

Diseño de siembra y frecuencias de corte: determinantes de la estructura y el aprovechamiento en pasturas de base *Medicago sativa* L. (alfalfa)

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área de Producción Animal*

Natalia Cristina Cadaviz

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires – 2012

Especialista en Manejo de Sistemas Pastoriles - Universidad de Buenos Aires – 2017

Lugar de trabajo: Facultad de Agronomía – UBA



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Facultad de Ciencias Veterinarias
Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis
María Laura Amalia Gatti
Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Co-director de tesis
Pablo Ariel Cipriotti
Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO
Juan Mattera
Ingeniero Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Maestría en Producción Vegetal (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO
Jean Víctor Savian
Zootecnista (Universidad Federal de Santa María)
Maestría en zootecnia (Universidad Federal de Rio Grande do Sul)
Doctor en zootecnia (Universidad Federal de Rio Grande do Sul)

JURADO
Marisa Wawrzekiewicz
Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de tesis: 14 de abril de 2025

Dedicatoria:

A mis padres, Elida y Antonio, por el germen de la perseverancia

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi comité consejero, a mi directora Dra. Laura A. Gatti por su acompañamiento permanente y su infinita paciencia y al Dr. Pablo A. Cipriotti por su ayuda invaluable.

A la UBA que financió el proyecto,

- Participante del proyecto PDE_21_2018, Título: “Optimización del ordeño robótico en tambos de Argentina. Identificación de puntos críticos de funcionamiento, tráfico voluntario y desempeño productivo.” Director del proyecto: Ing. Agr. José Luis Rossi.

Al Sr. Mario Suárez, por su ayuda y su “mano verde” en el trabajo a campo. Al Ing. Agr. Luis Salgado, por su ayuda y acompañamiento en el laboratorio.

A los estudiantes que participaron en la recolección y procesamiento de datos: Francisco Santomil, Valeria A. Salas y Nazareno O. Ramundo.

A la Facultad de Agronomía, Cátedra de Forrajicultura, ámbito en el cual desempeño mis tareas docentes. Especialmente a la Dra. Magdalena Druille, compañera de oficina, por su escucha y consejos.

A Malena, Gonzalo, Ramiro y Pablo, a mi familia y amigos por el apoyo en distintos momentos de este proceso.

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de los otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Natalia Cristina Cadaviz

Publicaciones derivadas de esta tesis:

- **Cadaviz, N. C.** y Gatti, M. L. (noviembre 2022). Efecto del diseño de siembra y la frecuencia de defoliación sobre la oferta y calidad de pasturas base alfalfa. 45° Congreso Argentino de Producción Animal, virtual. p.127. Referato: Si.
- **Cadaviz, N. C.;** Gatti, M. L.; Millapán, L. y Rossi, J. L. (noviembre, 2018). Neighbors and defoliation frequencies impact on forage quality and offer of base Lucerne crops (*Medicago sativa L.*). II World Alfalfa Congress, Córdoba, Argentina. p.175. Referato: Si.

ÍNDICE GENERAL

Declaración	v
Publicaciones derivadas de esta tesis:	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvi
Capítulo 1. Introducción general.....	1
1.1. Planteo del problema	2
1.2. Marco teórico y revisión de antecedentes	3
1.3. Objetivos de la tesis.....	7
1.4. Organización de la tesis	7
Capítulo 2. Oferta y calidad forrajera en pasturas de base alfalfa	9
2.1. Introducción	10
2.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones	13
2.2. Materiales y métodos	14
2.1.2. Sitio y diseño experimental.....	14
2.1.3. Condiciones ambientales	17
2.1.4. Mediciones	18
2.1.5. Análisis estadístico	20
2.3. Resultados.....	20
2.3.1. Eficiencia de interceptación de la radiación por los canopeos	20
2.3.2. Oferta de materia seca de la pastura y de las especies componentes: tasas de crecimiento.....	21
2.3.3. Calidad forrajera	23
• Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	23
• Altura total de alfalfa.....	24
2.4. Discusión	25

2.4.1.	Eficiencia de intercepción de la radiación por los canopeos	25
2.4.2.	Oferta de materia seca de la pastura y de las especies: tasas de crecimiento ..	25
2.4.3.	Calidad forrajera	29
	• Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	29
	• Altura total de alfalfa.....	30
2.5.	Conclusiones	31
 Capítulo 3. Variabilidad temporal de la oferta y la calidad forrajera en alfalfa		33
3.1.	Introducción	34
	3.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones	36
3.2.	Materiales y métodos	37
	3.2.1. Sitio y diseño experimental.....	37
	3.2.2. Tratamiento de defoliación y número de corte.....	38
	• Condiciones ambientales	39
	3.2.3. Mediciones	40
	3.2.4. Análisis estadístico	41
3.3.	Resultados.....	42
	3.3.1. Oferta de alfalfa: variabilidad temporal en las tasas de crecimiento.....	42
	3.3.2. Calidad: variabilidad temporal en los componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	45
3.4.	Discusión	47
	3.4.1. Oferta de alfalfa: variabilidad temporal en la tasa de crecimiento.....	47
	3.4.2. Calidad: variabilidad temporal en los componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	51
3.5.	Conclusiones	53
 Capítulo 4. Variabilidad vertical de la oferta y la calidad forrajera en pasturas de base alfalfa.....		54
4.1.	Introducción	55
	4.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones	57
4.2.	Materiales y métodos	58
	4.2.1. Sitio y diseño experimental.....	58
	4.2.2. Condiciones ambientales	59

4.2.3.	Mediciones	60
•	Contenido de minerales	62
4.2.4.	Análisis estadístico	62
4.3.	Resultados	63
4.3.1.	Estratificación vertical de la oferta en alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo	63
4.3.2.	Estratificación vertical de la calidad de alfalfa y de la pastura	65
•	Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	65
•	Contenido de minerales en la pastura	67
4.4.	Discusión	70
4.4.1.	Estratificación vertical de la oferta en alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo	70
4.4.2.	Calidad forrajera	72
•	Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa	72
•	Contenido de minerales en la pastura	73
4.5.	Conclusiones	76
Capítulo 5. Conclusión general		78
5.1.	Principales hallazgos del trabajo de tesis	79
5.2.	Implicancias prácticas	82
5.3.	Perspectivas para futuras investigaciones	83
Bibliografía general		86
Anexo: Análisis estadísticos		98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tratamientos resultantes de la combinación de tres diseños de siembra (parcela principal) por dos tratamientos de defoliación (parcela dividida)	16
Tabla 2.2: Plantas establecidas (50 días desde la siembra -dds-) para tres diseños de siembra de pasturas de base alfalfa	16
Tabla 2.3: Resumen de variables ambientales de interés durante el ciclo del cultivo. El tiempo térmico acumulado (TT_ac), cantidad de tiempo térmico acumulado basado en la temperatura media (tm). Se consideró una temperatura base (tb) para alfalfa de 1°C cuando la temperatura media (t_m) < 15°C, y 5°C cuando la t_m.> 15°C (Brown <i>et al.</i> , 2005). Para pasto ovinillo (PO), se consideró tb= 0°C (Gatti <i>et al.</i> , 2023). Se presentan datos promedios y error estándar cuando aplica.....	17
Tabla 2.4: Resultados del análisis de varianza de efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura de alfalfa consociada con pasto ovinillo, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), del tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía) y su interacción sobre la eficiencia de interceptación de luz (eRMi), tasas de crecimiento (TC) de la pastura, alfalfa y pasto ovinillo, TC de hojas (H) y tallos (T), relación hoja:tallo y altura de alfalfa (n=4). Se muestran los valores de (gln,gld) F y p: *** p<0,001; ** p<0,01; *p<0,05 y ns= diferencias no significativas.....	21
Tabla 3.1: Descripción de fechas de corte, días entre cortes (Días_ec), tiempo térmico acumulado entre cortes (TT_ac), fotoperíodo al momento del corte (Fotop.), radiación incidente acumulada entre cortes (Rad.i_ec) y temperatura promedio (Temp_pr) del período. Para los tratamientos de defoliación temprana y tardía.	39
Tabla 3.2: Resultados del análisis de varianza, efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura consociada con pasto ovinillo, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), el tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía), la fecha de corte (5 cortes para la defoliación tardíos y 6 cortes para la defoliación tempranos) y su interacción sobre: la tasas de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas (H) y tallos (T) y relación hoja:tallo (n=4). Se muestran los valores de (gln,gld)F y p: *** p<0,001; ** p<0,01; *p<0,05 y ns= diferencias no significativas	43
Tabla 3.3: Valores de oferta por corte de alfalfa, hojas y tallos (gMS/m ²) y porcentaje de la oferta del corte sobre la oferta total del primer ciclo reproductivo para dos tratamientos de defoliación.....	44

Tabla 4.1: Resumen de variables ambientales de interés durante el ciclo del cultivo. El tiempo térmico acumulado (TT_ac), cantidad de días por temperatura media (tm). Se consideró una temperatura base (tb) para alfalfa de 1°C cuando la temperatura media (t_m) < 15°C, y 5°C cuando la t_m > 15°C (Brown *et al.*, 2005). Se presentan datos promedios61

Tabla 4.2: Resultados del análisis de varianza, efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura de alfalfa consociada con pasto ovido, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), el tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía), el estrato (tres niveles: apical, medio y basal) y su interacción sobre: la tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas (H), de tallos (T) y relación hoja:tallo de alfalfa, contenido fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), nitrógeno (N), sodio (Na) y cobre (Cu) en la pastura (n=4). Se muestran los valores de F(gln,gld) y p: *** p<0,001; ** p<0,01; *p<0,05 y ns= diferencias no significativas.....63

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Diseños de siembra en las parcelas principales: a) pastura consociada de $\alpha\alpha$ +PO con 200 semillas viables/m² alfalfa y 200 semillas viables/m² de PO, en hileras alternas a 0,175 m, b) pastura pura de $\alpha\alpha$ sembrada en hileras a 0,175 m con 400 semillas viables/m², alta densidad y c) pastura pura de alfalfa sembrada con 200 semillas viables/m² a 0,35 m entre hilera, baja densidad. En todos los diseños existió igual número y distancia entre plantas en la hilera, las diferencias estuvieron únicamente relacionadas a la distancia entre hileras de siembra y la densidad de siembra por m²15
- Figura 2.2:** Tasa de crecimiento (TC_Pastura, gMS/m².°Cd) para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovinillo - $\alpha\alpha$ +PO-, alfalfa pura con alta densidad - $\alpha\alpha$ - y alfalfa pura con baja densidad de siembra - $\alpha\alpha^{1/2}$ -) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE, barras llenas- y tardía -TA, barras rayadas-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas.....22
- Figura 2.3:** Tasa de crecimiento (TC_Pastura, gMS/m².día), a partir de la suma de sus componentes, para la pasturas consociadas de alfalfa ($\alpha\alpha$) y pasto ovinillo (PO), bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas, mayúsculas-TC_PO y minúsculas-TC_Alfalfa23
- Figura 2.4:** Tasa de crecimiento de hojas (gMS/m².°Cd, panel a) y tallos (gMS/m².°Cd, panel b) de alfalfa para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovinillo - $\alpha\alpha$ +PO-, alfalfa pura con alta densidad - $\alpha\alpha$ - y alfalfa pura con baja densidad de siembra - $\alpha\alpha^{1/2}$ -) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardío -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas, mayúsculas-Diseño de siembra y minúsculas-Defoliación24
- Figura 2.5:** Altura de alfalfa (cm) para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovinillo - $\alpha\alpha$ +PO-, alfalfa pura con alta densidad - $\alpha\alpha$ - y alfalfa pura con baja densidad de siembra - $\alpha\alpha^{1/2}$ -) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas24
- Figura 3.1:** Evolución de la temperatura media (panel a), la radiación incidente (panel b) y el fotoperíodo (panel c) durante el período experimental. Se señalan los momentos de cortes, corte

de limpieza (C0 azul), cortes 1 a 6 realizados con defoliación temprana -TE- (C1-C6 naranja) y cortes 1 a 5 realizados con defoliación tardía -TA- (C1-C5 verde).40

Figura 3.2: Dinámica de la tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa, gMS/m².°Cd) para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs44

Figura 3.3: Dinámica de la tasa de crecimiento de hojas (TC_H, gMS/m².°Cd, panel a), y tallos (TC_T, gMS/m².°Cd, panel b) de alfalfa, para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs46

Figura 3.4: Dinámica de la relación entre el contenido de hojas y tallos de alfalfa (hoja:tallo) para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs.....47

Figura 4.1: Tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa, gMS/m².°Cd) por estrato (apical, medio y basal). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$)56

Figura 4.2: Tasa de crecimiento de hojas (TC_H, gMS/m².°Cd, panel a) y tallos (TC_T, gMS/m².°Cd, panel b) de alfalfa, por estrato (apical, medio y basal) y para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras minúsculas muestran diferencias significativas entre estratos y tratamiento de defoliación, panel a. Letras minúsculas muestran diferencias significativas entre tratamientos de defoliación dentro de cada estrato y letras mayúsculas entre estratos, panel b64

Figura 4.3: Relación hojas y tallo de alfalfa (hoja:tallo) por estrato (apical, medio y basal) y para dos tratamientos de defoliación (temprana-TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras minúsculas muestran diferencias significativas para estratos y trataminetos de defoliación59

Figura 4.4: Contenido de fósforo (P, ppm) para tres diseños de siembra (pastura consociada con pasto ovido $-\alpha+\text{PO}$, panel a-, alfalfa pura con alta densidad $-\alpha\alpha$, panel b- y alfalfa pura con baja densidad $-\alpha\alpha^{1/2}$, panel c-) y tres estratos (apical, medio y basal). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre estratos, para cada diseños de siembra: $\alpha\alpha+\text{PO}$, $\alpha\alpha$ y $\alpha\alpha^{1/2}$, respectivamente.....**68**

Figura 4.5: Contenido de calcio (Ca, ppm) por estrato (panel a) y para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovido $-\alpha\alpha+\text{PO}$ -, alfalfa pura con alta densidad $-\alpha\alpha$ - y alfalfa pura con baja densidad $-\alpha\alpha^{1/2}$ -) y para dos tratamientos de defoliación (temprana $-\text{TE}$ - y tardía $-\text{TA}$ -, panel b). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas.....**69**

Figura 4.6: Contenido de magnesio (Mg, ppm) por estrato (apical, medio y basal), para dos tratamientos de defoliación (temprana $-\text{TE}$ - y tardía $-\text{TA}$ -). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas**69**

Figura 4.7: Contenido de nitrógeno (N, ppm) por estrato (panel a) y para dos tratamientos de defoliación (temprana $-\text{TE}$ - y tardía $-\text{TA}$ -, panel b). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas**70**

Resumen

Las pasturas de base alfalfa (*Medicago sativa* L.) se caracterizan por su variabilidad temporal y vertical en oferta de biomasa y calidad, dificultando su aprovechamiento bajo pastoreo. El diseño de siembra y el manejo de la defoliación determinan las relaciones de competencia entre individuos y, por lo tanto, la estructura del cultivo, el desarrollo temporal de órganos aéreos, y la calidad de estas pasturas. El objetivo de esta tesis fue establecer el diseño de siembra y el manejo de la defoliación que permitan modular la competencia y la variabilidad temporal y vertical en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo. Se estableció un experimento factorial con parcelas divididas, A la parcela principal se le asignó el diseño de siembra: alfalfa con baja densidad de siembra ($\alpha\alpha^{1/2}$), alfalfa con alta densidad ($\alpha\alpha$) o alfalfa consociada con pasto ovillo ($\alpha\alpha$ +PO). Cada parcela se dividió en dos sub-parcelas y se le asignó distinto manejo de la defoliación: temprana (TE, botón floral temprano) y tardía (TA, inicios de floración). Se midió la oferta de materia seca -MS- (tasa de crecimiento -TC- de la pastura y sus componentes), la calidad (relación hoja y tallo de alfalfa -H:T- y altura), la variabilidad temporal de la TC_Alfalfa y su H:T, y la variabilidad vertical de la TC_Alfalfa, la H:T y el contenido de minerales (nitrógeno -N-, fósforo -P-, calcio -Ca-, magnesio -Mg-, sodio -Na- y cobre -Cu-) de la pastura. Las pasturas puras de alfalfa ($\alpha\alpha^{1/2}$ y $\alpha\alpha$) con TE redujeron la oferta de MS, contrariamente, $\alpha\alpha$ +PO mantuvo la oferta por aumentos en las TC_PO que compensaron las menores TC_Alfalfa con TE. La TE mejoró la calidad (mayor H:T y menor altura). La variabilidad temporal de la oferta y calidad de alfalfa no se afectó por el diseño de siembra, pero la TE disminuyó su variabilidad temporal en oferta y calidad. Solo la variabilidad vertical de la calidad se vio afectada por los tratamientos evaluados. El diseño de siembra modificó la distribución vertical de P y el contenido de Ca, mientras que TE afectó la variabilidad vertical de H:T, la distribución de Mg y el contenido de N. No hubo cambios en el contenido y distribución de Na y Cu. Estos resultados demuestran que el diseño de siembra afecta escasamente la oferta, y su variabilidad, en pasturas de base alfalfa. La densidad de siembra no afecta la oferta, pero la inclusión de una gramínea compensaría la caída en las TC_Alfalfa bajo defoliaciones más frecuentes. El diseño de siembra no afectó la calidad de alfalfa, y su variabilidad. Por su parte, el manejo de la defoliación tuvo un efecto marcado. Defoliaciones en botón floral temprano aumentaron la calidad global de alfalfa, disminuyeron la variabilidad temporal de la oferta y homogeneizaron la distribución vertical de la calidad, lo que favorecería su aprovechamiento bajo pastoreo.

