

Recibido 15 de marzo de 2016 // Aceptado 09 de marzo de 2017 // Publicado online 27 de diciembre de 2017

# Calibración y validación de un modelo de crecimiento para alfalfa (*Medicago sativa* L.)

BERONE, G.D.<sup>1</sup>; DINUCCI, E.<sup>2</sup>; FERNANDEZ, H.<sup>1</sup>; GASTALDI, L.<sup>3</sup>; MATTERA, J.<sup>4</sup>; SPADA, M.<sup>5</sup>.

## RESUMEN

En el presente trabajo se modificó un modelo de crecimiento generado por McCall y Bishop-Hurley para pasturas compuestas de gramíneas templadas perennes (Modelo McCall). El objetivo fue desarrollar un modelo de crecimiento capaz de representar el crecimiento aéreo de pasturas de alfalfa (Modelo Alfalfa) sujetas a diferentes condiciones ambientales y de manejo de la defoliación. Se trabajó con pasturas puras de alfalfa sin reposo invernal en la región central de Argentina (localidades de Manfredi, Rafaela, Susana, Marcos Juárez y Paraná). En la etapa de calibración se realizaron modificaciones para representar el crecimiento de pasturas de alfalfa que crecieron sin limitantes hídricas y nutricionales y de pasturas sometidas a distintas frecuencias de defoliación. Se modificó: 1) la relación entre temperatura media diaria del aire y la eficiencia de uso de la radiación solar global para crecimiento aéreo (parámetro  $\alpha$ ); 2) la ecuación que considera la importancia de las reservas en raíz utilizadas por las plantas durante el rebrote; y 3) el parámetro  $\alpha$  para simular pasturas sujetas a defoliaciones de distinta frecuencia. En la etapa de validación, se observó que el Modelo Alfalfa representó adecuadamente variaciones en crecimiento asociadas tanto a variaciones en la disponibilidad de agua como a variaciones en el manejo de la defoliación. Se concluye que el Modelo Alfalfa es capaz de representar los cambios en el crecimiento causado por variaciones en los principales factores bióticos (defoliación) y abióticos (clima) del ambiente.

**Palabras clave:** Modelo Alfalfa, crecimiento aéreo, disponibilidad de agua, frecuencia de defoliación.

## ABSTRACT

*A model originally developed by McCall and Bishop-Hurley to predict the growth of temperate perennial grasses (Modelo McCall) was modified. The aim was to develop a model capable to describe the above-ground growth of alfalfa pastures (Modelo Alfalfa) subjected to several climate and defoliation conditions. We used winter-active alfalfa pastures growing at a central region of Argentina (cities of Manfredi, Rafaela, Susana, Marcos Juárez and Paraná). Modifications realized at calibration step were made to represent the growth of alfalfa pure stands growing under non limiting conditions (i.e. irrigated and fertilized pastures) and that of pastures subjected to different defoliation frequencies. We modified: 1) the relationship between mean air daily temperature and solar radiation use efficiency (parameter  $\alpha$ ); 2) the equation taking account the use*

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce, Ruta 226 km 73,5 (7620). Correo electrónico: berone.german@inta.gob.ar

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná, Ruta 11, km 12,5 (3101).

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rafaela, Ruta 34, km 227 (2300).

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Pergamino, Av. Frondizi (Ruta 32) km 4,5 (2700).

<sup>5</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Manfredi, Ruta Nacional 9 km 636 (5988).

<sup>6</sup>Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Ruta 226, km 73,5 (7620).

root reserves during a regrowth; and 3) parameter  $\alpha$  to simulate pastures subjected to contrasting defoliation frequencies. At the validation step, we observed that Modelo Alfalfa adequately describe changes in aerial growth associated to variations in both, water availability and defoliation management. It was concluded that the Modelo Alfalfa is capable of representing the variations in growth caused by variations of main biotic (defoliation) and non-biotic (climate) environmental factors.

**Keywords:** Modelo Alfalfa, aerial growth, water availability, defoliation frequency.

## INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa*) sigue siendo la principal especie forrajera del país y la base de la producción de carne y leche en la región pampeana (Basigalup y Rossanigo, 2007). Contar con un modelo de crecimiento de alfalfa permitirá analizar su variabilidad productiva bajo distintas condiciones de crecimiento determinadas por variaciones climáticas estacionales e interanuales. Adicionalmente, es factible que un modelo de ese tipo sea integrado a modelos más amplios con el objeto de analizar la sustentabilidad de sistemas de producción de leche bajo diferentes escenarios de clima y precios.

En la actualidad desde un proyecto específico lechero de INTA se encuentra en desarrollo un modelo (Litwin y Engler, 2011) basado en planillas...planillas de cálculo (programa Excel de Microsoft) con el fin de generar una herramienta de modelización amigable y de uso sencillo que permita representar sistemas de producción de leche (SUSTENTAM). Hasta la fecha, SUSTENTAM utiliza como estimación de la producción de las pasturas el dato brindado por referentes locales. La posibilidad de incluir un submodelo de producción de pasturas permitiría incluir la variabilidad de la producción de estas y su impacto en los sistemas lecheros; este submodelo se realiza en articulación con un proyecto dedicado a la investigación en pasturas, también de INTA.

El objetivo del presente trabajo es presentar las modificaciones y los resultados de los ajustes efectuados para desarrollar un modelo de crecimiento de alfalfa (en adelante, Modelo Alfalfa). Se trabajó con un modelo de crecimiento (en adelante Modelo McCall) desarrollado en Nueva Zelanda para pasturas compuestas principalmente por gramíneas templadas perennes, base raigrás (McCall y Bishop-Hurley, 2003). El Modelo McCall fue diseñado para explicar la variación espacial (sitios) y temporal (años, estaciones) en el crecimiento de pasturas integradas por gramíneas templadas perennes. El modelo se puede programar con Excel por lo que podría ser fácilmente incorporado por distintos usuarios, así como por modelos que simulan sistemas de producción. Las ecuaciones del Modelo McCall son fácilmente modificables y existe abundante información para adaptarlas a alfalfa. La buena capacidad de predicción para raigrás perenne, tanto del modelo original (McCall y Bishop-Hurley, 2003) como de una versión modificada, (Romera *et al.*, 2009) y la simplicidad del funcio-

namiento hacen promisorio su uso en otras pasturas. Los datos de entrada que requiere el modelo son mínimos y fácilmente disponibles, en cuanto a pastura (biomasa seca verde por unidad de superficie al inicio del rebrote), clima (temperatura mínima y máxima diaria, precipitaciones y evapotranspiración potencial diaria y radiación global diaria) y suelo (capacidad de almacenaje de agua del suelo, así como el contenido inicial de agua del suelo).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Breve descripción del modelo original (Modelo McCall)

La descripción detallada del Modelo McCall se puede consultar en el trabajo original (McCall y Bishop-Hurley, 2003) por lo que aquí solo se presentarán brevemente los aspectos más relevantes para el desarrollo del Modelo Alfalfa. Las abreviaturas presentadas en el presente trabajo serán las mismas que las utilizadas en el trabajo original.

Básicamente, el modelo simula el nuevo crecimiento a partir de la radiación solar incidente ( $I$ , MJ/m<sup>2</sup>) interceptada por la cubierta vegetal. La proporción interceptada de la radiación solar incidente [ $c(G)$ ] es función de una variable de estado de la pastura, la biomasa verde expresada en materia seca ( $G$ , kg/ha de materia seca aérea). Luego,  $I$  es convertida en biomasa seca aérea a través de la eficiencia de uso de la radiación solar global para crecimiento bruto aéreo (parámetro  $\alpha$ , g/MJ).

