

CAPÍTULO 3

Ambiente y rendimiento potencial de alfalfa

Abordaje desde la ecofisiología

Silvia Olivo, Juan Mattera,
Fernando Salvagiotti y
Daniel Collino

Introducción

En este capítulo se abordarán los procesos involucrados en el crecimiento y en el desarrollo del cultivo de alfalfa explicados a través de dos modelos i) el basado en la eficiencia del uso de la radiación (modelo “radiativo”), que fuera originalmente propuesto por Monteith (1977) y que posteriormente Teixeira *et al.* (2008) adaptaron para el cultivo de alfalfa; y ii) el de componentes del rendimiento propuesto por Volenec *et al.* (1987). Además, se desarrollarán aspectos relacionados con el uso del agua y las diferencias existentes entre las producciones potencial, alcanzada y utilizada. Finalmente, el otro objetivo del capítulo es explicar –desde la ecofisiología– cómo incide el ambiente en los procesos de captura y eficiencia de uso los recursos y cómo estas respuestas afectan a la producción y la calidad del forraje.

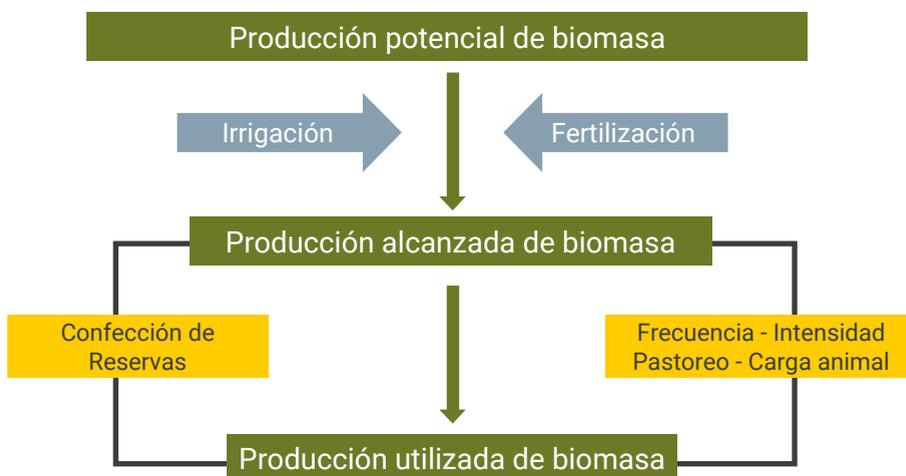
Producción potencial, alcanzada y utilizada de alfalfa

En alfalfa, como en cualquier otro cultivo, el rendimiento potencial se define como aquella producción máxima que se puede obtener sin limitantes bióticas ni abióticas controlables (plagas, enfermedades y deficiencias de agua y nutrientes) bajo las condiciones de temperatura, radiación y fotoperíodo de cada ambiente en particular (Figura 1).

Por lo tanto, comprender los mecanismos fisiológicos con los que las plantas responden a estas señales ambientales (Teixeira, 2006) como así también aspectos relacionados con la implantación de la pastura (Romero *et al.*, 1991; Sevilla *et al.*, 2003; Mattera *et al.*, 2009; Teixeira *et al.*, 2011; Thiébeau *et al.*, 2011; Mattera *et al.*, 2013; Sevilla *et al.*, 2003; Olivo, 2018) y con el manejo de la defoliación o corte (Avice *et al.*, 1997; Belanger *et al.*, 1999; Teixeira *et al.*, 2007a; Ventroni *et al.*, 2010; Olivo *et al.*, 2017; Berone *et al.*, 2020) son esenciales para maximizar la producción de forraje.

En la Argentina, la Red de Evaluación de Cultivares de Alfalfa del INTA (ver capítulo 8) conduce ensayos en diversos sitios agroecológicos que cubren gran parte del territorio nacional. Dichos ensayos son evaluados en condiciones óptimas de manejo del cultivo de alfalfa, por lo que de

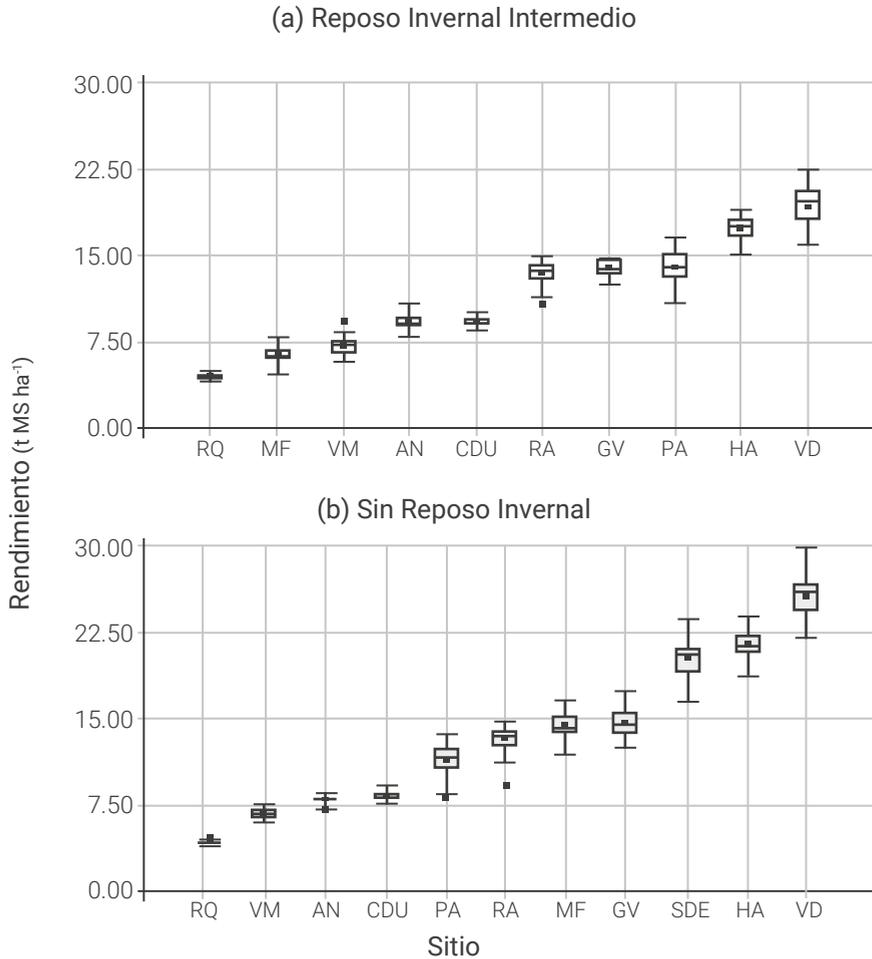
alguna manera brindan información acerca de la producción alcanzable en los diversos sitios.



■ **Figura 1.** Esquema de la producción potencial, alcanzada y utilizada en el cultivo de alfalfa.

En la Figura 2 se resumen los resultados de la serie 2014 de ensayos de evaluación conducidos en diez localidades de la red del INTA (Arolfo y Odorizzi, 2018). Se aprecia que tanto para los cultivares de reposo intermedio como para los sin reposo, los mayores rendimientos se obtuvieron en las localidades bajo riego (Santiago del Estero, Viedma e Hilario Ascasubi). Se destaca el caso de Viedma, donde los cultivares sin reposo invernal tuvieron un rango de producción de 22,5 a 30 t MS ha⁻¹ año⁻¹. Estos valores son muy cercanos a los valores potenciales de producción de alfalfa estimados por Collino *et al.* (2007), que oscilaron entre 30,5 y 32 t MS ha⁻¹ año⁻¹. Respecto de los cultivares con reposo invernal intermedio, los valores de producción en las tres localidades bajo riego estuvieron alrededor de las 20 t MS ha⁻¹ año⁻¹. Por un lado, en este caso, la brecha con respecto al potencial anteriormente señalado no está relacionada con la disponibilidad de agua sino con las condiciones de temperatura y radicación solar, que no fueron las suficientes para que el cultivo expresara su potencial de producción. Por otro lado, la diferencia de rendimiento entre grupos de reposo invernal registrada en Viedma también estaría indicando que los cultivares sin reposo aprovecharon mejor las condiciones de crecimiento de ese ambiente que los

de reposo intermedio. Esto se relaciona con un diferencial de potencial de producción entre grupos de reposo invernal.



■ **Figura 2.** Gráficos de caja (box-plot) para el promedio de rendimiento anual de forraje (t MS ha⁻¹ año⁻¹) durante los tres primeros ciclos de producción en distintos sitios de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Alfalfa para el ciclo de evaluación 2014-18. Referencias: a) cultivares con reposo invernal intermedio (14 cultivares) y b) cultivares sin reposo invernal. Referencias: RQ = Reconquista, VM = Villa Mercedes, AN = Anguil, CDU = Concepción del Uruguay, PA = Paraná, RA = Rafaela, MF = Manfredi, GV = General Villegas, SDE = Santiago del Estero (SDE), HA = Hilario Ascasubi y VD = Viedma (VD). Para cada localidad, los puntos y las líneas representan la media y la mediana, respectivamente. Los límites inferior y superior de los cuadros verticales representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. Tomado de Arolo y Odorizzi (2018).

Siguiendo con el análisis de la Figura 2, se advierte que un segundo grupo de ambientes tuvieron producciones que, si bien intermedias, son elevadas para condiciones de secano, como las registradas en los sitios de la región central de Argentina: Rafaela, Paraná, General Villegas y Manfredi. En estos casos la producción de forraje estuvo cercana a las 15 t MS ha⁻¹ año⁻¹, lo que hace inferir que la mayor limitante ha sido probablemente una oferta hídrica menor a la demanda del cultivo. En apoyo de esto, Totis *et al.* (1998) indicaron que para norte de la provincia de Buenos Aires la demanda hídrica de la alfalfa se ubica en torno a los 1640 mm año⁻¹, mientras que los valores de precipitaciones oscilan entre 800 y 1200 mm año⁻¹. En este contexto es esperable una limitación al crecimiento del cultivo.

Por último, existe un tercer grupo integrado por Anguil, Villa Mercedes, Concepción del Uruguay y Reconquista, donde las mayores limitaciones ambientales hicieron que se alcanzaran producciones promedio por debajo de las 10 t MS ha⁻¹ año⁻¹. Las dos primeras localidades registran menores precipitaciones, lo que ocasiona usualmente fuertes limitaciones hídricas al crecimiento del cultivo. Por el contrario, las dos localidades restantes registran precipitaciones elevadas –similares a las de Rafaela y Paraná–, pero tienen restricciones edáficas (suelos de textura muy fina) que restringen el crecimiento de la alfalfa.

De todo lo anterior se desprende, por un lado, que las brechas entre el rendimiento potencial y el efectivamente alcanzado diversos sitios de la Argentina indican un claro margen de acción para mejorar la producción de la alfalfa. Como se señalara, los datos de producciones potenciales cercanas a las 30 t MS ha⁻¹ año⁻¹ poco menos que duplican los valores de producción alcanzados en los ensayos de evaluación de algunas localidades.

Por otro lado, cuando se recurre al riego, debe tenerse en cuenta que el impacto de esta práctica puede variar entre distintas zonas. Por ejemplo, para el norte de la provincia de Buenos Aires, Bertín *et al.* (2015) calcularon un incremento de 25 % en la producción de MS de alfalfa con riegos estratégicos, logrando ir de 15 a 18,7 t MS ha⁻¹ año⁻¹; sin embargo, como efecto colateral, el uso del riego aumentó la concentración de sodio en el suelo como consecuencia de la calidad del agua disponible (Bertín, comunicación personal). En consecuencia, sería muy

interesante avanzar en el conocimiento de nuevas prácticas de manejo de la irrigación en el cultivo de alfalfa, como la irrigación deficitaria o el efecto de la irrigación subsuperficial.

Ojeda *et al.* (2018b) analizaron la variación interanual de la producción de alfalfa dentro de una secuencia de rotación (Figura 3). Para ello, utilizaron un modelo de estimación de rendimiento y de eficiencia de uso de las lluvias en diferentes secuencias de cultivo (cultivos anuales vs. alfalfa) y en zonas agroecológicas contratantes.

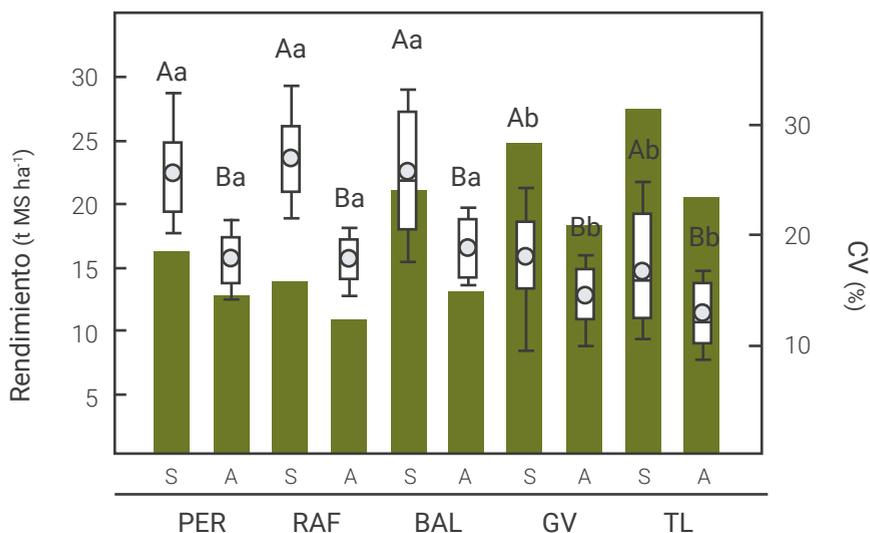


Figura 3. Rendimiento medio de biomasa aérea (t MS ha⁻¹ año⁻¹) para diferentes secuencias de cultivos (S) y alfalfa (A) en Pergamino (PER), Rafaela (RAF), Balcarce (BAL), General Villegas (GV) y Trenque Lauquen (TL) durante una serie climática de 30 años (1983–2013). Los círculos blancos y las líneas negras horizontales representan la media y la mediana de cada situación, respectivamente. Los límites inferior y superior de los cuadros verticales representan los percentiles 25 y 75, respectivamente. Diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos dentro de cada localidad. Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre localidades para un mismo tratamiento. Las barras grises indican el coeficiente de variación (%) del rendimiento modelado de MS.

Conforme indicaron los autores del trabajo, por una parte las variaciones en el rendimiento de MS se asociaron con la disponibilidad de lluvias, siendo este efecto mayor en los sitios con más de 800 mm anuales. Cuando se analizaron las rotaciones, se observó que la alfalfa presentó menor rendimiento que la secuencia de cultivos anuales, aun-

que con menor coeficiente de variación. Por lo tanto, se concluye que las variaciones de rendimiento de las secuencias de cultivos anuales se correlacionaron con la variabilidad de las precipitaciones de cada año, mientras que el cultivo de alfalfa mostró una mayor estabilidad frente a esas variaciones.

Por otra parte, es igualmente importante mencionar que para acercarse a la producción potencial en cada ambiente es menester ajustar los aspectos relacionados con la nutrición del cultivo (ver capítulo 10). Además, a fin de reducir la brecha entre las producciones alcanzadas y efectivamente utilizadas, es clave también ajustar el manejo de la defoliación, ya sea bajo condiciones de corte o pastoreo (ver capítulo 11). Por ejemplo, en ensayos de pastoreo realizados en Rafaela en condiciones de secano, Baudracco *et al.* (2011) estimaron que la producción de forraje efectivamente utilizada por los animales pasaba de 62 % a 76 % por el solo hecho de aumentar la carga animal.

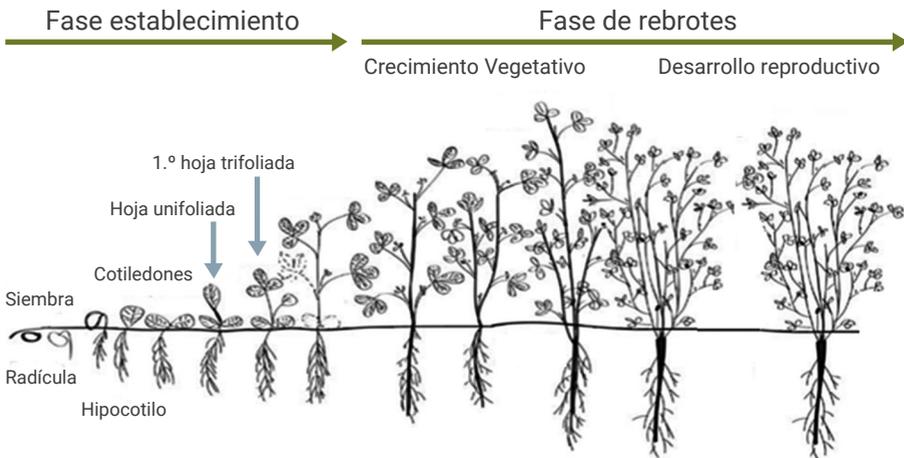
Fenología del cultivo, temperatura y fotoperíodo

Conocer y entender los procesos de crecimiento y desarrollo del cultivo de alfalfa a través de los ciclos de rebrote a lo largo de las estaciones de crecimiento es fundamental para realizar prácticas de manejo adecuadas (Moot *et al.*, 2003). El crecimiento refiere a la acumulación de materia seca producto de la intercepción de la luz y partición del carbono fijado a través de la fotosíntesis, mientras que el desarrollo refiere al estado de madurez dentro del ciclo del cultivo o de rebrote (Christian, 1977). Estos procesos están fuertemente relacionados y son modificados por señales ambientales tales como temperatura, fotoperíodo y radiación. La materialización de tales procesos se hace visible por medio de la producción de nudos y hojas en el tallo principal y en las ramificaciones axilares (Fick *et al.*, 1988; Baldissera *et al.*, 2014).