Palabras clave: competencia inter e intraespecífica, crecimiento y desarrollo del cultivo, consumo de forraje

Abstract

Pastures based on lucerne (*Medicago sativa* L.) are characterized by their temporal and vertical variability in biomass supply and quality, making their utilization under grazing challenging. Sowing design and defoliation management determine the competitive relationships among individuals and, therefore, the crop structure, the temporal development of aerial organs, and the quality of these pastures. The objective of this thesis was to establish the sowing design and defoliation management that allow modulating competition and temporal and vertical variability in lucerne-based pastures during their first reproductive period. A factorial experiment with split plots was established. The main plot was assigned the sowing design: lucerne with low sowing density ($\alpha\alpha^{1/2}$), lucerne with high density ($\alpha\alpha$) or lucerne mixed with orchardgrass ($\alpha\alpha+PO$). Each plot was divided into two sub-plots, and a different defoliation management was assigned to each: early defoliation (TE, early floral bud stage) and late defoliation (TA, early flower). Dry matter (DM) availability (pasture growth rate -GR- and its components), quality (alfalfa leaf-to-stem ratio -L:S- and height), the temporal variability of L:S and GR_Lucerne and the vertical variability of GR_lucerne, L:S, and pasture mineral content (nitrogen -N-, phosphorus -P-, calcium -Ca-, magnesium -Mg-, sodium -Na- and copper -Cu-), were measured. Pure lucerne pastures ($\alpha\alpha^{1/2}$ and $\alpha\alpha$) with TE reduced DM availability, conversely, $\alpha\alpha+PO$ maintained supply due to increases in GR_PO, compensating for lower GR_lucerne in TE. TE improved quality (higher L:S and lower height). Temporal variability of alfalfa availability and quality was not affected by sowing design, however, TE reduced its temporal variability in both availability and quality. Only the vertical variability of quality was affected by the treatments. Sowing design modified the vertical distribution of P and Ca content, while TE affected vertical variability of L:S, Mg distribution, and N content. There were no changes in Na and Cu content and distribution. These results demonstrate that sowing design has a limited effect on supply and its variability in lucerne-based pastures. Sowing density does not affect lucerne dry matter supply, but the inclusion of grass in the mixture would compensate for the decline in GR_lucerne under more frequent defoliation. Sowing design did not affect alfalfa quality, and its variability. On the other hand, defoliation management had a marked effect. Defoliations at early bud stage improved overall lucerne quality; decreased temporal variability of supply while homogenizing the vertical distribution of quality, favoring utilization under grazing.

Keywords: inter- and intra-specific competition; crop growth, and development; forage intake.

Capítulo 1. Introducción general

1.1. Planteo del problema

Existe un renovado interés en las pasturas como fuente principal de forraje en la producción de leche o carne. Esto se relaciona principalmente con el acceso a mercados diferenciados que valoran productos más saludables para el consumo humano (Bargo *et al.*, 2006; Morales-Almaráz *et al.*, 2010) y un mayor bienestar animal, mejorando su salud y respetando sus preferencias (Arnott *et al.*, 2017). Además, los sistemas con base pastoril ofrecen menor incertidumbre ante las fluctuaciones de los precios de insumos y productos (Tozer *et al.*, 2003), lo cual es especialmente relevante para los productores argentinos, que enfrentan fuertes fluctuaciones de precios (Jáuregui *et al.*, 2022). Sin embargo, los altos requerimientos de estos animales sólo pueden satisfacerse con pasturas diseñadas para ser altamente productivas y de calidad, junto con prácticas de manejo de la defoliación que maximicen su aprovechamiento por parte de los animales.

En los sistemas pastoriles, los forrajes proporcionan la mayor parte de los carbohidratos, proteínas, azúcares solubles, lípidos, minerales y vitaminas necesarios para la producción de carne y leche (Chilibroste, 2002). El consumo de estos nutrientes por parte de los animales depende de varios factores, como la oferta de forraje, la calidad de la pastura y la estructura del canopeo (Ungar y Noy-Meir, 1988; Parsons *et al.*, 1994; Illius *et al.*, 1995; Berone *et al.*, 2020; Jaurena *et al.*, 2021). Características específicas del canopeo, como densidad, altura, distribución vertical de sus componentes -hojas y tallos-, contenido de energía y nutrientes toman relevancia y condicionan la producción secundaria (Gregorini *et al.*, 2015; Oltjen y Gunter, 2015). Por este motivo es importante conocer cómo el diseño de siembra y el manejo de la defoliación afectan estas características y, por lo tanto, la producción animal.

1.2. Marco teórico y revisión de antecedentes

Decisiones culturales como el diseño de siembra (densidad, arreglo espacial y combinación de especies) y el manejo de la defoliación determinan las relaciones de competencia entre individuos, influyendo en la estructura del cultivo y la calidad de la pastura (Marriott y Carrère, 1998; Lemaire y Millard, 1999; Chapman, 2016). Por ello, en sistemas pastoriles con altos requerimientos, no solo es importante seleccionar especies de excelentes características forrajeras, sino también combinarlas y manejarlas de manera que favorezcan el consumo de nutrientes por los animales.

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una de las especies más elegidas, pura o consociada, por su alta productividad y calidad (Moot *et al.*, 2012b; Jáuregui *et al.*, 2022). Su productividad varía entre 7 y 27 t/ha.año, dependiendo del ambiente y el sistema de producción (Jáuregui *et al.*, 2022), con máximos rendimientos en un amplio rango de stand de plantas. En este sentido, Moot *et al.* (2012a) no encontraron diferencias en el rendimiento con densidades entre 7 y 16 kg/ha (150 y 300 plantas/m² en el primer año). Mientras que Sardiña *et al.* (2015), encontraron rendimientos similares con siembras de 14 y 20 kg/ha (393 y 562 semillas viables/m²). Esto se debe a la capacidad de alfalfa de compensar un menor número de plantas mediante el aumento de otros componentes del rendimiento, como el número y peso de los brotes principales y grado de ramificaciones (Moot *et al.*, 2012a). La competencia por luz entre los individuos es el factor que modula estos mecanismos y determina los cambios en el desarrollo morfológico de las plantas (Gosse *et al.*, 1988; Lemaire *et al.*, 2005; Baldissera *et al.*, 2014), influyendo también en la calidad de la biomasa a través de la relación hoja:tallo y la altura del canopeo (Berone *et al.*, 2020; Ta *et al.*, 2020). Además, la competencia por luz no solo depende de la densidad de siembra, sino también del arreglo espacial de las plantas. Arreglos equidistantes mejoran la oferta de materia seca al reducir la competencia intraespecífica

y aumentar la intercepción de luz por el canopeo (Mattera *et al.*, 2009, 2013). Por lo tanto, tanto la densidad como el arreglo espacial en el diseño de siembra, modulan la competencia por luz e impactan en la cantidad y calidad de la biomasa (altura y relación hoja:tallo), pero también en el tamaño y distribución de los órganos aéreos (Lemaire y Millard, 1999; Maamouri *et al.*, 2015).

A su vez, el diseño de siembra de pasturas también implica la inclusión de gramíneas de ciclo de crecimiento otoño invierno primaveral (OIP) y buena calidad forrajera. Ésta es una práctica recomendada para generar recursos forrajeros menos estacionales, por su ciclo de crecimiento contrastante, y con un mejor balance nutricional por el aporte adicional de fibra de la gramínea a los altos contenidos de proteína de la leguminosa (Maamouri *et al.*, 2017; Moot *et al.*, 2020). La mayor diversidad no solo mejora la nutrición del animal, sino también su salud y bienestar, al mismo tiempo que disminuye el impacto ambiental de los sistemas de producción (Distel *et al.*, 2020). Por ejemplo, se ha reportado que la inclusión de gramíneas consociadas con alfalfa reduce la emisión de gases de efecto invernadero del ganado (Ghani *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2023). Sin embargo, la relación competitiva que se establezca entre los integrantes de la mezcla generará cambios en la oferta, la calidad y la distribución de órganos aéreos de la pastura (Baldissera *et al.*, 2014; Maamouri *et al.*, 2015; Roscher *et al.*, 2016; Olivo *et al.*, 2022). Es esperable que diseños de siembra que incluyan gramíneas de baja competitividad por luz frente a alfalfa, reduzcan la competencia dentro del canopeo, aumentando la oferta y la calidad de la pastura (Bélanger *et al.*, 2020). Pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.), es una gramínea muy utilizada consociada con alfalfa, su complementariedad en el ciclo de crecimiento (OIP), su potencial productivo, calidad y tolerancia al sombreado (Devkota y Kemp, 1999; Belesky, 2005a,b; Peri *et al.*, 2007a,b; Xue *et al.*, 2023), la hacen

recomendable para la alimentación de animales de altos requerimientos en sistemas pastoriles.

Por otra parte, la forma en que se utilizan las pasturas de alfalfa es un factor determinante, junto al diseño de siembra, de la oferta y la calidad. Es conocida la relación de compromiso entre oferta y calidad en alfalfa (Ackerly *et al.*, 2000; Brink *et al.*, 2010; Berone *et al.*, 2020). En Argentina, el manejo tradicional de pasturas de alfalfa durante su ciclo reproductivo (primavera-verano) recomienda el pastoreo cuando alcanza el 10% de floración (Teixeira *et al.*, 2011; Berone *et al.*, 2020; Hoppen *et al.*, 2022; Jáuregui *et al.*, 2022). Sin embargo, este aprovechamiento en estados avanzados de madurez del cultivo reduce la eficiencia de utilización del forraje e incrementa la sustitución asociada al uso de suplementos en sistemas de alta producción (Jáuregui *et al.*, 2022). Por el contrario, cuando la alfalfa se cosecha en estados tempranos de madurez (previos al 10% de floración) la relación hoja:tallo aumenta, lo que mejora la digestibilidad, y el contenido de proteína y nutrientes, es decir la calidad de la biomasa (Cangiano y Pece, 2005; Brink *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2020; Ordoñez *et al.*, 2021; Eckberg *et al.*, 2022; Hoppen *et al.*, 2022). Sin embargo, esos aumentos en calidad suelen estar asociados a una menor oferta de materia seca (Teixeira *et al.*, 2007a; Ventroni *et al.*, 2010). Actualmente, existe un esfuerzo generalizado en establecer prácticas de manejo de la defoliación que optimicen la relación oferta:calidad de la biomasa y maximicen el aprovechamiento animal.

También existen factores característicos del cultivo de alfalfa que afectan su oferta y calidad, en el tiempo y el espacio, dificultando su aprovechamiento. En primer lugar, el desarrollo fenológico de alfalfa depende de la temperatura y del fotoperiodo, ya que las tasas de crecimiento del cultivo aumentan a medida que aumenta la duración del día (Moot *et al.*, 2001; Moot *et al.*, 2003). Esto genera, no solo una variabilidad temporal de

la oferta, sino también de su calidad al afectar los patrones de competencia por luz dentro del canopeo (Gosse *et al.*, 1988; Ackerly *et al.*, 2000; Cangiano y Ventroni, 2022). Esta respuesta combinada a la temperatura y al fotoperíodo hace difícil establecer pautas de defoliación fijas, ya sea en días o en tiempo térmico. En segundo lugar, las pasturas puras de alfalfa muestran variabilidad vertical en la acumulación de biomasa, mayor en los estratos intermedios del canopeo, y en su calidad (relación hoja:tallo), decreciente desde el ápice hasta la base de la planta (Romero *et al.*, 1995; Cangiano y Ventroni, 2022). Esta variabilidad podría acentuarse en situaciones de alta competencia por luz por baja frecuencia de defoliación. En esta situación, es esperable, que exista una desigual distribución de la radiación dentro del canopeo, mayor elongación de tallos y menor relación hoja:tallo en los estratos sombreados (Lemaire *et al.*, 2005). Los cambios en la elongación de los tallos, debido a la competencia, a aumentos en las tasas de crecimiento del cultivo y a características morfológicas de las variedades utilizadas, dificultan la definición de pautas de defoliación basadas en la altura del canopeo. Moderar estas variabilidades temporal y vertical, y establecer pautas de defoliación menos dependientes de las condiciones ambientales y asociadas a características morfológicas fácilmente identificables a campo, podrían mejorar la eficiencia de utilización de estas pasturas en sistemas ganaderos de alta producción.

Es necesario un mayor conocimiento en diseños de siembra de base alfalfa y prácticas de manejo de la defoliación que generen pasturas más estables temporal y verticalmente, a la vez que maximicen la relación entre la oferta y la calidad de la biomasa y optimicen el aprovechamiento por parte de los animales.

1.3. Objetivos de la tesis

Se estableció el siguiente objetivo general:

Evaluar el impacto que ejerce el diseño de siembra y el manejo de la defoliación sobre la oferta y la calidad de la materia seca, y su variabilidad temporal y vertical, en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo.

Los objetivos específicos fueron:

- I. Evaluar el impacto sobre la oferta de materias seca y las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera, en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo (capítulo 2).
- II. Evaluar el impacto sobre la variabilidad temporal de la oferta de materia seca y las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera de alfalfa durante su primer ciclo reproductivo (capítulo 3).
- III. Evaluar el impacto sobre la variabilidad vertical de la oferta de materia seca y las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera, en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo (capítulo 4).

1.4. Organización de la tesis

Además de este capítulo introductorio, esta tesis contiene tres capítulos de resultados, asociados a los objetivos específicos, y un capítulo final de conclusiones generales. En todos los capítulos se estudió la oferta de materia seca (MS) y la calidad de pasturas de base alfalfa bajo tres diseños de siembra diferentes (pastura consociadas con pasto ovillo, pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra y pastura pura de alfalfa con alta densidad de siembra) y dos manejos de la defoliación asociados a características

morfológicas fácilmente identificables a campo (defoliación temprana, más frecuente y defoliación tardía, menos frecuente). En cada uno de los capítulos, el análisis hizo foco en determinaciones temporales o espaciales de estas variables. En el 2^{do} capítulo se estudió la oferta y la calidad forrajera promedio en pasturas de base alfalfa. Para ello se evaluó la oferta de MS y la calidad (relación hoja:tallo y la altura de alfalfa). En el 3^{er} capítulo, se estudió la variabilidad temporal de la oferta de MS y la calidad (relación hoja:tallo) de alfalfa. En el 4^{to} capítulo se evaluó la variabilidad vertical de la oferta de MS y la calidad (relación hoja:tallo en alfalfa y contenido de minerales en la pastura). En el 5^{to} y último capítulo, se realiza un análisis integrado de los resultados, finalizando con comentarios y conclusiones generales. Finalmente, detalles de los análisis estadísticos se presentan en un anexo que contiene tablas consecutivas para cada capítulo (se hará referencia a ellas en los capítulos de resultados como Tablas A seguido del número de capítulo y orden).

Capítulo 2. Oferta y calidad forrajera en pasturas de base alfalfa

2.1. Introducción

La oferta y la calidad de las pasturas son factores determinantes del consumo de forraje y la performance productiva de animales en pastoreo. Si bien, estas características, son atributos de las especies utilizadas, también son influenciadas por diversos manejos culturales (Dove, 1996; Chilibroste *et al.*, 2005). Entre las decisiones clave en el manejo de pasturas se incluyen el diseño de siembra (densidad, arreglo espacial entre plantas y combinación de especies) y el manejo de la defoliación (frecuencia, momento e intensidad). La interacción entre estos factores, diseño de siembra y tratamiento de la defoliación determina la estructura del canopeo (Marriott y Carrère, 1998). Siendo la estructura del canopeo, uno de los factores que explica el comportamiento ingestivo de animales en pastoreo (Chilibroste *et al.*, 2005; Jaurena *et al.*, 2021).