El parámetro  $\alpha$  es multiplicado por diversos factores que representan las principales influencias fenológicas y ambientales que modifican el crecimiento bruto de la pastura. Un factor estacional  $c(G)$  asociado al estado vegetativo/reproductivo de la pastura ( $g_v$ ), y factores que relacionan el patrón de crecimiento con la temperatura media diaria del aire ( $g_T$ ) y con el estado hídrico del suelo ( $g_w$ ). El parámetro  $\alpha$  es también afectado por la fertilidad de suelo y la especie forrajera que predomina en una pastura en un sitio determinado. En este sentido, McCall y Bishop-Hurley (2003) plantean que para las pasturas y suelos de Nueva Zelanda el parámetro  $\alpha$  fluctúa entre 0,45 y 0,89 g/MJ en función de la fertilidad edáfica y la composición botánica de la pastura. El modelo en su versión original no presenta ecuaciones que asocian variaciones en el parámetro  $\alpha$  con variaciones en fertilidad de suelo (p.ej. niveles de materia orgánica, N,

P, entre otros). Los autores sugieren calibrar el modelo en cada sitio en el que se utilizará, haciendo fluctuar el parámetro  $\alpha$  dentro de un rango de valores reconocidos en la literatura (McCall y Bishop-Hurley, 2003).

Además, hay otros parámetros mencionados por los autores para la calibración. Uno de ellos refiere al desarrollo fenológico y al valor relativo del parámetro  $\alpha$  en pasturas vegetativas en relación con aquellas en estado reproductivo ( $v$ ). Otro parámetro de relevancia es el ( $g_w$ ), que modifica el crecimiento de acuerdo a la proporción de agua útil del suelo en la profundidad explorada por las raíces. El modelo original también contempla la ocurrencia de senescencia ( $\sigma$ ), que es una proporción de la biomasa aérea verde que varía de acuerdo al estado fenológico, que es mayor cuando la pastura está reproductiva. Así también la tasa de senescencia aumenta cuando el contenido de agua del suelo cae por debajo del 20% del agua útil. Estos parámetros ( $v$ ,  $g_w$  y  $\sigma$ ) no fueron modificados para desarrollar el Modelo Alfalfa.

### Cambios realizados para desarrollar el nuevo modelo

Tres aspectos fueron priorizados para el desarrollo del Modelo Alfalfa. Se modificó la eficiencia de uso de la radiación solar global para crecimiento bruto aéreo (llamada parámetro  $\alpha$  en la versión original del modelo), y los valores del factor  $g_T$  que la modifican, es decir, la relación del parámetro con la temperatura. También se modificó la ecuación que considera la importancia relativa de las reservas de carbono (C) y nitrógeno (N) utilizadas por las plantas durante el rebrote. En tercer lugar, se buscó identificar un valor del parámetro  $\alpha$  para simular pasturas sujetas a defoliaciones que contrastan en su frecuencia. Se priorizaron estos tres aspectos por su importancia para el crecimiento de especies forrajeras y a su vez debido a que son esencialmente diferentes entre alfalfa y gramíneas templadas perennes. Vale aclarar que, en este trabajo, se utilizó un enfoque empírico para representar, tanto el efecto que tiene la frecuencia de defoliación como el efecto que tienen las reservas de la planta (C y N) sobre el crecimiento aéreo.

El factor de crecimiento ( $g_T$ ) en el McCall Model presenta temperaturas cardinales de 4 °C (mínima), 18 °C (óptima) y 35 °C (máxima). Esta relación es diferente en alfalfa. Para desarrollar el Modelo Alfalfa se consideró una temperatura mínima de 5 °C (Thiébeau *et al.*, 2011), una óptima de 25 °C y una máxima de 35 °C. Para establecer la óptima se tuvo en cuenta que: *i*) el rango óptimo de crecimiento reportado por Doorenbos y Pruitt (1977) está entre 25 y 30 °C, *ii*) la tasa de fotosíntesis fue máxima entre 25°C y 35°C (Al-Hamdani y Tood, 1990), y *iii*) la eficiencia de uso de la radiación muestra aumentos hasta los 26 °C (Collino *et al.*, 2005). Aunque la temperatura cardinal máxima podría ser superior a los 35 °C optamos por el momento en no modificar dicho valor.

El máximo valor de eficiencia de uso de la radiación fotosintéticamente activa reportado en nuestro país para alfalfa, a la temperatura óptima (25 °C), fue de alrededor de 2,5 g/MJ (Mattera *et al.*, 2013), por lo que al parámetro  $\alpha$

(eficiencia de uso de la radiación solar global) se le asignó un valor de 1,25 g/Mj.

En gramíneas, la influencia del contenido de reservas de C y N durante el rebrote es de escasa relevancia (Schnyder y de Visser, 1999). Para contemplar el efecto de las reservas el Modelo McCall asume una intercepción de la radiación del 20% [ $c(G) = 20$ ] siempre que la intercepción de la radiación (calculada por el modelo en función de la biomasa aérea seca verde) sea menor o igual al 20%. De este modo cuando la intercepción es menor o igual al 20% tácitamente se simula un crecimiento a partir de reservas. La movilización de reservas de C y N es más importante en alfalfa respecto de gramíneas templadas perennes. Por lo tanto, bajo buenas condiciones para el crecimiento, luego de un corte que prácticamente no deja área foliar remanente, las plantas retoman un activo crecimiento a partir de dichas reservas (Avice *et al.*, 1996). Para aislar el efecto de las reservas de C y N, se utilizaron los datos de rebrotes bajo riego y se buscó el mejor ajuste utilizando valores de  $c(G)$  entre un 20% y un 60%.

Tanto en la calibración como en la validación del Modelo Alfalfa los valores de biomasa seca aérea observados (ej. datos de campo) se contrastaron con el valor de crecimiento bruto modelado. La senescencia no fue considerada debido a que, en los experimentos utilizados, el intervalo de tiempo entre defoliaciones fue generalmente inferior a los 450 grados días acumulados (GDA, temperatura base = 5 °C) y por lo tanto la biomasa perdida por senescencia es prácticamente despreciable (Brown *et al.*, 2005; Derrick Moot, comunicación personal, 2014). Al respecto, mediciones efectuadas durante rebrotes prolongados muestran que la biomasa senescente es nula hasta los 350 GDA y alcanza valores del 7-10% del total del crecimiento acumulado recién a los 700 GDA del rebrote (Olivo, trabajo de tesis en desarrollo, 2016).

Tanto la severidad como la frecuencia de la defoliación impactan sobre el forraje cosechado (Davies, 1988); en alfalfa es particularmente relevante el efecto de la frecuencia (Smith y Nelson, 1967). El momento óptimo de defoliación teórico se daría cuando una cubierta vegetal alcanza las máximas tasas de crecimiento promedio (Parsons y Penning, 1988) que corresponden a una intercepción de la radiación solar aproximada del 90-95%. Por una parte, para las pasturas defoliadas en T-95, al parámetro  $\alpha$  se le asignó un valor de 1,25 g/Mj. Debido a que incrementos en los niveles de sombreado producirían incrementos en la eficiencia de uso de la radiación (Mattera *et al.*, 2013), este valor se incrementó a 1,50 g/Mj para pasturas defoliadas menos frecuentemente (T-95+150). Por otra parte, pastoreos más frecuentes han reducido la eficiencia de uso en la radiación (Teixeira *et al.*, 2008), por lo que para modelar pasturas defoliadas muy frecuentemente (T-50) se redujo el parámetro  $\alpha$  a 0,7 g/Mj.

### Datos utilizados para calibrar y validar el modelo de alfalfa (Modelo Alfalfa)

En todos los casos analizados, las pasturas tenían una cobertura de plantas óptima (mayor al 90%), siempre se

consideró una biomasa inicial verde poscorte de 200 kg/ha de materia seca (altura de corte = 5 cm) y se utilizaron datos de cultivares con escaso reposo invernal (alfalfas grupo 9).