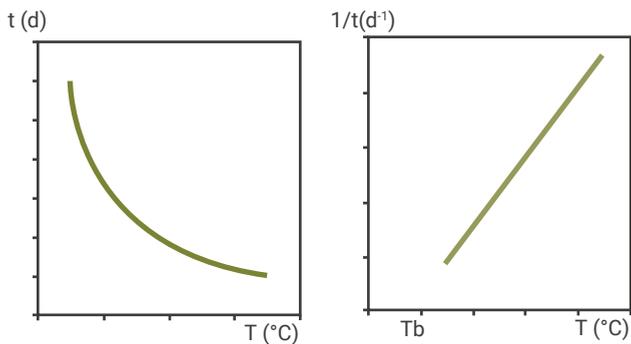
Una vez implantado el cultivo, la ontogenia de la alfalfa entra en la fase de rebrotes (ver capítulo 5), que comprende los ciclos de crecimiento que ocurren entre el primer y el último corte o defoliación en la vida del cultivo. A su vez, los ciclos de crecimiento comprenden dos períodos: 1) crecimiento vegetativo, que abarca la producción de hojas y tallos

(forraje); y II) crecimiento reproductivo, que abarca desde la floración hasta la producción de semillas (Kalu y Fick, 1981; Undersander *et al.*, 2011). Estos períodos se esquematizan en la Figura 4.

La temperatura es el principal factor que incide en la duración de cada período de crecimiento (Christian, 1977; Fick *et al.*, 1988). La relación entre la duración de un período y la temperatura no es lineal (Figura 5a), motivo por el cual la caracterización de un período queda generalmente determinado por su inversa ($1/t$), que se denomina tasa de desarrollo y que se expresa en día^{-1} (Figura 5b).

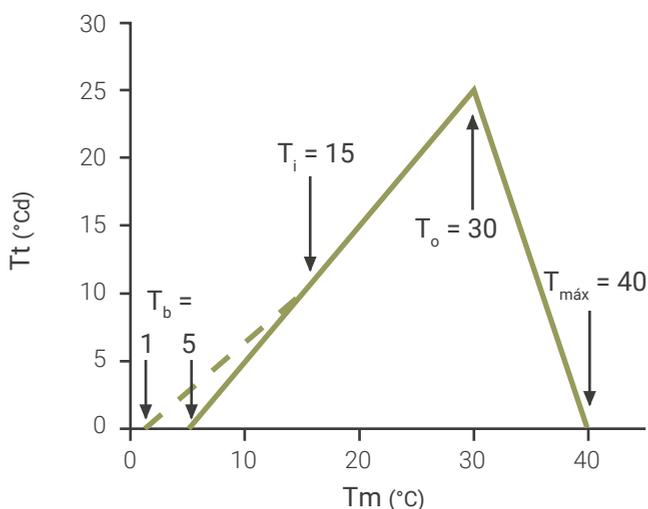


■ **Figura 4.** Ontogenia del cultivo de alfalfa dividida en fase de establecimiento y fase de rebrotes, comprendiendo esta última los períodos de crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo.



■ **Figura 5.** Respuesta idealizada a la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) respecto de: (a) duración de una fase fenológica (días) y (b) su inversa, la tasa de desarrollo $1/t$ (día^{-1}). Adaptado de Sadras *et al.* (2009).

Por un lado, lo anterior permite definir tres temperaturas cardinales: la temperatura base (T_b), la temperatura óptima (T_o) y la temperatura máxima (T_{max}). La T_b y la $T_{m\acute{a}x}$ son las temperaturas en que la tasa de desarrollo es cercana a cero, es decir que, el desarrollo prácticamente se detiene. Por otro lado, la tasa de desarrollo aumenta linealmente entre la T_b y la T_o . De acuerdo con Fick *et al.* (1988), la alfalfa tiene una $T_b = 5\text{ }^\circ\text{C}$, una $T_o = 30\text{ }^\circ\text{C}$ y una $T_{m\acute{a}x} = 45\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, Moot *et al.* (2001) propusieron considerar una $T_b = 1\text{ }^\circ\text{C}$ cuando la temperatura media del aire (T_m) es $\leq 15\text{ }^\circ\text{C}$ y una $T_b = 5\text{ }^\circ\text{C}$ cuando la $T_m > 15\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 6). Todos estos valores son importantes para calcular los tiempos térmicos (T_t) de cada período de crecimiento, expresados de grados-día ($^\circ\text{Cd}$).



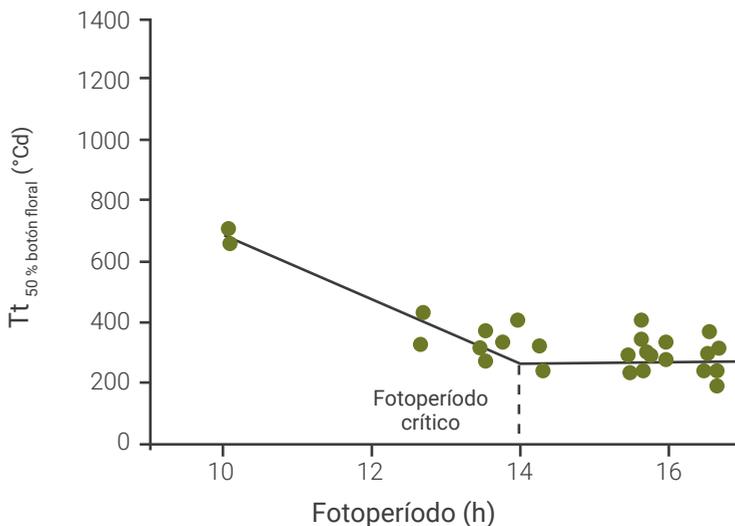
■ **Figura 6.** Umbrales de temperatura para calcular la acumulación de tiempo térmico (T_t) en grados días ($^\circ\text{Cd}$) durante el desarrollo del cultivo de alfalfa en función de la temperatura media del aire (T_m). Referencias: T_b : temperatura base; T_i : temperatura de inflexión; T_o : temperatura óptima y $T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima. Cuando la $T_m \leq 15\text{ }^\circ\text{C}$, la $T_b = 1\text{ }^\circ\text{C}$; cuando la $T_m > 15\text{ }^\circ\text{C}$, la $T_b = 5\text{ }^\circ\text{C}$. Adaptado de Brown *et al.* (2005).

El tiempo térmico (T_t) es una forma de expresar la relación entre la temperatura y el desarrollo de la planta. El T_t también es conocido como la cantidad de Grados Día de crecimiento Acumulado (GDA) que se requieren entre dos estados de desarrollo (Arnold y Monteith, 1974). El modelo de cálculo para T_t se basa en la sumatoria de las diferencias

entre T_m y T_b (Ritchie y Nesmith, 1991) y se representa en la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo Térmico (Tt)} = \sum (T_m - T_b)$$

Otro factor que afecta la tasa de desarrollo de los cultivos es el fotoperíodo (duración del día), que es percibido por las hojas y transmitido al ápice de crecimiento. El fotoperíodo incide sobre la floración y, dependiendo de la latitud, puede incidir también sobre el filocrono (intervalo de aparición de hojas). La alfalfa es una especie de día largo que requiere mayores valores de T_t para florecer conforme disminuye la longitud del día, con un fotoperíodo crítico de 14 h (315 GDA, $T_b = 5^\circ\text{C}$) (Major *et al.*, 1991); a partir de ese valor, para que las plantas alcancen 50 % de desarrollo de botón floral, el T_t se vuelve constante (Figura 7). Por lo tanto, cuando el fotoperíodo se incrementa de 13,5 a 16 h, el T_t requerido para florecer disminuye de 550 a 380 GDA (Moot *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2011; Sim *et al.*, 2015).



■ **Figura 7.** Tiempo Térmico (T_t) requerido para alcanzar el 50 % de botones florales (T_t 50 % botón floral $^\circ\text{Cd}$) en función del fotoperíodo (h) en rebrotes de un cultivar de alfalfa con reposo invernal (GRI 5) creciendo en el rango del fotoperíodo de Lincoln, Nueva Zelanda. Adaptado de Teixeira *et al.* (2011).

Modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación

Uno de los objetivos del manejo de cultivos de alto rendimiento es generar hojas (área foliar) para que las plantas puedan captar la radiación solar y convertirla en biomasa (Vega y Andrade, 2009). La producción de biomasa de un cultivo puede ser expresada a través del modelo ecofisiológico, desarrollado por Monteith (1977), que considera a la biomasa producida como el resultado del siguiente producto:

$$\text{Biomasa total} = \sum (f \text{ RFA}_{\text{interceptada}}) * \text{EUR}_{\text{total}}$$

En esa ecuación, RFA_{inc} es la radiación fotosintéticamente activa diaria incidente, $f \text{ RFA}_{\text{interceptada}}$ es la fracción diaria de dicha radiación que el cultivo es capaz de interceptar y $\text{EUR}_{\text{total}}$ es la eficiencia (g MJ^{-1}) con la cual el cultivo convierte la radiación interceptada en biomasa (aérea + subterránea).

Cuando se analiza la producción de biomasa aérea, que reviste un interés particular en el caso de forrajeras como la alfalfa, ya que la biomasa aérea representa al rendimiento de forraje, el modelo sufre una modificación. De este modo el valor de $\text{EUR}_{\text{total}}$ es afectado por el coeficiente p , que es la fracción particionada hacia estructuras subterráneas (raíz + corona) permitiendo cuantificar la $\text{EUR}_{\text{aérea}}$. Como se verá más adelante, esta modificación al modelo permitirá entender mejor las variaciones de $\text{EUR}_{\text{aérea}}$ de la alfalfa a lo largo del año. De este modo la ecuación resultante (Brown *et al.*, 2006; Teixeira *et al.*, 2008) será:

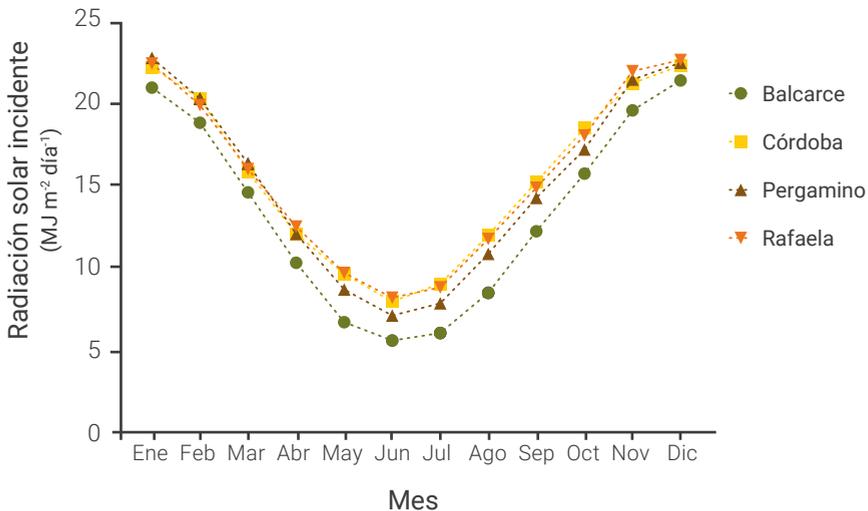
$$\text{Biomasa aérea} = \sum (f \text{ RFA}_{\text{interceptada}}) * \text{EUR}_{\text{aérea}}$$

$$\text{EUR}_{\text{aérea}} = \text{EUR}_{\text{total}} * (1 - p_{\text{raíz}})$$

Radiación global incidente y radiación fotosintéticamente activa incidente

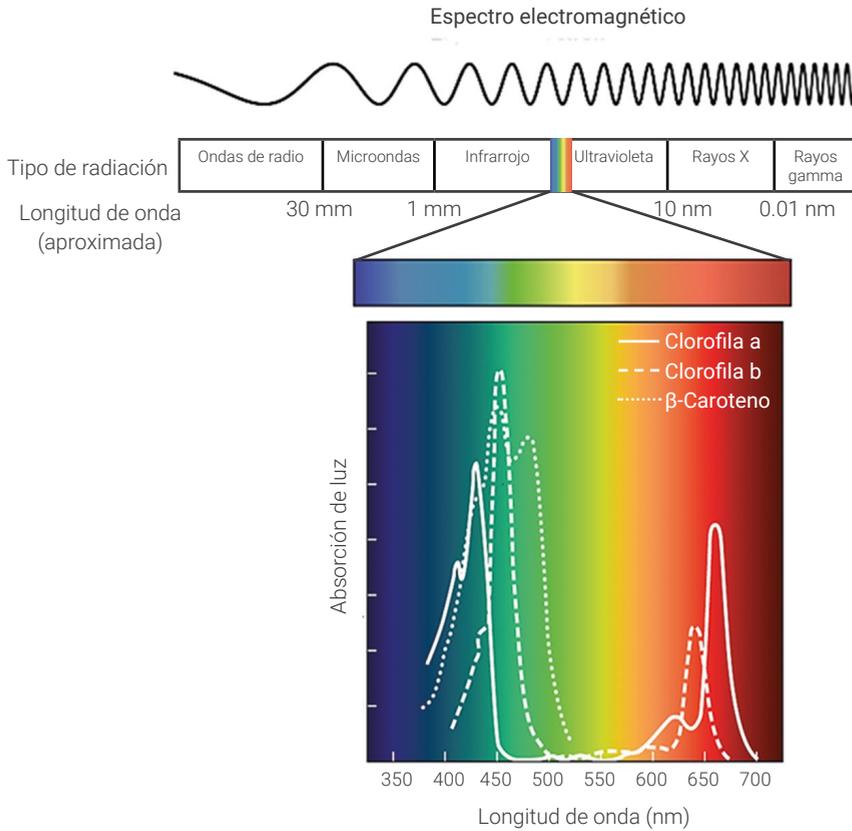
La cantidad de radiación solar global incidente a nivel de cultivo determina el potencial de producción de biomasa en un ambiente determinado Monteith (1981). La intensidad ($\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la duración (h día^{-1}) de la ra-

diación solar dependen del ángulo de elevación solar, por lo que ambos valores presentan variaciones en función de la latitud y de la estación del año, así como también de la altitud y de las condiciones de nubosidad del sitio. Al analizar los valores mensuales de radiación solar de algunas localidades representativas de la región pampeana (Figura 8), se observa que las variaciones de cada una a lo largo del año son más importantes que las diferencias entre localidades en cualquier época del año. Considerando el conjunto de localidades, la radiación solar promedio que incide presenta un rango anual de 15 a 17 MJ m⁻² d⁻¹ (Collino *et al.*, 2007); por el contrario, la radiación a lo largo del año tiene una elevada variación, con valores de 6-10 MJ m⁻² d⁻¹ en junio a 22-24 MJ m⁻² d⁻¹ en diciembre (Collino *et al.*, 2005).



■ **Figura 8.** Radiación solar incidente (MJ m⁻² día⁻¹) en función a los meses del año para cuatro sitios de la región pampeana: Balcarce, Córdoba, Pergamino y Rafaela. Adaptado de Collino *et al.* (2007).

Usualmente, el cultivo solo utiliza entre 45 y 50 % del total de la radiación incidente (Monteith, 1972). Esa radiación utilizada corresponde a las longitudes de onda de entre 400 y 700 nanómetros, que es la fracción que absorben los pigmentos fotosintéticos presentes en las plantas (Figura 9). Esta fracción de la radiación solar se conoce como radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}).



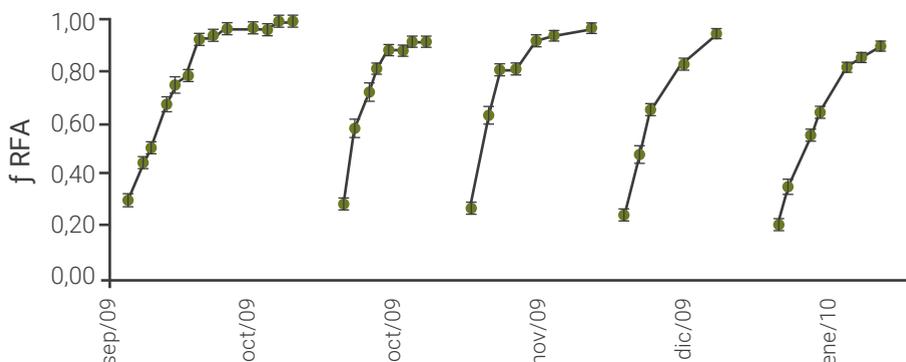
■ **Figura 9.** Longitudes de onda (400-700 nanómetros) que absorben los pigmentos fotosintéticos presentes en las plantas. Adaptado de Campbell y Norman (1998).