En pasturas puras de alfalfa, la estructura del canopeo está influenciada por la habilidad de esta especie para compensar la relación tamaño:densidad entre sus individuos. Es conocida la capacidad de alfalfa de contrarrestar, hasta cierto umbral, menores densidades de siembra con un aumento en el tamaño individual de las plantas (Volenc *et al.*, 1987; Teixeira *et al.*, 2007a; Maamouri *et al.*, 2015; Berti y Samarappuli, 2018). En este sentido, Moot *et al.*, (2012a), encontraron que aumentos en la densidad de siembra (250 a 550 semillas/ha) generaron diferentes stand de plantas establecidas (150 a 300 plantas/m²), aunque sin diferencias significativas en la oferta de materia seca en el primer año (9,7 t MS/ha). Otros autores reportaron que densidades entre 150 y 250 plantas por metro cuadrado maximizaban los rendimientos en el primer año después de la siembra (Tesar y Marble, 1988). Sin embargo, no solo la densidad de siembra influye sobre la oferta y la estructura del canopeo. El arreglo espacial entre las plantas afecta directamente la estructura del canopeo y la capacidad del cultivo de captar recursos del ambiente, particularmente la radiación incidente (Mattera *et al.*, 2009, 2013). Se ha reportado que

arreglos espaciales con una distribución de plantas más equidistantes, aumentaron la oferta de materia seca por una menor competencia intraespecífica y una mayor intercepción de luz por el canopeo. Arreglos espaciales más equidistantes se lograrían manteniendo la densidad de siembra, pero reduciendo la distancia entre hileras. En pasturas densas de alfalfa (250 plantas/m²) se registraron incrementos de hasta un 40% en la oferta de materia seca entre las distancias de siembra de 15-17,5 cm y >20 cm (Mattera *et al.*, 2009, 2013; Olivo y Mattera, 2022). Sin embargo, pueden manejarse simultáneamente la densidad y el arreglo de siembra, modificando la competencia por luz dentro del canopeo, el tamaño y disposición de los órganos aéreos (Lemaire *et al.*, 2005; Baldissera *et al.*, 2014) y, consecuentemente, la productividad y la calidad de la pastura.

Así mismo, en diseños consociados con gramíneas, es esperable que se establezcan otras relaciones de competencia entre los individuos de la pastura. En este sentido, Cruz y Lemaire (1986), comparando cultivos puros y consociados de alfalfa y pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L., gramínea de crecimiento otoño invierno primaveral -OIP-) a igual densidad de siembra global, no encontraron diferencias en la oferta de materia seca. Y observaron que las plantas de alfalfa sufrieron una mayor competencia por luz cuando crecían en monocultivo, respecto a cuando lo hacían consociadas con pasto ovillo. Sin embargo, otros autores (Maamouri *et al.*, 2017), encontraron que plantas de alfalfa creciendo consociadas con *Lolium arundinaceum* Schreb. (festuca, gramínea OIP), produjeron más materia seca, explicado por una mayor cantidad de tallos, pero sin cambios en el largo de éstos, respecto a cuando crecían en monocultura. Estas diferencias podrían estar explicadas por las densidades de siembra utilizadas, posiblemente mayores en este trabajo respecto al de Cruz y Lemaire (1986) lo que aumentaría la competencia ejercida entre las plantas de alfalfa respecto a la ejercida por vecinos gramínea. Se podría esperar entonces que diseños densos de alfalfa consociados con pasto ovillo, y con una

adecuada distribución espacial, generen una menor competencia por luz, pasturas más productivas, bajas y de mayor calidad.

Por su parte, la defoliación tiene un rol central como modulador de las interacciones competitivas, impacta sobre la estructura y, por lo tanto, sobre la oferta y la calidad de la pastura (Briske y Heitschmidt, 1991; Teixeira *et al.*, 2007*a,b*; Brink *et al.*, 2010; Bélanger *et al.*, 2020). Defoliaciones más frecuentes generarían canopeos más bajos y de mayor calidad (Ordoñez *et al.*, 2021). Sin embargo, no habría una respuesta única respecto a la productividad. Se encontraron disminuciones en la oferta de materia seca cuando la cantidad de días entre defoliación fueron menores (Teixeira *et al.*, 2007*a*; Ventroni *et al.*, 2010), asociado con una menor intercepción de la radiación por un reducido desarrollo del área foliar. Sin embargo, cuando la pauta de defoliación se estableció en tiempo térmico o grados día (GD), siguiendo los cambios estacionales asociados al desarrollo del cultivo, se encontró un mayor rendimiento en las defoliaciones a 350 GD versus las defoliaciones a 500 GD. Esto se asoció a un óptimo periodo de recuperación de la pastura sin aumentos excesivos de la biomasa sombreada y la respiración de mantenimiento (Berone *et al.*, 2020). Es decir que los resultados obtenidos por cambios en la frecuencia de defoliación variarían si estos se hacen fijando el tiempo en días o en tiempo térmico. Sin embargo, hay escasa información respecto a cómo pautas de defoliación asociadas a estados morfológicos del cultivo (respuesta simultánea a la temperatura y el fotoperíodo y fácilmente identificables a campo), podrían modificar su oferta y calidad.

Entonces, el manejo de la defoliación, las características de las especies (velocidad de recuperación, tamaño de cada genotipo y contenido de reservas) y su interacción, regulan las dinámicas competitivas en el espacio, afectando la estructura y el funcionamiento de la pastura. Pero, se desconoce cómo diferentes manejos de la defoliación pueden impactar

en la interacción competitiva en diferentes diseños de siembra y, por lo tanto, sobre la estructura, la oferta y la calidad forrajera de pasturas consociadas.

2.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones

El objetivo de este capítulo fue evaluar el impacto que ejerce el diseño de siembra y el manejo de la defoliación sobre la oferta de materia seca y las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera, en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo.

La hipótesis que guió este capítulo fue:

Los diseños de siembra menos competitivos aumentan la captación y distribución de luz dentro del canopeo, mejorando la oferta de materia seca y su calidad. Las defoliaciones tempranas, y más frecuentes, incrementan la distribución de luz pero reducen su captación, disminuyendo la oferta de materia seca pero mejorando su calidad.

De la hipótesis se desprenden las siguientes predicciones:

1. Diseños de siembra consociados con pasto ovillo aumentarán las tasas de crecimiento de la pastura y la relación hoja:tallo, y disminuirán la altura de alfalfa.
2. Diseños con baja densidad de siembra únicamente aumentarán la relación hoja:tallo y disminuirán la altura de alfalfa.
3. Defoliaciones tempranas, disminuirán las tasas de crecimiento de la pastura, aumentarán la relación hoja:tallo y disminuirá la altura de alfalfa.

2.2. Materiales y métodos

2.1.2. Sitio y diseño experimental

El experimento se realizó en el campo experimental de la Facultad de Agronomía-UBA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina (FAUBA, 34° 35' 29" S, 58° 29' 00" W). El análisis químico del horizonte superficial del suelo indicó un pH de 5,85 (1:2,5), conductividad eléctrica de 0,20 dS m/m, carbono de 12,9 mg/g (Walkley Black), nitrógeno de 1,5 mg/g (Kjeldhal) y nitratos de 1,86 mg/kg (SNEDD). El contenido de fósforo extractable mostró una distribución espacial en parches en los 20 cm superficiales del suelo, entre 5,26 y 10,93 mg/kg (Bray and Kurtz 1). Por este motivo, todas las parcelas se fertilizaron con fósforo (P) a la siembra a fin de elevar su contenido edáfico a 30 ppm (Rubio *et al.*, 2012), en virtud de los elevados requerimientos de alfalfa (Quintero y Boschetti, 2004).

Se establecieron cuatro bloques con tres parcelas de 3 m por 3 m (9 m²), doce parcelas en total. A cada parcela, se le asignó al azar el tratamiento “diseño de siembra” con tres niveles: *Medicago sativa* L. -alfalfa- consociada con gramínea -*Dactylis glomerata* L. - pasto ovillo- ($\alpha\alpha$ +PO, hileras alternas de las especies a 0,175 m), alfalfa pura sembrada con alta densidad ($\alpha\alpha$, hileras a 0,175 m) y alfalfa pura sembrada con baja densidad ($\alpha\alpha^{1/2}$, hileras distanciadas a 0,35 m). En otoño (17/mar/17), se sembró 400 semillas viables/m² para los tratamientos $\alpha\alpha$ +PO (50% de cada especie) y $\alpha\alpha$, y 200 semillas viables/m² en los tratamientos $\alpha\alpha^{1/2}$. Con esto se logró que la distancia entre plantas en la hilera sea igual en todos los tratamientos, pero con distintos arreglos espaciales entre plantas. Las plantas en los tratamientos con alta densidad - $\alpha\alpha$ +PO y $\alpha\alpha$ - tuvieron un arreglo espacial más equidistantes que los tratamientos de baja densidad - $\alpha\alpha^{1/2}$ - (rectangularidad 6 y 12 respectivamente, Mattera *et al.*, 2009, 2013). Este diseño experimental involucra parcelas

con diseños aditivos y sustitutivos de alfalfa –competencia intra e interespecífica- (Cruz y Lemaire, 1986; Cruz y Soussana, 1997, Figura 2.1).

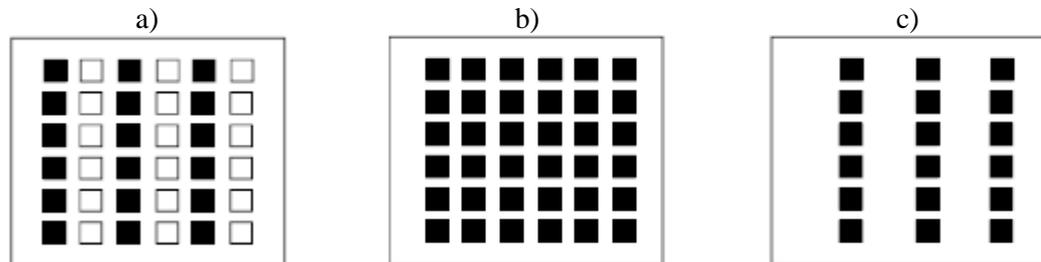


Figura 2.1: Diseños de siembra en las parcelas principales: a) pastura consociada de $\alpha\alpha$ +PO con 200 semillas viables/m² alfalfa y 200 semillas viables/m² de PO, en hileras alternas a 0,175 m, b) pastura pura de $\alpha\alpha$ sembrada en hileras a 0,175 m con 400 semillas viables/m², alta densidad y c) pastura pura de alfalfa sembrada con 200 semillas viables/m² a 0,35 m entre hilera, baja densidad. En todos los diseños existió igual número y distancia entre plantas en la hilera, las diferencias estuvieron únicamente relacionadas a la distancia entre hileras de siembra y la densidad de siembra por m². Fuente: adaptado Cruz y Lemaire, 1986

Al inicio del estado reproductivo de alfalfa, cada una de las doce parcelas se dividió en dos sub-parcelas y se les asignó aleatoriamente el tratamiento de “defoliación” con dos niveles: temprana, más frecuente (TE) y tardía, menos frecuente (TA). Éstos se corresponden a botón floral temprano (E3) e inicios de floración (E5) respectivamente, de la escala de desarrollo morfológico definido por Kalu y Fick (Kalu y Fick, 1981; Fick y Mueller, 1989). Las defoliaciones TE fueron definidas como defoliaciones anticipadas respecto a la defoliación tradicional en el manejo de alfalfa (10% de floración, -Kloster y Zanivoni, 2007; Kloster *et al.*, 2022-), asociado en este trabajo a las defoliaciones TA.

Se estableció así un arreglo factorial con parcelas divididas en bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al factor diseño de siembra y la parcela dividida, a los tratamientos de defoliación. Los seis tratamientos resultantes fueron $\alpha\alpha^{1/2}$ -TE; $\alpha\alpha^{1/2}$ -TA, $\alpha\alpha$ -TE, $\alpha\alpha$ -TA, $\alpha\alpha$ +PO -TE y $\alpha\alpha$ +PO -TA (Tabla 2.2).

Tabla 2.1: Tratamientos resultantes de la combinación de tres diseños de siembra (parcela principal) por dos tratamientos de defoliación (parcela dividida).

Tipo de diseños		Nº tratamiento	Tratamiento de defoliación
a)	Alfalfa consociada con pasto ovillo	1	Temprana- en botón floral temprano
		2	Tardía- en inicio de floración
b)	Alfalfa pura con alta densidad	3	Temprana- en botón floral temprano
		4	Tardía- en inicio de floración
c)	Alfalfa pura con baja densidad	5	Temprana- en botón floral temprano
		6	Tardía- en inicio de floración-

Se utilizaron variedades comerciales tanto de alfalfa (Queen 910 -grado de reposo 9) como de pasto ovillo (Porto).

A los 50 días desde la siembra se evaluó la eficiencia de establecimiento y el logro inicial para los objetivos propuestos (tabla 2.1, Sardiña *et al.*, 2014 y Sim *et al.*, 2015). Se contabilizaron 131 plantas/m² en la pastura pura de alfalfa con baja densidad, 254 y 255 plantas/m² en la pastura pura de alfalfa con alta densidad y en la pastura consociada con pasto ovillo respectivamente (Tabla 2.1).

Tabla 2.2: Plantas establecidas (50 días desde la siembra -dds-) para tres diseños de siembra de pasturas de base alfalfa.

Diseño de siembra		Semillas totales viables/m ²		Plantas objetivo/m ² (a establecimiento)		Plantas logradas/m ² (50 dds)	
Alfalfa (Alf) consociada con pasto ovillo (PO), sembrada con alta densidad - hileras alternas a 0,175 m-.	Alf	200	400	100-125	200-250	156	255
	PO	200		100-125		99	
Alfalfa pura sembrada con alta densidad - 0,175 m entre hileras-.		400		200-250		254	
Alfalfa pura sembrada con baja densidad -0,35 m entre hileras-.		200		100-125		131	

Previo al inicio del período de floración de alfalfa, se realizó un corte (corte inicial, 17/oct), con el objetivo de emparejar las parcelas antes de iniciar los tratamientos de defoliación. A partir de ese primer corte, los tratamientos fueron defoliados cada vez que los cultivos alcanzaron el estado morfológico objetivo (botón floral temprano o inicio de

floración) para cada tratamiento (TE y TA), hasta el final del período de floración de alfalfa (siguiente otoño). Para definir el momento adecuado de corte, al inicio de cada rebrote, se eligieron al azar, y se marcaron con cintas de colores, 15 individuos de alfalfa por sub-parcela (Teixeira *et al.*, 2007b; Berone *et al.*, 2020). Así, cuando el 50% de esos brotes marcados alcanzaron el estado morfológico buscado se procedió al corte y cosecha de las muestras. De esta manera, durante el período experimental, se obtuvieron seis cortes en 121 días en el tratamiento TE y cinco cortes en 135 días en TA (Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Resumen de variables ambientales de interés durante el ciclo del cultivo. El tiempo térmico acumulado (TT_{ac}), cantidad de tiempo térmico acumulado basado en la temperatura media (t_m). Se consideró una temperatura base (tb) para alfalfa de 1°C cuando la temperatura media (t_m) < 15°C, y 5°C cuando la t_m > 15°C (Brown *et al.*, 2005). Para pasto ovido (PO), se consideró tb= 0°C (Gatti *et al.*, 2023). Se presentan datos promedios y error estándar cuando aplica.

	Temprano (TE) (Botón floral temprano)			Tardío (TA) (Inicio de floración)		
	αα+PO	αα	αα½	αα+PO	αα	αα½
Corte inicial	17/oct	17/oct	17/oct	17/oct	17/oct	17/oct
Corte final	16/feb	14/feb	14/feb	2/mar	28/feb	28/feb
Duración del período experimental (días)	121 (± 0,67)			135 (± 0,67)		
TT _{ac} alfalfa (°Cd)	2357 (± 20,75)			2640 (± 20,17)		
TT _{ac} PO (°Cd)	3157			3358		
Número de cortes	6			5		
Días promedio entre corte	20 (± 0,11)			27 (± 0,13)		
TT _{ac} entre cortes alfalfa (°Cd)	393 (± 3,46)			528 (± 4,03)		
TT _{ac} entre cortes PO (°Cd)	526			672		
TT _{ac} por día alfalfa (°Cd)	19,54 (± 0,07)			19,60 (± 0,09)		
TT _{ac} por día PO (°Cd)	26			25		

Durante todo el período experimental se realizó desmalezado manual de las parcelas y riegos eventuales a fin de evitar déficits hídricos.

2.1.3. Condiciones ambientales

Durante el período experimental la temperatura fue en promedio de 24,5°C, incrementándose entre octubre y febrero (20 y 26,5°C, respectivamente). Por su parte la

radiación incidente tuvo un valor promedio de 20 MJ/m².d. Finalmente, el fotoperíodo al inicio del período experimental presentó valores de 13,98 hs, alcanzó el valor máximo (15,46 hs) entre el 19 y el 22 de diciembre y concluyó el período con 13,75 hs a fines de verano. Traspaso el umbral de 14 hs establecido como fotoperíodo crítico por Teixeira *et al.* (2011), el 18 de octubre y el 23 de febrero, en aumento y disminución respectivamente.

