a una posible respuesta al riego.

Por otro lado, la relación hoja:tallo en alfalfa es un componente morfológico sensible a la disponibilidad hídrica, dado que se modifica la partición de biomasa entre órganos. Bajo estrés hídrico se reduce principalmente el crecimiento foliar debido a limitaciones en la expansión celular lo que altera dicha relación (Blum, 1996). En contraste, el riego favorece el crecimiento vegetativo y la expansión de hojas,

modificando la estructura del dosel y la relación hoja:tallo del cultivo (Van Halsema *et al.*, 2012).

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. Además, se analizó la evolución de los componentes del rendimiento, composición química y relación hoja tallo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Ubicación tempo-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 experimento se evaluó desde el 1 de diciembre del 2020 hasta el 28 de febrero del 2022, abarcando todas las estaciones del año. Para la definición de las estaciones, se consideró que el verano corresponde al período del 1 de diciembre al 28 de febrero, el otoño del 1 de marzo al 30 de mayo, el invierno del 1 de junio al 31 de agosto, y la primavera del 1 de septiembre al 30 de noviembre.

### **Caracterización edáfica**

El suelo predominante en el sitio fue un Brunosol Eutrico Lac, clasificado como Arguidol típico según la clasificación taxonómica del USDA (1999). Los parámetros hídricos de los horizontes del suelo se presentan en la Tabla 1

**Tabla 1** Parámetros hídricos por horizontes del suelo

**Profundidad**   **CC**   **PM**   **DAP**   **AD**   **AD**

**P**

| <i>cm</i> | %ps |      | $\text{g cm}^3$ | $\text{mm } 10\text{cm}^{-1}$ | mm<br>horizonte <sup>1</sup> |
|-----------|-----|------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0 – 19    | 35  | 20,9 | 1,15            | 16,2                          | 30,8                         |
| 20 – 36   | 36  | 21,6 | 1,20            | 17,3                          | 27,6                         |
| 37 - 80   | 36  | 21,6 | 1,40            | 20,16                         | 88,7                         |

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

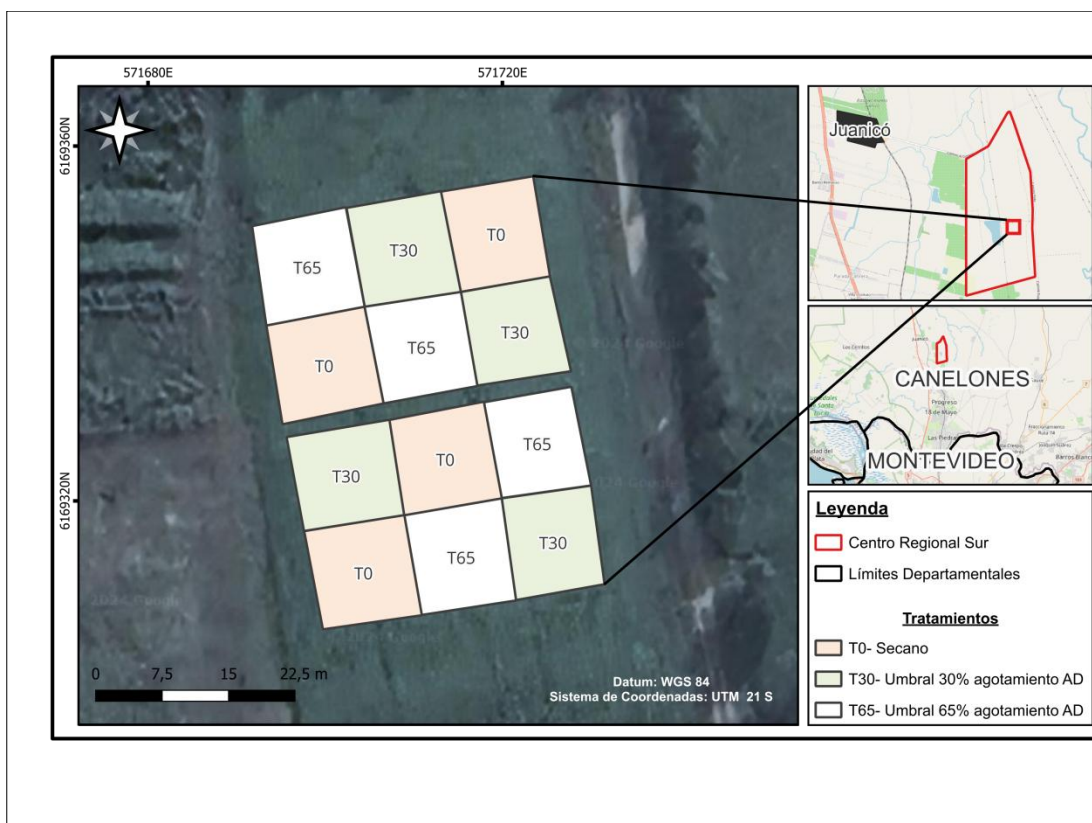
Se determinó la capacidad de campo (CC) de cada horizonte aplicando la metodología establecida por García et al. (2011). El punto de marchitez permanente (PMP) fue estimado mediante la regresión desarrollada por Silva et al. (1988), utilizando los datos de CC obtenidos en peso seco. La densidad aparente (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, generando 12 unidades experimentales de 11

x 11 metros cada una, con un área de 121 m<sup>2</sup> 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.



**Figura 1** Mapa del sitio experimental mostrando la disposición de las parcelas delimitadas

### **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 a dicho autor. La tasa de aplicación fue medida en 5,5 mm h<sup>-1</sup>.

Se definieron dos niveles de agotamiento de agua disponible, en 30% y 65% del contenido total de agua disponible (ADT) en una profundidad 40cm, 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 50cm. 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 (Tabla 2) para restablecer el agua del suelo desde el umbral hasta el 85% del ADT en la profundidad radicular, de forma de

alejarse 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:

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

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

A continuación, 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    | Lámina |
|-------------|------------|--------|
|             | acumulado  | neta   |
|             | del agua   |        |
|             | disponible |        |
|             | mm         |        |
| <b>T30</b>  | 22         | 11     |
| <b>T65</b>  | 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 la FAO, el cual ha sido validado a nivel internacional por la comunidad científica. A continuación, se presenta su fórmula:

$$\text{ETo} = 0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{\mu_2} (e_s - e_a)$$

$$\frac{T + 273}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \mu_2)} \quad [6]$$

Donde:

ETo Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm<sup>-1</sup>)

Rn radiación solar neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

G calor sensible desde la superficie al interior del suelo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

T temperatura media diaria medida a 2 m de altura (°C)

$\mu_2$  velocidad del viento media diaria medida a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)

es presión de vapor a saturación (KPa)

ea presión de vapor real del aire (KPa)

es-ea déficit de presión de vapor (KPa)

$\Delta$  pendiente de la curva T-presión de vapor a saturación (KPa °C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  constante psicrométrica (KPa °C<sup>-1</sup>)

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 100m del ensayo.