Fracción de la radiación interceptada por la canopia

Las hojas son las estructuras de las plantas que, en mayor proporción, captan la luz solar. Así, a medida que las plantas crecen, interceptan y absorben una cantidad creciente de la RFA_{inc} . Este proceso puede ser representado por la curva de intercepción en el tiempo que se presenta en la Figura 10, y está fuertemente asociado a la evolución del Índice de Área Foliar (IAF), que cuantifica la cantidad de área foliar (hojas) por unidad de superficie (suelo) (Gardner *et al.*, 1985).

De acuerdo con Brown *et al.* (2005), el IAF puede entenderse a través de componentes de crecimiento (ej., tallos m^2 y área individual de hoja) y de desarrollo (ej., número de hojas principales y ramificaciones). A

su vez, los cambios que surjan en el IAF serán dependientes de la tasa de aparición de hojas y de expansión foliar que –junto con la tasa de senescencia foliar en la base de la canopia– definen la expansión foliar neta diaria del IAF.



■ **Figura 10.** Evolución de la fracción de intercepción (f) de la RFA_{inc} para cinco rebrotes de alfalfa en el cv. Monarca SP INTA (sin reposo invernal). Estimaciones hechas durante el período primavera-verano en Rafaela (Santa Fe) bajo condiciones de crecimiento potenciales y con un distanciamiento entre hileras de 15 cm. Adaptado de Mattera *et al.* (2013).

Al inicio de un período de crecimiento o rebrote, cuando el IAF es bajo, debido a la escasa cantidad de hojas presentes, la intercepción de la radiación también es baja, haciendo que una gran parte de esa radiación llegue al suelo sin ser aprovechada por el cultivo. Con el avance de los procesos de desarrollo y crecimiento, la acumulación de hojas aumenta hasta alcanzar un valor de IAF denominado “IAF crítico”, que corresponde a la intercepción del 95 % de la RFA_{inc} . En el caso de alfalfa, el IAF crítico corresponde a valores de IAF entre 3,2 a 3,6 (Figura 11); por encima de estos valores, se alcanza el *plateau* en torno a los valores máximos de intercepción (Teixeira *et al.*, 2007c; Teixeira *et al.*, 2011).

Además del IAF, la disposición de las hojas en el espacio aéreo también determina cómo es interceptada la radiación. La disposición de las hojas está básicamente definida por el ángulo de inserción y por el largo de los entrenudos en los tallos. Estas variables determinan el coeficiente de extinción lumínica (k). Valores elevados de k se corresponden con canopeos de tipo planófilo, donde las hojas rápidamente interceptan la RFA_{inc} y alcanzan el IAF crítico a bajos valores, como es el caso del tré-

bol blanco (*Trifolium repens*). Por el contrario, valores bajos de k definen canopeos de tipo erectófilo, de estructura más abierta y donde el incremento de la interceptación es más lento, como por ejemplo en festuca alta (*Festuca arundinacea*).

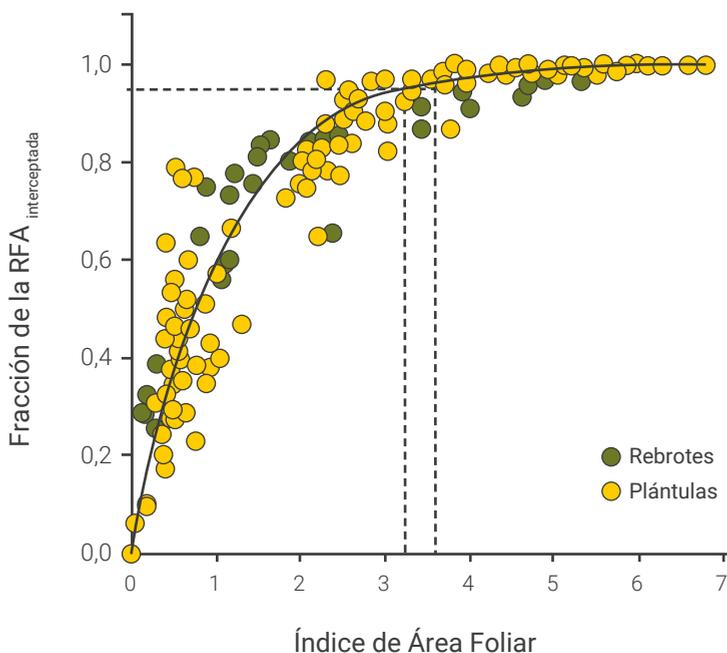


Figura 11. Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada ($f_{RFA_{inc}}$) en función del índice de área foliar para un cultivar de alfalfa con reposo invernal (GRI 5) en fase de establecimiento (plántulas) y rebrotos en Lincoln, Nueva Zelanda. Adaptado de Teixeira *et al.* (2007c; 2011).

En el caso particular de la alfalfa, la arquitectura del canopeo posee características que le permiten una captura de la luz eficiente, dada por la disposición de las hojas con distintos ángulos foliares entre estratos y por la capacidad de los folíolos de moverse siguiendo al sol (Travis y Reed, 1983; Heichel, 1988). Por una parte, de este modo, un IAF crítico de 3,2 a 3,6 (Figura 11) se corresponde con valores de k de 0,81 a 0,93 (Teixeira *et al.*, 2007c; Teixeira *et al.*, 2011). Por otra parte, de acuerdo con Sheehy *et al.* (1979), la tasa fotosintética en alfalfa aumenta en forma lineal ante incrementos del IAF, alcanzando niveles de saturación recién a elevados valores de IAF (de 5 a 6); esto es consecuencia del mayor sombreado y de menores temperaturas en los estratos inferiores del canopeo (Heichel *et al.*, 1988).

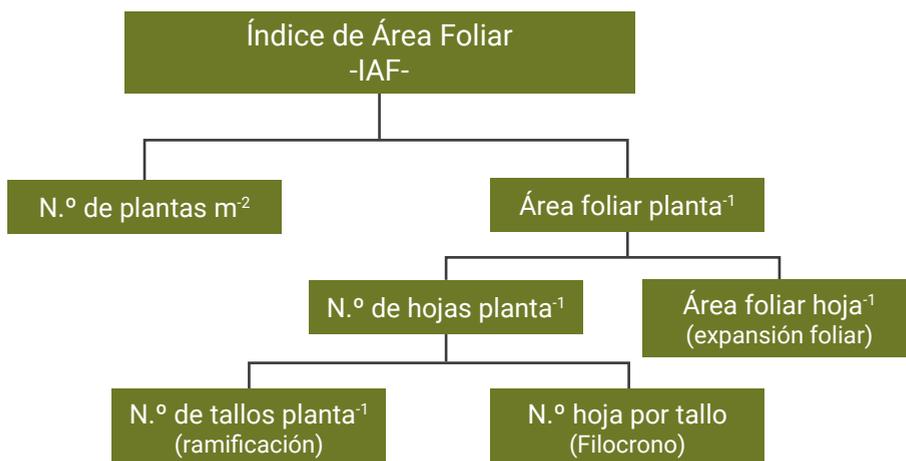
De la sumatoria diaria del producto entre la RFA_{inc} y la $fRFA_{interceptada}$ surge la $RFA_{interceptada}$ acumulada en cada período de crecimiento ($RFA_{intacum}$), valor también afectado por la duración del período de crecimiento en cuestión. Además de los procesos de desarrollo y de crecimiento, y a medida que se avanza en el rebrote, un elevado IAF y una alta interceptación producen sombreado en los estratos inferiores del canopeo, lo que incrementa el proceso de senescencia de hojas. La tasa de senescencia es muy baja hasta la aparición de la novena hoja en el tallo principal; a partir de este momento, la tasa de senescencia alcanza un valor de 1,1, lo que equivale a decir que por cada hoja nueva aparecida en el tallo principal se muere 1,1 hoja en los estratos inferiores (Brown *et al.*, 2005). Por lo tanto, desde el inicio del rebrote hasta aproximadamente los 350-380 GDA ($T_b=5\text{ }^\circ\text{C}$), que corresponde al intervalo de tiempo entre defoliaciones, la pérdida por senescencia es prácticamente despreciable (Brown *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2007c), alcanzando valores de 7 a 10 % del total del crecimiento acumulado del rebrote recién a los 700 GDA (Olivo *et al.*, 2017).

Lo anterior resulta en un cambio en la estructura del canopeo a medida que el período de crecimiento progresa por encima de los 450 GDA, pasando de una estructura más foliosa a una estructura donde la proporción de los tallos y la pérdida de hojas por senescencia se acrecientan. En consecuencia, si bien la producción de biomasa aérea puede seguir aumentando, las características nutritivas del forraje acumulado van disminuyendo, generando una menor digestibilidad y un menor porcentaje de proteína bruta como resultado de la menor relación hoja/tallo.

Los componentes de desarrollo del IAF que impactan en la $fRFA_{interceptada}$ resultan del producto entre el área foliar de cada planta y la densidad de plantas. A su vez el área foliar de cada planta resulta del número de hojas por planta y el área foliar de cada hoja (Figura 12). Todos estos parámetros resultan de procesos controlados por la temperatura (Moot *et al.*, 2001) y modulados por el fotoperíodo (Brown *et al.*, 2005).

El intervalo de aparición de hojas sucesivas se denomina filocrono, que se cuantifica a través del tiempo térmico (T_t) y se expresa en grados día ($^\circ\text{Cd}$) (Lemaire y Chapman, 1996). Para las condiciones de Nueva Zelanda, Brown *et al.* (2005) estimaron un filocrono de 37°Cd durante la primavera y el verano; a partir del comienzo del otoño, con fotoperío-

dos decrecientes, el filocrono se incrementó a 60°Cd, lo que equivale a decir que durante el otoño se requiere más tiempo térmico para que aparezca una nueva hoja. Esto último también estaría relacionado con la prioridad que tienen los órganos subterráneos durante el otoño, momento en que se produce una mayor partición de fotoasimilados hacia raíz y corona, en desmedro del crecimiento y desarrollo de las estructuras aéreas (Avice *et al.*, 2003).



■ **Figura 12.** Componentes del índice de área foliar en una pastura de alfalfa. Entre paréntesis se menciona el proceso involucrado en la definición de alguna de las variables.

Diversos autores han estimado valores similares de filocrono, que van desde 35°Cd (73) a 32,4°Cd (Baldissera *et al.*, 2014). Teixeira *et al.* (2007c), evaluando diferentes frecuencias de corte, señalaron que si bien durante los meses estivales el filocrono fue similar a los anteriormente mencionados, en la medida que disminuyó el fotoperíodo —de 16,5 a 10,5 horas diarias— el filocrono aumentó entre 40 y 63°Cd, dependiendo de la frecuencia de corte utilizada.

Por un lado, Spada y Olivo (2014), caracterizando en Manfredi (zona semiárida) rebrotes de primavera-verano de cultivares de reposo invernal contrastante (GRI 2, 4, 6, 8 y 10) y con fotoperíodos de 12,5 a 14 horas diarias, no hallaron diferencias ($p > 0,05$) de filocrono entre GRI (Figura 13), no obstante, cultivares de menor reposo manifestaron una tendencia a mayores valores. Por otro lado, debe considerarse que el déficit

hídrico estival que normalmente ocurre en Manfredi pudo haber modificado la expresión del filocrono.

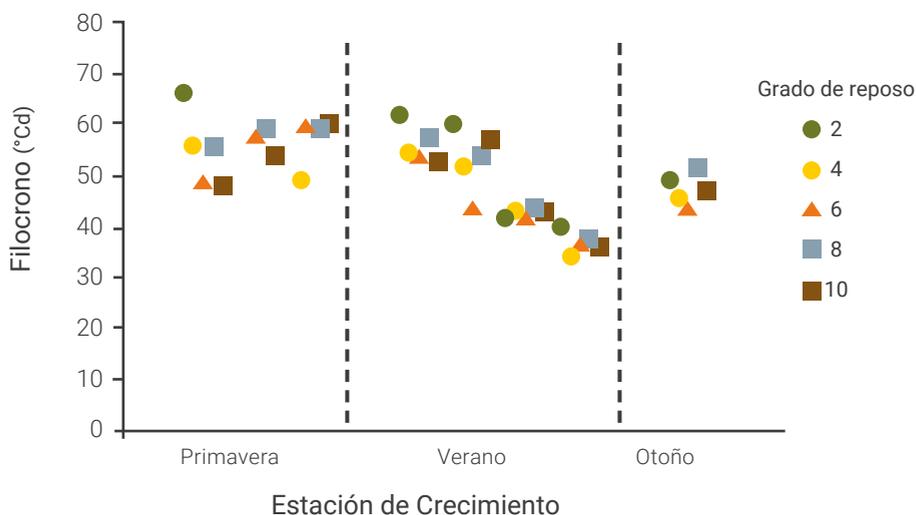


Figura 13. Filocronos (°Cd) a lo largo de tres estaciones de crecimiento (primavera, verano y otoño) para cultivares de alfalfa con diferentes grado de reposo invernal (GRI 2, 4, 6, 8 y 10) en Manfredi (Córdoba). Los valores de filocrono corresponden a cuatro años de medición (2008-2011). Adaptado de Spada y Olivo (2014).

Por un lado, el IAF está afectado también por el proceso de ramificación de la planta, que está sincronizado con la aparición de hojas en el tallo principal. Las ramificaciones comienzan cuando aparece el 4.º o 5.º nudo hoja⁻¹ en el tallo principal, registrándose una mayor tasa de ramificación en otoño y primavera respecto de la que se produce en verano (Brown *et al.*, 2005; Baldissera *et al.*, 2014). Por otro lado, si bien el tamaño máximo de las hojas está determinado genéticamente, la expresión de ese potencial dependerá de factores ambientales —tales como la temperatura, la radiación, el agua disponible y el contenido de reservas endógenas en raíz y corona (Tardieu *et al.*, 1999; Brown *et al.*, 2005)— y del manejo del cultivo, particularmente la frecuencia de corte o pastoreo (Teixeira *et al.*, 2007c). De esta forma, el tamaño final quedará definido más fuertemente por los cambios diarios de la tasa de expansión foliar (m² hoja⁻¹ día⁻¹) que por la duración de la expansión (día hoja⁻¹) (Tardieu *et al.*, 1999).

En ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, la tasa de expansión foliar será mayor en primavera/verano que en otoño, con menores y mayores filocronos respectivamente (Brown *et al.*, 2005). Esto está asociado a que las condiciones térmicas en primavera/verano están más cercanas al rango óptimo (25-30 °C) de temperatura de crecimiento de la (Christian, 1977; Moot *et al.*, 2001). En relación con la frecuencia de corte o pastoreo, Teixeira *et al.* (Teixeira *et al.*, 2007c) demostraron que las mayores frecuencias (250 GDA GDA) de corte se corresponden con menores tasas de expansión foliar, seguramente asociadas con menores niveles de reservas nitrogenadas en raíz y corona. En relación con esto, Avice *et al.* (2003) detectaron que los cambios individuales en el tamaño de las hojas fueron notables a partir de la 6.ª hoja del nudo principal, argumentado que —independientemente de la frecuencia de corte utilizada— las primeras hojas desplegadas pueden haberse desarrollado antes del pico de disminución de reservas, que ocurre aproximadamente a los 10 días posteriores al corte.

Eficiencia en el uso de la radiación

Según Sinclair y Muchow (1999), el modelo desarrollado por Monteith (1977) permite una aproximación a la estimación de la productividad en relación con la radiación incidente, estableciendo una relación lineal entre la acumulación de biomasa aérea y la radiación interceptada. Por su parte, la EUR presenta una relación curvilínea con las tasas fotosintéticas alcanzadas, donde los valores de EUR se estabilizan a valores altos de tasa de fotosíntesis. Esto explicaría la relativa estabilidad de la EUR cuando las plantas crecen bajo condiciones potenciales. Entre los factores que afectan la EUR, Sinclair y Muchow (1999) mencionan como principales a la especie, al nitrógeno, a la sequía y a la estacionalidad; y entre los factores menores identifican a la estructura del cultivo (IAF) y a la calidad de la radiación (relación entre la radiación directa y la radiación difusa).