2.1.4. Mediciones

Previo a cada corte, se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA) por encima del canopeo (RFA₀) y al ras del suelo (debajo del canopeo, RFA₁), dos mediciones en cada posición, paralela y perpendicular a la hilera de siembra. Se utilizó un radiómetro (barra de aluminio de 1 m de longitud- Flujo de fotones = μMOL/m².s, marca comercial Cavadevices®). A través de la diferencia de radiación promedio en ambas posiciones se estimó la radiación máxima interceptada por el canopeo, previo al corte (RMi, Mj/m²), ecuación 1.

$$RMi \text{ (Mj/m}^2\text{)} = RFA_0 \text{ (Mj/m}^2\text{)} - RFA_1 \text{ (Mj/m}^2\text{)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Luego la eficiencia de intercepción de la radiación (eRMi, %), se estimó a través de la relación entre RMi y la RFA₀, ecuación 2.

$$eRMi \text{ (\%)} = \frac{RMi \text{ (Mj/m}^2\text{)}}{RFA_0 \text{ (Mj/m}^2\text{)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Se realizaron cortes y cosechas utilizando un marco de 30 cm por 30 cm dejando un remanente de 5 cm (oferta de biomasa con alta intensidad de defoliación). Cada corte corresponde a una única muestra por parcela, dos hileras en los tratamientos de alta densidad (αα y αα+PO) y una hilera en los tratamientos de baja densidad (αα½). Luego de cada muestreo se procedió al corte del resto de la sub-parcela con idéntico remanente.

Las muestras de biomasa cosechada fueron separadas, primero por especie (alfalfa y pasto ovillo) en las pasturas consociadas, y luego se separó la biomasa de alfalfa en sus componentes tallo (T) y hoja (folíolo+pecíolo, H). Las muestras fueron secadas en estufa (60 °C) hasta peso seco constante (no fueron corregidas a 105°C), pesadas y ajustadas a una misma unidad de superficie (m²). Se determinó así el peso parcialmente seco (PS, gMS/m²) por corte. Estas determinaciones parciales se sumaron para obtener un valor total (g/m²) de oferta de materia seca -MS- (T+H) y de sus componentes (T y H), durante el primer ciclo reproductivo de alfalfa (octubre a marzo, sumatoria de 6 cortes en TE y 5 cortes en TA). A partir de esos valores se determinó la relación hoja:tallo (PS_H/PS_T). Previamente a los cortes número 1, 2, 4 y 6, se midió la altura total del canopeo.

Todas las variables de oferta de MS fueron expresadas como tasa de crecimiento (TC) en tiempo térmico (TT_{ac}) para compensar en el análisis las diferencias en la duración de los períodos de rebrote entre los tratamientos (Tabla 2.3). Para esto, se calculó el tiempo térmico acumulado entre cortes usando como temperatura base (tb)= 1°C cuando la temperatura media (t.med.) fue menor a 15°C y tb= 5°C cuando la t.med. superaba ese valor (Brown *et al.*, 2005). De esta manera se obtuvieron los valores de TC de la pastura (TC_Pastura), TC de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas y TC tallos de alfalfa (TC_H y TC_T) a partir del cociente entre la oferta de MS, o sus componentes individuales, y el tiempo térmico acumulado en el mismo período (gMS/m².°Cd). En el caso de la TC de pasto ovillo (TC_PO), se realizó el mismo procedimiento, pero se utilizó una tb=0 °C (Gatti *et al.*, 2023).

Tanto la variable altura (Altura, cm) como la eficiencia de interceptación de la radiación (eRMi, %) se estimaron como un promedio de los registros obtenidos a lo largo del período experimental.

2.1.5. Análisis estadístico

Se ajustó un modelo estadístico acorde al diseño experimental utilizado, factorial en bloques completos con parcelas divididas. El experimento consistió en seis tratamientos (tipo de pastura con tres niveles y tratamiento de defoliación con dos niveles) en cuatro bloques, doce parcelas principales totales (diseño de siembra) y veinticuatro subparcelas totales (tratamiento de defoliación). Las variables evaluadas fueron la radiación máxima interceptada por el canopeo (RMi), la oferta de MS (TC_Pastura, TC_Alfalfa y TC_PO), los componentes del crecimiento aéreo (TC_H y TC_T), la relación hoja:tallo y la altura de alfalfa). Se realizó un análisis de varianza, con los efectos fijos “diseño de siembra” y “tratamiento de defoliación”, y los efectos aleatorios “bloques”, “parcelas” y “subparcelas”. Los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro Wilks) y homogeneidad de varianzas (gráfico de dispersión de residuos vs. predichos) fueron probados y aceptados.

Las diferencias significativas fueron evaluadas por medio de comparaciones múltiples (Tukey). Para los análisis se utilizó el paquete nlme v3.1-155 (Pinheiro *et al.*, 2021) y emmeans v1.7.3 (Lenth, 2022) del software R, versión 2022.02.0 (R Core Team, 2022) (R Core Team, 2022).

2.3. Resultados

2.3.1. Eficiencia de intercepción de la radiación por los canopeos

La eficiencia de intercepción de la radiación por el canopeo (eRMi, %), respondió únicamente al tratamiento de defoliación (Tabla 2.4 y Tabla A2.1).

Tabla 2.4: Resultados del análisis de varianza de efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura de alfalfa consociada con pasto ovido, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), del tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía) y su interacción sobre la eficiencia de intercepción de luz (eRMi), tasas de crecimiento (TC) de la pastura, alfalfa y pasto ovido, TC de hojas (H) y tallos (T), relación hoja:tallo y altura de alfalfa (n=4). Se muestran los valores de (gln, gld) F y p: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$ y ns= diferencias no significativas.

Variable	Efecto Diseño (D) (gln, gld) F y p	Efecto Defoliación (C) (gln, gld) F y p	Interacción Tipo, (gln, gld) F y p	Referencia
eRMi	ns	(1,6) 97,96 ***	ns	
TC_Pastura	ns	(1,9) 32,63 ***	D x C; (2,9) 4,45 *	Figura 2.2
TC_Alfalfa	(2,6) 12,77 **	(1,9) 38,78 ***	ns	Figura 2.3
TC_Pasto Ovido		(1,3) 17,46 *		Figura 2.3
TC_H	(2,6) 29,33 ***	(1,9) 52,95 ***	ns	Figura 2.4 a
TC_T	(2,6) 21,59 **	(1,9) 56,67 ***	ns	Figura 2.4 b
hoja:tallo	ns	(1,9) 12,25 **	ns	
Altura	(2,6) 9,32 *	(1,9) 267,81 ***	D x C; (2,9) 5,66 *	Figura 2.5

Los tratamientos de defoliación temprana tuvieron aproximadamente un 20% menos eficiencia de intercepción que los de defoliación tardía ($69 \pm 3,5\%$ vs. $90 \pm 1,9\%$).

Se observó una tendencia en la interacción diseño de siembra y tratamiento de defoliación ($F_{(2,6)} = 3,95$, $p = 0,08$, Tabla A2.1). Los tratamientos TE, presentaron los mayores valores de eRMi en las pasturas consociadas con pasto ovido ($\alpha\alpha + PO$, $76 \pm 7\%$) y los menores valores en la pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra ($\alpha\alpha^{1/2}$, $63 \pm 3,7\%$).

2.3.2. Oferta de materia seca de la pastura y de las especies componentes: tasas de crecimiento

La tasa de crecimiento de la pastura (TC_Pastura, $gMS/m^2 \cdot ^\circ Cd$) presentó una interacción entre los tratamientos diseño de siembra y defoliación (Tabla 2.4 y Tabla A2.2). La TC de la pastura consociada no respondió al cambio en el tratamiento de defoliación y no se diferenció de las TC_Pastura observadas en las pasturas puras de alfalfa (Figura 2.2). Las pasturas puras de alfalfa con defoliación TE tuvieron TC_Pastura

un 46% menores que con defoliaciones TA (Figura 2.2). La sumatoria de la materia seca (MS) cosechada fue de 10.650 ± 1.000 kgMS/ha para la pastura consociada con pasto ovillo y de 7.500 ± 740 kgMS/ha y 14.000 ± 1.500 kgMS/ha para las pasturas puras de alfalfa con defoliación TE y TA respectivamente.

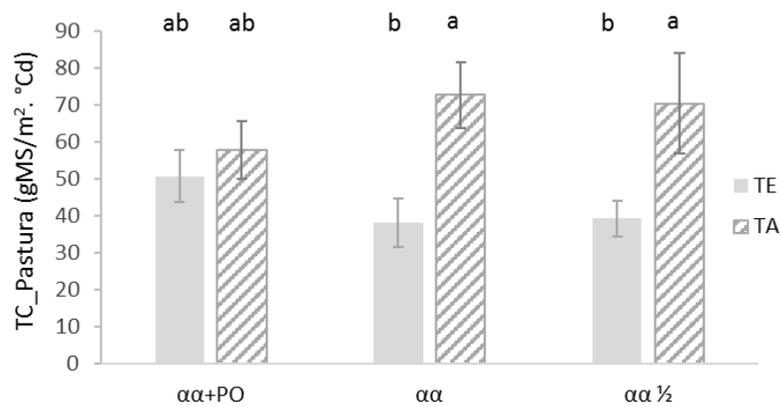


Figura 2.2: Tasa de crecimiento (TC_Pastura, gMS/m².°Cd) para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo - αα+PO-, alfalfa pura con alta densidad -αα- y alfalfa pura con baja densidad de siembra -αα½-) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE, barras llenas- y tardía -TA, barras rayadas-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas (α= 0,05). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

La tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa) fue un 47% más baja en la pastura consociada con pasto ovillo respecto a las pasturas puras de alfalfa (29 ± 6 gMS/m².°Cd vs. 55 ± 9 gMS/m².°Cd, Tabla 2.4 y Tabla A2.3), independientemente del tratamientos de defoliación. Los valores de contraste entre las medias fueron para αα-αα+PO $t=4,43$ y $p=0,01$, αα½-αα+PO $t=4,31$ y $p=0,01$ y αα½-αα $t=0,1$ y $p=0,99$. Así mismo, la defoliación TE tuvo un 46% menos TC_Alfalfa respecto a los tratamientos TA ($38 \pm 3,8$ gMS/m².°Cd vs. $71 \pm 7,5$ gMS/m².°Cd, Tabla 2.4 y Tabla A2.3).

La tasa de crecimiento de pasto ovillo (TC_PO, gMS/m².°Cd) fue un 100% mayor en las defoliaciones TE respecto a las defoliaciones TA (Tabla 2.4, Figura 2.3 y Tabla A2.4).

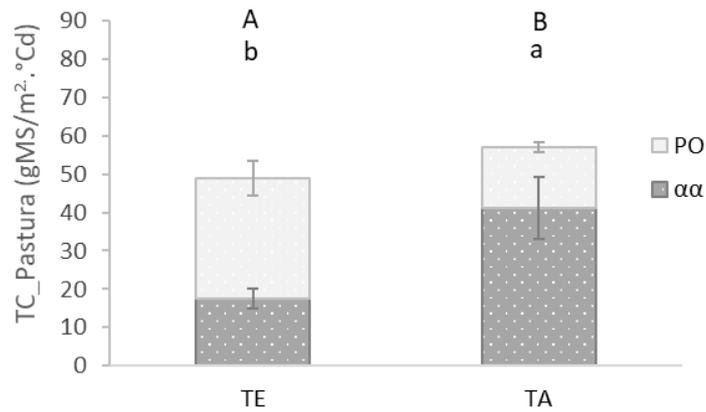


Figura 2.3: Tasa de crecimiento (TC_Pastura, gMS/m².día), a partir de la suma de sus componentes, para las pasturas asociadas de alfalfa (αα) y pasto ovillo (PO), bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedio, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas, mayúsculas-TC_PO y minúsculas-TC_Alfalfa.

2.3.3. Calidad forrajera

- **Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa**

El vecino gramínea afectó las tasas de crecimiento de hojas (TC_H, gMS/m².°Cd, Tabla 2.4 y Tabla A2.5) y de tallos (TC_T, gMS/m².°Cd, Tabla 2.4 y Tabla A2.6) de alfalfa. Ambos componentes fueron 50% menores en la pastura asociada con pasto ovillo respecto a las pasturas puras de alfalfa (Figura 2.4a).

Ambos componentes respondieron también al tratamiento de defoliación, pero con distinta magnitud (Figura 2.4b). Los tratamientos TE presentaron TC_H 46% menores (Tabla 2.4 y Tabla A2.5), y TC_T 56% menores (Tabla 2.4 y Tabla A2.6) respecto a la defoliación TA. Esta respuesta diferencial entre las TC_H y TC_T aumentó la relación entre el contenido de hojas y tallos (hoja:tallo) en los tratamientos TE respecto a los TA ($1,5 \pm 0,05$ vs. $1,3 \pm 0,06$, Tabla 2.4 y Tabla A2.7).

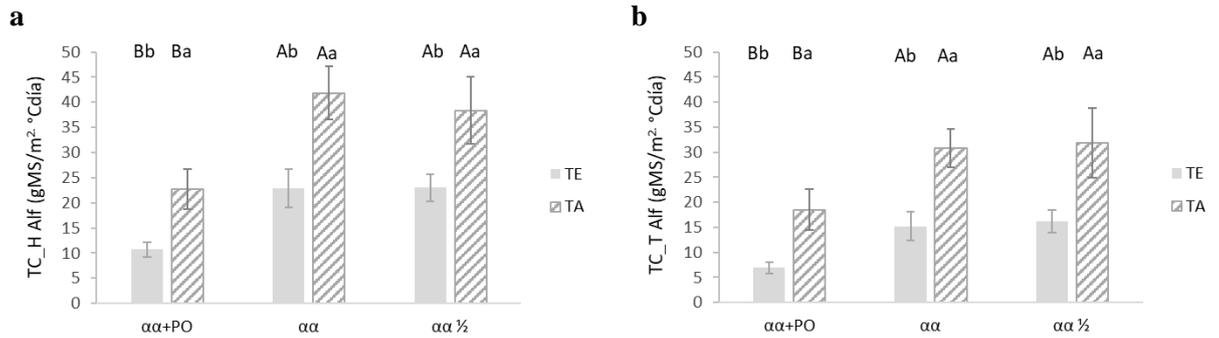


Figura 2.4: Tasa de crecimiento de hojas (gMS/m²·°Cd, panel a) y tallos (gMS/m²·°Cd, panel b) de alfalfa para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo -αα+PO-, alfalfa pura con alta densidad -αα- y alfalfa pura con baja densidad de siembra -αα½-) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardío -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas (α= 0,05). Letras diferentes muestran diferencias significativas, mayúsculas-Diseño de siembra y minúsculas-Defoliación.

- **Altura total de alfalfa**

La altura de alfalfa mostró un efecto de interacción entre el diseño de siembra y el tratamiento de defoliación (Tabla 2.4 y Tabla A2.8). Todos los diseños de siembra se comportaron en forma similar con defoliaciones TE. Por el contrario, con defoliaciones TA, la alfalfa consociada con pasto ovillo fue casi 10 cm (13%) más baja que en la pastura pura con alta densidad de siembra. La pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra no difirió de ninguno de los diseños anteriores (Figura 2.5).

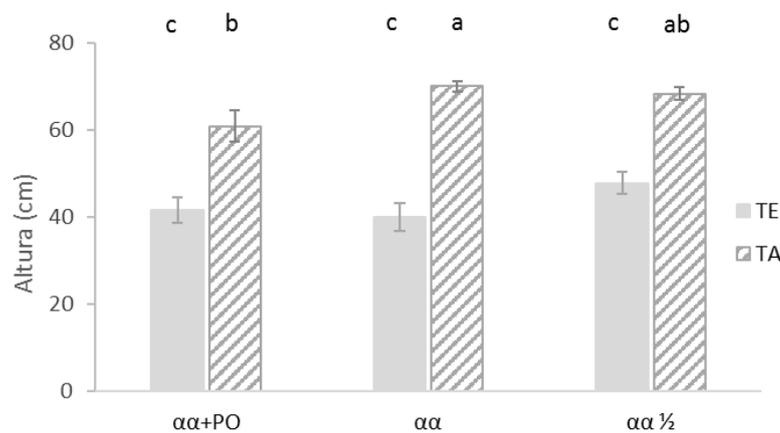


Figura 2.5: Altura de alfalfa (cm) para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo -αα+PO-, alfalfa pura con alta densidad -αα- y alfalfa pura con baja densidad de siembra -αα½-) y bajo dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas (α= 0,05). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

2.4. Discusión

2.4.1. Eficiencia de intercepción de la radiación por los canopeos

La eficiencia de intercepción de la radiación (eRMi) por el canopeo no fue afectada por el diseño de siembra indicando que la pastura consociada con pasto ovillo no interceptó más luz que los diseños puros de alfalfa con alta densidad de siembra. Estos resultados coinciden con los hallados por Ojeda *et al.* (2018) para pasturas consociadas de alfalfa y festuca en comparación con monocultivos de alfalfa. Por otro lado, las diferencias en los diseños puros de alfalfa no fueron suficientes para afectar la eRMi. Esto puede deberse a que, si bien el diseño puro de alfalfa con alta densidad tuvo un arreglo espacial más equidistante, ambos diseños tuvieron una adecuada distribución entre plantas que maximizó la intercepción de la radiación (Mattera *et al.*, 2013; Olivo, 2018).