El coeficiente del cultivo (Kc) permitió estimar la evapotranspiración del cultivo 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 ( $K_s$ ).

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 se ve limitada como se indica en la ecuación 6:

$$ET_c aj = ETo \times K_c \times K_s \quad [7]$$

La magnitud del  $K_s$  se calculó en la ecuación 7:

$$K_s = \frac{ADT - DA_{cu}}{(1 - p) \times ADT} \quad [8]$$

$$(1 - p) \times ADT$$

Se obtiene al dividir la diferencia entre ADT y  $DA_{cu}$  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 del agua, calculada mediante la producción de materias seca acumulada para el período de evaluación y estacional, específicamente el verano. Para su determinación se obtuvo 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 DC a una dosis de 1 L ha<sup>-1</sup>,

glifosato a 2,5 L ha<sup>-1</sup> y fluroxipir a 400 cc ha<sup>-1</sup>, para eliminar la vegetación preexistente de *Cichorium intybus*. Tras un mes se procedió a la siembra del cultivar *Chaná*, con una densidad de 20 kg ha<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup> 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.

Se evaluó la producción de materia seca (MS) y los componentes demográficos de la pastura como plantas por metro cuadrado, número de tallos por metro cuadrado y peso seco de tallos.

Las mediciones de producción de MS se realizaron previo a cada pastoreo. Se aplicó 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 ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) 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  $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  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).

Para evaluar las características demográficas de la pastura, se utilizaron marcos de 0,3 x 0,3 m, se realizaron 3 repeticiones por parcela al comienzo de la estación ubicados al azar. En cada marco, se contabilizó el número de plantas que se encontraban dentro, así como el número de tallos de cada planta, para determinar el número de tallos de cada planta. Con esa información se determinó el número de tallos  $\text{m}^{-2}$ . Se cuantificó su peso fresco, luego las muestras fueron llevadas a estufa por 72 horas a 60°C y finalmente se midió peso seco.

Para el análisis de las características químicas de la pastura, se realizó una submuestra compuesta para cada estación, se secó a estufa a 60° hasta peso constante, se molieron las muestras y se analizó contenido de Proteína cruda (PC), Fibra detergente ácida (FDA) y Fibra detergente neutra (FDN) estas dos últimas con el método de Van Soest y Robertson (1991).

### **Caracterización climática**

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

### **Análisis estadístico**

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

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

Para el análisis por estación las variables de plantas m<sup>-2</sup>, tallos m<sup>-2</sup>, peso seco de tallo y 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 una diferencia mínima significativa con un nivel de probabilidad del 5%.

## **RESULTADOS**

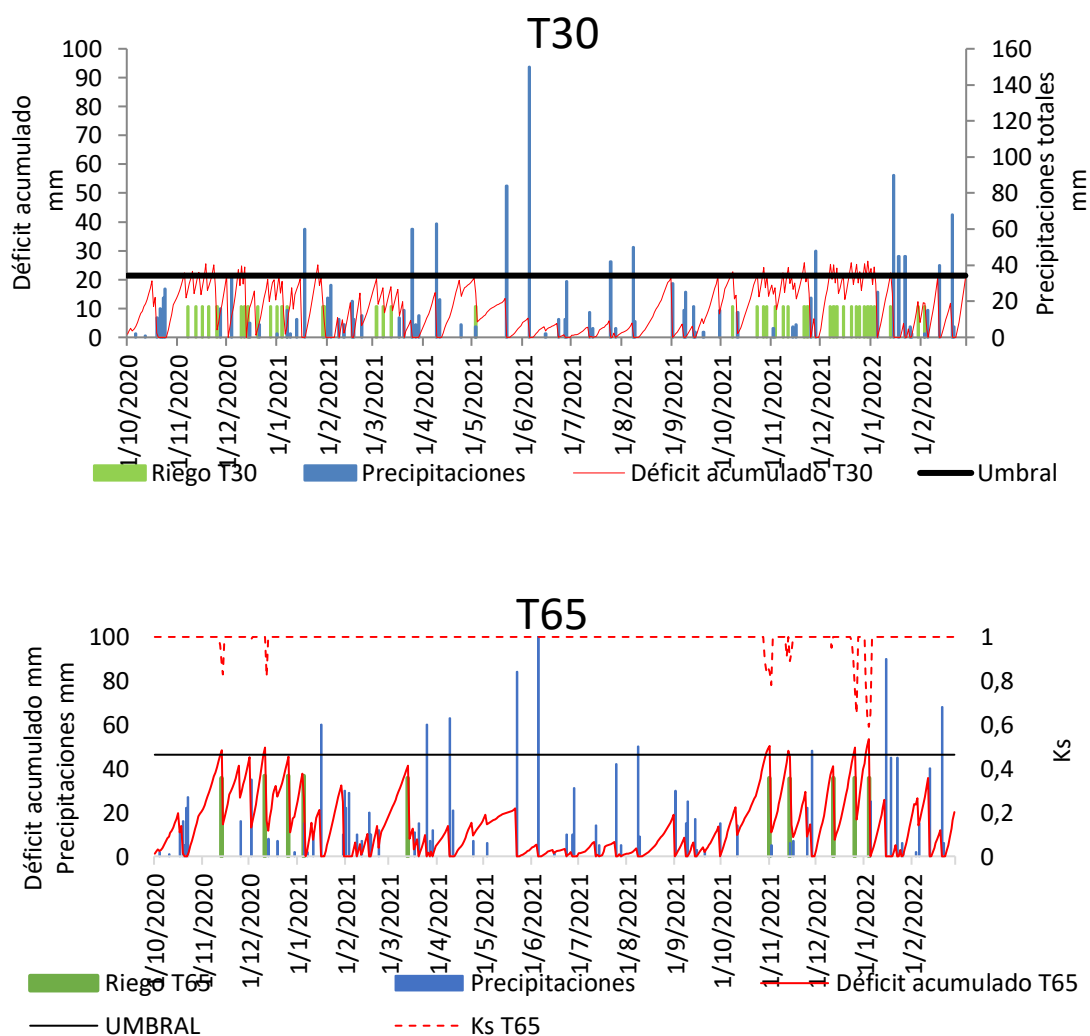
### **Caracterización climática**

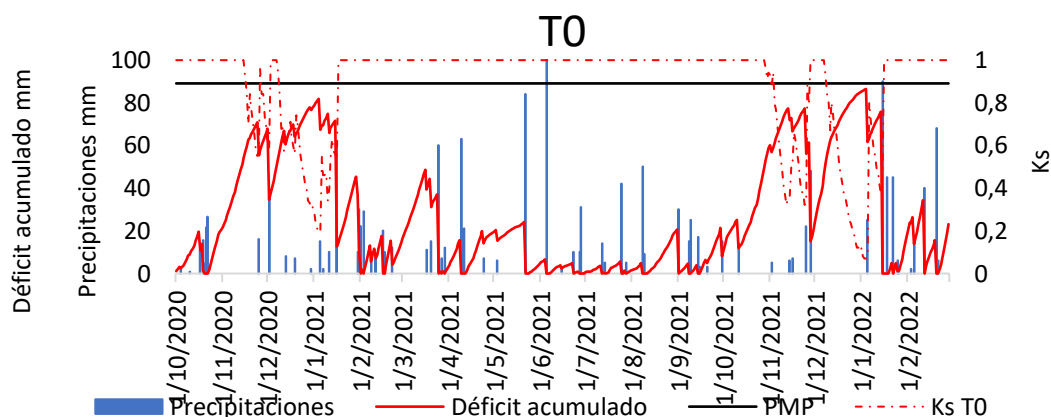
Se analizaron 43 temporadas estivales comprendidas entre los años 1980 y 2022, obteniéndose un valor de evapotranspiración con una probabilidad de excedencia del 20% (P80) de 527 mm, lo que representa la demanda evaporativa máxima esperada en condiciones frecuentes. En contraste, los ciclos 2020/21 y 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.