Los cambios propuestos para desarrollar el Modelo Alfalfa fueron calibrados con datos de rebrotes en los que se siguió la acumulación de biomasa seca aérea de pasturas de alfalfa que crecieron sin limitantes hídricas (bajo riego) ni nutricionales (N y P) obtenidos en los INTA Rafaela, INTA Manfredi e INTA Paraná. Estos experimentos fueron realizados sobre pasturas con óptima cobertura y con estricto control de plagas. En estos experimentos se realizaron cortes secuenciados con el objeto de evaluar la acumulación de biomasa aérea durante cada rebrote en distintas estaciones del año. En los momentos en los cuales las pasturas no eran evaluadas, seguían siendo defoliadas bajo sistemas rotativos para evitar acumulaciones excesivas de forraje.

Para calibrar el valor del parámetro  $\alpha$  según la frecuencia de defoliación se utilizaron datos de pasturas conducidas bajo riego en INTA Paraná (Spada *et al.*, 2013) donde se evaluaron tres frecuencias de corte determinadas por el porcentaje de radiación incidente interceptada (%RI) y tiempo térmico acumulado (grados día acumulados, temperatura base = 5 °C): T-50: se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 50%; T-95: se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 95% y T-95+150: una vez que el %RI llegaba al 95 % de intercepción se dejaban acumular 150 grados día y entonces se defoliaba.

Para validar el Modelo Alfalfa se utilizaron tres grupos de datos de alfalfa que crecieron en condiciones de secano, con un stand de plantas óptimo. Estos datos fueron tomados en los mismos experimentos descriptos previamente (en los experimentos irrigados del proyecto AEF-2492, ver sección "Cambios realizados para desarrollar el modelo de alfalfa (Modelo Alfalfa). En líneas generales los suelos y clima en los que se realizaron los experimentos eran adecuados para el cultivo de alfalfa (ej. suelos: niveles de fósforo > a 20 ppm, materia orgánica > 3%, pH cercanos a la neutralidad y sin limitantes para el crecimiento de las raíces; clima: templado húmedo-subhúmedo, 800-1000 mm anuales de lluvia, 22-25 °C de temperatura media diaria en verano, 12-14 °C, de temperatura media diaria en invierno). El primer grupo de datos correspondió a datos de acumulación de biomasa en secano con cortes secuenciados dentro de cada rebrote, obtenidos en INTA Rafaela (31°11' S; 61°30' O), INTA Manfredi (31°41' S; 63°46' O) e INTA Paraná (31°50' S; 60°31' O). El segundo correspondió al primer año de producción de seis siembras realizadas en condiciones de secano en la localidad de Susana, distante diez km de INTA Rafaela (Berone, 2010). Se incluyó este último grupo de datos proveniente de la red de ensayos llevado adelante por la Cámara de Semilleras de la Bolsa de Cereales por ser de interés al contar con siembras durante años consecutivos y encontrarse en las cercanías del sitio de Rafaela. A diferencia del primer grupo de datos, en este caso los cortes se realizan siguiendo criterios fenológicos (10% de floración o rebrote basal de 5 cm) sin realizar evaluaciones de biomasa intermedias durante un rebrote (es decir, entre corte y corte definidos por el 10% de

floración no hay una evaluación intermedia de la biomasa) por lo que solo se contó con el dato final de acumulación de biomasa aérea en cada corte realizado. El tercero correspondió a datos obtenidos en secano en INTA Marcos Juárez (32°36' S; 62°00' O) donde se evaluaron las mismas frecuencias de defoliación que se evaluaron en el experimento de Spada *et al.* (2013). Los datos de Marcos Juárez, también obtenidos en el marco del proyecto AEF-2492, se utilizaron para validar los cambios realizados en el parámetro  $\alpha$  con el objeto de representar pasturas de alfalfa (con adecuado stand de plantas) sometidas a diferentes frecuencias de defoliación.

### Análisis de la información

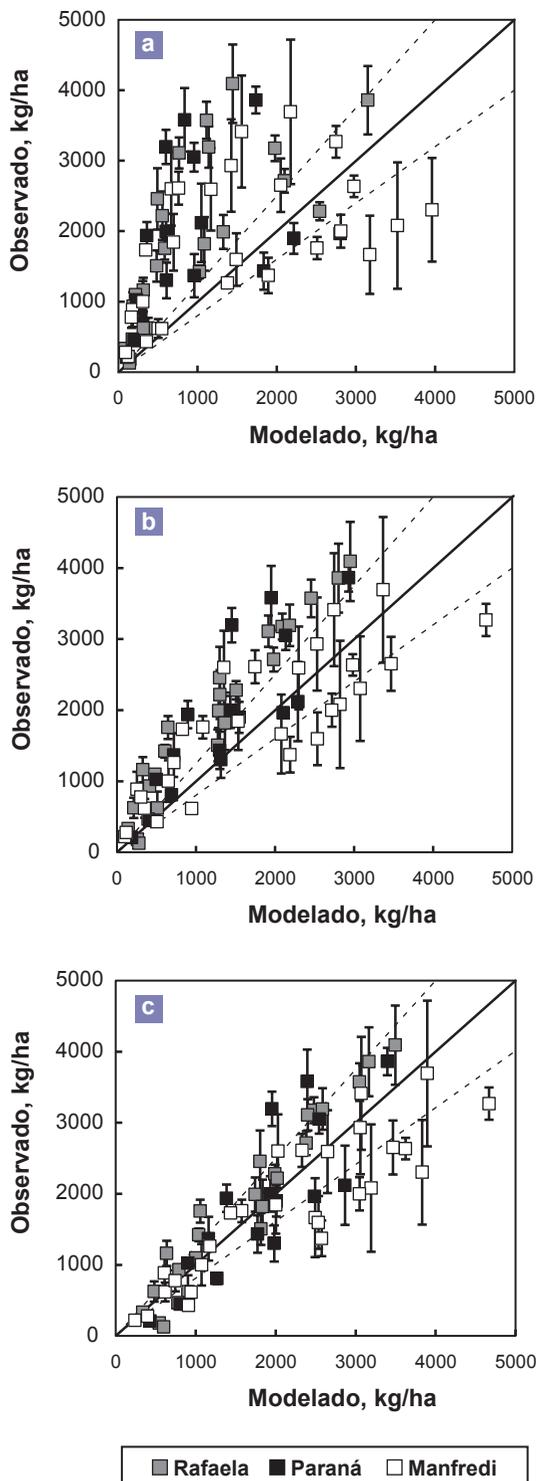
Para evaluar el ajuste entre los datos de cosechas y los generados por el modelo, se realizó primero una inspección visual de los datos con la relación entre los valores observados (eje y) y valores modelados (eje X) con la versión original y las versiones modificadas (Piñeiro *et al.*, 2008). Se analizó la diferencia (prueba t: 0,05) entre el valor medio observado (VMO) y modelado (VMM). Se analizó la pendiente, la ordenada al origen y el R<sup>2</sup> de la relación entre valores observados y modelados. Se realizaron análisis para las cosechas individuales y cuando se disponía de datos se realizaron análisis de biomasa acumulada por estación (primavera, verano, otoño e invierno) y por año.

## RESULTADOS

### Calibración de la relación entre el parámetro $\alpha$ y la temperatura y de las reservas

Se puede observar (figura 1a) que el Modelo McCall en su versión original subestimó significativamente la producción de alfalfa siendo: i) significativamente superior el valor medio observado (VMO) del valor medio modelado (VMM) y ii) la pendiente y la ordenada al origen de la relación entre valores observados y modelados ( $X=Y$ ) fueron, respectivamente, significativamente inferior a uno y superior a cero (tabla 1). Modificar la relación entre temperatura y el parámetro  $\alpha$  sin considerar la importancia de las reservas de C y N durante el rebrote (versión 1 de tabla 1) redujo dicha subestimación, pero se mantuvieron las diferencias significativas entre VMO y VMM y tanto la pendiente como la ordenada al origen de la relación  $X=Y$  siguieron siendo significativamente diferentes de 1 y 0, respectivamente (figura 1b y tabla 1).