Los tratamientos de defoliación temprana (TE) mostraron un 20% menos de eRMi, reducciones similares fueron reportadas por otros autores (Teixeira *et al.*, 2007b; Olivo, 2018). Esto se asocia a un menor tiempo de desarrollo del canopeo, un menor índice de área foliar -IAF- (Robison y Massengale, 1968), y una menor captura de energía por fotosíntesis (radiación fotosintéticamente activa interceptada -RFAi-). En este sentido tanto Teixeira *et al.* (2007b) como Robison y Massengale (1968), reportaron que canopeos de alfalfa defoliados frecuentemente no alcanzaban el índice de área foliar crítico (3,5-3,6) en la mayoría de los ciclos de rebrote.

2.4.2. Oferta de materia seca de la pastura y de las especies: tasas de crecimiento

La pastura consociada con pasto ovillo generó una oferta de materia seca (MS) similar a la de las pasturas puras de alfalfa (predicción 1; Figura 2.2). Otros autores reportaron resultados similares en pasturas consociadas de alfalfa y pasto ovillo (Cruz y Lemaire, 1986; Sheaffer *et al.*, 1990; Jones y Tracy, 2018; Aponte *et al.*, 2019; Tahir *et al.*, 2022).

A su vez, las TC_Pastura de la pastura consociada no se vieron afectadas por el tratamiento de defoliación, a diferencia de lo que ocurrió en las pasturas puras de alfalfa (predicción 3). La pastura consociada con pasto ovinillo presentó una oferta total intermedia (10.600 ± 1.000 kgMS/ha, datos que surgen a partir de la Figura 2.2 y Tabla 2.3), en términos absolutos, pero sin diferenciarse de ninguno de los tratamientos de defoliación de las pasturas puras de alfalfa (7.500 ± 740 y 14.000 ± 1.480 kgMS/ha).

Cuando se analizaron los componentes individuales responsables de la oferta total de la pastura (Figura 2.3), se observó que mientras en la pastura consociada con defoliación tardía predominaba el aporte de alfalfa (72%), bajo defoliación tempranas el mayor aporte lo hacía el pasto ovinillo (64%). Existen varios trabajos que muestran la preponderancia de alfalfa consociada con gramíneas. Cruz y Lemaire (1986), encontraron aportes del 77% y Tahir *et al.* (2022), del 78 % de materia seca (MS) de alfalfa a la pastura en el primer año luego de la siembra. Estos valores coinciden con los observados en este trabajo para la pastura consociada con pasto ovinillo y defoliación tardía. Sin embargo, está menos documentado el aporte relativo de pasto ovinillo consociado con alfalfa bajo defoliaciones tempranas. Bélanger *et al.* (2020), observaron aumentos en el aporte de MS de gramíneas en pasturas consociadas con alfalfa, cuando estas eran cortadas en botón floral respecto a cuando se cortaban en floración temprana. Es posible que estos aumentos en el aporte de las gramíneas estén asociados a un mejor ajuste del tiempo térmico acumulado entre defoliación y la vida media foliar de estas especies. En este caso, un tiempo térmico acumulado hasta defoliación de $526^{\circ}\text{C}\text{día}$, como se observó en los tratamientos TE para pasto ovinillo (Tabla 2.3), sería más adecuado para esta especie -filocrono de $120\text{-}150^{\circ}\text{C}\text{día}$ y 3-4 hojas vivas por macollo- (Rawnsley *et al.*, 2002; Gatti *et al.*, 2013, 2023; Gatti, 2015).

A pesar de lo esperado (predicción 1), la TC_Alfalfa cuando creció junto a pasto ovillo se vio fuertemente reducida respecto a cuando creció en monocultivo. Indicando que, sembrados a alta densidad (250 plantas/m², Tabla 2.1), la competencia que ejerció pasto ovillo sobre alfalfa fue equivalente a la que ejerció la propia alfalfa sobre sí misma (150 plantas de alfalfa/m² consociadas con pasto ovillo tuvieron un 50% menos TC - gMS/m².°Cd- que 250 plantas de alfalfa/m², Tabla 2.1, Figura 2.2 y 2.3). Esto es contrario a lo observado por Cruz y Lemaire (1986), pero similar a lo reportado por otros autores. Casler y Walgenbach (1990), encontraron que pasto ovillo suprimía el crecimiento de alfalfa cuando crecían consociadas y Sheaffer *et al.* (1990), encontraron reducciones del 40% en la oferta de alfalfa cuando crecía consociada con pasto ovillo, en relación a cuando lo hacía en monocultivo. Así mismo, Xue *et al.* (2023), encontraron que en pasturas consociadas de alfalfa y pasto ovillo (50:50 y similares condiciones de contenido de nitrógeno -N- que los observados en este trabajo) ambas especies reducían su rendimiento aproximadamente un 50% en función a cuando crecían en monocultivo durante el primer año de la pastura. Esto indicaría que pasto ovillo ejerce una alta competencia frente a alfalfa, probablemente asociado a las mayores características competitivas de pasto ovillo comparado con otras gramíneas C₃ (Haynes, 1980; Roscher *et al.*, 2016; Vasileva y Naydenova, 2017; Duchini *et al.*, 2019; Xue *et al.*, 2023).

Finalmente, respecto a los diseños puros de alfalfa, se observó una compensación tamaño:densidad que resultó en similares TC_Pastura (gMS/m².°Cd) en ambas densidades de siembra. Varios autores encontraron resultados similares asociados a una disminución en el número de tallos o el tamaño de plantas individuales de alfalfa a medida que aumenta la competencia dentro del canopeo (Mattera *et al.*, 2009; Ventroni *et al.*, 2010; Berti y Samarappuli, 2018).

La defoliación temprana solo disminuyó la oferta de materia seca (MS) en las pasturas puras de alfalfa (predicción 3, Figura 2.2). Sin embargo, este manejo de la defoliación redujo un 50% la oferta de MS de alfalfa (Figura 2.2 y 2.3), tanto en las pasturas puras como en la pastura consociada con pasto ovillo. Ventroni *et al.* (2010), encontraron reducciones similares en la oferta de MS en alfalfa cuando se realizaban cortes cada 20 días respecto a cuando lo hacían cada 30 días. Mientras Sheaffer *et al.* (2000) encontraron reducciones del 30% en la oferta de MS de alfalfa cuando esta era defoliada en botón floral respecto a cuando se hacía en floración temprana. Muchos trabajos reportaron respuestas similares frente a aumentos en la frecuencia de defoliación (Brink *et al.*, 2010; Olivo, 2018; Atis *et al.*, 2019; Mitchell *et al.*, 2020; Eckberg *et al.*, 2022). Esto estaría explicado fundamentalmente por un menor tiempo de rebrote, limitando la captación de energía (Robison y Massengale, 1968; Sheaffer *et al.*, 2000; Kallenbach *et al.*, 2002; Ventroni *et al.*, 2010) y por un menor desarrollo del canopeo al disminuir progresivamente las tasas de expansión y el tamaño de las hojas (Teixeira *et al.*, 2007b). Sin embargo, estas respuestas a la defoliación también podrían estar influenciadas por características del ensayo. Temperatura y fotoperiodo regulan el desarrollo de alfalfa (Collino *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2007b), la respuesta a la defoliación varía con la edad de las pasturas (Kallenbach, Nelson y Coutts, 2002) y los genotipos sin reposo invernal son menos sensibles a los cambios en el fotoperíodo (Hoppen *et al.*, 2022), maduran más rápido y tienen un mayor peso y altura de brotes en el primer año (Ventroni *et al.*, 2010).

En Argentina, son escasos los trabajos sobre aumentos en la frecuencia de defoliación en función al tiempo térmico o al estado de desarrollo del cultivo, y sus resultados son dispares. Berone *et al.* (2020), en un ensayo de 2 años de duración, realizado en Gral. Villegas- Prov. Bs. As., y utilizando un genotipo con grado de reposo 6, encontraron

mayor oferta de materia seca (MS) en pasturas de alfalfa cosechadas cada 350°Cd, respecto a cosechas cada 500°Cd (21 y 32 días aproximadamente). Esto se explicó por un menor contenido de biomasa y respiración de mantenimiento, lo cual aumentaría las tasas de crecimiento bajo defoliaciones frecuentes. En este ensayo los autores reportaron que el número de nudos fue cercano a 9 y mayor de 12 para los tratamientos de 350°Cd y 500°Cd, respectivamente. Esto explicaría sus resultados dado que en alfalfa la senescencia aumenta a partir del nudo 9 asociada al cierre del canopeo (95% de interceptación; Brown *et al.*, 2005). Por el contrario Olivo (2018), en un ensayo realizado en Balcarce -Prov. Bs. As., y trabajando con un genotipo sin reposo invernal durante su primer año de crecimiento, encontró mayor oferta de MS realizando defoliaciones cada 700°C.día, que cuando lo hacía a 350°C.día. La autora asoció estos resultados a un 40% más radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada en los tratamientos menos frecuentemente defoliados. En los resultados de la presente tesis, la menor oferta de MS de los tratamientos con defoliación temprana estaría explicada por la menor radiación interceptada (eRMi) previo al corte (69 y 90% respectivamente), asociado a un menor desarrollo del canopeo (menores TC_H y TC_T, Figura 2.5), sumado a un período de rebrote más corto (7 días menos en promedio en cada ciclo de rebrote, Tabla 2.3).

2.4.3. Calidad forrajera

- **Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa**

Contrariamente a lo esperado (predicción 1 y 2), la relación hoja:tallo se mantuvo en los distintos diseños de siembra evaluados porque ambos componentes del crecimiento aéreo (TC_H y TC_T) disminuyeron en igual proporción en la pastura consociada con pasto ovillo y compensaron su crecimiento en la pastura pura de alfalfa con baja densidad (Figura 2.4 a y b). En el caso de las pasturas consociadas, esta respuesta se asocia a la

fuerte competencia que ejerció pasto ovilla sobre alfalfa, discutida anteriormente, generando similares TC_H y TC_T que el de las plantas de alfalfa que crecieron en diseños puros con alta densidad. En el caso de los diseños puros de alfalfa de baja densidad, ambos componentes del crecimiento aéreo compensaron en igual magnitud la menor densidad de siembra, generando iguales TC_H y TC_T por metro cuadrado (Figura 2.4a). Observaciones similares realizaron otros autores ante cambios de la densidad de siembra, o el arreglo espacial de las plantas (Volenc *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 2008; Mattera *et al.*, 2009; Baldissera *et al.*, 2014).

La defoliación temprana afectó más las TC_T que las TC_H (10% más bajas, Figura 2.4b) por lo tanto, y como se esperaba (predicción 3), las pasturas sometidas a este tratamiento de defoliación presentaron una mayor relación hoja:tallo. Sheaffer *et al.* (2000), encontraron que aumentos en la frecuencia de defoliación, disminuyeron la oferta de MS alrededor del 40%, con reducciones del contenido de hojas de solo un 26% pero del 59% en los tallos. Respuestas similares en la relación hoja:tallo fueron encontrados por otros autores (Berone *et al.*, 2020), y estarían explicadas fundamentalmente por un mayor peso de los tallos en los tratamientos menos frecuentemente defoliados ya que predominan los brotes dominantes (más gruesos y altos) sobre los intermedios y los suprimidos (Teixeira *et al.*, 2007a; Ventroni *et al.*, 2010; Olivo, 2018).

- **Altura total de alfalfa**

Los diseños de siembra evaluados respondieron parcialmente a lo que se esperaba respecto a la altura de alfalfa (predicción 1 y 2). La pastura consociada con pasto ovilla solo se diferenció de la pastura pura de alfalfa con alta densidad de siembra en los tratamientos de defoliación temprana. La pastura con pasto ovilla presentó alturas un 13% más bajas que la pastura pura de alfalfa con alta densidad (61 vs. 70 cm, Figura 2.5). El

porte más bajo de la gramínea, respecto a alfalfa, podría asociarse a una menor competencia por luz en los estratos más altos del canopeo y, en consecuencia, una menor elongación en los tallos de alfalfa. De todas maneras, si bien estas diferencias en la altura de alfalfa fueron significativas, podrían ser despreciables ya que no estuvieron asociadas a cambios en las TC de los componentes del crecimiento aéreo (Hakl *et al.*, 2021) o en el rendimiento (Ventroni *et al.*, 2010, Figura 2.2). De la misma manera que lo reportado por otros autores (Volenc *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 2008), no se encontraron respuestas en la altura de alfalfa en las pasturas puras con distinta densidad siembra (Figura 2.5).

Cuando fueron sometidos a defoliaciones tempranas, independientemente del diseño de siembra, la altura promedio de alfalfa fue un 35% menor que con defoliación tardías ($\alpha\alpha$ +PO: 32% y $\alpha\alpha$: 43%, Figura 2.5). Estos datos coinciden con lo esperado (predicción 3) y son similares a lo reportado por otros autores (Ventroni *et al.*, 2010; Berone *et al.*, 2020). Esto se asocia a un menor desarrollo del canopeo y menores IAF, menor elongación de tallos, una proporción más equilibrada de tallos dominantes, intermedios y suprimidos dentro del canopeo y una menor competencia por luz dentro de los canopeos más frecuentemente defoliados (Teixeira *et al.*, 2007a).

2.5. Conclusiones

La respuesta de la oferta de materia seca (MS) en pasturas de base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo dependió del diseño de siembra y el tratamiento de defoliación. Los resultados mostraron que los diseños puros de alfalfa con defoliaciones tempranas (TE) redujeron alrededor del 50% su oferta de MS, independientemente de su densidad de siembra. Por el contrario, bajo estas mismas condiciones de defoliación, las pasturas

consociadas con pasto ovillos mantuvieron su oferta de MS por aportes adicionales de MS de la gramínea.

La calidad de alfalfa fue afectada tanto por el diseño de siembra como por el tratamiento de defoliación. El diseño de siembra no afectó la relación hoja:tallo pero, la presencia de pasto ovillo redujo la altura de alfalfa en pasturas consociadas con defoliación tardía (TA). Asimismo, la defoliación TE aumentó la relación hoja:tallo y disminuyó la altura de alfalfa, independientemente del diseño de siembra.

Capítulo 3. Variabilidad temporal de la oferta y la calidad forrajera en alfalfa

3.1. Introducción

En sistemas productivos de altos requerimientos, las fluctuaciones en cuanto a oferta de materia seca y calidad, impactan directamente sobre los patrones de consumo animal y, por lo tanto, sobre la eficiencia productiva del sistema (Chilibroste *et al.*, 2015). Por este motivo gran parte del esfuerzo en el diseño y manejo de pasturas está puesto en estabilizar la producción de biomasa en cantidad y calidad. Sin embargo, el patrón típico de crecimiento de los cultivos forrajeros, influenciado por factores ambientales como la temperatura y el fotoperíodo, dificulta este objetivo al afectar las tasas de crecimiento y la calidad de la biomasa (Parsons, 1988).

Los cultivos de alfalfa presentan una alta variabilidad temporal en su oferta de biomasa, concentrada en los meses de primavera y verano con temperaturas y fotoperíodos en aumento (Cangiano y Ventroni, 2022; Moot *et al.*, 2003; Teixeira *et al.*, 2007). En esta época del año, las tasas de crecimiento de alfalfa se aceleran, aumentando la oferta de biomasa pero disminuyendo su calidad, asociada a un aumento en la altura y el peso de los tallos y una menor relación hoja:tallo (Brink *et al.*, 2010; Cangiano y Pece, 2005). Sin embargo, Hall *et al.* (2000) encontraron que esta disminución en la calidad varía entre primavera, principio o fin del verano y otoño. Esto se relaciona a cambios en la marcha del fotoperíodo en estos momentos del año. La alfalfa es una especie de días largos y su respuesta combinada al fotoperíodo y la temperatura modula las tasas de crecimiento y el desarrollo del cultivo. (Moot *et al.*, 2003).

Sin embargo, no todos los procesos están igualmente regulados por estos factores ambientales. El filocrono (TT requerido para el desarrollo de dos nudos sucesivos) como y el TT a estado de botón floral (50% de yemas florales visibles), son mínimo y constantes con fotoperíodos mayores a 14 hs, pero se incrementan a medida que el fotoperíodo

desciende por debajo de 14 hs (Brown *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2008; Sim *et al.*, 2015; Ta *et al.*, 2020). Por el contrario, el paso de botón floral a floración solo depende de la temperatura y requiere la acumulación de un TT fijo (Teixeira *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2021). Finalmente, Teixeira *et al.* (2008) y Sim *et al.* (2015), demostraron que la partición de fotoasimilados entre la parte aérea y la raíz, responde al fotoperíodo ($>$ o $<$ de 14 hs), afectando las tasas de crecimiento del cultivo (TC) y su capacidad de reponer el aérea foliar luego de la defoliación. Esto indica que establecer pautas de defoliación en función a días o TT fijos no sería razonable si lo que se busca es mantener una oferta y calidad estable, que maximice la eficiencia productiva en los sistemas ganaderos. Mientras que pautas de defoliación asociadas a estados morfológicos del cultivo podrían lograr este objetivo.