**Figura 2** 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

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 Ks por debajo de 1. 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 (Tabla 2) 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 ( $\Delta H$ ) entre el inicio y el final de cada estación. Un  $\Delta H$  positivo sugiere una acumulación de agua incrementando así el agua disponible (AD) en la profundidad radicular, mientras que un  $\Delta H$  negativo indicaría que el agua en el suelo disminuye incrementando el consumo por parte del cultivo.



**Tabla 2** Registro de la Precipitación total, precipitaciones efectivas, riegos netos, variación del contenido de humedad ( $\Delta H$ ), agua total consumida expresados en milímetros y números de riegos para las diferentes estaciones evaluadas

|              | PP total | PP ef |     |     | Riegos netos |     | ΔH    |       |       | ACT |     |     | Nº riegos |     |
|--------------|----------|-------|-----|-----|--------------|-----|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----------|-----|
|              | mm       |       |     |     |              |     |       |       |       |     |     |     |           |     |
|              |          | T30   | T65 | T0  | T30          | T65 | T30   | T65   | T0    | T30 | T65 | T0  | T30       | T65 |
| Verano 21    | 289      | 142   | 174 | 242 | 107          | 72  | -3,6  | -24,6 | 53,5  | 245 | 270 | 295 | 16        | 3   |
| Otoño 21     | 286      | 75    | 82  | 122 | 43           | 36  | 20,2  | 15,9  | 12,3  | 136 | 133 | 134 | 4         | 1   |
| Invierno 21  | 328      | 30    | 37  | 42  | 0            | 0   | -10,9 | -13,1 | -2,7  | 24  | 24  | 39  | 0         | 0   |
| Primavera 21 | 210      | 106   | 126 | 147 | 75           | 71  | -5,0  | 0     | -20,9 | 204 | 197 | 126 | 7         | 2   |
| Verano 22    | 338      | 112   | 111 | 198 | 150          | 107 | 4,6   | -1,17 | 19,9  | 246 | 217 | 227 | 14        | 3   |
| Total        | 1451     | 465   | 530 | 751 | 375          | 286 |       |       |       | 855 | 841 | 821 | 41        | 9   |

Nota PP total precipitación total; PP ef precipitación efectiva; ACT Agua consumida total

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 riego aplicado en el T65 es ligeramente superior al 30% menor al aplicado en el T30 para el mismo período. Así mismo el número de riego del T65 es muy inferior a los riegos a los riegos requeridos por el tratamiento T30.

### Respuesta al riego en producción de MS

**Tabla 3** Producción anual y acumulada de kg de MS ha<sup>-1</sup> para los diferentes tratamientos evaluados

|            | <b>Producción<br/>anual 2<sup>do</sup><br/>año</b> | <b>Producción<br/>acumulada<br/>(Verano<br/>2021 a<br/>Verano<br/>2022)</b> |
|------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>T0</b>  | 23352 A                                            | 32152 A                                                                     |
| <b>T30</b> | 22969 A                                            | 32450 A                                                                     |
| <b>T65</b> | 24553 A                                            | 33419 A                                                                     |

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

No se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 3), ni 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<sup>-1</sup>, en el tratamiento T0 se alcanzaron 23352 kg de MS ha<sup>-1</sup>. 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.

**Tabla 4** Producción estacional de kg de MS ha<sup>-1</sup> de los tratamientos (T0, T30 y T65)

|            | Año     |         |          |           |         |
|------------|---------|---------|----------|-----------|---------|
|            | 2021    |         |          |           | 2022    |
|            | Verano  | Otoño   | Invierno | Primavera | Verano  |
| <b>T0</b>  | 9134 A  | 5627 AB | 3709 A   | 6532 A    | 7590 B  |
| <b>T30</b> | 10513 A | 6855 A  | 3586 A   | 5744 A    | 10604 A |
| <b>T65</b> | 9465 A  | 4917 B  | 3161 A   | 6418 A    | 11123 A |

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

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 1, diferencias significativas fueron detectadas en otoño de 2021 y verano de 2022. En otoño el tratamiento T65 presentó rendimientos significativamente menores frente a T0. 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 (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Tabla 5** Tasa de crecimiento estacional expresada en kg de MS ha<sup>-1</sup>

|            | 2021  |      |      |      | 2022  |
|------------|-------|------|------|------|-------|
|            | Ver.  | Oto. | Inv. | Prim | Ver.  |
| <b>T0</b>  | 102 A | 62 B | 40 A | 69 A | 92 A  |
| <b>T30</b> | 109 A | 80 A | 34 A | 59 A | 116 A |
| <b>T65</b> | 97A   | 57 B | 34 A | 65 A | 119 A |

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

Mientras que para las demás estaciones no hay diferencias estadísticas entre tratamientos. Se puede visualizar que en términos absolutos la tasa de acumulo en el

verano del 2022 son elevadas y contrastantes a las obtenidas en el verano 2021, el primer verano de evaluación.

### Productividad del agua

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

**Tabla 6** Productividad del agua anual para los diferentes tratamientos evaluados expresados en kg de MS m<sup>-3</sup>