Al contemplar el efecto de las reservas se analizaron cuatro versiones (versiones 2 a la 5 de la tabla 1), donde se determinó que cuando la intercepción de la radiación modelada [ $c(G)$ ] es inferior a un determinado valor, el modelo asume dicho valor. Los resultados obtenidos indican que la versión 4, que considera un valor umbral de  $c(G)$  del 50% es la que mostró el mejor ajuste ya que la mayoría de los valores modelados se ubicaron dentro de un rango aceptable ( $\pm 20\%$  del valor observado), desaparecieron las diferencias significativas entre VMO y VMM y la ordenada



**Figura 1.** Calibración. Relación entre valores observados y modelados utilizando (a) la versión original del modelo desarrollado por McCall y Bishop-Hurley (2003); (b) la versión modificada con la nueva relación del parámetro  $\alpha$  con la temperatura, pero dejando sin incluir las modificaciones para el uso de reservas de raíz y corona para el crecimiento; y (c) la versión modificada con la nueva relación del parámetro  $\alpha$  con la temperatura e incluyendo las modificaciones para el uso de reservas de raíz y corona para el crecimiento. Las líneas punteadas denotan una desviación de  $\pm$  el 20% de la línea 1:1 donde  $x=y$  (línea llena), mientras que las barras denotan  $\pm 1$  desvío estándar de los valores observados.

al origen y pendiente de la relación observados: modelados fueron igual a 0 y 1, respectivamente (figura 1c y tabla 1).

En función de los resultados obtenidos en esta etapa de calibración se determinó que la versión más adecuada del Modelo Alfalfa difiere de la versión original en dos aspectos: 1) las temperaturas cardinales serán 5 °C (mínima), 25 °C (óptima) y 35 °C (máxima) y 2) para contemplar la mayor importancia en la movilización de reservas de C y N en alfalfa respecto de gramíneas templadas perennes, se asume una intercepción de la radiación del 50 % [ $c(G) = 50$ ] siempre que la intercepción de la radiación (calculada por el modelo en función de la biomasa seca verde disponible) sea menor o igual al 50%. Los ajustes para representar pasturas sometidas a distintas frecuencias de defoliación y validación se realizaron utilizando esta versión 4.

#### Ajustes en el parámetro $\alpha$ para modelar variaciones en la frecuencia de defoliación

En este trabajo se establecieron *a priori* ajustes en el parámetro  $\alpha$  asociados a las variaciones en la frecuencia de defoliación. El objetivo es evaluar si a través de esta simple manera se pueden representar adecuadamente las variaciones en productividad que muestran pasturas sometidas a distintos regímenes de defoliación (Teixeira *et al.*, 2007).

Para realizar estos ajustes se utilizaron los datos de producción de alfalfa obtenidos en INTA Paraná. Analizando la información de las cosechas individuales puede observarse que solo las pasturas defoliadas a una frecuencia óptima (T-95) fueron relativamente bien representadas por el Modelo Alfalfa (tabla 2). Por su parte pasturas defoliadas a una frecuencia mayor (T-50) y menor (T-95+150), respecto de la óptima, no fueron modeladas adecuadamente (tabla 2).

Al incorporar todos los tratamientos en una sola regresión, las diferencias entre las distintas frecuencias de defoliación fueron adecuadamente representadas por el modelo (tabla 2, figura 2a). Por su parte, el modelo mejoró su performance cuando la información se analizó agrupada estacionalmente (tabla 2, figura 2b).

#### Validación

El modelo desarrollado simuló adecuadamente los rebrotes de secano (figura 3a, tabla 3) y no fue necesario realizar modificaciones al valor óptimo del parámetro  $\alpha$  (1,25 g/MJ). Para modelar adecuadamente el grupo de datos de la localidad de Susana) fue necesario reducir el valor de dicho parámetro de 1,25 a 1,00 g/MJ, debido a que sobreestimaba el crecimiento. El ajuste no fue bueno cuando se analizaron las cosechas individuales, pero mejoró notablemente cuando se analizó a una escala temporal de estación (figuras 3b,c y tabla 3).

Finalmente, se validaron los cambios realizados en el valor del parámetro  $\alpha$  para simular pasturas sometidas a frecuencias de defoliación contrastantes. El ajuste no fue bueno cuando se analizaron las cosechas individuales dentro de

|                    | Versión Original (McCall-Model) | Versiones modificadas para desarrollar el Modelo-Alfalfa |            |            |            |            |
|--------------------|---------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|
|                    |                                 | 1Versión 1   | Versión 2  | Versión 3  | Versión 4  | Versión 5  |
| <sup>2</sup> n     | 67                              | 67   | 67         | 67         | 67         | 67         |
| VMO (kg/ha)        | 1847                            | 1847   | 1847       | 1847       | 1847       | 1847       |
| VMM (kg/ha)        | 1145                            | 1470   | 1626       | 1763       | 1887       | 2034       |
| T-Test             | <sup>3</sup> Sig.               | Sig.   | Sig.       | No sig.    | No sig.    | Sig.       |
| R <sup>2</sup>     | 0,28                            | 0,67   | 0,70       | 0,71       | 0,72       | 0,72       |
| Ordenada al origen | 1187 ( <sup>4</sup> ≠ 0)        | 592 (≠ 0)  | 426 (≠ 0)  | 296 (≠ 0)  | 203 (= 0)  | 131 (= 0)  |
| Pendiente          | 0,58 (≠ 1)                      | 0,85 (≠ 1)   | 0,87 (= 1) | 0,88 (= 1) | 0,87 (= 1) | 0,84 (≠ 1) |

**Tabla 1.** Calibración. Valor medio observado (VMO), valor medio modelado (VMM), significancia de test-t (T-Test) entre VMO y VMM, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), ordenada al origen y pendiente del análisis entre datos observados y modelados utilizando la versión original (Modelo McCall) y versiones modificadas para desarrollar el Modelo Alfalfa.

<sup>1</sup>Versión 1: solo se modificó la relación entre el parámetro α y la temperatura. Versión 2, 3 4 y 5: igual a versión 1, pero a su vez se contempló el uso de reservas de C y N durante el rebrote. Para ello se determinó que cuando la intercepción de la radiación modelada [c(G)] es inferior a un determinado valor, el modelo asume dicho valor (Versión 2: c(G) = 30%, versión 3: c(G) = 40%, versión 4: c(G) = 50%, versión 5: c(G) = 60%). <sup>2</sup>Datos bajo riego y sin limitantes de nitrógeno obtenidos en INTA Manfredi, Paraná y Rafaela. <sup>3</sup>Las siglas Sig. y No sig. denotan, respectivamente, la presencia y ausencia de diferencias significativas (p < 0,05) entre VMO y VMM. <sup>4</sup>El símbolo ≠ denota que la ordenada al origen y la pendiente difieren (p < 0,05) de 0 y 1, respectivamente. El símbolo = denota que la ordenada al origen y la pendiente son iguales (p > 0,05) a 0 y 1, respectivamente.