A su vez, tanto el diseño de siembra como el manejo de la defoliación pueden afectar la variabilidad temporal en la oferta y la calidad de alfalfa. Por un lado, diseños de siembra que permitan disminuir la competencia entre los componentes de la pastura podrían moderar la elongación de los tallos de alfalfa, fundamentalmente en las épocas de activo crecimiento. Esto aumentaría la calidad en estos diseños por un menor contenido de tejidos de sostén de menor calidad, pero también por el menor sombreado de estratos inferiores (Lemaire *et al.*, 2005). Así mismo, cambios en el vecino acompañante a través del diseño de pasturas consociadas con gramíneas podría lograr este objetivo (Maamouri *et al.*, 2015; Roscher *et al.*, 2016). Por otro lado, prácticas de manejo, como defoliaciones poco frecuentes, magnifican los efectos de la competencia intraespecífica y la elongación de tallos en los meses de primavera/verano cuando las TC del cultivo están en aumento (Mattera *et al.*, 2009; Duchini *et al.*, 2019). Por el contrario, defoliación más frecuentes podrían mantener canopeos más bajos, de mayor calidad y sin pérdidas de productividad por un aumento en el número de cortes, menos productivos individualmente pero más

estables a lo largo del ciclo (Teixeira *et al.*, 2008). Sin embargo, se desconoce en qué medida estas prácticas de manejo permitirían moderar la variabilidad temporal de alfalfa en cuanto a oferta de materia seca y su calidad.

3.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones

El objetivo de este capítulo fue evaluar el impacto que ejerce el diseño de siembra y el manejo de la defoliación sobre la variabilidad temporal de la oferta de biomasa y las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera de alfalfa durante su primer período reproductivo

La hipótesis que guió este capítulo fue:

Los diseños de siembra menos competitivos aumentan la distribución de luz dentro del canopeo, reduciendo la variabilidad temporal en la calidad. Las defoliaciones tempranas, y más frecuentes, incrementan la distribución de luz pero reducen su captación, reduciendo la variabilidad temporal de la oferta y la calidad.

De la hipótesis se desprenden las siguientes predicciones:

1. Diseños de siembra menos competitivos (consociados con pasto ovillo o con menor densidad de siembra) disminuirán la variabilidad temporal de la relación hoja:tallo de alfalfa.
2. Defoliaciones tempranas disminuirán la variabilidad temporal de las tasas de crecimiento y la relación hoja:tallo de alfalfa.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Sitio y diseño experimental

En el campo experimental de la Facultad de Agronomía-UBA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina se establecieron cuatro bloques con tres parcelas de 3 m por 3 m (9 m²), doce parcelas en total. A cada parcela, se le asignó al azar el tratamiento “diseño de siembra” con tres niveles: *Medicago sativa* L. -alfalfa- consociada con gramínea - *Dactylis glomerata* L. -pasto ovillo- ($\alpha\alpha$ +PO, hileras alternas de las especies a 0,175 m), alfalfa pura sembrada con alta densidad ($\alpha\alpha$, hileras a 0,175 m) y alfalfa pura sembrada con baja densidad ($\alpha\alpha^{1/2}$, hileras distanciadas a 0,35 m).. En otoño (17/mar/17), se sembró 400 semillas viables/m² para los tratamientos $\alpha\alpha$ +PO (50% de cada especie) y $\alpha\alpha$, y 200 semillas viables/m² en los tratamientos $\alpha\alpha^{1/2}$.. Con esto se logró que la distancia entre plantas en la hilera sea igual en todos los tratamientos, pero con distintos arreglos espaciales entre plantas. Las plantas en los tratamientos con alta densidad - $\alpha\alpha$ +PO y $\alpha\alpha$ - tuvieron un arreglo espacial más equidistantes que los tratamientos de baja densidad - $\alpha\alpha^{1/2}$ - (rectangularidad 6 y 12 respectivamente, Mattera *et al.*, 2009, 2013). Este diseño experimental involucra parcelas con diseños aditivos y sustitutivos de alfalfa - competencia intra e interespecífica- (Cruz y Lemaire, 1986; Cruz y Soussana, 1997; Figura 2.1).

Al inicio del estado reproductivo de alfalfa, cada una de las doce parcelas se dividió en dos sub-parcelas y se les asignó aleatoriamente el tratamiento de “defoliación” con dos niveles: temprana, más frecuente (TE) y tardía, menos frecuente (TA). Éstos se corresponden a botón floral temprano (E3) e inicios de floración (E5) respectivamente, de la escala de desarrollo morfológico definido por Kalu y Fick (Kalu y Fick, 1981; Fick y Mueller, 1989). Las defoliaciones TE fueron definidas como defoliaciones anticipadas

respecto a la defoliación tradicional en el manejo de alfalfa (10% de floración, -Kloster y Zanivoni, 2007; Kloster *et al.*, 2022-), asociado en este trabajo a las defoliaciones TA.

Se estableció así un arreglo factorial con parcelas divididas en bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al factor diseño de siembra y la parcela dividida, a los tratamientos de defoliación. Los seis tratamientos resultantes fueron $\alpha\alpha^{1/2}$ -TE, $\alpha\alpha^{1/2}$ -TA, $\alpha\alpha$ -TE, $\alpha\alpha$ -TA, $\alpha\alpha$ +PO -TE y $\alpha\alpha$ +PO -TA (Tabla 2.2).

3.2.2. Tratamiento de defoliación y número de corte

Previo al inicio del período de floración de alfalfa, se realizó un corte (corte inicial, 17/oct), con el objetivo de emparejar las parcelas antes de iniciar los tratamientos de defoliación. A partir de ese primer corte, los tratamientos fueron defoliados cada vez que los cultivos alcanzaron el estado morfológico objetivo (botón floral temprano o inicio de floración) para cada tratamiento (TE y TA), hasta el final del período de floración de alfalfa (siguiente otoño). Para definir el momento adecuado de corte, al inicio de cada rebrote, se eligieron al azar, y se marcaron con cintas de colores, 15 individuos de alfalfa por sub-parcela (Teixeira *et al.*, 2007b; Berone *et al.*, 2020). Así, cuando el 50% de esos brotes marcados alcanzaron el estado morfológico buscado se procedió al corte y cosecha de las muestras. De esta manera, durante el período experimental, se obtuvieron seis cortes en 121 días en el tratamiento TE y cinco cortes en 135 días en TA (Tabla 3.1 y Tabla 2.2). Durante la primavera, desde el inicio de los tratamientos de cortes hasta el 21 de diciembre, el tratamiento de defoliación TE presentó tres cortes, mientras que el TA presentó dos. Durante el verano, comprendido entre el 22 de diciembre hasta el final del período experimental, ambos tratamientos presentaron tres cortes.

Tabla 3.1: Descripción de fechas de corte, días entre cortes (Días_{ec}), tiempo térmico acumulado entre cortes (TT_{ac}), fotoperíodo al momento del corte (Fotop.), radiación incidente acumulada entre cortes (Rad.i_{ec}) y temperatura promedio (Temp_{pr}) del período. Para los tratamientos de defoliación temprana y tardía.

Corte	DEFOLIACIÓN TEMPRANA (Botón floral temprano)						DEFOLIACIÓN TARDÍA (Inicio de floración)					
	Fecha	Días _{ec}	TT _{ac} (°Cd)	Fotop. (hs)	Rad.i _{ec} (MJ/m ²)	Temp _{pr} (°C)	Fecha	Días _{ec}	TT _{ac} (°Cd)	Fotop. (hs)	Rad.i _{ec} (MJ/m ²)	Temp _{pr} (°C)
C1	6/nov	20	320	14,67	380	20,25	17/nov	31	522	14,99	589	21,23
C2	29/nov	23	380	15,25	483	21,48	12/dic	25	433	15,42	525	22,12
C3	15/dic	16	313	15,44	352	24,58	6/ene	25	495	15,34	550	24,95
C4	6/ene	22	438	15,34	484	24,85	2/feb	27	619	14,7	594	27,95
C5	25/ene	19	443	14,93	418	26,24	1/mar	27	570	13,75	486	26,42
C6	14/feb	20	464	14,3	380	27,85						

- **Condiciones ambientales**

Durante el período de cortes la temperatura fue en promedio de 24,5°C, incrementándose entre octubre y febrero (20 y 26,5°C en promedio respectivamente, Figura 3.1a). Por su parte la radiación incidente tuvo un valor promedio de 20 MJ/m².d, sin embargo, durante gran parte del período evaluado (desde el 11/nov al 21/ene aproximadamente), mantuvo valores superiores a este valor (Figura 3.1b). Finalmente, el fotoperíodo, inició el período experimental con valores de 13,98 hs, alcanzó el máximo valor (15,46 hs) durante el 19 y el 22 de diciembre y concluyó el período experimental con 13,75 hs a fines de verano. Se traspasó el umbral de 14 hs (fotoperíodo crítico, Teixeira *et al.*, 2011) el 18 de octubre y el 23 de febrero, en aumento y disminución, respectivamente (Figura 3.1c).

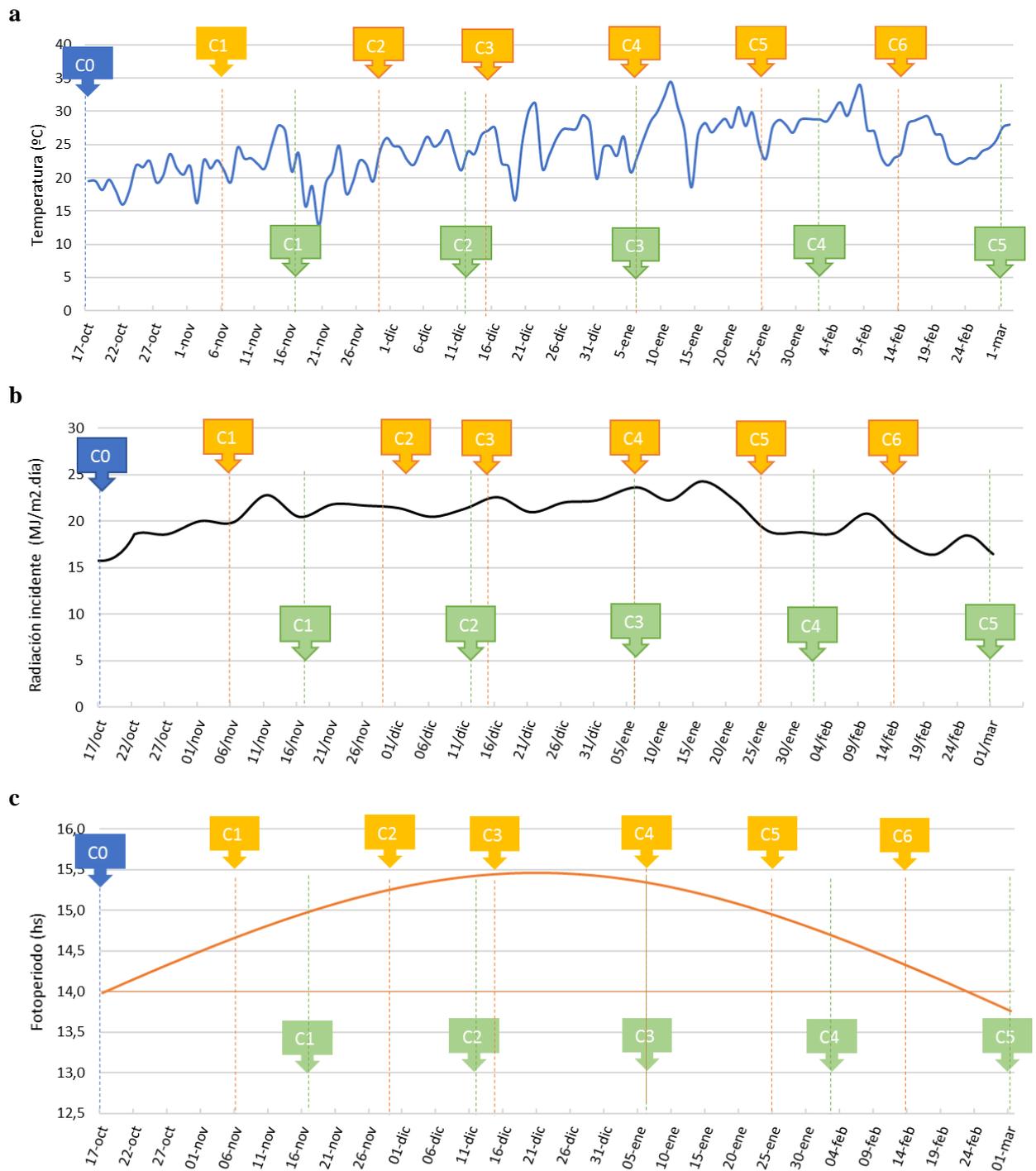


Figura 3.1: Evolución de la temperatura media (panel a), la radiación incidente (panel b) y el fotoperiodo (panel c) durante el período experimental. Se señalan los momentos de cortes, corte de limpieza (C0 azul), cortes 1 a 6 realizados con defoliación temprana -TE- (C1-C6 naranja) y cortes 1 a 5 realizados con defoliación tardía -TA- (C1-C5 verde).

3.2.3. Mediciones

Se realizaron cortes y cosechas utilizando un marco de 30 cm por 30 cm con un remanente de 5 cm (oferta de biomasa con alta intensidad de defoliación). Cada corte

corresponde a una única muestra por parcela, dos hileras en los tratamientos de alta densidad ($\alpha\alpha$) y una hilera en los tratamientos de baja densidad ($\alpha\alpha^{1/2}$) y en los diseños de siembra consociados con pasto ovilla ($\alpha\alpha$ +PO). Las muestras de alfalfa fueron separadas en sus componentes tallo (T) y hoja (folíolo+pecíolo, H). Este material se secó en estufa (60 °C) hasta peso seco constante (no fueron corregidas a 105°C), pesadas y ajustadas a una misma unidad de superficie (m^2). Se determinó así el peso parcialmente seco de alfalfa (PS, g/m^2) para hojas, tallos y total de la biomasa, y la relación hoja:tallo (PS H/PS T).

Todas las variables de oferta de materia seca (MS) fueron expresadas como tasa de crecimiento (TC) en tiempo térmico (TT_{ac}) para compensar en el análisis las diferencias en la duración de los períodos de rebrote entre los tratamientos (Tabla 3.1). Para esto, se calculó el tiempo térmico acumulado entre cortes usando como temperatura base (tb)= 1°C cuando la temperatura media (t.med.) fue menor a 15°C y tb= 5°C cuando la t.med. superaba ese valor (Brown *et al.*, 2005). De esta manera se establecieron los valores de TC de alfalfa (TC_{Alfalfa}), TC de hojas y TC tallos de alfalfa (TC_H y TC_T) a partir del cociente entre la oferta de MS, o sus componentes individuales, y el tiempo térmico acumulado en el mismo período ($gMS/m^2 \cdot ^\circ Cd$).

3.2.4. Análisis estadístico

Se ajustó un modelo estadístico acorde al diseño experimental utilizado, un factorial en bloques completos con parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo correlacionado con el tiempo transcurrido desde la siembra. El experimento consistió en seis tratamientos (tipo de pastura con tres niveles y tratamiento de defoliación con dos niveles) en cuatro bloques, doce parcelas principales totales (diseño de siembra), veinticuatro subparcelas totales (momento de corte) y cinco o seis cortes para los

tratamientos de defoliación TA y TE, respectivamente. Las variables evaluadas fueron TC de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas y TC tallos de alfalfa (TC_H y TC_T) y relación hoja:tallo por corte. Se realizó un análisis de varianza, con los efectos fijos “diseño de siembra”, “tratamiento de defoliación” y “número de corte” y los efectos aleatorios “bloque”, “parcela” y “subparcela”. Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron probados y aceptados.

Las diferencias significativas fueron evaluadas por medio de comparaciones múltiples (Tukey). Para los análisis se utilizó el paquete nlme v3.1-155 (Pinheiro *et al.*, 2021) y emmeans v1.7.3 (Lenth, 2022) del software R, versión 2022.02.0 (R Core Team, 2022). La variabilidad temporal se analizó a través del coeficiente de variación entre fechas (CV_f).

3.3. Resultados

3.3.1. Oferta de alfalfa: variabilidad temporal en las tasas de crecimiento

El vecino gramínea afectó la oferta de alfalfa (TC_Alfalfa) durante todo el período evaluado (Tabla 3.2 y Tabla A3.1). La pastura consociada con pasto ovillo, presentó TC_Alfalfa casi un 50% más bajas que las pasturas puras de alfalfa, independientemente de la densidad de siembra ($5,45 \pm 0,36$ y $12,95 \pm 0,8$ gMS/m².°Cd). Los valores de contraste entre las medias fueron para $\alpha\alpha-\alpha\alpha+PO$ $t=8,94$ y $p=0,0003$, $\alpha\alpha^{1/2}-\alpha\alpha+PO$ $t=8,39$ y $p=0,0004$ y $\alpha\alpha^{1/2}-\alpha\alpha$ $t=0,25$ y $p=0,96$

Tabla 3.2: Resultados del análisis de varianza, efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura consociada con pasto ovido, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), el tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía), la fecha de corte (5 cortes para la defoliación tardíos y 6 cortes para la defoliación tempranos) y su interacción sobre: la tasas de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas (H) y tallos (T) y relación hoja:tallo (n=4). Se muestran los valores de $(\ln, \ln)F$ y p: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$ y ns= diferencias no significativas.