Respecto del tipo de especie que se trate, las C4 son las que alcanzan mayores valores de EUR, lo que se traduce en mayores tasas fotosintéticas; siguen, en orden decreciente, las especies C3 no leguminosas y, por último, las C3 leguminosas, que tienen una menor EUR derivada de su mayor costo energético para formar biomasa con mayor contenido

de proteínas y grasas. El contenido de nitrógeno de la hoja evidencia una relación directa con la EUR en diversos cultivos, alcanzando una estabilización a valores elevados de nitrógeno foliar; en consecuencia, las diferencias del contenido de nitrógeno en el suelo impactan sobre la EUR. La sequía presenta un patrón de respuesta diferente, dado que la EUR recién se ve afectada por debajo de un valor umbral de humedad edáfica.

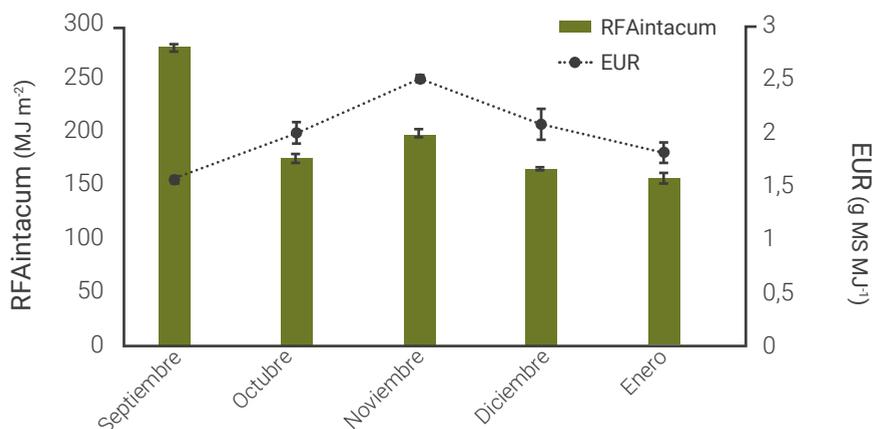
La estacionalidad de la EUR está relacionada con los cambios en las condiciones climáticas, que afectan las tasas máximas de fotosíntesis alcanzadas por los cultivos y, por ende, de EUR. En el caso de alfalfa, como se verá más adelante, se suman las variaciones estacionales registradas en lo referido a la partición de fotoasimilados hacia los órganos subterráneos (raíces + corona) (Brown *et al.*, 2006; Teixeira *et al.*, 2008).

Con bajos valores de IAF, la EUR se puede ver disminuida por una mayor proporción de hojas en estado de saturación lumínica; en cambio, en días nublados, con mayor proporción de radiación difusa, la EUR puede aumentar un poco como fruto de una mejor redistribución de la radiación dentro del canopeo.

En el caso particular de la alfalfa, la irrigación ha mostrado un mayor efecto sobre la expansión foliar, y en consecuencia sobre la interceptación de la radiación; no obstante, la EUR se reduce solo con niveles severos de estrés hídrico (Collino *et al.*, 2005). Derivado de su capacidad para utilizar el N del aire a través de la fijación biológica, el N foliar en alfalfa es generalmente elevado, por lo cual la EUR alcanzada no se ve usualmente limitada.

Como ya se ha mencionado, la época del año afecta la EUR. Mattera *et al.* (2013), trabajando con condiciones potenciales de crecimiento, estimaron en Rafaela variaciones de 1,5 a 2,5 g MS MJ⁻¹ de radiación interceptada entre primavera y fin de primavera-verano (Figura 14). Esto se debe a que las condiciones térmicas de noviembre-diciembre son más cercanas al valor óptimo para la alfalfa, lo que posibilita alcanzar los mayores valores de EUR.

En el mismo sentido, Collino *et al.* (2005) hallaron un incremento lineal de la EUR con la temperatura ambiente hasta los 21°C; por encima de ese valor, la respuesta se estabilizó. Valores similares fueron reportados por Guzmán *et al.* (2007).



■ **Figura 14.** Estacionalidad de la radiación fotosintéticamente activa interceptada y acumulada ($RFA_{intacum}$) y de la eficiencia del uso de la radiación (EUR) en cinco rebrotes de alfalfa del cv. Monarca SP INTA (sin reposo invernal) durante la primavera-verano en Rafaela (Santa Fe) bajo condiciones potenciales de crecimiento y con un distanciamiento entre hileras de 15 cm. Adaptado de Mattera *et al.* (2013).

La calidad de la radiación incidente también afecta la EUR de la alfalfa. Así, en sistemas silvopastoriles, donde se genera un incremento de la radiación difusa y una disminución de la relación rojo:rojo lejano, Varella *et al.* (2011) detectaron aumentos significativos de la EUR. Estos incrementos compensan, al menos en parte, la disminución de la cantidad de radiación que reciben los estratos inferiores del canopeo por efecto del sombreado típico de estos agroecosistemas. En canopeos obtenidos por diferentes arreglos espaciales, Mattera *et al.* (2013) hallaron que los bajos IAF en distancias muy espaciadas explicaron la menor EUR estimada en esos casos. Sin embargo, Olivo *et al.* (2017), al evaluar diferentes arreglos de siembra, no registraron variaciones en la EUR.

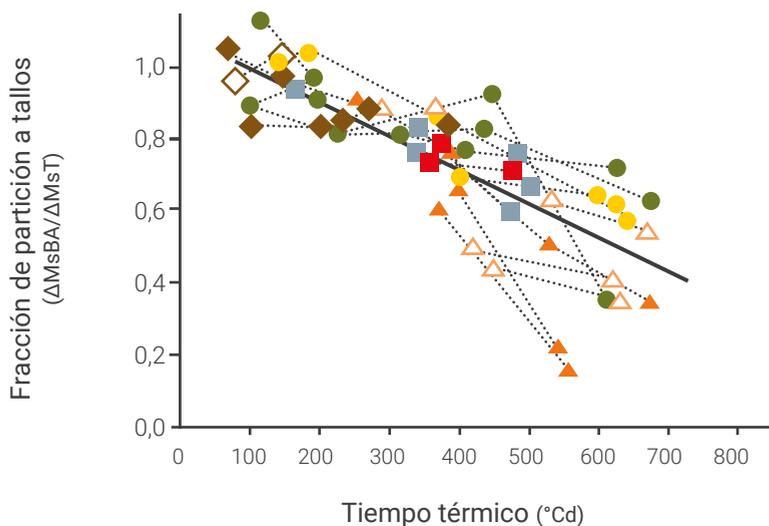
La frecuencia de defoliación también afecta la EUR, aunque con un menor impacto que la estacionalidad. Teixeira *et al.* (2008) concluyeron que los pastoreos muy frecuentes (250 GDA) no permitieron una adecuada recomposición de las reservas en raíces y corona, lo que se reflejó en menores tasas fotosintéticas. Por su parte, Olivo *et al.* (2017) detectaron menores valores de EUR cuando disminuyó la frecuencia de corte (350 vs. 700 GDA). Esto último difícilmente pueda ser explicado por una menor fotosíntesis, ya que trabajos previos demuestran que las pasturas de alfalfa defoliadas con baja frecuencia muestran similar, o ligeramente

mayor, capacidad fotosintética que las pasturas defoliadas a muy alta frecuencia (250 GDA) (Teixeira *et al.*, 2008). Por el contrario, una posible explicación podría relacionarse con la hipótesis de que a partir del inicio de floración la partición de fotoasimilados de los órganos perennes sería mayor, lo que puede hacer que se reduzca la EUR en el tratamiento cortado cada 700 GDA. Esta línea de razonamiento es consistente con el mayor peso de biomasa perenne registrada por Olivo (2018) en alfalfa cortada menos frecuentemente.

Partición

El proceso de partición del carbono fijado a través de la fotosíntesis abarca la asignación, la distribución y el transporte de asimilados desde el origen (fuente) hacia los diferentes sitios u órganos de utilización (destinos) (Heichel *et al.*, 1988). En alfalfa, el nivel de reservas endógenas, tanto de nitrógeno como de carbohidratos, en órganos perennes (corona + raíz) es un componente importante que impacta en la producción de biomasa y en la persistencia del cultivo (Avice *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2007c; Thiébeau *et al.*, 2011). El crecimiento de alfalfa no solo depende de la radiación solar interceptada por el follaje, sino también del aporte hacia tejidos aéreos desde las reservas endógenas de carbono y nitrógeno almacenadas en los órganos perennes (Khaiti y Lemaire, 1992; Cunningham *et al.*, 1998; Moot *et al.*, 2003; Avice *et al.*, 2001).

A fin de asegurar la persistencia del cultivo, se recomienda que la alfalfa acumule entre la siembra y la primera utilización (fase de implantación) entre 3 y 5 t MS ha⁻¹ de biomasa radicular, siendo este un destino prioritario durante ese período (Sim *et al.*, 2015). Por un lado, luego del primer corte, a lo largo de los rebrotes y las estaciones, la prioridad de los destinos se torna variable. Con relación a esto, Cralle (1983) observó que dentro de un ciclo de rebrote (período entre cortes sucesivos) los destinos de los fotoasimilados varían según el estadio de desarrollo de la pastura: durante los estadios vegetativos son prioritarios los órganos aéreos en detrimento de los órganos perennes, mientras que a partir de inicio de floración hasta fructificación (estadios reproductivos) las prioridades se invierten. Del mismo modo, Thiébeau *et al.* (2011) también señalaron que a medida que transcurre el tiempo de rebrote, la partición hacia los órganos perennes se va incrementando (Figura 15).



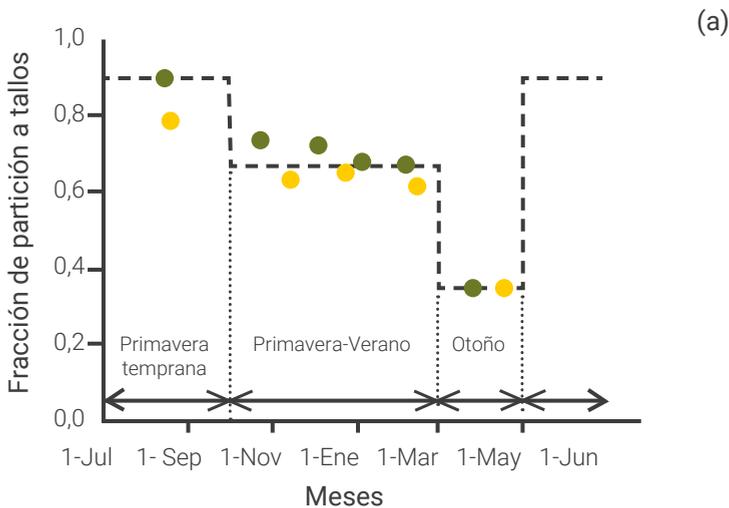
■ **Figura 15.** Fracción de partición hacia tallos ($\Delta MsBA/\Delta MsT$) en función al Tiempo Térmico ($^{\circ}Cd$) en alfalfa durante varios ciclos de rebrote y fechas de siembra. $\Delta MsBA/\Delta MsT$ = delta de la materia seca de biomasa aérea/delta de la materia seca total. Ajuste de función lineal. Fracción de partición a tallos= $(1,9 - 8,90 * 10^{-4} * \text{Tiempo Térmico})$ $R^2 = 0,66$ $p < 0,001$. Adaptado de Thibeau *et al.* (2011).

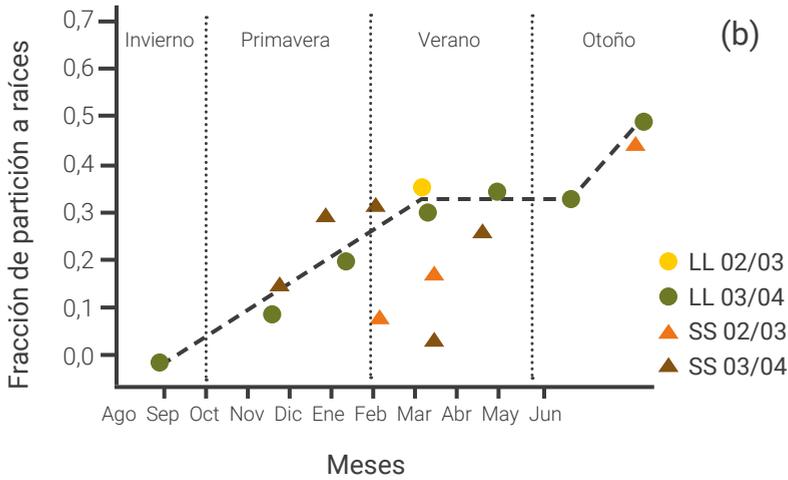
Por otro lado, el cultivo también presenta variaciones estacionales en la partición de fotosimilados. Brown *et al.* (2006) estimaron que la fracción de partición hacia los tallos fue mayor en primavera temprana (0,70-0,90), intermedia en primavera y verano (0,67) y menor en otoño temprano (0,35) (Figura 16a). Estas proporciones indican que en la medida que las temperaturas disminuyen y el fotoperíodo se acorta, la partición de asimilados tendrán como destino prioritario la raíz y la corona, de modo que se restablezcan los niveles de reservas durante el otoño, a fin de sobrevivir el invierno y asegurar la persistencia de las plantas (Moot *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2016; Teixeira *et al.*, 2008) (Figura 16b). Además, la tasa de crecimiento de los primeros rebrotes de primavera se asocia de manera directa con el nivel de reservas presentes en los órganos perennes (Cunningham *et al.*, 1998; Moot *et al.*, 2003; Teixeira *et al.*, 2007a).

El nivel de reservas endógenas también se ve afectado por la frecuencia de corte o defoliación que se utilice. Luego de los sucesivos cortes o defoliaciones que se realizan durante los meses estivales, es necesario

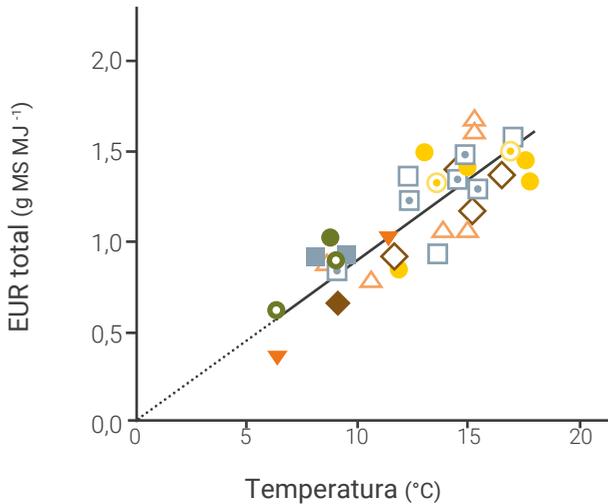
que la planta recupere el nivel de reservas entre fin de verano y principio de otoño. Mediante ese descanso, que no debe ser menor a los 500 GDA, la pastura de alfalfa podrá restablecer sus niveles de reservas y favorecer así la persistencia y la producción a lo largo de las sucesivas temporadas (Dhont *et al.*, 2004). Vázquez y Berone (2019), evaluando en Balcarce diferentes momentos de descanso otoñal en cultivares de reposo intermedio y sin reposo, concluyeron que —con independencia del grado de reposo invernal— la biomasa perenne solo se incrementó durante el invierno cuando el descanso comenzó temprano (inicios de febrero), lo que luego se tradujo en una mayor producción de biomasa durante la primavera siguiente. Por lo tanto, es importante remarcar que el momento óptimo del descanso sugerido hacia fin de verano-principio de otoño dependerá de las temperaturas, fecha promedio de la primera helada y radiación imperante en cada región agroecológica.

En función a lo anterior, las diferencias estacionales de prioridad de destinos (partición) estarán relacionadas en parte con los cambios registrados durante el año en la EUR de la biomasa aérea. Así, la disminución de la EUR aérea debida a la partición hacia estructuras subterráneas desaparece cuando se considera la biomasa total del cultivo y la EUR total. De todas formas, de acuerdo con Brown *et al.* (2006), existe una variación estacional de la EUR total debida principalmente al efecto de la temperatura sobre la fotosíntesis y el crecimiento (Figura 17).





■ **Figura 16.** (a) Fracción de partición a tallos en función de los meses y las estaciones del año para diferentes duraciones de rebrotes de alfalfa [Adaptado Brown *et al.* (2006)]; (b) Fracción de partición a raíces en función de los meses y las estaciones del año para diferentes frecuencias de pastoreo de alfalfa [Adaptado de Teixeira *et al.* (2007c)]. Las evaluaciones corresponden a las condiciones de Lincoln, Nueva Zelanda.



■ **Figura 17.** Eficiencia de uso de la radiación total (EUR total) en función de la temperatura media del aire en alfalfa irrigada cv. 'Kaituna' durante cinco ciclos de crecimiento (1997/1998–2001/2002) en la Universidad de Lincoln, Canterbury, Nueva Zelanda. Los símbolos representan diferentes años de medición y diferentes estaciones. Regresión (—): $y = 0,090 x$, $R^2 = 0,67$. Adaptado de Brown *et al.* (2006).