**Modelo-Alfalfa: calibración del modelo para frecuencia de defoliación**

| Estadísticos       | Cosechas individuales  |            |            |              | Estacional |            |            |              |
|--------------------|------------------------|------------|------------|--------------|------------|------------|------------|--------------|
|                    | T-50 <sup>2</sup>      | T-95       | T-95+150   | Todos juntos | T-50       | T-95       | T-95+150   | Todos juntos |
| n <sup>3</sup>     | 24                     | 15         | 13         | 52           | 7          | 7          | 7          | 21           |
| VMO (kg/ha)        | 1022                   | 2911       | 3680       | 2232         | 3506       | 6238       | 6836       | 5526         |
| VMM (kg/ha)        | 1102                   | 2790       | 3661       | 2229         | 3778       | 5979       | 6800       | 5519         |
| T-Test             | No Sig. <sup>4</sup>   | No sig.    | No sig.    | No sig.      | No sig.    | No sig.    | No sig.    | No sig.      |
| R <sup>2</sup>     | 0,11                   | 0,48       | 0,10       | 0,74         | 0,61       | 0,93       | 0,97       | 0,93         |
| Ordenada al origen | 685 (≠ 0) <sup>5</sup> | 708 (= 0)  | 2588 (≠ 0) | 244 (= 0)    | 1179 (= 0) | 463 (= 0)  | - 84 (= 0) | 45 (= 0)     |
| Pendiente          | 0,31 (≠ 1)             | 0,79 (= 1) | 0,30 (≠ 1) | 0,89 (= 1)   | 0,62 (= 1) | 0,97 (= 1) | 1,02 (= 1) | 0,99 (= 1)   |

**Tabla 2.** Calibración. Valor medio observado (VMO), valor medio modelado (VMM), significancia de test-t (T-Test) entre VMO y VMM, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), ordenada al origen y pendiente del análisis entre datos observados y modelados utilizando la versión modificada (Modelo Alfalfa<sup>1</sup>) de pasturas sujetas a diferentes frecuencias de defoliación. Se muestra el resultado del análisis para las cosechas individuales y los acumulados de manera estacional (primavera, verano, otoño e invierno).

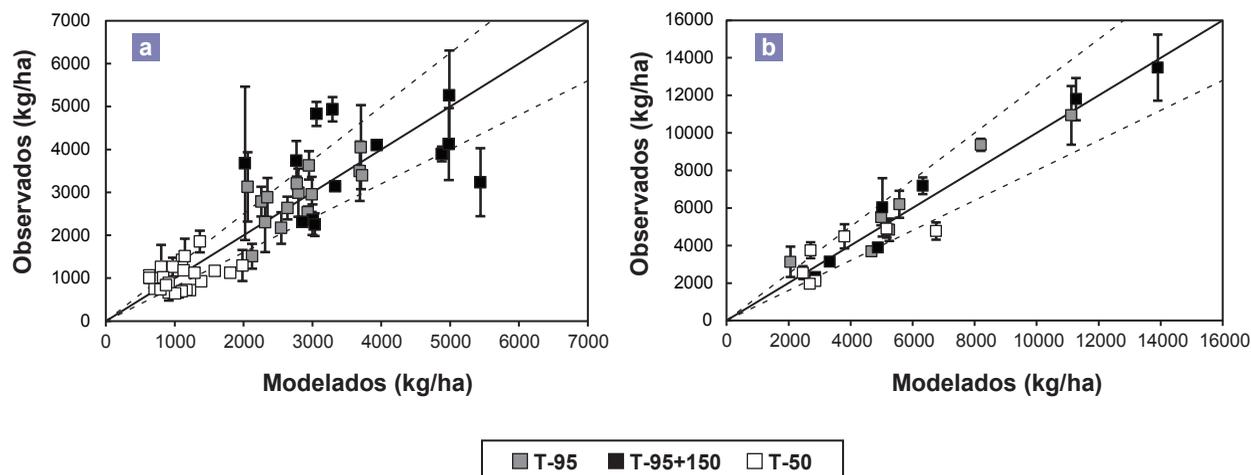
<sup>1</sup>Modelo-Alfalfa: hace referencia a la versión 4 (ver Tabla 1) en la cual las temperaturas cardinales son: 5 °C (mínima), 25 °C (óptima) y 35 °C (máxima); para contemplar el uso de reservas asume una intercepción de la radiación del 50% [c(G) = 50] siempre que la intercepción de la radiación (calculada por el modelo en función de la biomasa seca verde disponible) sea menor o igual al 50%. <sup>2</sup>Tres frecuencias de defoliación: T-50= se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 50%; T-95= se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 95%; y T-95+150= una vez que el %RI llegaba al 95% de intercepción se dejaban acumular 150 GDA y entonces se defoliaba. Para modelar T-50, T-95 y T-95+150, el parámetro α en el Modelo- Alfalfa fue, respectivamente, 0,70 g/MJ, 1,25 g/MJ y 1,50 g/MJ. <sup>3</sup>Datos bajo riego, obtenidos en INTA Paraná. <sup>4</sup>Las siglas Sig. y No sig. denotan, respectivamente, la presencia y ausencia de diferencias significativas (p < 0,05) entre VMO y VMM. <sup>5</sup>El símbolo ≠ denota que la ordenada al origen y la pendiente difieren (p < 0,05) de 0 y 1, respectivamente. El símbolo = denota que la ordenada al origen y la pendiente son iguales (p > 0,05) a 0 y 1, respectivamente.

cada tratamiento de defoliación (figura 4a, tabla 4). Al igual que en la etapa de calibración, el resultado mejoró cuando se realizó un análisis incorporando todos los tratamientos en una sola regresión (tabla 4). Si bien se observaron mejoras cuando se analizaron los datos acumulados estacionalmente, puede observarse que el Modelo Alfalfa tiende a subes-

timar la productividad en este sitio, particularmente en las pasturas defoliadas con menor frecuencia (figura 4b, tabla 4).

**DISCUSIÓN**

En palabras de McCall y Bishop-Hurley (2003), “un modelo, para ser útil, debería ser capaz de ayudar a lograr un objetivo



**Figura 2.** Calibración del parámetro  $\alpha$  para modelar pasturas bajo diferentes frecuencias de defoliación. Relación entre valores observados (obtenidos bajo riego en INTA Paraná) y modelados utilizando versión 4 de tabla 1, donde para modelar T-50 (cuadros blancos), T-95 (cuadros grises) y T-95+150 (cuadros negros), el parámetro  $\alpha$  en el Modelo Alfalfa fue, respectivamente, 0,70 g/MJ, 1,25 g/MJ y 1,50 g/MJ. (a) grupo de datos de cortes individuales. (b) grupo de datos de cortes agrupados por estación. Las líneas punteadas denotan una desviación de  $\pm$  el 20% de la línea 1:1 donde  $x=y$  (línea llena), mientras que las barras denotan  $\pm$  1 desvío estándar de los valores observados.

#### Modelo-Alfalfa: evaluación del modelo en seco

| Estadísticos       | INTA Paraná, Rafaela<br>y Manfredi (cosechas individuales) | Susana<br>(cosechas individuales) | Susana<br>(acumulado estacional) |
|--------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|
| n                  | 67   | 45                                | 18                               |
| VMO (kg/ha)        | 1318   | 1702                              | 4255                             |
| VMM (kg/ha)        | 1137   | 1708                              | 4270                             |
| T-Test             | Sig. <sup>2</sup>  | No sig.                           | No sig.                          |
| R <sup>2</sup>     | 0,80   | 0,52                              | 0,84                             |
| Ordenada al origen | 162 (= 0) <sup>3</sup>                                     | 671 ( $\neq$ 0) <sup>3</sup>      | 537 (= 0)                        |
| Pendiente          | 1,00 (= 1)   | 0,60 ( $\neq$ 1)                  | 0,87 (= 1)                       |

**Tabla 3.** Validación. Valor medio observado (VMO), valor medio modelado (VMM), significancia de test-t (T-Test) entre VMO y VMM, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), ordenada al origen y pendiente del análisis entre datos observados y modelados utilizando la versión modificada (Modelo Alfalfa<sup>1</sup>) de datos obtenidos en seco en los INTA Paraná, Rafaela, Manfredi. Se analizaron cosechas individuales mientras que para Susana se muestra el resultado del análisis para las cosechas individuales y los acumulados de manera estacional (primavera, verano, otoño e invierno).