Variable	Efecto Diseño (D) F y p	Efecto Defoliación (C) F y p	Efecto Fecha (T) F y p	Interacción Tipo, F y p	Referencia
TC_Alfalfa	(2,6) 56,13 ***	(1,9) 174,44 ***	(5,74) 4,97 ***	C x T (5,74) 6,71 ***	Figura 3.2
TC_H	(2,6) 67,47 ***	(1,9) 170,21 ***	(5,73) 9,35 ***	C x T (5,73) 5,12 ***	Figura 3.3 a
TC_T	(2,6) 40,37 ***	(1,9) 126,85 ***	(5,74) 3,34 **	C x T (5,74) 9,7 ***	Figura 3.3 b
hoja:tallo	ns	(1,9) 66,15 ***	(5,66) 41,39 ***	C x T (5,66) 25,89 ***	

Por su parte, la defoliación temprana (TE) generó un corte más que la defoliación tardía (TA) con menor duración del ciclo reproductivo de alfalfa (121 vs. 135 días, Tabla 2.2 y Tabla 3.1). La respuesta al tratamiento de defoliación presentó una interacción respecto a la fecha de corte evaluada (Tabla 3.2 y Tabla A3.1). La defoliación TE tuvo TC_Alfalfa similares a la defoliación TA en gran parte de los cortes evaluados (Figura 3.2). Las diferencias estuvieron explicadas principalmente por los cortes 2 y 5 de los tratamientos TA. El corte 2 TA (12/dic), cercano al momento de ocurrencia del fotoperíodo máximo, presentó una TC_Alfalfa un 60% superior al promedio del tratamiento (Figura 3.2). El corte 5 TA (28/feb), presentó una TC_Alfalfa un 10% superior al promedio del tratamiento. En conjunto ambos cortes acumularon el 53% del total de la materia seca (MS) cosechada durante el período experimental en el tratamiento TA (Tabla 3.3).

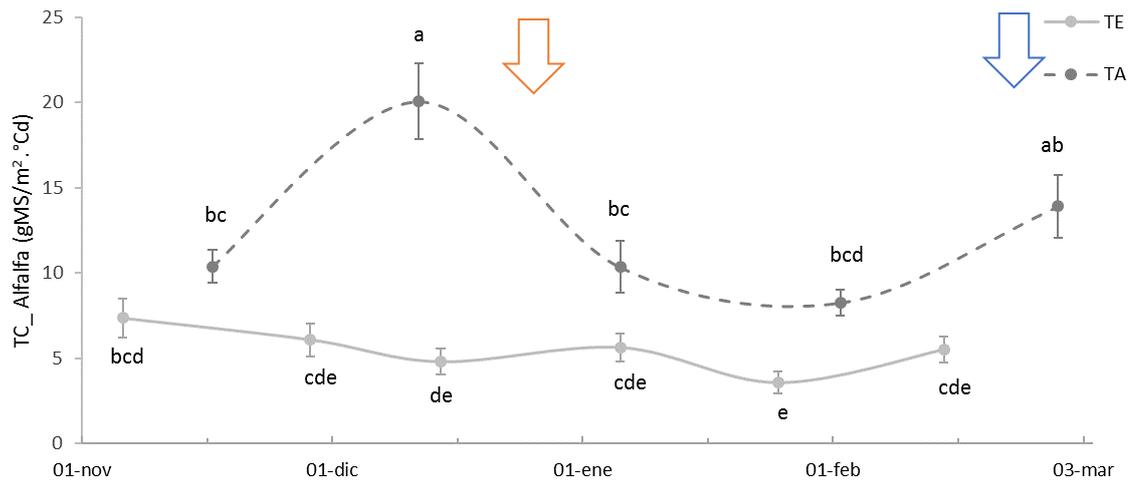


Figura 3.2: Dinámica de la tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfaifa, gMS/m².°Cd) para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs.

Tabla 3.3: Valores de oferta por corte de alfalfa, hojas y tallos (gMS/m²) y porcentaje de la oferta del corte sobre la oferta total del primer ciclo reproductivo para dos tratamientos de defoliación.

	Oferta total Alfalfa		Oferta Hojas		Oferta Tallos	
	Por corte (gMS/m ²)	% del total	Por corte (gMS/m ²)	% del total	Por corte (gMS/m ²)	% del total
DEFOLIACIÓN TEMPRANA						
C1	118	19	70	19	43	17
C2	100	16	61	17	38	15
C3	94	15	55	15	39	15
C4	112	18	53	14	61	24
C5	82	13	47	13	29	11
C6	126	20	82	22	44	17
DEFOLIACIÓN TARDÍA						
C1	175	14	127	20	44	8
C2	343	28	155	24	177	32
C3	208	17	95	15	113	20
C4	189	16	107	16	88	16
C5	297	25	165	25	132	24

Dentro de cada tratamiento de defoliación, se observó que las diferencias entre cortes fueron menores en el tratamiento TE respecto al TA, explicadas por los valores extremos señalados anteriormente (Figura 3.2 y Tabla 3.3). De la misma manera, el coeficiente de variación entre fechas (CV_{A_f}) fue 37% menor en los tratamientos TE que en los TA ($CV_{A_f,TE}$ 23% y $CV_{A_f,TA}$ 37%).

3.3.2. Calidad: variabilidad temporal en los componentes del crecimiento aéreo de alfalfa

El vecino gramínea afectó la tasa de crecimiento de hojas (TC_H, Tabla 3.2 y Tabla A3.2) y de tallos (TC_T, Tabla 3.2 y Tabla A3.3) de alfalfa, durante todo el período evaluado. Ambos componentes del crecimiento aéreo de alfalfa presentaron TC aproximadamente un 50% más bajas en la pastura consociada con pasto ovillo, respecto a las pasturas puras de alfalfa, independientemente de la densidad de siembra ($3,13 \pm 0,7$ gMS/m².°Cd vs. $5,99 \pm 1$ gMS/m².°Cd para TC_H y $2,5 \pm 0,7$ gMS/m².°Cd vs. $4,73 \pm 1,1$ gMS/m².°Cd para TC_T). Los valores de contraste entre las medias fueron para $\alpha\text{-}\alpha\text{+PO}$ $t=10$ y $p=0,0001$, $\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\text{+PO}$ $t=8,77$ y $p=0,0003$ y $\alpha^{1/2}\text{-}\alpha$ $t=0,86$ y $p=0,68$ para TC_H. Para TC_T los valores de los contrastes entre las medias fueron $\alpha\text{-}\alpha\text{+PO}$ $t=7,15$ y $p=0,0009$, $\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\text{+PO}$ $t=7,6$ y $p=0,0007$ y $\alpha^{1/2}\text{-}\alpha$ $t= -0,3$ y $p=0,9$.

El tratamiento de defoliación mostró una interacción con la fecha de corte para las TC_H y TC_T (Tabla 3.2, Tabla A3.2 y A3.3). Respecto a la TC_H, estas fueron menores en la defoliación TE respecto a la TA para la mayoría de las fechas evaluadas. La excepción ocurrió en los cortes 3 TA (6/ene) y 4 TA (2/feb) que presentaron TC_H un 30% más bajas que el promedio del tratamiento (Figura 3.3a y Tabla 3.3). En el caso de las TC_T, estas presentaron valores similares para las defoliaciones TE y TA en gran parte de los cortes evaluados. Las diferencias estuvieron explicadas fundamentalmente por el corte 2 TA (12/dic) que presentó valores 80% más altos que el promedio del tratamiento (Figura 3.3b y Tabla 3.3).

Dentro de cada tratamiento de defoliación las TC_H y TC_T tuvieron escasas diferencias entre cortes para la defoliación TE y explicadas por el corte 5 (25/ene) que

presentó los menores valores de TC_H y TC_T del tratamiento (Figura 3.3 y Tabla 3.3). La defoliación TA tuvo mayores diferencias entre cortes y las dinámicas de crecimiento variaron entre ambos componentes del crecimiento aéreo (Figura 3.3 y Tabla 3.3). Esto determinó que, mientras el CV_f para la TC_H fue similar para ambos tratamientos de defoliación ($CV_{H,f,TE}$ 26% y $CV_{H,f,TA}$ 29%), el CV_f para TC_T fue 45% menor para el tratamiento TE ($CV_{T,f,TE}$ 28% y $CV_{T,f,TA}$ 51%). Es decir, que la defoliación TE generó un aporte más estable de T en el total de MS cosechada a lo largo del período evaluado, sin afectar la variabilidad en el aporte de H.

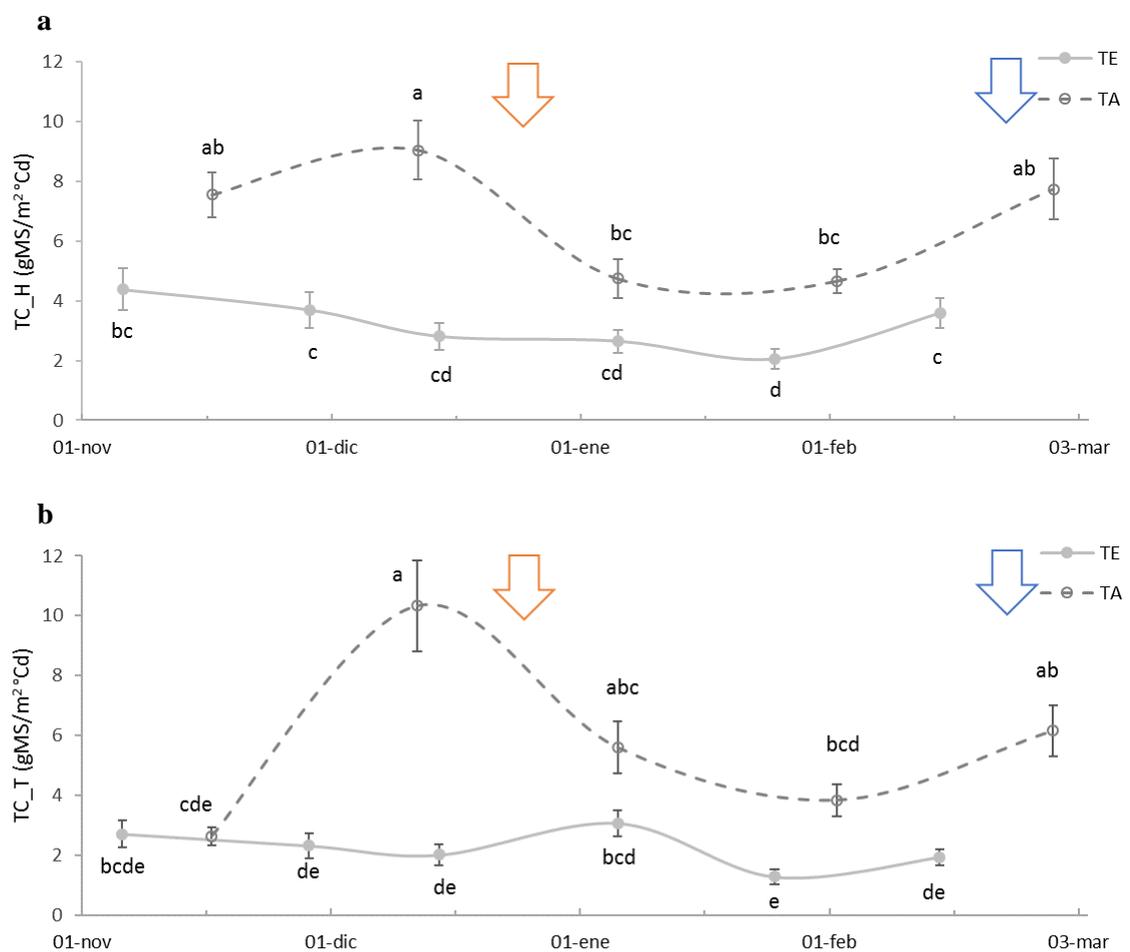


Figura 3.3: Dinámica de la tasa de crecimiento de hojas (TC_H, gMS/m²·°Cd, panel a), y tallos (TC_T, gMS/m²·°Cd, panel b) de alfalfa, para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs.

Esta respuesta diferencial entre los dos tratamientos de defoliación para las TC_H y TC_T, implicó que la relación entre el contenido de hojas y tallos (hoja:tallo) también presentara una interacción entre el tratamiento de defoliación y el número de corte (Tabla 3.2 y Tabla A3.4). La relación hoja:tallo fue, en promedio, mayor en el tratamiento TE ($1,6 \pm 0,08$ vs. $1,3 \pm 0,06$, Figura 3.4). La excepción a esto estuvo explicada por el corte 1 TA (17/nov), con valores de TC_T muy por debajo del promedio del tratamiento, y por el corte 4 TE (6/ene) que presentó valores elevados de TC_T (Figura 3.3 y Tabla 3.3). A su vez los tratamientos TE presentaron una menor variabilidad entre fechas (CV_f), estos fueron un 55% más estables que los tratamientos TA (21% vs. 47%).

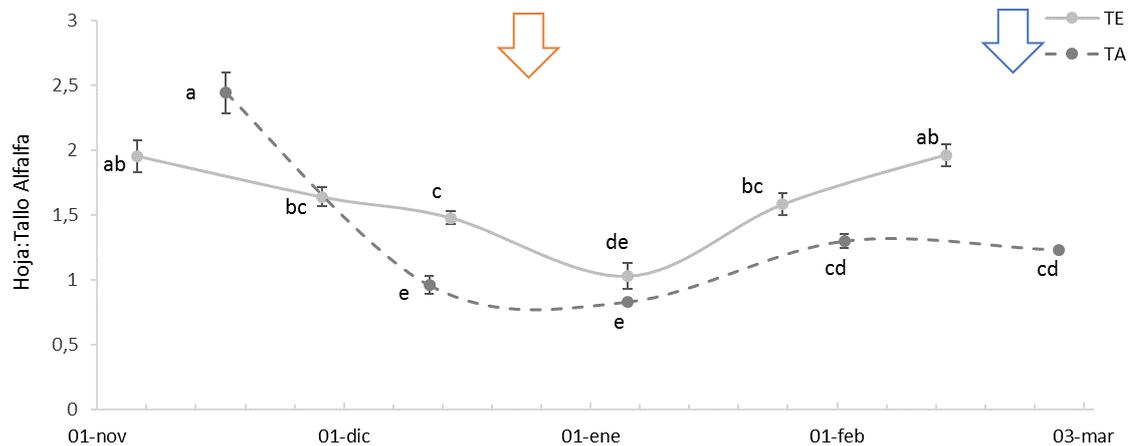


Figura 3.4: Dinámica de la relación entre el contenido de hojas y tallos de alfalfa (hoja:tallo) para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-) durante el primer ciclo reproductivo. Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas. La flecha naranja muestra el momento de fotoperíodo máximo y la flecha azul el momento en el cual el fotoperíodo es igual a 14 hs.

3.4. Discusión

3.4.1. Oferta de alfalfa: variabilidad temporal en la tasa de crecimiento

Contrariamente a lo esperado (predicción 1), todos los diseños evaluados presentaron igual variabilidad temporal de la oferta de alfalfa. La TC_Alfalfa en el diseño consociado con pasto ovillo (PO), se redujo un 50% aproximadamente durante todo el período experimental. El efecto competitivo de PO sobre las TC_Alfalfa fue equivalente al

ejercido por la propia alfalfa sobre sí misma y se mantuvo estable en el tiempo, independientemente de las condiciones ambientales y del manejo de la defoliación. Datos similares fueron reportados por Moot *et al.* (2020) y Cruz y Lemaire (1986), para la dinámica de crecimiento de alfalfa creciendo sola o acompañada por pasto ovillo, durante primavera y verano. Los resultados de la presente tesis estarían asociados a las altas tasas de crecimiento que mantuvo pasto ovillo hasta principio del verano (datos no presentados), asociado a temperaturas acordes a sus óptimos térmicos -25°C - (Figura 3.1a; Davidson y Milthorpe, 1965) y suficiente provisión de agua en el perfil a través del riego. Por otro lado, las TC_Alfalfa con baja densidad alcanzaron iguales TC por superficie que la pastura pura de alfalfa con alta densidad, e iguales dinámicas de crecimiento durante todo el período experimental. Esto estaría indicando que los mecanismos de compensación tamaño:densidad (discutido en el capítulo 2) se mantuvieron activos en todos los períodos de rebrote, independientemente de las condiciones ambientales y los tratamientos de defoliación. Datos similares fueron presentados por Mattera *et al.* (2013), quienes encontraron que la dinámica de la oferta de alfalfa no se modificaba frente a cambios en los arreglos de siembra, en aquellos diseños más equidistantes entre plantas.