Uso del agua y producción

Disponibilidad de agua

En un cultivo perenne como la alfalfa, cuya duración promedio en buenas condiciones de manejo es de cuatro años (Basigalup y Rossanigo, 2007), el agua almacenada en el suelo al momento de la siembra tiene una influencia relevante durante el primer año de vida. A lo largo de este primer año, además de la ocurrencia de precipitaciones, la disponibilidad de agua inicial en el perfil dependerá de la capacidad de almacenaje del suelo, que estará ligada a su vez a la profundidad del perfil. En cambio, en los años posteriores, el suministro de agua para el cultivo estará relacionado con la probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones en cada región y con la distribución de estas durante el año. En el norte de la región Pampeana existe un patrón de decrecimiento de las precipitaciones de este a oeste, mientras que en el sur las lluvias decrecen en sentido norte-sur. En líneas generales, la ocurrencia de mayores precipitaciones se ubica entre noviembre y abril, y la de menores lluvias, entre junio y agosto. Considerando a la región Pampeana en conjunto, se aprecia que —a excepción de las zonas este y sudeste— la diferencia entre precipitación (pp) y Evapotranspiración Potencial (ETP) normal durante el período abril-octubre es negativa, particularmente en la zona noroeste (Figura 18a). En cambio, si se considera el período noviembre-marzo, el déficit se hace general para toda la región, en especial en el sector sudoeste (Figura 18b).

Por una parte, tal como se observa en la Figura 19, la diferencia entre precipitaciones y ETP en localidades contrastantes (desde zona húmeda a semiárida) de la región Pampeana muestra valores negativos casi todo el año, excepto en Balcarce durante la época invernal (Ojeda *et al.*, 2018a). Por otra parte, cuando se hace el cálculo de la disponibilidad de agua para el cultivo, en algunas áreas además hay que considerar el aporte de la napa freática. Esto último es importante porque el sistema radical de la alfalfa a los 10 meses de implantación puede absorber agua hasta los 2,20 m, y en proporciones decrecientes hasta los 3,5 m; y a los 24 meses de la siembra la exploración radicular puede alcanzar una profundidad de hasta 4-5 metros (Collino *et al.*, 2005).

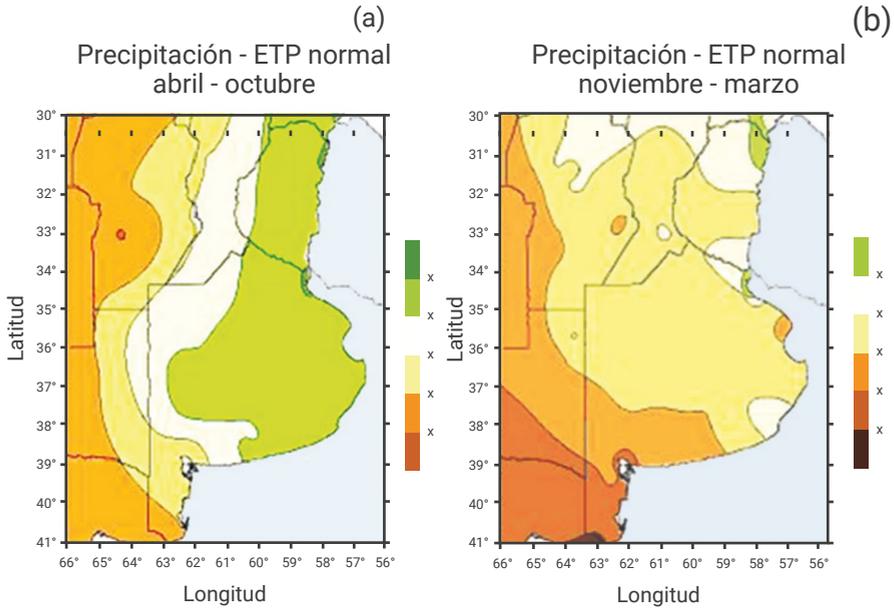


Figura 18. Diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial normal de Penman (Penman, 1948) en la región pampeana para la serie 1961-2002: (a) período abril-octubre y (b) período noviembre-marzo. Datos suministrados por el Instituto de Clima y Agua (INTA Castelar).

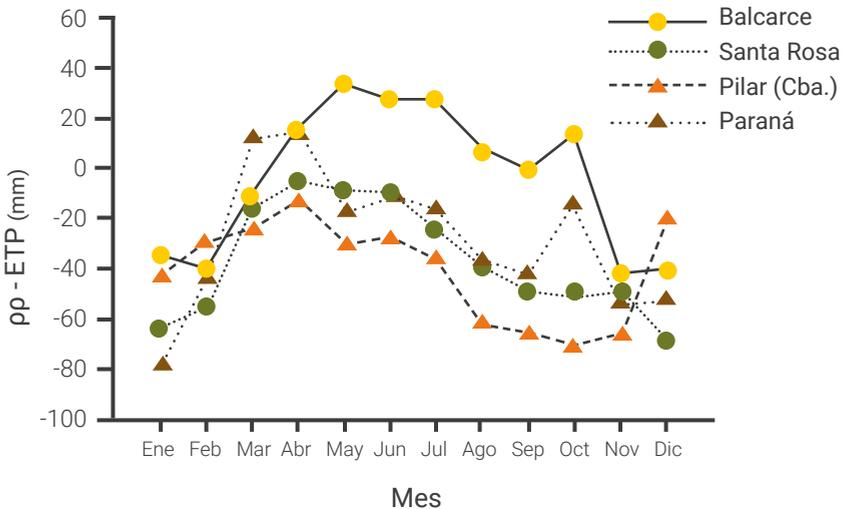


Figura 19. Diferencia entre la precipitación (pp) y la evapotranspiración potencial (ETP) de Penman (1948), simbolizada como pp-ETP, para algunas localidades de la región Pampeana: Paraná (húmeda), Pilar (subhúmeda norte), Balcarce (subhúmeda sur) y Santa Rosa (semiárida).

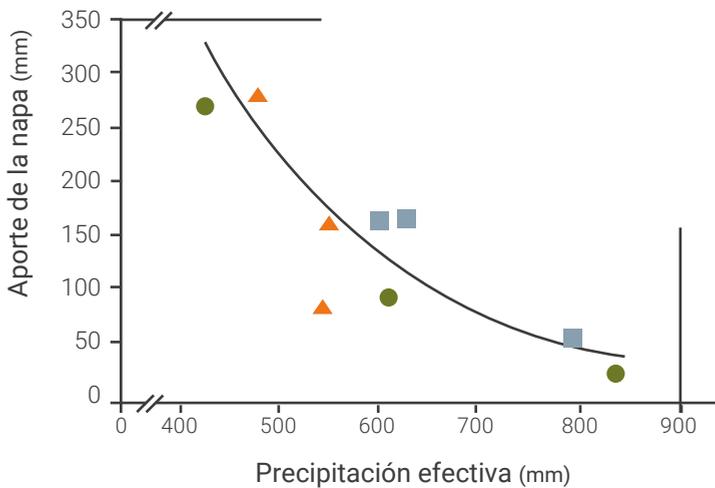
La proporción del agua de lluvia que llega al suelo y queda disponible para el cultivo estará determinada por la proporción de las precipitaciones que realmente ingresa al suelo, llamada precipitación efectiva (P_{ef}). La mayoría de los suelos pampeanos tienen una elevada proporción de limo en el horizonte superficial (Hall *et al.*, 1992), lo cual los predispone al encostramiento, especialmente cuando el cultivo ha sido implantado con siembra convencional (labranza) (Cosentino y Pecorari, 2002). Esta característica superficial induce menores tasas de infiltración, que a su vez favorecen una mayor escorrentía. Dardanelli *et al.* (1992) sugirieron que para un suelo con horizonte superficial de textura franco-limosa y bajo un sistema de labranza reducida, la P_{ef} podría estimarse a partir de precipitaciones diarias (P_r) superiores a 15 mm por medio de la siguiente ecuación exponencial:

$$P_{ef} = 2,43 * P_r^{0,667}$$

Más recientemente, Andriani *et al.* (2016) elaboraron un modelo cuantitativo para suelos Molisoles con pendientes menores a 1 %, incluyendo en las ecuaciones de predicción dos componentes importantes que determinan la P_{ef} como son la intensidad de la lluvia y el grado de humedad del suelo al inicio de las precipitaciones. Este trabajo también muestra que el componente de escorrentía en la estimación del balance hídrico comenzaría a cobrar importancia cuando las lluvias son superiores a los 15 mm.

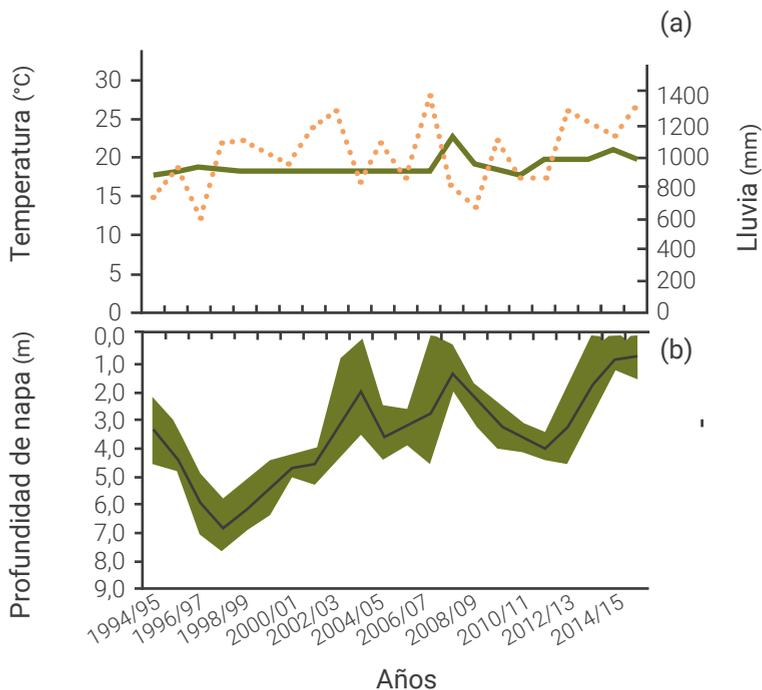
Por un lado, debe considerarse que en la región se presentan situaciones en que la influencia de la napa freática incrementa los rendimientos anuales y disminuye la variabilidad anual de producción. A diferencia de las lluvias, que por su elevada variabilidad generan una importante inestabilidad en la producción de MS, la presencia de napas freáticas tiende a elevar y estabilizar la producción de forraje entre años. La Figura 20 muestra que la importancia relativa de la napa en la producción de forraje será mayor en la medida que las precipitaciones sean menores (Dardanelli y Collino, 2002). Estos autores al encontrar la relación entre consumo de agua y la evapotranspiración potencial del cultivo mostraron que aun con aporte de agua de la napa las plantas no pudieron satisfacer completamente sus necesidades de agua, ya que el consumo potencial de agua del cultivo pasó de 45 % de satisfacción cuando

no hubo influencia de la napa a 56 % cuando hubo aporte de la napa. Este comportamiento también estará ligado a la profundidad en que se encuentre la napa, ya que en la medida que esta sea más profunda proveerá agua solo a una porción reducida de raíces. En un cultivo perenne como la alfalfa, el consumo permanente de agua por parte del sistema radical no permite un ascenso capilar hacia capas más superficiales de suelo. Por otro lado, la dinámica de la napa está asimismo ligada a la ocurrencia de precipitaciones de cada lugar, haciendo que —como se muestra en la Figura 21— cuando se producen lluvias abundantes la napa se eleve.

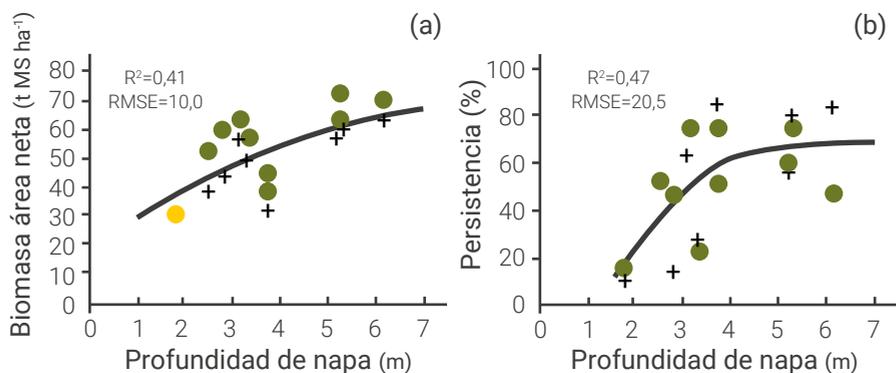


■ **Figura 20.** Relación entre el aporte de la napa al consumo total de agua de la alfalfa y la precipitación efectiva anual. Adaptado de Dardanelli y Collino (2002).

Berhongaray *et al.* (2019) analizaron datos de Rafaela de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Alfalfa del INTA y mostraron que tanto la productividad de forraje como la persistencia disminuyeron a medida que la napa alcanzaba niveles más superficiales. Como se representa en la Figura 22, a profundidades de napa menores a los 4 m, la producción de materia seca acumulada durante cuatro años disminuye en función de la profundidad. Se concluye que si bien la napa puede ser una importante fuente de agua para la alfalfa, este efecto positivo es más importante en regiones en donde la ocurrencia de precipitaciones no recargue la napa por encima de este umbral de 4 m.



■ **Figura 21.** (a) Temperatura media (línea continua) en °C y lluvias (línea discontinua) en mm y (b) Profundidad de la napa freática (línea gris) y rango anual (área gris) entre 1994-2016 en Rafaela, Santa Fe. Adaptado de Berhongaray et al. (2019).

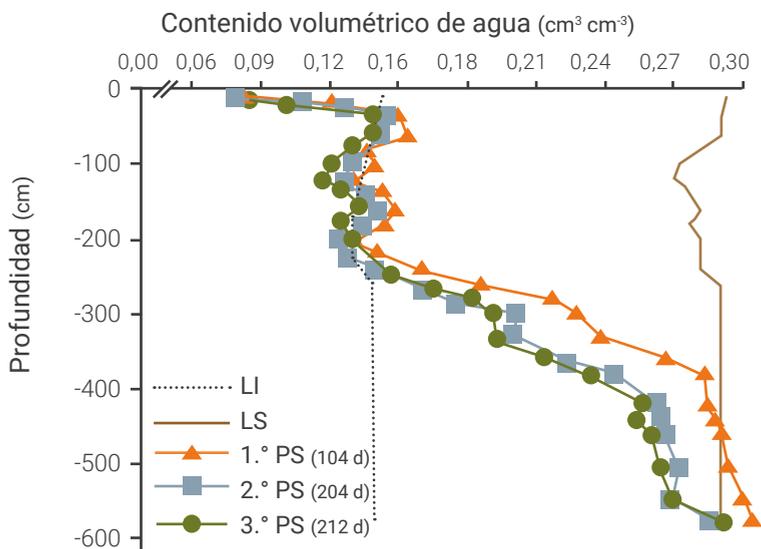


■ **Figura 22.** (a) Producción de biomasa aérea acumulada (t MS ha⁻¹) y (b) persistencia (%) de alfalfa en función a la profundidad promedio de la napa freática (m) a lo largo de cuatro años en Rafaela para cultivares de grados de reposo invernal intermedio (cruces) y sin reposo (círculos). Las líneas representan el ajuste de los datos al modelo de Gompertz: $\alpha * \exp(-\beta * \exp(-\gamma * wt))$. Adaptado de Berhongaray et al. (2019).

El sistema radical de la alfalfa y la captura de agua

Dos aspectos relevantes deben considerarse en relación con la importancia del sistema radical para la captura del agua: i) la velocidad de profundización de las raíces y su profundidad máxima y ii) la tasa de absorción del sistema radical ya establecido.

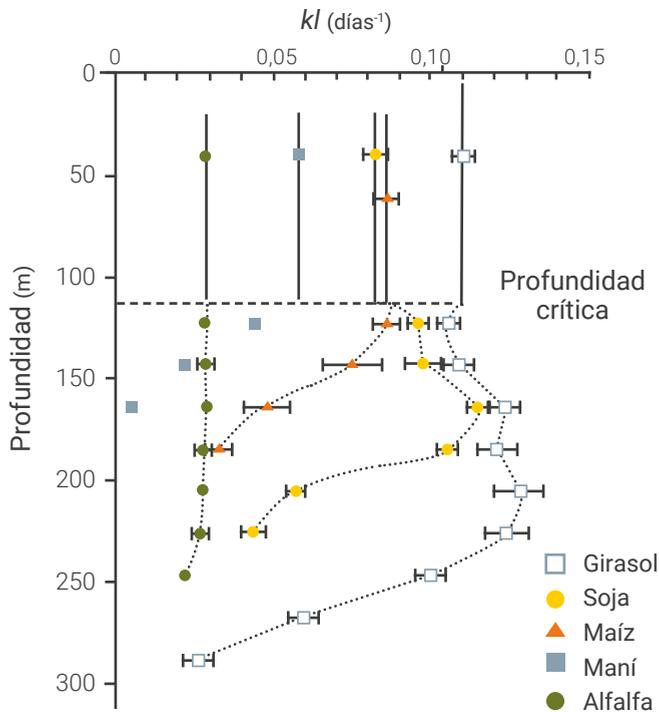
Estas variables se pueden estimar en forma indirecta analizando la evolución del agua en el suelo, obtenida durante períodos de sequía prolongada, sea natural o impuesta. La Figura 23 muestra el contenido volumétrico de agua a lo largo del perfil del suelo al final de tres períodos sucesivos de sequía, impuestos a un cultivo de la variedad de alfalfa Victoria SP INTA en Córdoba (Collino *et al.*, 2005).