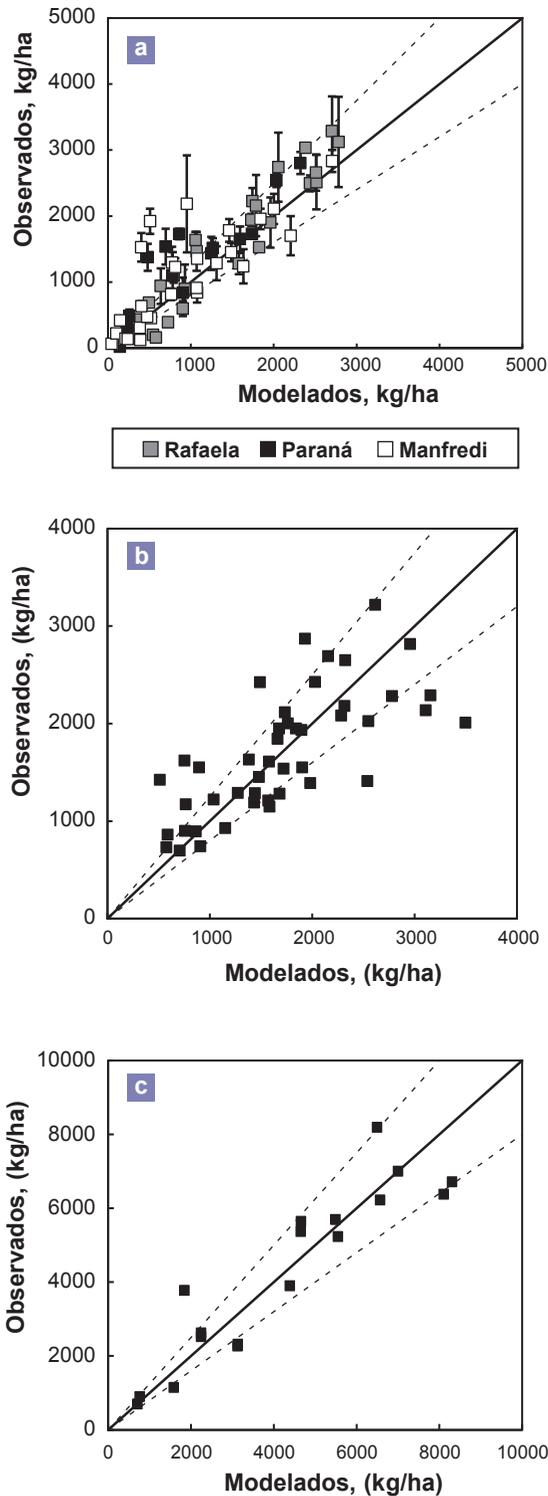
<sup>1</sup>Modelo-Alfalfa: hace referencia a la versión 4 (ver tabla 1) en la cual el valor del parámetro  $\alpha$  a la temperatura cardinal óptima es de 1,25 g/MJ para INTA (Paraná, Manfredi y Rafaela) y de 1,0 g/MJ para Susana; las temperaturas cardinales son: 5 °C (mínima), 25 °C (óptima) y 35 °C (máxima); para contemplar el uso de reservas asume una intercepción de la radiación del 50% [ $c(G) = 50$ ] siempre que la intercepción de la radiación (calculada por el modelo en función de la biomasa seca verde disponible) sea menor o igual al 50%. <sup>2</sup>Las siglas Sig. y No sig. denotan, respectivamente, la presencia y ausencia de diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre VMO y VMM. <sup>3</sup>El símbolo  $\neq$  denota que la ordenada al origen y la pendiente difieren ( $p > 0,05$ ) de 0 y 1, respectivamente. El símbolo = denota que la ordenada al origen y la pendiente son iguales ( $p > 0,05$ ) a 0 y 1, respectivamente.

establecido". El objeto del presente trabajo fue desarrollar un modelo capaz de representar el crecimiento de pasturas de alfalfa sujetas a diferentes condiciones ambientales y de manejo de la defoliación. En este sentido, las modificaciones realizadas al modelo originalmente desarrollado para representar pasturas de base raigrás perenne permitieron representar adecuadamente el crecimiento de pasturas de alfalfa ante variadas condiciones de clima, suelo y manejo de la defoliación.

El ajuste de parámetros ecofisiológicos del modelo de acuerdo a la alfalfa mejoró sustantivamente el resultado modelado en comparación con los valores observados bajo condiciones

sin limitantes hídricas ni nutricionales (tabla 1), es decir, condiciones potenciales de cada sitio. Sin embargo, las forrajeras, en concordancia con la mayoría de los cultivos anuales destinados a cosecha (p. ej. trigo, maíz), muestran variaciones en su capacidad de crecimiento asociadas a variaciones en la disponibilidad de agua y (macro) nutrientes (Sinclair y Rufty, 2012).

Respecto de las variaciones debidas a la disponibilidad de agua, el Modelo Alfalfa fue capaz de representarlas adecuadamente. Por un lado, fue capaz de modelar adecuadamente el crecimiento de pasturas tanto bajo riego, como en condiciones de seco. Por otro lado, las pasturas irri-



**Figura 3.** Validación. Relación entre valores observados y modelados utilizando la versión desarrollada para modelar el crecimiento de alfalfa (Modelo Alfalfa). (a) grupo de datos de secano obtenidos en Manfredi, Rafaela y Paraná. (b) grupo de datos de cortes individuales obtenidos en secano en Susana. (c) grupo de datos por estación obtenidos en Susana. Las líneas punteadas denotan una desviación de  $\pm$  el 20% de la línea 1:1 donde  $x=y$  (línea llena), mientras que las barras denotan  $\pm$  1 desvío estándar de los valores observados.

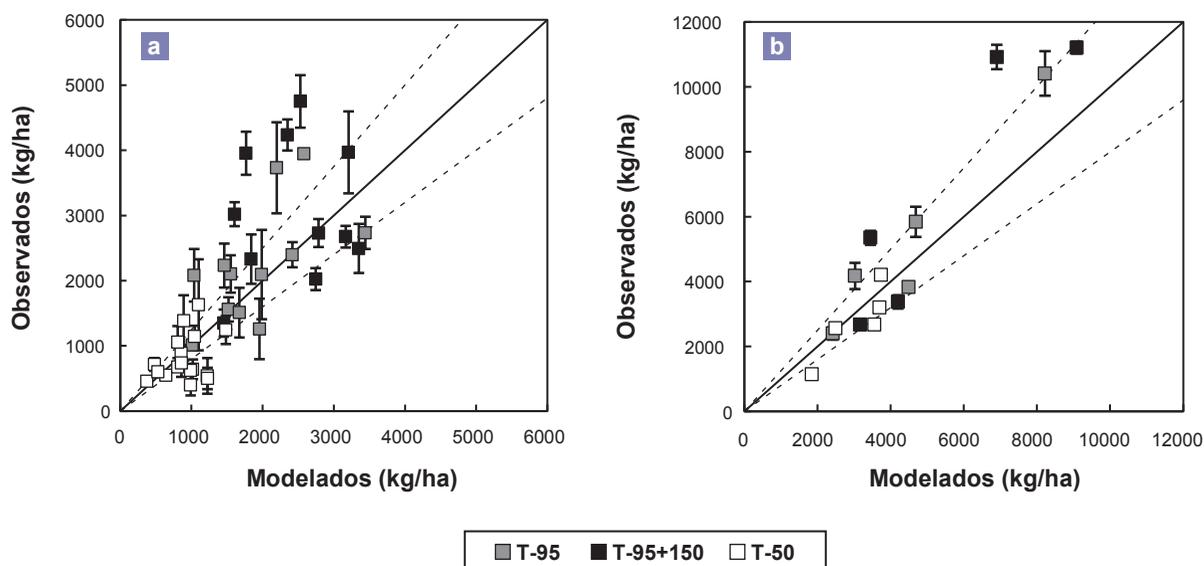
gadas (tabla 1) produjeron más forraje que las pasturas de secano (tabla 3) y dicha diferencia se reflejó en los datos modelados (comparar el VMO de tabla 1 versus el VMO de tabla 3 y luego comparar el VMM de versión 4 tabla 1 con el VMM de tabla 3).