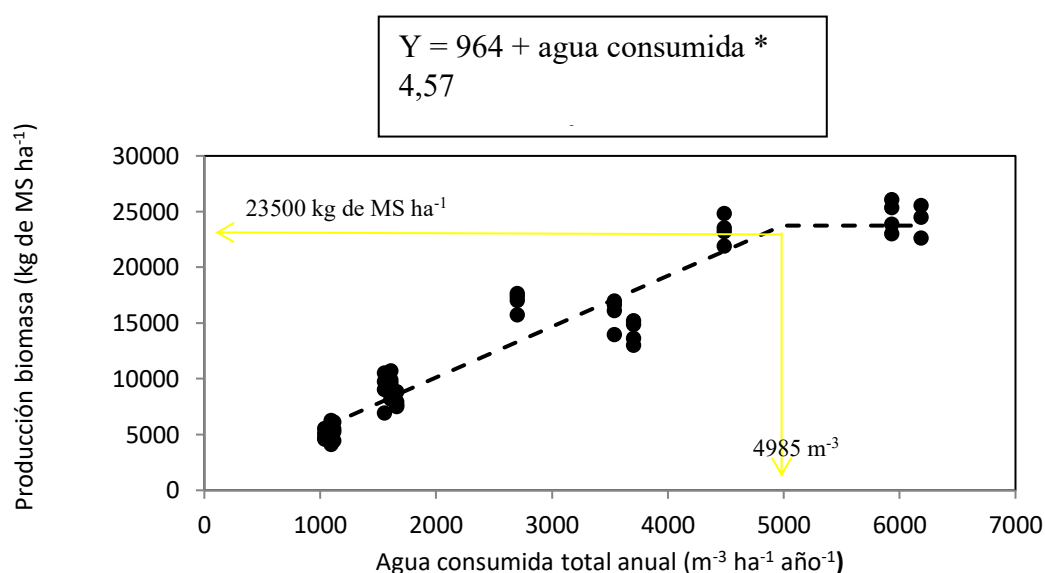
|            | Agua consumida total     | Agua de riego |
|------------|--------------------------|---------------|
|            | kg de MS m <sup>-3</sup> |               |
| <b>T0</b>  | 5,20 A                   | NC            |
| <b>T30</b> | 3,71 B                   | 7,95 B        |
| <b>T65</b> | 4,14 A                   | 11,5 A        |

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

Tanto el tratamiento T0 como el T65 fueron igualmente eficientes en cuanto a agua consumida, superando al T30. En cuanto al uso del agua de riego, el tratamiento T65 demostró una mayor eficiencia, con una superioridad del 44% respecto al T30.

### 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

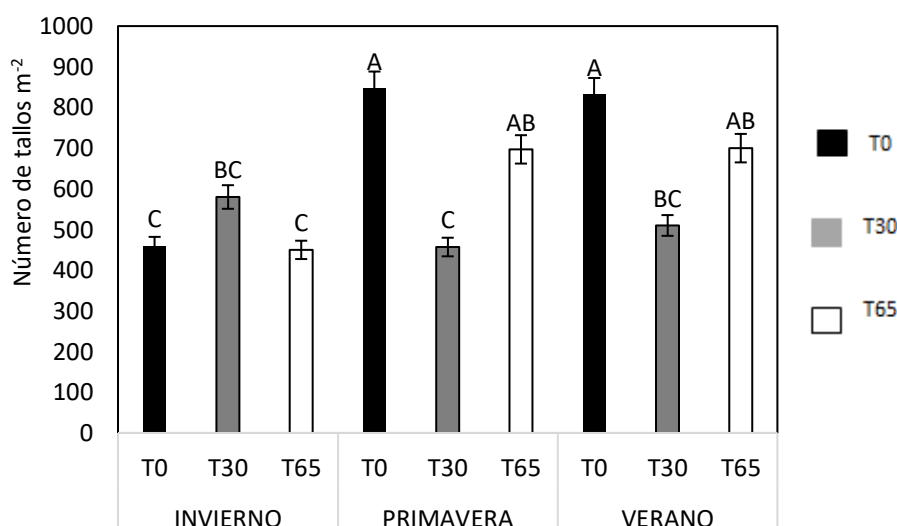


**Figura 3** Producción de biomasa en alfalfa (kg de MS ha<sup>-1</sup>) en función del agua consumida por la pastura (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

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<sup>-1</sup>. El agua, identificada como el principal factor productivo, explicó el 87 % de la variación en el rendimiento de MS ha<sup>-1</sup>. Se observó que, a partir de una dotación de 5000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, no se produjeron aumentos adicionales en la productividad, alcanzando un rendimiento máximo de 23500 kg de MS ha<sup>-1</sup>. El modelo ajustado fue estadísticamente significativo (F crítico  $1,7 \times 10^{-18}$ ), y los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  resultaron significativos con un valor de  $p < 0,001$ .

### **Evolución de los componentes de rendimiento por tratamiento**

La gráfica a continuación presenta la evolución en el número de tallos por superficie a lo largo de las estaciones evaluadas para los distintos tratamientos realizados.

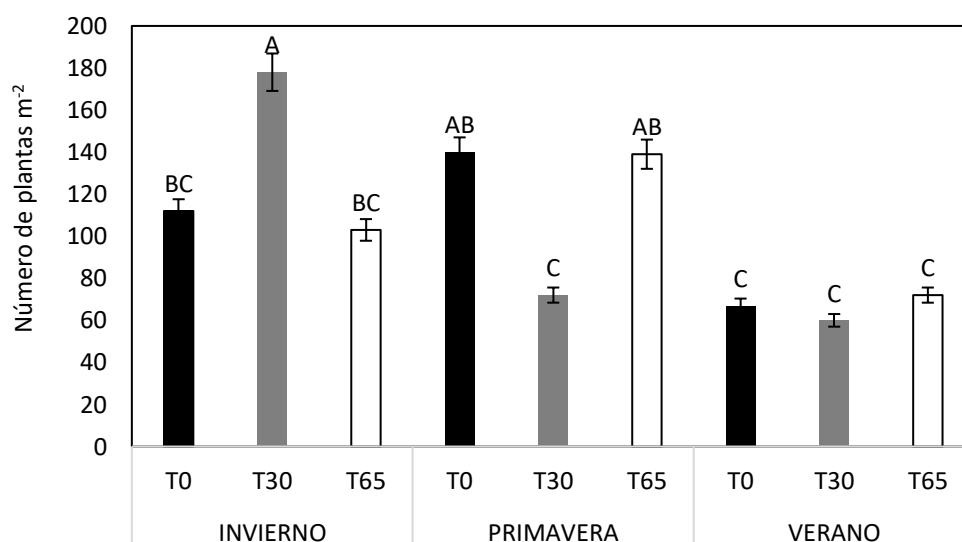


Letras distintas difieren entre sí con p-valor  $\leq 0,05$ .

**Figura 4** Evolución del número de tallos por superficie para los diferentes tratamientos evaluados

Para la variable tallos  $m^2$  los tratamientos comienzan a diferenciarse a partir de la primavera hacia el verano presentando un comportamiento similar, donde el T0 vio aumentado su número de tallos por superficie, numéricamente ronda los 800 tallos  $m^{-2}$ , mientras que el T30 presenta diferencias significativas con respecto al T0. Los tratamientos evaluados finalizan el período de evaluación sin evidenciar diferencias significativas entre tratamientos, pero presentando un claro comportamiento a aumentar desde el invierno hacia el verano, para los diferentes tratamientos evaluados.

Por otra parte, el número de plantas por superficie presenta una tendencia a la baja a lo largo de las estaciones para los diferentes tratamientos evaluados.