■ **Figura 23.** Contenido volumétrico de agua a lo largo del perfil de suelo al final de tres períodos sucesivos de sequía impuesta a la variedad Victoria SP INTA. Ensayo sembrado el 15/3/2000 en Córdoba. Entre paréntesis se indica en días la duración de cada período de sequía (PS) impuesta. LS: límite superior (trazo continuo) y LI: límite inferior (trazo punteado) de agua útil. Adaptado de Collino *et al.* (2005).

En el estudio comentado, el agua del perfil fue repuesta al inicio de cada período de sequía hasta valores cercanos a la capacidad de campo. Al final del primer período de sequía, el cultivo tenía 10 meses de edad y había agotado el perfil hasta los 2,20 m de profundidad, aunque también se observó disminución del contenido de agua hasta 3,50 m de pro-

fundidad. Al final del segundo y del tercer período de sequía impuesta (cultivo de 17 y 24 meses de edad, respectivamente), las raíces habían alcanzado su máximo desarrollo dado que la cantidad de agua absorbida en ambos períodos fue similar, habiendo agotado el perfil hasta los 2,40 m y absorbido agua hasta los 5,50 m (Figura 23). A partir de esta profundidad, el incremento de su capacidad de absorción fue muy poco significativo (Figura 24). En consecuencia, se podría decir que el agua útil que puede tomar el cultivo de alfalfa en suelos sin impedancias físicas importantes (por ejemplo presencia de tosca) es de 420 mm en el primer año y de 540 mm en los años subsiguientes. Estos valores son similares a los señalados por Borg y Grimes (1986), quienes también habían observado que la alfalfa alcanza 1,8-2,4 m en el primer año y de 3 a 6 m en los años subsiguientes.



■ **Figura 24.** Tasa de extracción de agua del suelo (Kl) estimado a diferentes profundidades (m) para girasol, soja, maíz y alfalfa. Las barras horizontales indican el error estándar de las medias. Las líneas punteadas horizontales indican la profundidad crítica sobre la que se obtuvo el Kl de cada cultivo. Adaptado de Dardanelli *et al.* (2007).

La segunda característica que define la aptitud de un sistema de raíces para utilizar las reservas de agua del suelo es la tasa de absorción, que hace referencia a la capacidad de las raíces para absorber agua de una determinada capa de suelo por unidad de tiempo. En cultivos anuales se ha demostrado que esta tasa de absorción, una vez que las raíces se han desarrollado y si el suelo no presenta impedimentos, es aproximadamente el 10 % del agua útil presente en la capa de suelo por día (Dardanelli *et al.*, 2004). Por ejemplo, si una capa contiene 40 mm de agua útil, las raíces pueden absorber como máximo 4 mm día⁻¹. Bajo las mismas condiciones, la alfalfa puede absorber agua a una tasa considerablemente menor, 3 % del agua útil presente en la capa (Dardanelli *et al.*, 1997). Es decir que, para una capa que contiene también 40 mm de agua útil, las raíces de alfalfa pueden absorber como máximo 1,2 mm día⁻¹ (Figura 24). Esta restricción hace que, por un lado, el cultivo sufra rápidamente las consecuencias del estrés; pero, por el otro lado, este comportamiento presenta como ventaja la capacidad de resistir períodos prolongados de sequía sin que el cultivo alcance niveles de estrés severos cercanos a la marchitez.

Disponibilidad de agua y producción de biomasa

La producción de biomasa en alfalfa, como cualquier cultivo, está directamente relacionada con la transpiración. De esta manera, en la medida que los estomas estén abiertos el proceso de fotosíntesis se maximiza, dado que los estomas son la vía de entrada del CO₂ del aire. Entonces, la materia seca (MS) producida está linealmente relacionada con el agua transpirada, cuya pendiente representa la eficiencia en el uso del agua (EUA). Vale decir que la EUA estima la cantidad de MS que se produce por unidad de agua transpirada, expresada como kg MS mm⁻¹. Otra forma de expresar la eficiencia es relacionando la producción de MS con el agua evapotranspirada (C), ya que muchas veces no se conoce cuál es la proporción de agua de la evapotranspiración que se pierde por transpiración de las plantas y por evaporación desde la superficie del suelo. En consecuencia, la producción de MS se puede calcular como:

$$MS = C * EUA$$

La alfalfa, por su condición de perenne, consume agua durante todo el año, aun durante el reposo invernal, generando por ende una demanda de agua mayor que un sistema de cultivos anuales, en donde siempre existen períodos de barbecho. Por ejemplo, López *et al.* (1997) estimaron un consumo de agua de 1464 mm año^{-1} para una producción de forraje de $28 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en dos variedades de distinto grado de reposo invernal en un ensayo sin limitaciones hídricas conducido en Córdoba durante tres campañas, representando este valor de consumo el 90 % de la evapotranspiración potencial de referencia calculada por la fórmula de Penman-FAO. Este valor entra dentro del rango de consumo de agua de alfalfa estimado por Sheaffer *et al.* (1988), que se ubica entre 400 y $1800 \text{ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Para tener magnitud de esta demanda es interesante considerar los datos de algunos estudios de rotaciones de cultivos agrícolas en la región Pampeana, que estimaron para sistemas que incluyeron secuencias agrícolas de soja en rotación con maíz y trigo, consumos anuales de alrededor de $775 \text{ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Sanmarti *et al.*, 2018).

El estudio de López *et al.* (1997) muestra que el consumo de agua de dos variedades de alfalfa de reposo invernal relativamente cercano (GRI 6 y 8) presentó el mismo patrón de distribución estacional (Figura 25). De todos modos, aunque el consumo hídrico de las dos variedades en cada estación fue similar, la producción de materia seca en invierno y primavera fue diferente. Se concluye que, al menos en este rango de grados de reposo invernal, si bien la transpiración no se modificó, la diferente producción de forraje durante algunas estaciones del año es consecuencia de un diferente grado de almacenamiento y removilización de asimilados.

La EUA puede ser modificada por una serie de factores: (i) la proporción de agua evaporada respecto de la transpirada, (ii) el déficit de presión de vapor, (iii) las condiciones de temperatura a lo largo del año, (iv) el grado de reposo invernal de la variedad utilizada y (v) el nivel de estrés hídrico. Guitjens (1990), a partir de una revisión general y considerando cortes individuales, menciona una amplia variación de EUA, con un rango de valores de 6 a 30 kg MS mm^{-1} . En la región Pampeana, diferentes investigaciones han estimado un rango entre 9 y $24 \text{ kg de MS mm}^{-1}$ evapotranspirado (López *et al.*, 1997; Collino *et al.*, 2005). Dependiendo del nivel de producción, el grado de estrés hídrico y el diferente grado de

sequedad del aire a lo largo del año, junto con otras variables meteorológicas, dicho rango modifica la demanda transpiratoria de las plantas. A un mismo valor de radiación solar, cuanto mayor sea la sequedad del aire, mayor deberá ser la transpiración del cultivo para producir la misma cantidad de MS. Este grado de sequedad del aire depende de la combinación de temperatura y humedad relativa, y se expresa a través de una variable conocida como déficit de presión de vapor (DPV).

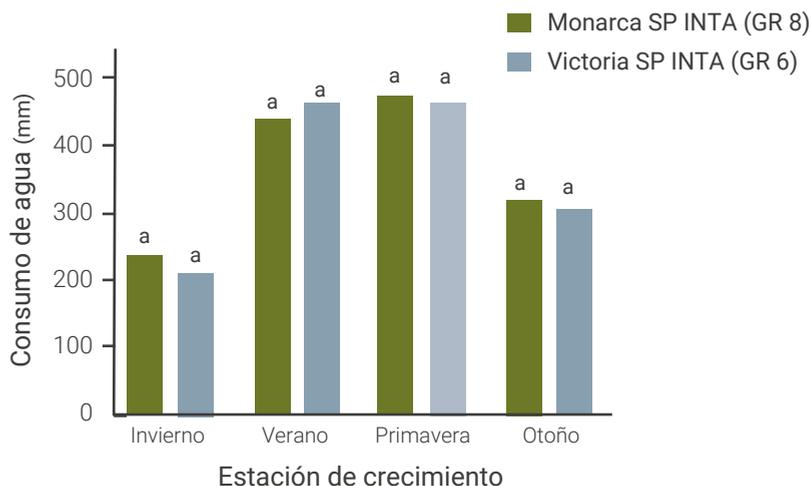


Figura 24. Consumo de agua (mm) en diferentes estaciones del año de las variedades Monarca SP INTA (GRI 8) y Victoria SP INTA (GRI 6) en un ensayo conducido en Córdoba sin limitaciones de agua. Letras iguales indican diferencias no significativas ($p > 0,05$) entre variedades dentro de cada estación del año. Adaptado de López *et al.* (1997).

La EUA y la eficiencia de captura del agua (EC), que se mide en mm de agua transpirada por mm de agua aportada (precipitaciones + riego), son las dos componentes para estimar la productividad del agua aportada. Ojeda *et al.* (2018a) estimaron para Balcarce que la EC osciló entre 79 y 96 % del agua total recibida por precipitaciones en dos años de evaluación. Para ese mismo período, la EUA fue calculada entre 20 y 24,5 kg MS mm⁻¹ transpirado. En consecuencia, la productividad del agua de lluvia se ubicó entre 19,3 y 19,4 kg MS mm⁻¹ de lluvia. En otro trabajo, Ojeda *et al.* (2018b), utilizando modelos de simulación con series históricas de datos meteorológicos, calcularon que la productividad del agua osciló entre 14 y 20 kg MS mm⁻¹.

La producción de materia seca de alfalfa presenta diferencias a lo largo de las estaciones afectando de esta manera la EUA. En la Tabla 1 se aprecia que la EUA en primavera es mayor que en verano. Esto se relaciona con que, aun cuando en primavera la temperatura media está ligeramente por debajo del valor crítico, el forraje producido proviene no solo de la fotosíntesis actual de la estación de crecimiento, sino también de la energía generada por la removilización de reservas desde la corona y la raíz. Contrariamente, las bajas EUA en otoño e invierno son producidas por limitaciones de temperatura y por la movilización de fotoasimilados hacia los órganos de reserva (López *et al.*, 1997).

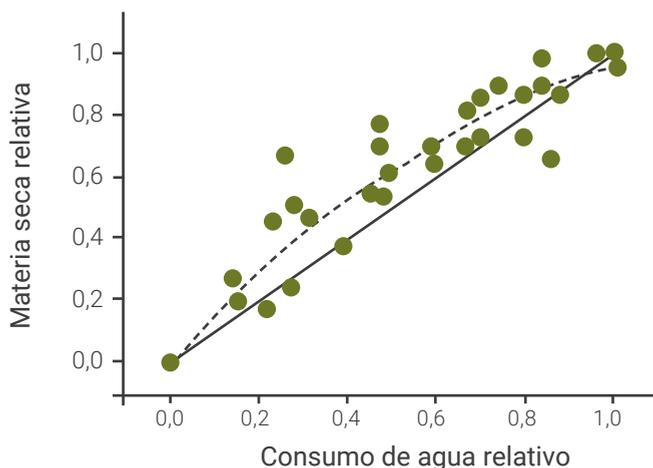
■ **Tabla 1.** Producción estacional de materia seca (MS), consumo de agua (C), temperatura media (Tmed) y eficiencia en el uso del agua (EUA) para las variedades Victoria SP INTA y Monarca SP INTA. También se indica la eficiencia en el uso del agua corregida por déficit de presión de vapor (EUAc). Adaptado de López *et al.* (1997).

Estación	MS (kg ha ⁻¹)		C (mm)	Tm (°C)	EUA		EUAc	
	Vitoria	Monarca			Vitoria	Monarca	Vitoria	Monarca
	SP INTA	SP INTA			SP INTA	SP INTA	SP INTA	SP INTA
Otoño	4,15		317	15,8	13,1		11,3	
Invierno	3,28	4,12	224	12,7	14,6	18,4	15,6	19,7
Primavera	11,71	10,95	454	20,1	25,8	24,1	45,1	42,2
Verano	9,20		470	22,8	19,6		29,8	

En términos generales, la expansión foliar es el proceso más sensible y el primero en verse afectado por efecto de algún estrés ambiental. Así, Collino *et al.* (2005) observaron que ante estrés hídrico moderado, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA_i), sucedáneo de la expansión foliar, se redujo 14-23 %, pero sin disminuir la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), que es el sucedáneo de la actividad fotosintética. En cambio, bajo condiciones de estrés severo no solo la RFA_i se redujo 40 % sino que también la EUR se redujo, lo cual indica que en este último caso se afectó parcialmente el proceso fotosintético.

Estudios hechos en alfalfa sobre estrés hídrico han demostrado que la EUA es mayor cuando se incrementa el nivel de estrés hídrico (Figura 26). Considerada en términos relativos a un tratamiento sin limitaciones hídricas, la relación entre producción de MS y consumo de agua no es lineal,

indicando que ante diferentes niveles de estrés hídrico la producción de MS se reduce proporcionalmente menos que el consumo de agua (Collino *et al.*, 2005). Esto sugiere que cuando se produce el cierre estomático ante el estrés hídrico, la transpiración se reduce más que la fotosíntesis, porque la resistencia estomática tiene mucho menos influencia sobre la difusión del CO₂ que sobre la difusión del vapor de agua (Ferreya *et al.*, 2003).



■ **Figura 26.** Relación entre la producción de materia seca y el consumo de agua relativa a un testigo regado. La línea recta representa la relación 1:1 y la línea punteada es la función de ajuste: $y = 0,997(1-0,0195x)$, $r^2=0,861$. Adaptado de Collino *et al.* (2005).

En cultivos anuales se ha observado que para lograr una mayor captura de los recursos, reflejado esto en una mayor producción de biomasa, el cultivo no debe estar limitado por deficiencias nutricionales (Salvagiotti *et al.*, 2017; Salvagiotti *et al.*, 2008; Carciochi *et al.*, 2020). En el caso de la alfalfa, el N debe ser provisto tanto por el suelo como a través de la fijación biológica, por lo que es importante que los cultivos sean inoculados. Sin embargo, dado que en la región Pampeana existen otros nutrientes que limitan la producción —como el fósforo, el azufre y algunos micronutrientes como Zn— es necesario corregir estas deficiencias en la implantación a fin de lograr una cobertura más rápida del suelo. Con esto se logra una mayor interceptación de radiación, que a su vez se verá traducida en una mayor productividad. Estudios conducidos en el sur de Santa Fe por Ibarlucea *et al.* (2020) han demostrado que en suelos con bajos niveles de fósforo (≤ 14 ppm) la productividad de la alfalfa

se incrementó 228 % por la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de superfosfato triple. Estas correcciones de deficiencias nutricionales se verán traducidas posteriormente en mayores EUR y EUA.

Modelo de componentes del rendimiento

Los efectos sobre la producción de biomasa de alfalfa, usualmente llamado rendimiento de forraje, pueden ser analizados mediante la siguiente ecuación que reúne los componentes de rendimiento de forraje (Volenc *et al.*, 1987):

$$\text{Producción de Biomasa} = N.^\circ \text{ plantas m}^2 * \text{número de tallos planta}^{-1} * \text{peso tallo}^{-1}$$

Este enfoque permite una aproximación con mayor nivel de detalle para la comprensión de los mecanismos involucrados ante cambios en el rendimiento. Los autores del trabajo precitado analizaron el efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento de forraje y sus componentes, hallaron que la densidad de plantas disminuye el peso por planta (menor número de tallos por planta y menor peso por tallo). No obstante, ese resultado es sobrecompensado por el aumento en la densidad de plantas, lo que produce una mayor biomasa por unidad de superficie cuando la densidad de plantas se acerca a las 200 plantas m².

Existen procesos de competencia en el cultivo de alfalfa que determinan la evolución de los componentes del rendimiento. La competencia intraespecífica (entre plantas de la misma especie) puede ocasionar tres tipos de efectos: i) mortalidad denso-dependiente (denominado auto-raleo o *self-thinning* en inglés); ii) efectos compensatorios entre tamaño y densidad (denominado SDC por sus siglas en inglés: *size density compensation*); y iii) alteración de la estructura de tamaños de la población, generando una estructura jerarquizada (Park *et al.*, 2003).