Respecto a las variaciones en la disponibilidad de nutrientes, el Modelo McCall no cuenta con un submodelo de fertilidad edáfica y los autores sugieren modificar el parámetro  $\alpha$  (eficiencia de conversión de la radiación solar) entre 0,45 y 0,90 g/MJ (McCall y Bishop-Hurley, 2003). Por una parte, para el caso de alfalfa en la Argentina nuestra opinión es que en general no suele estar muy limitada en cuanto a macronutrientes. Debido a su capacidad de fijar nitrógeno simbióticamente, suele crecer con adecuada disponibilidad de nitrógeno (Mattera *et al.*, 2012; Sardña y Barraco, 2013a, b; Sevilla y Pasinato, 2013). Por otra parte, salvo excepciones, suele ser utilizada en suelos con adecuados niveles de fósforo. Sería de esperar entonces que, ante la sospecha de menores niveles de P en suelo, el Modelo Alfalfa puede ser utilizado simplemente disminuyendo el valor del parámetro  $\alpha$ .

Al respecto, si bien las razones pueden no haber estado relacionadas a una baja disponibilidad de nutrientes, en el presente trabajo solo fue necesario reducir el valor del parámetro  $\alpha$  (de 1,25 a 1,00 g/MJ) en uno solo de los ambientes evaluados (Susana, tabla 3) con el objeto de mejorar el ajuste realizado por el Modelo Alfalfa. En el caso de los otros ambientes, con pasturas defoliadas a una óptima frecuencia en relación con la producción, calidad y persistencia de las pasturas de alfalfa (Cangiano, 2007) (versión 4 de tabla 1, y tratamiento T-95 de tablas 2 y 4), el crecimiento de alfalfa fue representado adecuadamente utilizando el parámetro  $\alpha$  con su valor óptimo (1,25 g/MJ).

Es de destacar el buen comportamiento del Modelo Alfalfa para representar, sobre todo a la escala estacional (ej. primavera, verano, otoño e invierno) las diferencias en productividad de pasturas sujetas a diferentes frecuencias de defoliación (tablas 2 y 4). Si bien la calibración general del modelo fue buena, la validación con el grupo de datos de Marcos Juárez presentó la tendencia a subestimar los valores productivos. Este resultado pudo deberse a que el sitio presenta napas cercanas a la superficie que pudieron haber realizado un aporte de agua no contemplado en el modelo.

En el futuro, sería de interés desarrollar funciones mecánicas que contemplen tanto el aporte de agua de la napa como el impacto de la frecuencia de defoliación sobre el parámetro  $\alpha$ . A nuestro entender, el resto de los modelos actualmente utilizados para alfalfa no tienen submodelos que contemplen estos dos factores. Por su parte, el hecho de que la modelación del crecimiento aéreo ante cambios en la frecuencia de defoliación sea trabajada empíricamente (pero basado en literatura) no limita la utilidad que tiene el modelo para cumplir con el objetivo para el cual fue desarrollado. Por supuesto, esto no descarta la importancia que podría tener para el Modelo Alfalfa, el futuro desarrollo de una relación general que asocie variaciones en EUR con variaciones en frecuencia de defoliación.



**Figura 4.** Validación de cambios realizados en parámetro  $\alpha$  para modelar diferentes frecuencias de defoliación. Relación entre valores observados (obtenidos en secano en INTA Marcos Juárez) y modelados utilizando la versión 4 de tabla 1, donde para modelar T-50 (cuadros blancos), T-95 (cuadros grises) y T-95+150 (cuadros negros), el parámetro  $\alpha$  en el Modelo Alfalfa fue, respectivamente, 0,70 g/MJ, 1,25 g/MJ y 1,50 g/MJ. (a) grupo de datos de cortes individuales. (b) grupo de datos de cortes agrupados por estación. Las líneas punteadas denotan una desviación de  $\pm$  el 20% de la línea 1:1 donde  $x=y$  (línea llena), mientras que las barras denotan  $\pm 1$  desvío estándar de los valores observados.

#### Modelo-Alfalfa: evaluación del modelo bajo distintas frecuencias de defoliación

| Estadísticos       | Cosechas individuales  |            |            |              | Estacional  |             |              |                    |
|--------------------|------------------------|------------|------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------------|
|                    | T-50 <sup>2</sup>      | T-95       | T-95+150   | Todos juntos | T-50        | T-95        | T-95+150     | Todos juntos       |
| $n^3$              | 17                     | 12         | 11         | 40           | 5           | 5           | 5            | 15                 |
| VMO (kg/ha)        | 810                    | 2222       | 3048       | 1849         | 2756        | 5332        | 6706         | 4931               |
| VMM (kg/ha)        | 902                    | 1903       | 2437       | 1624         | 3065        | 4569        | 5361         | 4332               |
| T-Test             | No Sig. <sup>4</sup>   | No sig.    | No sig.    | No sig.      | No sig.     | No sig.     | No sig.      | No sig.            |
| R <sup>2</sup>     | 0,12                   | 0,36       | 0,02       | 0,57         | 0,75        | 0,92        | 0,85         | 0,89               |
| Ordenada al origen | 430 (= 0) <sup>5</sup> | 741 (= 0)  | 2485 (= 0) | 102 (= 0)    | - 737 (= 0) | - 687 (= 0) | - 1224 (= 0) | - 1407 ( $\neq$ 0) |
| Pendiente          | 0,42 (= 1)             | 0,78 (= 1) | 0,23 (= 1) | 1,08 (= 1)   | 1,14 (= 1)  | 1,32 (= 1)  | 1,48 (= 1)   | 1,46 ( $\neq$ 1)   |

**Tabla 4.** Validación. Valor medio observado (VMO), valor medio modelado (VMM), significancia de test-t (T-Test) entre VMO y VMM, coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), ordenada al origen y pendiente del análisis entre datos observados y modelados utilizando la versión modificada (Modelo Alfalfa<sup>1</sup>) de pasturas sujetas a diferentes frecuencias de defoliación. Se muestra el resultado del análisis para las cosechas individuales y los acumulados de manera estacional (primavera, verano, otoño e invierno).

<sup>1</sup>Modelo-Alfalfa: hace referencia a la versión 4 (ver tabla 1) en la cual las temperaturas cardinales son: 5 °C (mínima), 25 °C (óptima) y 35 °C (máxima); para contemplar el uso de reservas asume una intercepción de la radiación del 50% [ $c(G) = 50$ ] siempre que la intercepción de la radiación (calculada por el modelo en función de la biomasa seca verde disponible) sea menor o igual al 50%. <sup>2</sup>Tres frecuencias de defoliación: T-50= se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 50%; T-95= se defoliaba cada vez que el %RI llegaba al 95%; y T-95+150= una vez que el %RI llegaba al 95% de intercepción se dejaban acumular 150 GDA y entonces se defoliaba. Para modelar T-50, T-95 y T-95+150, el parámetro  $\alpha$  en el Modelo-Alfalfa fue, respectivamente 0,70 g/MJ, 1,25 g/MJ y 1,50 g/MJ. <sup>3</sup>Datos en secano, obtenidos en INTA Marcos Juárez. <sup>4</sup>Las siglas Sig. y No sig. denotan, respectivamente, la presencia y ausencia de diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre VMO y VMM. <sup>5</sup>El símbolo  $\neq$  denota que la ordenada al origen y la pendiente difieren ( $p < 0,05$ ) de 0 y 1, respectivamente. El símbolo = denota que la ordenada al origen y la pendiente son iguales ( $p > 0,05$ ) a 0 y 1, respectivamente.