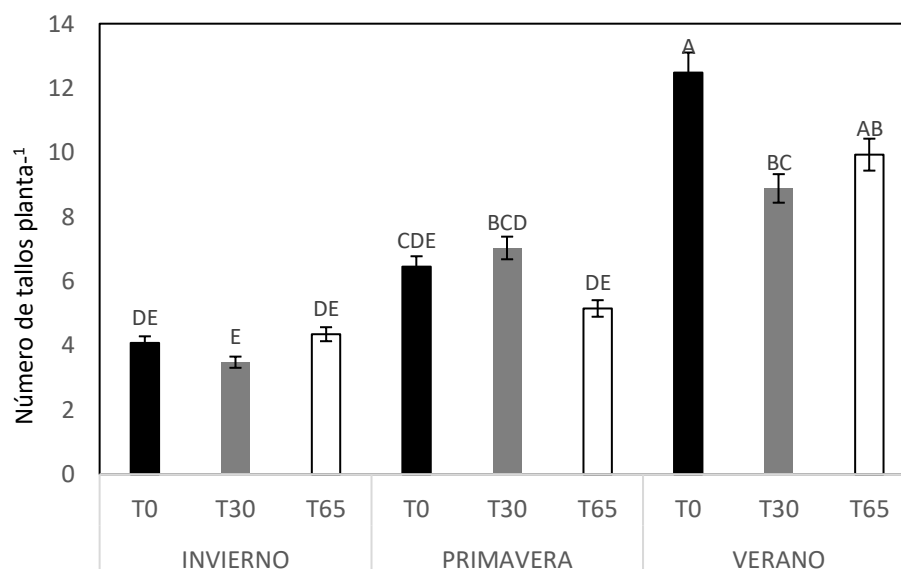
Letras distintas difieren entre sí con p-valor  $<0,05$ .

**Figura 5** Evolución del número de plantas por superficie para los diferentes tratamientos evaluados a lo largo de las estaciones

En el primer invierno podría haber un efecto acumulado del verano y otoño previos en donde no se evaluó esta variable, en donde se favorece al T30 en cuanto a número de plantas. La densidad de plantas aumentó en términos absolutos hacia la primavera en los tratamientos T0 y T65, logrando diferenciarse estadísticamente del T30.

Finalmente, en el verano los tres tratamientos no presentan diferencias significativas, situándose en el entorno de las 60 plantas  $m^{-2}$ , mostrando así una tendencia a la baja.

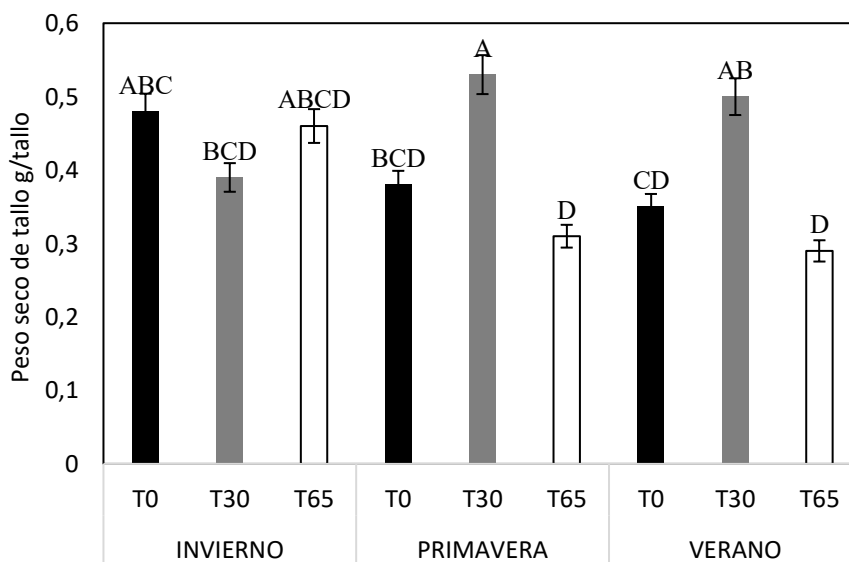




Letras distintas entre si con p-valor <0,05

**Figura 4** Evolución del número de tallos planta<sup>-1</sup> para los diferentes tratamientos evaluados

Se ve incrementado el número de tallos por planta en el verano notorio y significativo del T0 respecto al T30, no así del T65. Mientras que durante el invierno los tratamientos presentan los valores más bajos obtenidos durante el período de evaluación. El T30 presenta una mejoría notoria y significativa desde el invierno hacia la primavera que se mantiene hacia el verano.



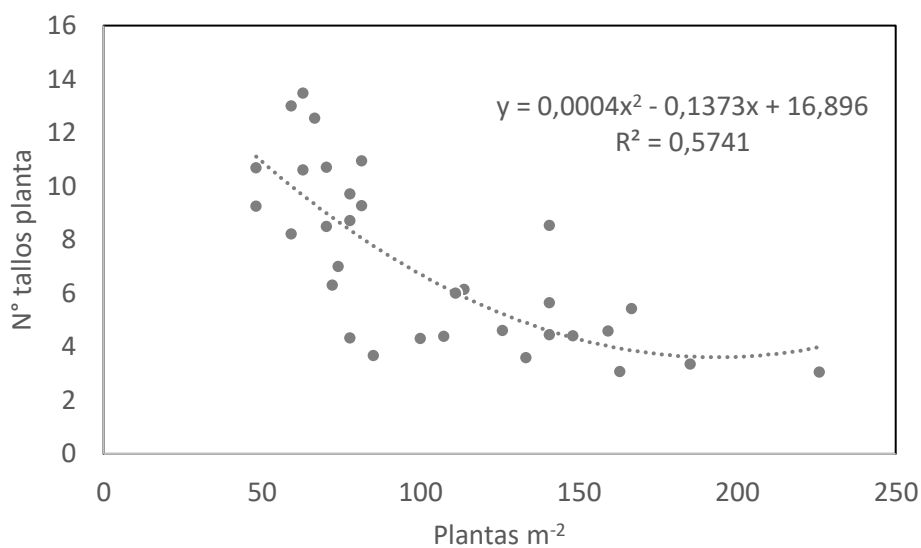
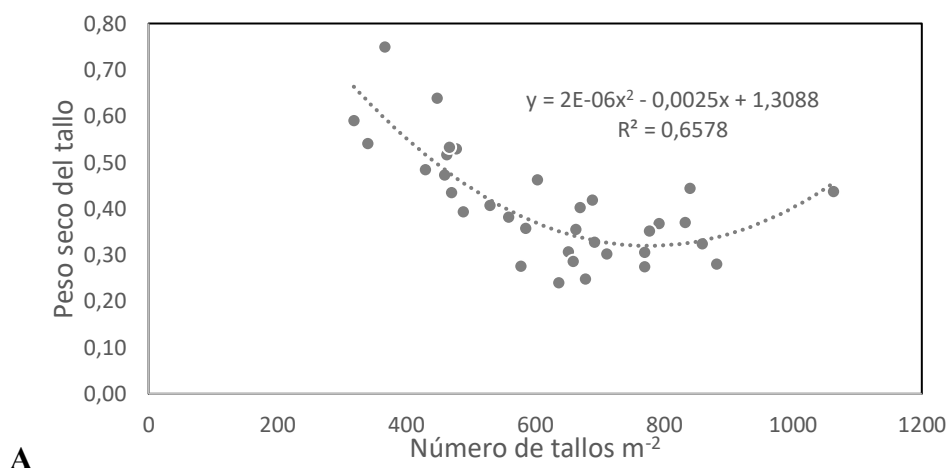
Letras distintas entre si con p-valor <0,05

**Figura 5** Evolución del peso seco de tallo para los diferentes tratamientos evaluados a lo largo de las estaciones

Específicamente en la primavera y verano se observó que el tratamiento T30, correspondiente a la mayor frecuencia de riego, presentó tallos con un peso significativamente superior en comparación con el tratamiento T65.