En el caso particular de la alfalfa ocurren los tres efectos. La mortalidad denso-dependiente determina una disminución del número de plantas desde las etapas tempranas del establecimiento (Romero *et al.*, 1991), con períodos de mayores tasas de mortalidad cuando la tasa de crecimiento del cultivo es mayor, es decir, en primavera-verano (Arolfo y

Odorizzi, 2018). También la mortandad de plantas en alfalfa es afectada por el ambiente (Rowe, 1989); así, prácticas de manejo como la distancia de siembra pueden colaborar para sostener un mayor número de plantas por unidad de superficie debido un espaciamiento más equidistante entre individuos, redundando en una menor competencia (Mattera *et al.*, 2013). En este contexto, la evolución del número de plantas m^{-2} es un parámetro importante que se mide en las redes de evaluación de cultivares, ya que da una idea de la persistencia de las pasturas. En la Red Nacional de Evaluación de Cultivares Alfalfa del INTA se evalúa no solo la producción de forraje sino también la cobertura en cada parcela, que se relaciona directamente con el rendimiento (Arolfo y Odorizzi, 2018) (ver capítulo 8).

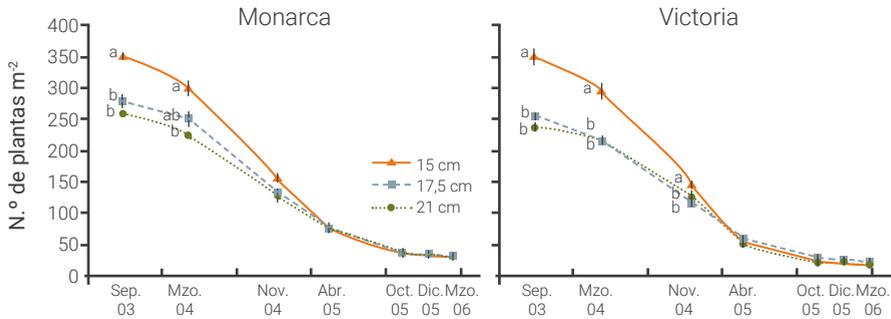
El segundo efecto de la competencia intraespecífica que también ocurre en alfalfa es la compensación entre el número de plantas y la cantidad de tallos por planta; esto último junto con el peso por tallo determinan el tamaño de cada planta. Hay referencias bibliográficas que indican que a medida que se pierden plantas en el cultivo, las plantas supervivientes presentan un mayor número de tallos (Teixeira *et al.*, 2007b) y un mayor tamaño de planta (Mattera *et al.*, 2009) (Figura 27). En este último trabajo se observó que la edad de la pastura tuvo un fuerte efecto sobre la dinámica del número de plantas y el peso por planta en los dos cultivares evaluados (Monarca SP INTA y Victoria SP INTA). También se detectó un efecto del sistema de siembra, dado que la menor distancia entre hileras permitió un mayor número de plantas por m^{-2} ; sin embargo, como contraparte, se produjeron compensaciones tamaño-densidad que redundaron en menores pesos por planta para ese tratamiento, lo que resultó a la postre en una menor producción de biomasa. En cambio, la distancia intermedia entre hileras, que mantuvo el mayor peso por planta, fue la que resultó en una mayor producción de forraje final.

Por último, dentro del cultivo existen jerarquías entre plantas suprimidas y plantas dominantes. Las suprimidas se localizan en los estratos inferiores del canopeo, donde llega menos radiación, lo que ocasiona que tengan menores tasas de crecimiento y que, por ende, vayan quedando relegadas frente al resto de la población. Estas plantas son las que irán desapareciendo por mortalidad denso-dependiente.

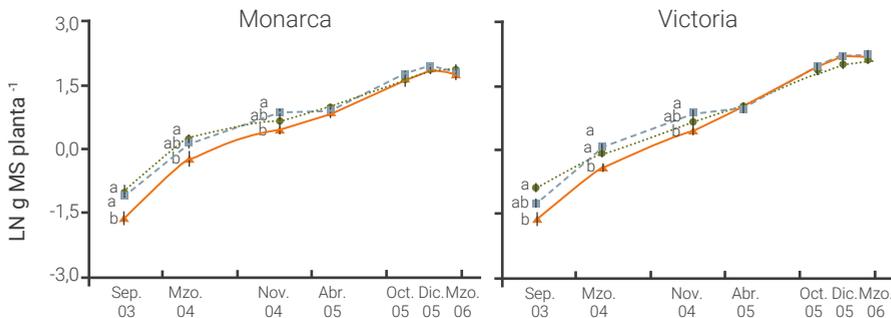
Como se aprecia en la Figura 28, el componente número de tallos planta⁻¹ comprende dos tipos de tallos: los provenientes de yemas ubicadas en los tallos remanentes luego de la defoliación (Tipo 1) y los tallos

provenientes de yemas ubicadas en las coronas de las plantas (Tipo 2) (Gosse *et al.*, 1988).

a) Densidad de plantas



b) Peso aéreo por planta



■ **Figura 27.** Efecto de la distancia de siembra sobre la dinámica de los componentes del rendimiento de alfalfa: (a) la densidad de plantas (plantas m^{-2}) y (b) peso aéreo por planta. Datos de tres años de evaluación en los cultivares Monarca SP INTA (GRI 8) y Victoria (GRI 6) para tres distancias de siembra: 15, 17,5 y 21 cm. Los valores son medias \pm error estándar de tres repeticiones. Adaptado de Mattera *et al.* (2009).

Al inicio del rebrote, los tallos Tipo 1 tienen una mayor participación, pero a medida que progresa el rebrote, los tallos Tipo 2 adquieren más importancia, aportando entre el 60 al 80 % de la biomasa producida (Gosse *et al.*, 1988). Teixeira *et al.* (2007b) describieron tres jerarquías de tallos en función de su altura: dominantes ($>2/3$ de altura máxima), intermedios (entre $1/3$ y $2/3$ de la altura máxima) y suprimidos ($<1/3$ de la altura máxima). Señalaron que inmediatamente después de un corte, la población de tallos se incrementa de manera similar para todas las jerarquías hasta alcanzar un promedio de casi 800 tallos m^{-2} y un IAF = 2. Luego, a

partir de ese momento, conforme avanza el rebrote, existe una reducción de la luz que llega a la base de la canopia y que genera una disminución en la proporción de tallos intermedios y suprimidos (Figura 29).

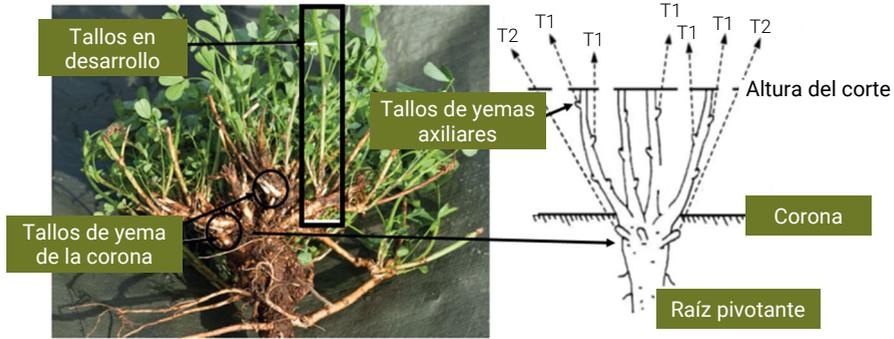


Figura 28. Tipos de tallos de los que se origina la biomasa luego de un corte o pastoreo. T1: tallos de yema remanentes y T2: tallos de yemas de la corona. Adaptado de Gosse *et al.* (1988) y Undersander *et al.* (2011).

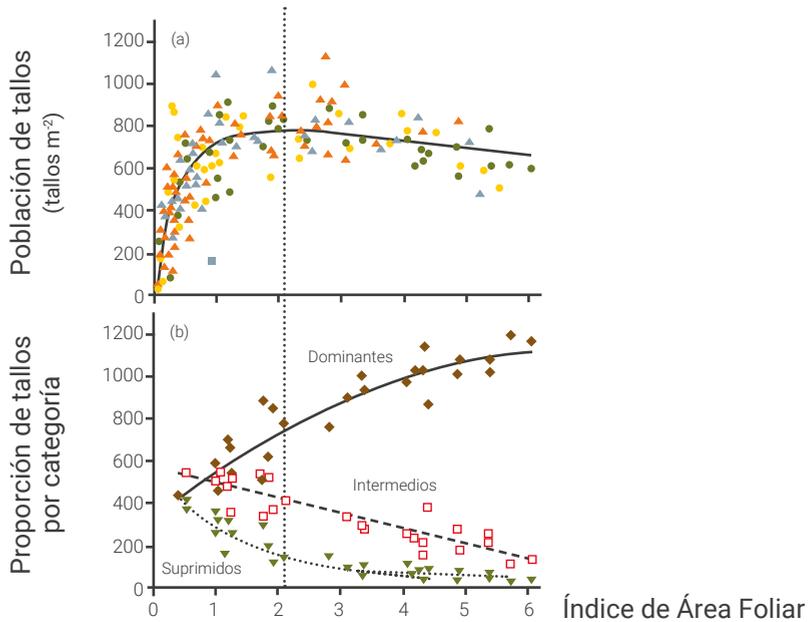
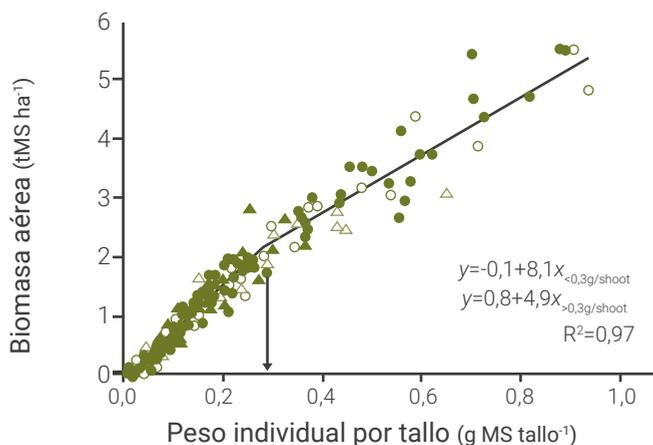


Figura 29. (a) Población de tallos (tallos m^{-2}) en función al Índice de Área Foliar (IAF) para un cultivar de alfalfa sometido a diferentes frecuencias de pastoreo y (b) Proporción de tallos por categoría (suprimidos, intermedios y dominantes) en función del IAF para un cultivar de alfalfa defoliado cada 450-500 grados días acumulados en Lincoln, Nueva Zelanda. Línea vertical (punteada): valor de IAF en que se maximiza la producción de tallos. Adaptado de Teixeira *et al.* (2007b).

El último componente del rendimiento forrajero es el peso por tallo, que ha sido reconocido en diversos trabajos como el componente del rendimiento que ha explicado en mayor medida las diferencias obtenidas en el rendimiento por planta (Volenec *et al.*, 1987; Teixeira *et al.*, 2007b; Ventroni *et al.*, 2010; Olivo, 2018). Si bien en bajas densidades de plantas, tanto el número de tallos por planta como el peso por tallo explican el rendimiento de cada planta, en densidades elevadas las diferencias de rendimiento por planta son básicamente explicadas por el peso por tallo (Figura 30).



■ **Figura 30.** Biomasa aérea (t MS ha⁻¹) en función del peso individual por tallo (g MS tallo⁻¹) para diferentes frecuencias de defoliación y ciclos de crecimiento. Ajuste bilineal para tallos de <0,3 gramos ($y = 0,1 + 8,1 x$) y para tallos >0,3 gramos ($y = 0,8 + 4,9 x$) Lincoln, Nueva Zelanda. Aclaración: círculos y triángulos blancos y verdes representan diferentes frecuencias de defoliación. Adaptado de Teixeira *et al.* (2007b).

Otras prácticas de manejo del cultivo de alfalfa, como la fertilización con fósforo y potasio, han explicado diferencias de rendimiento de forraje por los cambios que ocurrieron en el peso por tallo, es decir que, aquellos cultivos que respondieron a la fertilización produjeron tallos más pesados (Berg *et al.*, 2005). De forma similar, la extensión de la frecuencia de defoliación (descansos más prolongados) aumentó el rendimiento de forraje, principalmente por el aumento del peso por tallo (Teixeira *et al.*, 2007b; Ventroni *et al.*, 2010; Olivo, 2018). De la Figura 30 se infiere que existe un ajuste bilineal para cuantificar rendimiento de biomasa en función al peso individual de los tallos. El rendimiento se in-

crementa con una tasa $8,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ g}^{-1}$ cuando los valores de peso individual por tallo son menores a $0,3 \text{ g}$. Cuando el peso individual por tallo supera los $0,3 \text{ g}$, dicha tasa disminuye a $4,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ g}^{-1}$ (Teixeira *et al.*, 2007b).

Consideraciones finales

Como conclusión puede afirmarse que la caracterización de la eficiencia en el uso de la radiación y de la eficiencia en el uso del agua así como el desglose de los componentes del rendimiento de forraje permite comprender más acabadamente los mecanismos ecofisiológicos de la alfalfa. De esta manera, se pueden interpretar más adecuadamente las respuestas productivas observadas y la variabilidad estacional e interanual de esa producción, así como también analizar y prever los impactos de diversas prácticas de manejo sobre la producción, la estacionalidad y la persistencia. Existen compensaciones en las plantas que pueden aliviar o reducir el impacto de ciertas prácticas de manejo. Todos esos factores también pueden tener un impacto sobre otros aspectos de las pasturas, como por ejemplo la calidad del forraje; eso, a su vez, impactará sobre la respuesta animal para la producción de carne o de leche.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRIANI, J.M.; L. MAGNANO; N. SANMARTI. 2016. Modelo "cuanti-cualitativo" de escurrimiento superficial del agua en suelos agrícolas de la región pampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 34(2): 293-301.
- ARNOLD, S.M.; J.L. MONTEITH. 1974. Plant development and mean temperature in a tees date habitat. *Journal of Ecology* 62: 711-720.
- AROLFO, V.; A. ODORIZZI. 2018. *Ensayos Territoriales de Alfalfa. INTA Manfredi. Avances en Alfalfa Año 28 (28): 7-11.*
- AVICE, J.C.; F.L. DILY; E. GOULAS; C. NOQUET; F. MEURIOT; J.J. VOLENEC; P. NADEAU. 2003. Vegetative storage proteins in overwintering storage organs of forage legumes: roles and regulation. *Canadian Journal of Botany* 81 (12): 1198-1212.
- AVICE, J.C.; S. LOUAHLIA; A. KIM; A. JACQUET; A. MORVAN-BERTRAND; M.P. PRUDHOMME; A. OURRY J.C. SIMON. 2001. Influence des reserves azotees et caerbonees sur la repousse des especes prairiales. *Fourrages* 165: 3-22.
- AVICE, J.C.; G. LEMAIRE; A. OURRY; J. BOUCAUD. 1997. Effects of the previous shoot removal frequency on subsequent shoot regrowth in two *Medicago sativa* L. cultivars. *Plant and Soil* 188 (2): 189-198.
- BALDISSERA, T.C.; E. FRAK; P.C.D.F. CARVALHO; G. LOUARN. 2014. Plant development controls leaf area expansion in alfalfa plants competing for light. *Annals of Botany* 113 (1): 145-157.
- BASIGALUP, D.; R. ROSSANIGO. 2007. *Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: BASIGALUP, D. (Ed.). El Cultivo de Alfalfa en la Argentina. Ediciones INTA, Buenos Aires. Cap. 1. 13-27 pp.*
- BAUDRACCO, J.; N. LOPEZ-VILLALOBOS; L.A. ROMERO; D. SCANDOLO; M. MACIEL; E.A. COMERON; C.W. HOLMES; T.N. BARRY. 2011. Effects of stocking rate on pasture production, milk production and reproduction of supplemented crossbred Holstein-Jersey dairy cows grazing lucerne pasture. *Animal Feed Science and Technology* 168: 131-143.
- BELANGER, G.; T. KUNELIUS; D. MCKENZIE; Y. PAPADOPOULOS; B. THOMAS; K. MCRAE; S. FILLMORE; B. CHRISTIE. 1999. Fall cutting management affects yield and persistence of alfalfa in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 79 (1): 57-63.
- BERG, W.K.; S.M. CUNNINGHAM; S.M. BROUDER; B.C. JOERN; K.D. JOHNSON; J. SANTINI; J.J. VOLENEC. 2005. Influence of Phosphorus and Potassium on Alfalfa Yield and Yield Components. *Crop Science* 45: 297-304.
- BERHONGARAY, G.; M. BASANTA; J. JAUREGUI. 2019. Water table depth affects persistence and productivity of alfalfa in Central Argentina. *Field Crops Research* 235: 54-58.
- BERONE, G.D.; M.C. SARDIÑA; D.J. MOOT. 2020. Animal and forage responses on lucerne (*Medicago sativa* L.) pastures under contrasting grazing managements in a temperate climate. *Grass and Forage Science* 75 (2): 192-205.