Por una parte, como se demuestra en el presente trabajo, el Modelo Alfalfa refleja, al menos a la escala de estación, las diferencias productivas de pasturas defoliadas con dis-

tinta frecuencia. Entendemos que este es un aspecto y un aporte destacable. Por ejemplo, esto permitirá analizar a nivel de modelación de sistemas, el resultado de estrate-

gias contrastantes en lo que hace al manejo de pasturas de alfalfa en distintos sistemas, evitando (o complementando) experimentos muy costosos y de larga duración. Así, contar con esta herramienta permitirá evaluar en poco tiempo y a bajo costo (vía modelación) las respuestas de los sistemas de producción entre alternativas de manejo. Por otra parte, debido a que pasturas defoliadas con mayor frecuencia suelen ofrecer, respecto de pasturas defoliadas con menor frecuencia, menor cantidad de forraje, pero de mayor calidad (Cangiano, 2007), para realizar este análisis es necesario incorporar al Modelo Alfalfa un submodelo de calidad del forraje.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a los proyectos INTA de las Carteras 2006-2012 (AEFP-2492: Producción, calidad y persistencia productiva de pasturas con diferentes niveles de insumos y prácticas de manejo en ambientes templados y subtropicales), y 2013-2018 (PE-1126043: Sustentabilidad de los sistemas de producción de leche bovina y PE-1126073: Pasturas ecoeficientes y de bajo carbono en ganadería). Se agradecen los datos cedidos por Nicolás Bertrám (INTA Marcos Juárez). Aprovechamos para agradecer a uno de los revisores y al editor quienes con sus comentarios mejoraron sensiblemente la versión final del manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA

- AL-HAMDANI, S.; TODD, G.W. 1990. Effects of temperature regimens on photosynthesis, respiration and growth in alfalfa. *Proceedings Oklahoma Academic Science*. 70, 1–4.
- AVICE, J.C.; OURRY, A.; LEMAIRE, G.; BOUCAD, J. 1996. Nitrogen and carbon flows estimated by  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  pulse-chase labeling during regrowth of alfalfa. *Plant Physiol*. 112, 281–290.
- BASIGALUP, D.H.; ROSSANIGO, R. 2007. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: BASIGALUP, D.H. (Ed.). *El Cultivo de la Alfalfa en la Argentina*. Ediciones INTA, Buenos Aires, pp. 13–25.
- BERONE, G.D. 2010. Relación entre temperatura, lluvia y tasa de crecimiento en pasturas de alfalfa de distintas edades. *Rev Arg Prod Anim*. 30 (1), 396–397.
- BROWN, H.E.; MOOT, D.J. 2004. Quality and quantity of chicory, lucerne and red clover production under irrigation. *Proc New Zeal Grass Assoc*. 66, 257–264.
- BROWN, H.E.; MOOT, D.J.; TEIXEIRA, E.I. 2005. The components of lucerne (*Medicago sativa*) leaf area index respond to temperature and photoperiod in a temperate environment. *Eur J Agron*. 23, 348–358.
- CANGIANO, C.A. 2007. Crecimiento y manejo de la defoliación. En: BASIGALUP, D.H. (Ed.). *El Cultivo de la Alfalfa en la Argentina*. Ediciones INTA, Buenos Aires, pp. 247–276.
- COLLINO, D.J.; DARDANELLI, J.L.; DE-LUCA, M.J.; RACCA, R.W. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Aust J Agr Res*. 45, 383–390.
- DAVIES, A. 1988. The regrowth of the grass sward. En: JONES, M.B.; LAZENBY, A. (Ed.). *The Grass Crop: The Physiological Basis of Production*. Chapman and Hall, Londres. pp. 129–169.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. 1977. Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 33*. FAO Roma.
- LITWIN, G.M.; ENGLER, P.L. 2011. Simulación técnica, económica y ambiental de sistemas lecheros en Entre Ríos. *Rev. Arg. Prod. Anim*. 31 (1): 228.
- MATTERA, J.; ROMERO, L.A.; CUATRIN, A.L.; SCOTTO LENZ, M.A.; LIGORIO GUERRA, E. 2012. Riego y fertilización en alfalfa. Producción de biomasa. *Rev Arg Prod Anim*. 32 (1), 362.
- MATTERA, J.; ROMERO, L.A.; CUATRIN, A.L.; CORNAGLIA, P.S.; GRIMOLDI, A.A. 2013. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing. *Eur J Agron*. 45, 87–95.
- MCCALL, D.G.; BISHOP-HURLEY, G.J. 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agr Syst*. 76, 1183–1205.
- PARSONS, A.J.; PENNING, P.D. 1988. The effect of duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and the average rate of growth in a rotationally grazed sward. *Grass Forage Sci*. 43, 15–27.
- PIÑEIRO, G.; PERELMAN, S.; GUERSCHMAN, J.P.; PARUELLO, J.M. 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecol Model*. 216, 316–322.
- ROMERA, A.J.; MCCALL, D.G.; LEE, J.M.; AGNUSDEI, M.G. 2009. Improving the McCall herbage growth model. *New Zeal J Agr Res*. 52, 477–494.
- SARDIÑA, M.C.; BARRACO, M. 2013. Fertilización nitrogenada en pasturas establecidas de alfalfa. *Rev Arg Prod Anim*. 33 (1), 229.
- SARDIÑA, M.C.; BARRACO, M. 2013. Fertilización nitrogenada y azufrada en alfalfa en producción. *Rev Arg Prod Anim*. 33 (1), 232.
- SCHNYDER, H.; DeVISSER, R. 1999. Fluxes of Reserve-Derived and Currently Assimilated Carbon and Nitrogen in Perennial Ryegrass Recovering from Defoliation. The Regrowing Tiller and Its Component Functionally Distinct Zones. *Plant Physiol*. 119, 1423–1435.
- SEVILLA, G.; PASINATO, A. 2013. Captura y eficiencia de uso de radiación en alfalfa con y sin nitrógeno agregado. *Rev Arg Prod Anim*. 33 (1), 278.
- SINCLAIR, T.R.; RUFTY, T. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yields increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1, 94–98.
- SMITH, D.; NELSON, C.J. 1967. Growth of birdsfoot trefoil and alfalfa. I. Responses to height and frequency of cutting. *Crop Science* 7, 130–133.
- SPADA, M.C.; DINUCCI, E.; VALENTINUZ, O.; BOSCH R. 2013. Frecuencia de corte en alfalfa en dos ambientes: acumulación de biomasa y persistencia. *Rev Arg Prod Anim*. 33 (1), 293.
- TEIXEIRA, E.I.; MOOT, D.J.; MICKELBART, M.V. 2007. Seasonal patterns of root C and N reserves of lucerne crops (*Medicago sativa* L.) grown in a temperate climate were affected by defoliation regime. *Eur J Agron*. 26, 10–20.
- TEIXEIRA, E.I.; MOOT, D.J.; BROWN, H.E. 2008. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne (*Medicago sativa* L.) crops. *Eur J Agron*. 28, 103–111.
- THIEBEAU, P.; BEAUDOIN, N.; JUSTES, E.; ALLIRAND, J.; LEMAIRE, G. 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. *Eur J Agron*. 35, 255–268.