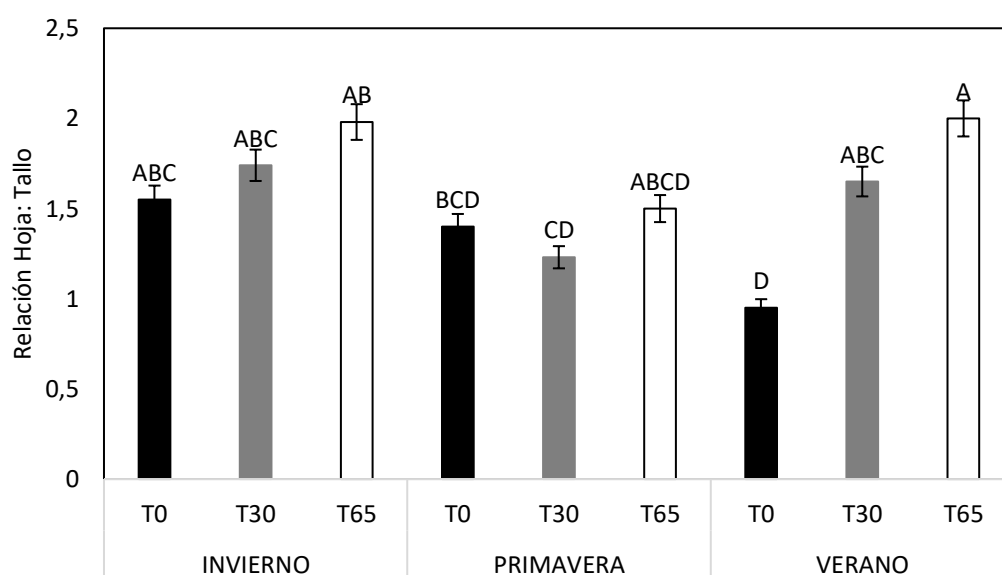
A modo de profundizar un poco más el análisis de los componentes de rendimientos, se elaboraron regresiones, en primer lugar, el peso seco de tallo sobre el número de tallos por superficie dando esta significativa en un 66% siendo de índole negativa es decir al aumentar el número de tallos el peso seco de los mismos descenderá. Por otro lado, se puede decir que hay un efecto compensatorio al disminuir la densidad de plantas y aumentar el número de tallos (Croll et al. 1993; Rodríguez et al., 1992; Sevilla et al., 2002). Al realizar la regresión tallos por planta sobre plantas por

superficie viéndose que la misma ajusta en un 57% y es de carácter positivo, es decir, que al aumentar el número de plantas por superficie también lo hace el número de tallos por planta.



**Figura 6 A y B** Regresión entre peso seco de tallo sobre número de tallos por superficie y tallos por planta sobre plantas por superficie

A continuación, se muestra la relación hoja tallo para los tratamientos evaluados en las diferentes estaciones.

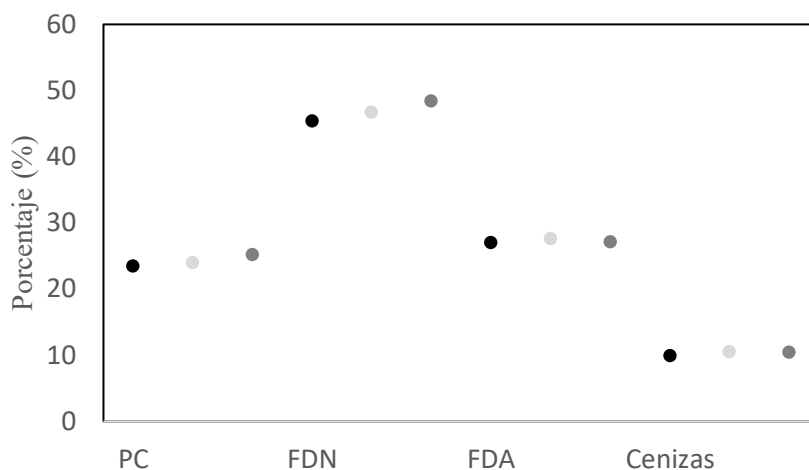


Letras distintas difieren entre sí con p-valor  $\leq 0,05$

**Figura 7** Evolución de la relación hoja tallo a lo largo de las distintas estaciones en función de los tratamientos evaluados

A lo largo del experimento, la evolución de dicha variable indica que el tratamiento T0 es inferior estadísticamente con respecto a los tratamientos regados.

### Evaluación de las diferentes fracciones de la composición química del forraje



Letras distintas difieren entre sí con p-valor  $\leq 0,05$  dentro de la misma variable.

**Figura 8** Comportamiento de las variables PC, FDN, FDA y Cenizas en función de los tratamientos evaluados, en negro se muestra el T0, gris claro T30 y gris oscuro T65.

En cuanto a la composición química del forraje, la variable de PC, expresada en porcentaje, mostró una superioridad en el tratamiento T65 en comparación con los demás tratamientos. Estos resultados sugieren que la calidad del forraje en el tratamiento T65 es superior. Esta aseveración al considerar la relación hoja-tallo, donde el tratamiento T65 también presentó una mayor proporción de hoja, lo que respalda la hipótesis de su mejor calidad nutricional, Lemaire et al., (2005). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en las variables FDN y FDA.

## DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos en este estudio superan notablemente los alcanzados por Rebuffo (2000) y por Formoso (2000) en una pastura de alfalfa de segundo año bajo riego. Sin embargo, a nivel regional, Rojas et al. (2017) lograron rendimientos de hasta 17.313 kg de MS ha<sup>-1</sup> en suelos con características edáficas similares, aunque en condiciones de secano. Estos resultados sugieren un notable avance en los rendimientos, lo que pone de manifiesto el potencial de producción bajo condiciones de riego. A nivel internacional Delgado et al., 2014 obtuvieron valores próximos a los 13.500 kg de MS ha<sup>-1</sup> dependiendo de la variedad, pero sin mostrar diferencias significativas entre ellas, bajo riego.

Las producciones de materia seca aquí obtenidas se dieron en un contexto de año con baja demanda atmosférica y alta precipitación, es de prever que en otra situación de mayor demanda y menores precipitaciones podría haber sido menos acentuada esa respuesta, diferenciando ampliamente los tratamientos regados del secano.