- BERTÍN, O.D.; P.F. BARLETTA; E. PACENTE; J. MATTERA; M.J. BERIBE; J.N. CAMARASA. 2015. *Secuencias de cultivos anuales y pastura perenne para forraje en suelo agrícola*. *Revista de Tecnología Agropecuaria* 10: 38-42.
- BORG, H.; D.W. GRIMES. 1986. *Depth development of roots with time: an empirical description*. *American Society of Agricultural Engineers* 29: 194-196.
- BROWN, H.E.; D.J. MOOT; E.I. TEIXEIRA. 2006. *Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (Medicago sativa) in temperate climate*. *European Journal of Agronomy* 25 (4): 319-327.
- BROWN, H.E.; D.J. MOOT; E.I. TEIXEIRA. 2005. *The components of lucerne (Medicago sativa) leaf area index respond to temperature and photoperiod in a temperate climate*. *European Journal of Agronomy* 23 (4): 348-358.
- CAMPBELL, G.S.; J.M. NORMAN. 1998. *An introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag, Nueva York, EUA.
- CARCIOCHI, W.D.; F. SALVAGIOTTI; A. PAGANI; N.I. REUSSI CALVO, M. EYHERABIDE; H.R. SAINZ ROZAS; I.A. CIAMPITTI. 2020. *Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize*. *European Journal of Agronomy* 116, Article 126045: 1-11.
- CHRISTIAN, K.R. 1977. *Effects of the environment of the growth of alfalfa*. *Advances in Agronomy* 29: 183-227.
- COLLINO, D.; J. DARDANELLI; J.; M. DE LUCA. 2007. *Capítulo 3 Uso del agua y la radiación para producción de forraje*. En: BASIGALUP, D. (Ed.). *El Cultivo de Alfalfa en la Argentina*. Ediciones INTA, Buenos Aires. 45-65 pp.
- COLLINO, D.J.; J.L. DARDANELLI; M.J. DE LUCA; R.W. RACCA. 2005. *Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (Medicago sativa L.)*. *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 383-390.
- COSENTINO, D.; C. PECORARI. 2002. *Impact of low-density minerals on physical properties of soils of the Pampean region*. *Ciencia del Suelo* 20 (1): 9-16.
- CRALLE, H.T. 1983. *Photosynthetic partitioning in alfalfa populations selected for high nitrogen fixation capability*. Ph. D. Thesis. Univ. of Minnesota, St. Paul., EUA. Diss. Abstr. DA 8329508, 150 p.
- CUNNINGHAM, S.M.; J.J. VOLENEC; L.R. TEUBER. 1998. *Plant survival and root and bud composition of alfalfa populations selected for contrasting fall dormancy*. *Crop Science* 38 (4): 962-969.
- DARDANELLI, J.L.; J.T. RITCHIE; M. CALMON; J.M. ANDRIANI; D.J. COLLINO. 2004. *An empirical model for root water uptake*. *Field Crops Res.* 87 (1): 59-71.
- DARDANELLI, J.; D.J. COLLINO. 2002. *Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas*. *Agriscientia* 19: 11-18.
- DARDANELLI, J.L.; O.A. BACHMEIER; R. SERENO; R.C. GIL. 1997. *Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil*. *Field Crops Res.* 54: 29-38.

DARDANELLI, J.L.; A.C. DE LA CASA; M.R. ATECA; R. ZANVETTOR; F. NÚÑEZ VÁZQUEZ; H.P. SALAS. 1992. *Validación del balance hidrológico versátil para la rotación sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza*. *Rev. Agropecuaria de INTA Manfredi y Marcos Juárez* 7 (2): 20-29.

DHONT, C.; Y. CASTONGUAY; P. NADEAU; G. BÉLANGER; R. DRAPEAU; F.P. CHALIFOUR. 2004. *Untimely fall harvest affects dry matter yield and root organic reserves in field-grown alfalfa*. *Crop Science* 44: 144-157.

FERREYRA, R.A.; J.L. DARDANELLI, L.B. PACHEPSKY; D.J. COLLINO; P.C. FAUTINELLI; G. GIAMBASTIANI; V.R. REDDY; J.W. JONES. 2003. *Nonlinear effects of water stress on peanut photosynthesis at crop and leaf scales*. *Ecological Modelling* 168: 57-76.

FICK, G.W.; D.A. HOLT; D.G. LUGG. 1988. *Environmental physiology and crop growth*. En: HANSON, A.A.; D.K. BARNES; R.R. HILL Jr. (Eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. *Agronomy Monograph 29*. American Society of Agronomy, Madison, EUA. 163-194 pp.

GARDNER, F.P.; R. BRENT PEARCE; R.L. MITCHEL. 1985. *Carbon fixation by crop canopies*. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. 31-57 pp.

GOSSE, G.; G. LEMAIRE; M. CHARTIER; F. BALFOURIER. 1988. *Structure of a lucerne population (Medicago sativa L.) and dynamics of stem competition for light during re-growth*. *Journal of Applied Ecology* 25: 609-617.

GUIJTENS, J.C. 1990. *Alfalfa and alfalfa improvement*. En: STEWART, B.A.; D.R. NIELSEN (Eds.). *Irrigation of Agricultural Crops*. *Agronomy Monograph N.º 30*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, EUA.

GUZMÁN, C.; M. DEL C. SPADA; J. MOMBELLI. 2007 *Eficiencia del uso de la radiación de cultivares de alfalfa de distinto grado de reposo en Córdoba, Argentina*. XX Reunión Asociación Latinoamericana de Producción Animal (ALPA), Cuzco, Perú, disco compacto (CD).

HALL, A.J.; C.M. REBELLA; C.M. GHERSA; J.P. CULOT. 1992. *Field-crop systems of the Pampas*. En: PEARSON, C.J. (Ed.). *Ecosystems of the world: field crop ecosystems*. Elsevier Science BV. Ámsterdam, Holanda. 413-449 pp.

HEICHEL, G.H.; R.H. DELANEY; H.T. CRALLE. 1988. *Carbon assimilation, partitioning, and utilization*. En: HANSON, A.A.; D.K. BARNES; R.R. HILL Jr. (Eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. *Agronomy Monograph 29* Madison, Wisconsin, EUA. 195-228 pp.

IBARLUCEA, J.; L. MAGNANO; F. SALVAGIOTTI. 2020. *Respuesta a fósforo y azufre en alfalfa en un suelo con larga historia agrícola*. *Actas Congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal*. Santiago del Estero. AAPA (en prensa).

KALU, B.A.; G.W. FICK. 1981. *Quantifying morphological development of alfalfa for studies of herbage quality*. *Crop Sci.* 21: 267-271.

KHAITI, M.; G. LEMAIRE. 1992. *Dynamics of shoot and root growth of lucerne after seeding and after cutting*. *European Journal of Agronomy* 1 (4): 241-247.

- LEMAIRE, G.; D. CHAPMAN. 1996. *Tissue Flows in Grazed Plant Communities*. En: J. HODGSON; A.W. ILLIUS (Eds.). *The Ecology and Management of Grazing Systems*, CAB International, Londres. 3-36 pp.
- LÓPEZ, A.; J.L. DARDANELLI; D. COLLINO; R. SERENO; R.W. RACCA. 1997. *Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego*. *RIA* 28 (2): 41-48.
- MAJOR, D.J.; M.R. HANNA; B.W. BEASLEY. 1991. *Photoperiod response characteristics of alfalfa (Medicago sativa L.) cultivars*. *Can. J. Sci.* 71:87-93.
- MATTERA, J.; L.A. ROMERO; A. CUATRÍN; P.S. CORNAGLIA; A.A. GRIMOLDI. 2013. *Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (Medicago sativa L.) in response to row spacing*. *European Journal of Agronomy* 45: 87-95.
- MATTERA, J.; L.A. ROMERO; A. CUATRÍN; A.A. GRIMOLDI. 2009. *Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa*. *Revista Argentina de Producción Animal* 29: 131-140.
- MONTEITH, J.L. 1981. *Climatic variation and the growth of crops*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107: 749-774.
- MONTEITH, J.L. 1977. *Climate and the efficiency of crop production in Britain*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences* 281: 277-294.
- MONTEITH, J.L. 1972. *Solar radiation and productivity in tropical ecosystems*. *J. Appl. Ecol.* 9: 747-766.
- MOOT, D.J.; H.E. BROWN; E.I. TEIXEIRA; K.M. POLLOCK. 2003. *Crop growth and development affect seasonal priorities for lucerne management*. En: D.J. MOOT (Ed.). *Legumes for Dryland Pastures Proceedings of a New Zealand Grassland Association*. (Disponible: https://www.researchgate.net/publication/260164594_Crop_growth_and_development_affect_seasonal_priorities_for_lucerne_management consultado: 20/08/2019).
- MOOT, D.J.; M.J. ROBERTSOEN; K.M. POLLOCK. 2001. *Validation of the APSIM-Lucerne model for phenological development in a cool-temperature climate*. *Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference. Australian Soc. of Agronomy*. (Disponible: https://www.researchgate.net/publication/284261367_Validation_of_the_APSIM-Lucerne_model_for_phenological_development_in_a_cool-temperate_climate consultado: 20/08/2019).
- OJEDA, J.J.; O.P. CAVIGLIA; M.G. AGNUSDEI; P.M. ERRECART. 2018a. *Forage yield, water and solar radiation productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina*. *Field Crops Research* 221: 19-31.
- OJEDA, J.J.; O.P. CAVIGLIA; J.G.N. IRISARRI; M.G. AGNUSDEI. 2018b. *Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences*. *Agric. and For. Meteor.* 259: 1-10.
- OLIVO, S. 2018. *Producción de biomasa de alfalfa (Medicago sativa L.) en respuesta al arreglo espacial de siembra y frecuencia de corte*. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina, 76 p.

- OLIVO, S.M.; G.D. BERONE; P.L. CICORE; A. CERRUDO; A. CASTAÑO. 2017. *Producción de biomasa aérea de alfalfa (Medicago sativa L.) en respuesta al arreglo espacial de siembra y frecuencias de corte*. *Revista Argentina de Producción Animal* 37: 411-417.
- PARK, S.E.; L.R. BENJAMIN; A.R. WATKINSON. 2003. *The theory and application of plant competition model: an agronomic perspective*. *Annals of Botany* 92: 741-748.
- PENMAN, H.L. 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. *Proc. R. Soc. A193*: 120-145.
- RITCHIE, J.T.; D.S. NESMITH. 1991. *Temperature and crop development*. *Modeling Plant and Soil Systems* 31: 5-29.
- ROMERO, L.A.; O.A. BRUNO; J.L. FOSSATI; O.R. QUAINO. 1991. *Densidad de siembra de alfalfa cultivar CUF 101: número de plantas y producción*. *Revista Argentina de Producción Animal* 11: 411-417.
- ROWE, D.E. 1989. *Competition thinning of alfalfa planted at three densities*. *Crop Science* 29: 1357-1361.
- SADRAS, V.O.; M. FERREIRO; F. GUTHEIM; A.G. KANTOLIC. 2009. *Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo*. En: ANDRADEF.H.; V.O. SADRAS (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA. Balcarce INTA – FCA, UNMDP. Balcarce, Argentina. 19-39 pp.
- SALVAGIOTTI, F.; P. PRYSTUPA, G. FERRARIS; L. COURETOT; L. MAGNANO; D. DIGNANI; F.H. GUTIERREZ BOEM. 2017. *N:P:S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition*. *Field Crops Research* 203: 128-138.
- SALVAGIOTTI, F.; D.J. MIRALLES. 2008. *Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat*. *European Journal of Agronomy* 28: 282-290.
- SANMARTI, N.; S. BACIGALUPPO; F. SALVAGIOTTI. 2018. *Consumo y eficiencia en el uso del agua en secuencias agrícolas con distinto grado de intensificación*. *Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Tucumán, Argentina.
- SEVILLA, G.H.; A.M. PASINATO; J.M. GARCÍA. 2003. *Producción de forraje y densidad de plantas de alfalfa irrigada comparando distintas densidades de siembra*. *Archivos Latinoamericanos de Prod. Animal* 10 (3): 164-170.
- SHEAFFER, C.C.; C.B. TANNER; M.B. KIRKHAN. 1988. *Water relations and irrigation*. EN: HANSON, A.A.; D.K. BARNES; R.R. HILL (eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. *Agronomy Monograph N.º 29, Chapter 11*. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI, EUA. 373-409 pp.
- SHEEHY, J.E.; F.I. WOODWARD; M.B. JONES; A. WINDRAM. 1979. *Microclimate, photosynthesis and growth of Lucerne (Medicago sativa L.)*. I. *Microclimate and Photosynthesis*. *Annals of Botany* 44: 693-707.

- SIM, R.E.; D.J. MOOT; H.E. BROWN; E.I. TEIXEIRA. 2015. *Sowing date affected shoot and root biomass accumulation of lucerne during establishment and subsequent re-growth season. European Journal of Agronomy* 68: 69-77.
- SINCLAIR, T.R.; R.C. MUCHOW. 1999. *Radiation use efficiency. Advances in Agronomy* 65: 215-265.
- SPADA, M. DEL C.; S. OLIVO. 2014. *Determinación del filocrono de cultivares de Medicago sativa de diferente grado de reposo. Revista Argentina de Producción animal* 34 (1): 97-211.
- TARDIEU, F.; C. GRANIER; B. MULLER. 1999. *Modelling leaf expansion in a fluctuating environment: are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate? New Phytologist* 143 (1): 33-43.
- TEIXEIRA, E.I. 2006. *Understanding growth and development of lucerne (Medicago sativa L.) crops with contrasting levels of perennial reserves. Ph.D. thesis, Lincoln University, Lincoln, Canterbury. 274 p.*
- TEIXEIRA, E.I.; H.E. BROWN; E.D. MEENKEN; D.J. MOOT. 2011. *Growth and phenological development patterns differ between seedling and regrowth lucerne crops (Medicago sativa L.). European Journal of Agronomy* 35: 47-55.
- TEIXEIRA, E.I.; D.J. MOOT; H.E. BROWN. 2008. *Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne (Medicago sativa L.) crops. European Journal of Agronomy* 28:103-111.
- TEIXEIRA, E.I.; D.J. MOOT; M.V. MICKELBART. 2007a. *Seasonal patterns of root C and N reserves of lucerne (Medicago sativa L.) crops grown in a temperate climate were affected by defoliation regime. European Journal of Agronomy* 26:10-20.
- TEIXEIRA, E.I.; D.J. MOOT; H.E. BROWN; A.L. FLETCHER. 2007b. *The dynamics of lucerne (Medicago sativa L.) yield components in response to defoliation frequency. European Journal of Agronomy* 26: 394-400.
- TEIXEIRA, E.I.; D.J. MOOT; H.E. BROWN; K.M. POLLOCK. 2007c. *How does defoliation management impact on yield, canopy forming processes and light interception of lucerne (Medicago sativa L.) crops? European Journal of Agronomy* 27: 154-164.
- THIÉBEAU, P.; N. BEAUDOIN; E. JUSTES; J.M. ALLIRAND; G. LEMAIRE. 2011. *Radiation use efficiency and shoot:root dry matter partitioning in seedling growths and regrowth crops of lucerne (Medicago sativa L.) after spring and autumn sowings. European Journal of Agronomy* 35: 255-268.
- TOTIS DE ZELJKOVICH, L.; G. COCA DE GONZÁLEZ. 1998. *Necesidades de agua de un cultivo de alfalfa y su relación con la productividad. Revista de Tecnología Agropecuaria* 3: 22-24.
- TRAVIS, R.L.; R. REED. 1983. *The solar tracking pattern in a closed alfalfa canopy. Crop Science* 23: 664-668.

UNDERSANDER, D.; M.V. HALL; P. VASSALOTTI; D. COSGROVE. 2011. *Alfalfa Germination and Growth*. National Alfalfa & Forage Alliance, St. Paul, MN, EUA 22 p.

VARELLA, A.C.; D.J. MOOT; K.M. POLLOCK; P.L. PERI; R.J. LUCAS. 2011. *Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry system?* *Agroforestry Systems* 81: 157-173.

VAZQUEZ, R.J.; G.D. BERONE. 2019. *Descanso otoñal de pasturas de alfalfa en el sudeste bonaerense: ¿Cuándo debe comenzar?* *Revista Argentina de Producción Animal* 39 (1): 99-167.

VEGA, C.R.; F.H. ANDRADE. 2009. *Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras*. En: F.H. ANDRADE; V.O. SADRAS (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. 69-97 pp.

VENTRONI, L.M.; J.J. PA; C.A. CANGIANO. 2010. *Fall dormancy and cutting frequency impact on alfalfa yield and yield components*. *Field Crops Research* 119: 252-259.

VOLENEC, J.J.; J.H. CHERNEY; K.D. JOHNSON. 1987. *Yield components, plant morphology, and forage quality of alfalfa as influenced by plant population*. *Crop Science* 27: 321-326.