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<sup>-1</sup> bajo riego. Por otro lado, (Otero et al., 2019; Diaz et al., 1996) reportan valores de 49,8 kg de MS ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> y 68 kg de MS ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> respectivamente. 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 pico de producción se alcanzará en el verano (García, 1995; Sawchik, 2010), en lugar 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), ya que contribuye a mejorar la producción agrícola y a conservar los recursos hídricos de forma sostenible. Cada balance refleja el déficit acumulado de cada tratamiento (ver 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, lo que resultó en una frecuencia de riego elevada. 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 el tratamiento T0 tuviera un rendimiento inferior.

Los resultados obtenidos permiten inferir que los tratamientos T0 y T65 representan estrategias eficientes en términos de productividad del agua en alfalfa. La

productividad alcanzada se encuentra en línea con lo reportado internacionalmente por Brown et al. (2005), quienes informaron valores cercanos a  $2,9 \text{ kg MS m}^{-3}$ , y con los obtenidos a nivel local por Sawchik et al. (2010), lo que refuerza la validez de los resultados. En particular, el tratamiento T65 se presenta como una opción ventajosa no solo desde el punto de vista de la eficiencia hídrica, sino también en términos de reducción de costos operativos, debido a la notable disminución en la cantidad de riegos necesarios: 41 en el tratamiento T30 frente a solo 9 en T65. Esta diferencia no solo implica un ahorro energético asociado al bombeo, sino también una mejora en la planificación y logística del riego.

Con respecto a los componentes demográficos de la pastura evidencian que las variaciones en la producción de materia seca registradas durante el verano de 2022 no se correlacionan directamente con la densidad poblacional, ya que esta mostró una disminución en los tres tratamientos evaluados. Sin embargo, la población de plantas no descendió por debajo del umbral crítico de  $30 \text{ plantas m}^{-2}$ , valor referenciado como límite funcional por Sevilla et al. (2002), Romero et al. (1995) y Rojas et al. (2017). De acuerdo con Moot et al. (2012), para lograr rendimientos superiores a las  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de materia seca, se requiere una densidad mayor a  $40 \text{ plantas m}^{-2}$ . Asimismo, la disminución poblacional observada hacia la primavera-verano concuerda con lo reportado por Mendoza et al. (2018), quienes atribuyen este fenómeno a una mayor tasa de mortalidad vegetal.

Durante el segundo verano, se registró un mayor número de tallos en el tratamiento T0. Esta respuesta puede estar relacionada con una mayor disponibilidad de recursos,



particularmente agua y luz, lo que habría favorecido procesos fisiológicos asociados a la emisión de brotes y a una mayor partición de fotoasimilados hacia órganos aéreos (Morales, 1998). Adicionalmente, se identificó una relación inversa entre el número de tallos y el peso seco individual, donde tratamientos con menor número de tallos exhibieron un mayor peso por tallo (Ihsan Serkan Varol et al 2024). Esta relación fue modulada por la frecuencia de riego, presentando un patrón opuesto al descrito por Olivo et al. (2021). Específicamente, los tratamientos con mayor frecuencia de riego mostraron una menor densidad de tallos, pero con un peso seco individual más elevado, lo que sugiere un ajuste en la asignación de biomasa que prioriza el desarrollo estructural de cada tallo bajo condiciones hídricas más constantes.

En cuanto a la relación hoja tallo aquí obtenida, tiene cierta concordancia con la presentada por Pecetti et., al 2016 presentando un valor de 1.27 sin estrés hídrico. Si se analizan en conjunto la relación hoja tallo y el contenido de proteína cruda, se visualiza un notorio efecto simultáneo y contrastante de una mayor proporción de hojas las cuales presentan mayor contenido de PC con respecto a los tallos que expliquen ese comportamiento.

De acuerdo con Rebuffo (1997), la calidad del forraje disminuye al avanzar el estado reproductivo, lo que ayuda a interpretar las diferencias observadas en proteína cruda (PC), cuyos valores fueron levemente superiores a los de Capacho et al. (2018) y similares a los de Arias et al. (2021). La relación hoja-tallo mostró un comportamiento diferencial en el verano, asociado al déficit hídrico que puede limitar la fotosíntesis y modificar la partición de fotoasimilados (Wang et al., 2020;

Brown et al., 2005). A diferencia de lo señalado por Sheaffer (1988), no se observó una mejora en calidad bajo estrés hídrico, aunque la relación hoja-tallo coincidió con valores sin estrés reportados por Pecetti et al. (2016). Esta relación estructural se vinculó estrechamente con las propiedades químicas, ya que una mayor proporción de hojas —más ricas en proteína— explicó los mayores contenidos de PC y variaciones en las fracciones fibrosas, en concordancia con lo indicado por Hakl et al. (2015). En cuanto a la fibra, los valores de FDN coincidieron con Basigalup (2004) y se ubicaron dentro del rango informado por otros autores, mientras que el contenido de cenizas fue inferior al reportado por Soplin (2021), destacando que las diferencias observadas responden principalmente a cambios morfológicos inducidos por el ambiente.

## CONCLUSIÓN

Los tratamientos con riego mostraron un rendimiento estival superior al del secano. 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. Cabe destacar que los años evaluados tuvieron baja demanda atmosférica y precipitaciones superiores a la media, los tratamientos con riego presentaron un rendimiento superior, lo que podría cambiar en un contexto de mayor demanda atmosférica y menores precipitaciones, como los que se han experimentado en los últimos años debido al cambio climático.

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.

Las tasas de crecimiento más altas se registraron en la estación estival para los tratamientos regados.

A partir de la biomasa producida y el agua consumida, se logró establecer una relación que facilita la evaluación de la eficiencia en el uso del agua en los cultivos. Esta relación permite determinar el valor crítico hasta el cual la pastura responde favorablemente en términos de producción de biomasa, ofreciendo una herramienta útil para optimizar el riego y mejorar la sostenibilidad 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 (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.

Arias, A., Cruz, J., Pantoja, C., Lopez, M., Bermúdez, W., Morales, E. (2021). Estudio comparativo de la producción de forraje y calidad nutricional de variedades de cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), en la puna húmeda y seca del Perú. Compendio de Ciencias Veterinarias. 11(2). 7-12.

Basigalup, D. (2004). EL cultivo de la alfalfa en la Argentina. EEA Manfredi

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.

Capacho-Mogollón, A., Flórez-Delgado, D., Hoyos-Patiño, J. (2018). Biomasa y calidad nutricional de cuatro variedades de alfalfa para introducir en Pamplona, Colombia. Ciencia y Agricultura. 15 (1), 61-67.

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

Castaño 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.

Croll, W., Bayá, E., Saucedo, M., Colombino, A. (1993). Comportamiento de cultivares de alfalfa en pasturas consociadas a distintas densidades durante el año de implantación 2. Vigor de plántulas. Rev. Arg. Prod. Anim.13:191:199.

Da Cunha, G. R., Bergamaschi, H., de Paula, J. R. F., & de Saibro, J. C. (1998). Resposta da alfalfa a diversas disponibilidades de água. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 1113-1119.

Dardaneli 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.

Delgado, I; Muñoz, F; Andueza, D. (2014). Evaluación comparativa de la alfalfa y la esparceta en condiciones de secano y regadío de Aragón. 53º Reunión Científica de la SEEP 9-12 de junio 2014. Pasturas y PAC 2014-2020. 303-310p.

Díaz, J. E., García, J., & Rebuffo, M. (1996). Crecimiento de leguminosas en La Estanzuela. INIA Serie Técnica, (71).

DIEA MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Investigaciones y Estadísticas Agropecuarias, UY). (2018). Informe sobre riego en Uruguay 2018.

Espinoza, G; Servín, M; Olvera, C; De la Rosa, J; García, M; Moreno, M. (2018). Optimización de agua de riego en alfalfa (*Medicago sativa*) utilizando sensores de humedad en el suelo. Agricultura protegida. 265. 27.

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, M., Puppo, L., Hayashi, R., Morales, P. (2011). 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).

Gimenez L; García Petillo M. (2011). Evapotranspiración de los cultivos de verano para dos regiones contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15(2), 100-108.

Giorello D; Jaurena M; Boggiano P; Perez Gomar E. (2012). Respuesta al Riego Suplementario en Pasturas y Forrajes. En *Riego en Cultivos y Pasturas*. 2do. Seminario Internacional. Salto. pp. 43-53.

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.

Hakl, J., Fuksa, P., Konecna, J., Santrucek, J. (2015). Differences in the crude protein fractions of lucerne leaves and stems under different stand structures. *Grass and forage science*. 71. 413-423 pp.

Hayashi, R., Dogliotti, S. (2021). Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrocienc Urug.* 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

Hofstadter, R. (1983). Producción de maíz, alfalfa y trébol rojo bajo riego. *Rev. Asoc. Ing. Agr.* 2a Época, N° 12.

Instituto Nacional de Semillas. INASE (2022). Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras. Anuales, Bianuales y Perennes período 2022. La Estanzuela. Uruguay. Actualización enero 2023. 112p. 2023.

Ihsan Serkan Varol,,Ali Ünlükara, Mahmut Kaplan, (2024). Water productivity, yield response factors, yield and quality of alfalfa cultivars in semi-arid climate conditions, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 224, 2024, 105826, ISSN 0098-8472, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105826>.

Ivelic-Sáez, J., Reckman, O., Dec, D., López, R., Uribe, H., Valenzuela, J., & Ibarra, D. (2022). Bases para el riego de praderas en Magallanes.

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.

Lemaire, G., Avice, J., Kim, T., Ourry, A. (2005). Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (*Medicago sativa*. L) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy. Journal of Experimental Botany, Vol. 56, N° 413 935 – 943 pp.

Luna Guerrero, M. J. (2020). Variabilidad en rendimiento de forraje y resistencia a sequía en alfalfa.

Martínez, B., Leiva, M. (2018). Estudio comparativo de la producción de forraje y calidad nutricional de variedades de cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), en la sierra central. Tesis. Pasco, Perú. 77p.

Mas, C. (2004). Algunos resultados de riego en pasturas en el Este. INIA Serie de actividades de difusión 364, pp. 31-46.

Mendoza-Pedroza. S; Cadenas-Villegas. S; Hernandez-Garay. A; Vaquera-Huerta, H; Villareal-Gonzalez, J; Flores-Santiago. (2018). Cambios en la frecuencia de defoliación para recuperar la densidad de plantas en una pradera de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Agroproductividad Vol. 11. N° 5. pp 51-55.

Moot. D; Texeira. E; Brown, H. (2012). Alfalfa. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Morales, A. (1998). Morfogenese e reparticao do carbono em *Lotus corniculatus* L cv. Sao Gabriel sob o efeito de restricoes hídricas e luminosas. Universidade federal do rio grande do sul facultade de agronmia programa de pós-graduacao em zootecnia. Porto Alegre. Brasil. 74 p.



Olivo, S., Adolfo V., Odorizzi, A. (2021). Caracterización de poblaciones de alfalfa por tolerancia a sequía.

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.

Pecetti, L., Annicchiarico, P., Scotti, C., Paolini, M., Nanni, V., & Palmonari, A. (2016). Effects of plant architecture and drought stress level on lucerne forage quality. *Grass and Forage Science*, 72(4), 714-722.

Pembleton, K. G., Volenec, 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.

Pigurina, G., Metho, M., Bassewitz, Y., Mieres, J. (1991). Guía para la alimentación de rumiantes. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Uruguay. 56pp.

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.; Garcia, J. (1997). Importancia del ciclo de las variedades forrajeras en los sistemas intensivos. In: Restaino, E.; Indarte, E. eds. Pasturas y producción animal en áreas ganaderas intensivas. Montevideo, INIA. pp. 9-15 (Serie Técnica no. 15)

Rebuffo, M., Risso, D., Restaino, E. (2000). Tecnología en alfalfa. Boletín de divulgación N° 69. 165pp.

Rodriguez, A., Colombino, A., Saucedo, M. (1992). Densidad de siembra de alfalfa cv. CUF -101: Número de plantas y producción. Rev. Arg. Prod. Anim. 11:411-417.

Rojas-García, A; Torres, N; Joaquin, S; Hernández, A; Maldonado, M; Sánchez, P.(2017). Componentes del rendimiento en variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) Agrociencia, 51 (7), 697-708.

Romero, N; Comerón, E; Ustarroz, E. (1995). Manejo y utilización de la alfalfa. In: La alfalfa en la Argentina. INTA Cuyo. 150-170.

Sawchik J, Ceretta S. (2005). Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En: Jornada Técnica de cultivos: Trabajos presentados. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 417). pp. 41 - 45.

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.

Sawchik, J.: Formoso, F. (2000). Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. INIA Serie de actividades de difusión N° 227. pp. 13-25.

Sevilla, G; Pasinato, A; García, J. (2002). Producción de forraje y densidad de plantas de alfalfa irrigada comparando distintas densidades de siembra. Arch. Latin. Prod. Anim. 10(3), 164-170.

Sheaffer, C., Lacefield, G., Marble, V. (1988). Cutting schedules and stans. In: Hanson, A., Barnes, R., Hill, J. (eds.) Alfalfa and Alfalfa Improvement. ASA/CSSA/SSSA. Agronomy Monograph 29 Madison, Wisconsin, USA pp 412-430.

Silva A; Ponce de León J; García F; Durán A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Montevideo: Facultad de Agronomía. (Boletín de Investigación, 10).

Soplin, D. (2021). Características agronómicas y valor nutricional de cuatro variedades de alfalfa (*Medicago sativa L.*) bajo diferentes densidades de siembra. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias Escuela profesional de Ingeniería Agrónoma. Tesis final para obtener el título profesional de ingeniero agrónomo.

Tarjuelo, M. Benito, M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. 3era edición. 581 pp.

Van Soest, P; Robertson, J. Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of Dairy Science 74. 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

Wang, H., Zhou, Q., Mao, P. (2020). Ultrastructural and Photosynthetic Responses of Pod Walls in Alfalfa to Drought Stress. Int. J Mol Sci 2020. 23;21 (12):4457.