Como se esperaba (predicción 2), la variabilidad en las TC_Alfalfa estuvo afectada por el tratamiento de defoliación. La defoliación temprana (TE) presentó menores TC_Alfalfa, pero más estables, durante todo el período experimental. Por su parte la defoliación tardía (TA) tuvo mayores TC_Alfalfa durante todo el período evaluado, pero fundamentalmente en primavera (Figura 3.2 y Tabla 3.2). La mayor variabilidad en los tratamientos TA no pudo ser explicada por cambios en el largo del período de rebrote. La cantidad de días entre defoliaciones sucesivas (descansos) fue casi constante para cada tratamiento de defoliación, y con una diferencia de siete días entre tratamientos (TE: 20

$\pm 0,11$ días y TA: $27 \pm 0,13$ días, Tabla 3.1). La consistencia en el largo del rebrote dentro de cada tratamiento puede asociarse a que los valores de fotoperíodo estuvieron por encima del fotoperíodo crítico (14 hs; Teixeira *et al.*, 2011) durante la mayor parte del período experimental (Figura 3.1c). Con estos valores de fotoperíodo el tiempo térmico acumulado (TT_{ac}) para alcanzar el estado de botón floral es contante y depende solo de la temperatura (Teixeira *et al.*, 2011; Sim *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2021). Así mismo, el pasaje de botón floral a floración no depende del fotoperíodo y es regulado únicamente por la temperatura (Teixeira *et al.*, 2011).

En este trabajo el TT_{ac} necesario para alcanzar el estado de botón floral temprano fue $393 \pm 3,46^{\circ}\text{Cd}$ y $150 \pm 4,03^{\circ}\text{Cd}$ para alcanzar el estado de inicio de floración (Tabla 3.1). El TT_{ac} a botón floral es mayor a lo reportado por Teixeira *et al.* (2011) -269°Cd -, Yang *et al.* (2021) -278°Cd - y Sim *et al.* (2015) $-314,8^{\circ}\text{Cd}$ - para un fotoperíodo promedio de 14,85 hs. Mientras que el TT necesario para el paso de botón floral a floración es menor a lo reportado por Teixeira *et al.* (2011) -274°Cd - y Yang *et al.* (2021) -310°Cd -. Las diferencias con la bibliografía podrían estar relacionadas con el modelo de TT utilizado, los trabajos citados usan el modelo de TT de Moot *et al.* (2001), mientras que en esta tesis se utilizó el modelo de Brown *et al.* (2005). Otra fuente de variación podría estar dada por las condiciones ambientales, los trabajos citados están realizados en Nueva Zelanda, donde las temperaturas son más bajas, $11,4^{\circ}\text{C}$ promedio anual y $16,6^{\circ}\text{C}$ en enero, y el fotoperíodo tiene una mayor amplitud, aumenta de 10 a 16,5 hs. entre septiembre y enero (Moot *et al.*, 2003; Teixeira *et al.*, 2011). Lo que repercute también en la fecha de siembra utilizada (otoño en Argentina y primavera en Nueva Zelanda). Finalmente, el cultivar utilizado también podría ser un factor de variación ya que tanto, la sensibilidad de los procesos fisiológicos a los estímulos ambientales podría variar (Teixeira *et al.*, 2011), como también la rapidez en el desarrollo en función al grado de dormición (Ventroni

et al., 2010), a pesar de que Yang *et al.* (2021) no encontró diferencias en la fenología de alfalfa con distinto grado de dormición.

Dado que los factores ambientales y la duración del período entre defoliación no explicarían la variabilidad en la oferta de alfalfa, ésta podría ser explicada por los cambios en la partición de fotoasimilados entre la parte aérea y la raíz en función a cambios ambientales. Durante la primavera tardía los fotoasimilados son destinados prioritariamente a la parte aérea de la planta (Teixeira *et al.*, 2007c), las altas tasas de crecimiento en los tratamientos TA en las fechas de primavera tardía (12/dic), estarían relacionadas con esta mayor asignación de recursos a la parte aérea, acompañado por condiciones térmicas y de radiación que estimulan el crecimiento. Datos similares fueron encontrados por otros autores para cultivos de alfalfa con períodos entre defoliación moderados -35 y 42 días- (Cangiano y Pece, 2005; Moot *et al.*, 2003), o a principio de floración (Sheaffer *et al.*, 2000; Mattera *et al.*, 2013; Sim *et al.*, 2015). En los mismos trabajos, estos autores también observaron disminuciones en las TC de alfalfa durante el verano y principios de otoño. En estas estaciones, con fotoperíodos en disminución, los fotoasimilados son prioritariamente enviados a las raíces y las TC aéreas del cultivo disminuyen (Teixeira *et al.*, 2007c), lo que concuerda con la dinámica de crecimiento del tratamiento TA en estos meses del año (C3 -6/ene- y C4 -2/feb-). Finalmente, durante el final del verano/principios de otoño existe una leve recuperación de las TC (C5 -1/mar-) posiblemente debido a una disminución de las temperaturas máximas diurnas (Argentina-SMN) que podrían haber perjudicado parcialmente las tasas fotosintéticas en los meses de verano (Cangiano y Ventroni, 2022).

Por el contrario, los tratamientos TE no tuvieron una influencia marcada por los cambios estacionales y sus TC se mantuvieron más estables a lo largo del período experimental. Datos similares fueron reportados por Sheaffer *et al.* (2000), para alfalfas

cortadas en estado de yema floral visible. Esto podría ser debido, por un lado, a una menor acumulación de reservas en la raíz por un menor tiempo de crecimiento del cultivo entre defoliaciones, generando una demora en el desarrollo del canopeo, reduciendo la intercepción de radiación y la fotosíntesis (Teixeira *et al.*, 2007c, 2008). Esto implicaría que, en los meses de activo crecimiento y alta prioridad de asignación a la parte aérea, como es la primavera, los cultivos defoliados con mayor frecuencia no tienen tiempo suficiente para maximizar sus TC, como se observó en los cortes 2 (29/nov) y 3 (15/dic). Por otro lado, una menor partición a raíces fue reportada en tratamientos con altas frecuencias de defoliación durante el verano, es decir que hay una mayor retención de MS en la parte aérea del cultivo en esa época del año (Teixeira *et al.*, 2008). Lo cual concuerda con la escasa disminución observada en las TC_Alfalfa en los corte 3 (6/ene) y 4 (25/ene) en los tratamientos TE. Estos cambios en la fisiología del cultivo debidos a cambios en el manejo de la defoliación explicarían la mayor estabilidad en las TC_Alfalfa en los tratamientos defoliados más frecuentemente. Finalmente, durante el verano tardío podría estar sucediendo lo que ya se discutió para los tratamientos TA, las menores temperaturas en esa época del año favorecen la fotosíntesis, lo cual explicaría la leve recuperación de las TC_Alfalfa en el corte 6 (14/feb). La escasa variabilidad observada en los tratamientos TE podría estar exacerbadas debido a que el genotipo utilizado pertenece al grado de dormición 9. Ta *et al.* (2020) y Hoppen *et al.* (2022) observaron que los genotipos sin dormición no presentaron respuestas a los cambios en el fotoperíodo cuando eran defoliados muy frecuentemente.

3.4.2. Calidad: variabilidad temporal en los componentes del crecimiento aéreo de alfalfa

Sorprendentemente (predicción 1) todos los diseños evaluados presentaron una variabilidad de la calidad similar (relación hoja:tallo). Esto se explicó debido a que en la

pastura consociada con pasto ovillo las reducciones en las tasas de crecimiento de los componentes aéreos de alfalfa (TC_H y TC_T), fueron similares, manteniendo la relación hoja:tallo estable. A su vez la pastura pura de alfalfa con baja densidad presentó un crecimiento compensatorio de igual magnitud en ambos componentes del crecimiento aéreo, lo que determinó que la relación hoja:tallo se mantuviera constante. Esto reforzaría la idea, presentada en el capítulo 2, que los diseños de siembra evaluados en este trabajo presentaron similares relaciones de competencia entre sus componentes. Esto se traduce, en este caso, en relaciones hoja:tallo similares, sin aumentos en altura (capítulo 2), asociado a competencia por luz dentro del canopeo (Lemaire y Millard, 1999; Lemaire *et al.*, 2005; Ta *et al.*, 2020).

La defoliación TE generó reducciones en las TC_H y TC_T (Figura 3.3a y b) en todo el período experimental, estrechamente asociadas a una reducción en la oferta de MS y la altura de alfalfa (capítulo 2; Hoppen *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2021). Sin embargo, la caída de la TC_T fue mayor que en la TC_H, por lo tanto, los tratamientos TE tuvieron mayor relación hoja:tallo que los tratamiento TA (Figura 3.4). A su vez, la TC_T en los tratamientos TE fue más estable durante el período evaluado, lo cual redundó en una disminución de la variabilidad en la relación hoja:tallo en este tratamiento (predicción 2). Estos resultados se asocian a las menores TC_Alfalfa en los tratamientos TE, menor elongación de brotes, y menor contenido de componentes de sostén -T- del canopeo (Ta *et al.*, 2020). Contrastando con los tratamientos TA que tuvieron mayores TC_Alfalfa y mayor contenido de T, particularmente en los momentos de activo crecimiento (C2 - 29/nov).

3.5. Conclusiones

En pasturas de base alfalfa, durante el primer ciclo reproductivo, el diseño de siembra (densidad de siembra y vecino acompañante) no afectó la variabilidad temporal de la oferta de materia seca (MS) y la calidad de alfalfa.

Por el contrario, el manejo de la defoliación afectó la variabilidad temporal tanto en la oferta de MS como en la calidad de alfalfa. Los resultados mostraron que defoliaciones más frecuentes, botón floral temprano ($\approx 390^{\circ}\text{Cdía}$) en contraste a inicios de floración ($\approx 550^{\circ}\text{Cdía}$), permitieron mantener tasas de crecimiento bajas, incluso en primavera cuando las condiciones ambientales estimulan el crecimiento. Esto generó una menor oferta de MS en el ciclo (capítulo 2) pero una distribución de la oferta de MS más estable entre cortes. Así mismo, el manejo de la defoliación aplicado aumentó la calidad de alfalfa (relación hoja:tallo) y su estabilidad a lo largo del ciclo.

**Capítulo 4. Variabilidad vertical de la oferta y la
calidad forrajera en pasturas de base alfalfa**

4.1. Introducción

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, las fluctuaciones de la oferta de materia seca (MS) y la calidad de los forrajes afectan el patrón de consumo de los animales y, por lo tanto, la eficiencia productiva del sistema. En este sentido, en los sistemas pastoriles, no solo la variabilidad temporal (capítulo 3) será relevante, sino también la variabilidad vertical de la oferta de MS y la calidad de la pastura. La variabilidad vertical de la calidad afecta los patrones de consumo del ganado a media que se profundiza en el perfil del canopeo (Cangiano y Ventroni, 2022; Kloster *et al.*, 2022), determinando tanto la performance productiva animal como el aprovechamiento del forraje.

Es conocida la variabilidad vertical que presenta alfalfa en cuanto a la oferta de MS y al contenido de hojas y tallos (relación hoja:tallo). Por un lado, la MS se concentra en la parte central de las plantas, asociado a una concentración de hojas, que disminuye hacia el ápice y la base, mientras que el peso de los tallos aumenta desde la base hasta el ápice de la planta (Brown *et al.*, 2005; Cangiano y Ventroni, 2022). Por otro lado, la relación hoja:tallo disminuye desde el ápice hasta la base de las plantas, y este mismo patrón es acompañado por la digestibilidad y el contenido de proteína de la MS (Cangiano y Ventroni, 2022). En este sentido, muchos trabajos vinculan parámetros morfológicos como la relación hoja:tallo y la altura, con digestibilidad y contenido de proteína bruta en alfalfa (Sheaffer *et al.*, 2000; Maamouri *et al.*, 2015; Ta *et al.*, 2020). Sin embargo, otros componente asociados a la calidad forrajera, como los minerales, han sido menos explorados.

En este sentido, la distribución vertical de diferentes minerales, determina la calidad nutricional del forraje ofrecido (Ordoñez *et al.*, 2021). El consumo de macro elementos como fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) -macrominerales-, e incluso

cobre (Cu) -microminerales-, son fundamentales para el bienestar animal y la performance productiva de animales de carne y leche (Grace *et al.*, 2010; Fazzio *et al.*, 2013). Para alfalfa, Lanyon y Griffith (1988), reportaron que la concentración de la mayoría de los nutrientes es mayor en hojas que en tallos. Pero también existen diferencias en la concentración de minerales en las hojas en función a su posición en el perfil vertical de las plantas. Así, mientras la concentración de N y P es menor en las hojas basales que en las del ápice del tallo, las hojas basales tienen una mayor concentración de Ca y Mg. Asimismo, la concentración de minerales en el tallo también varía respecto a la posición, la concentración de N, P, Ca, Mg y algunas veces Cu, decrece desde el ápice a la base de los tallos. Es decir que el modo en que se distribuyen los órganos aéreos de alfalfa determinará, no solo la variabilidad vertical de la oferta de MS, la digestibilidad y el contenido de proteína bruta, sino también la oferta de minerales. Por lo tanto, prácticas de manejo que tengan el potencial de cambiar la distribución y el tamaño de los componentes del crecimiento aéreo podrían afectar la variabilidad vertical de la oferta de MS y la calidad nutricional en canopeos de pasturas de base alfalfa.

Decisiones de manejo como el diseño de siembra -densidad de siembra, arreglo espacial y selección de especies- o el manejo de la defoliación, que permitan una mejor distribución de la radiación dentro del perfil vertical del canopeo disminuirán la competencia interna por luz, la elongación de las plantas y la acumulación de estructuras de sostén de menor calidad (Lemaire *et al.*, 1992; Ta *et al.*, 2020). Por otro lado, esta mayor distribución de radiación dentro del canopeo permitirá el mantenimiento de estructuras fotosintéticas en diferentes niveles del perfil vertical por un menor sombreado (Lemaire *et al.*, 2005). Como ya se ha discutido en capítulos anteriores, una menor densidad de siembra o el diseño de pasturas consociadas con gramíneas, podrían estimular el desarrollo de canopeos menos competitivos, con menor altura, disminuyendo la

estratificación vertical de los componentes hoja:tallo, del contenido de minerales y otros nutrientes (Parsons, 1988; Lemaire y Millard, 1999; Park *et al.*, 2003; Jones y Tracy, 2015). Así también, el manejo de la defoliación repercute sobre la estructura vertical de la pastura (Teixeira *et al.*, 2007a, 2008; Berone *et al.*, 2020). La relación hoja:tallo disminuye marcadamente con la madurez del cultivo y la acumulación de biomasa (Ackerly *et al.*, 2000; Cangiano y Ventroni, 2022). Es por esto que, las frecuencias de defoliación actualmente recomendadas para alfalfa (10% floración, Kloster y Zanivoni, 2007; Kloster *et al.*, 2022), generarían canopeos más maduros y productivos, pero también, más altos y con mayor cantidad de biomasa, aumentando la competencia por luz entre sus individuos (Lemaire y Millard, 1999; Chapman, 2016). Esto repercutirá en una mayor variabilidad vertical en la oferta y la calidad debida al sombreo de los estratos inferiores (Kalu y Fick, 1983; Lemaire *et al.*, 2005). Sin embargo, se desconoce la forma en que la combinación de estas prácticas -densidad de siembra, combinación de especies, y manejos de la defoliación- pueden generar canopeos menos variables verticalmente, maximizando la relación entre oferta de MS y calidad, fundamentales para la performance productiva de animales de carne y leche.

4.1.1. Objetivos, hipótesis y predicciones

El objetivo de este capítulo fue evaluar el impacto que ejerce el diseño de siembra y el manejo de la defoliación sobre la variabilidad vertical de la oferta de biomasa y la calidad forrajera de pasturas base alfalfa durante su primer ciclo reproductivo

La hipótesis que guió este capítulo fue:

Los diseños de siembra menos competitivos y las defoliaciones tempranas, y más frecuentes, aumentan la distribución de luz dentro del canopeo, reduciendo la variabilidad vertical en la oferta y la calidad.

De la hipótesis se desprenden las siguientes predicciones:

1. Diseños de siembra menos competitivos (consociados con pasto ovillo o con menor densidad de siembra) disminuirán la variabilidad vertical de las tasas de crecimiento y la relación hoja:tallo.
2. Defoliaciones tempranas disminuirán la variabilidad vertical de las tasas de crecimiento y la relación hoja:tallo.
3. Diseños de siembra menos competitivos disminuirán la variabilidad vertical en el contenido de minerales en pasturas base alfalfa.
4. Defoliaciones tempranas disminuirán la variabilidad vertical en el contenido de minerales en pasturas base alfalfa.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Sitio y diseño experimental

En el campo experimental de la Facultad de Agronomía-UBA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina se establecieron cuatro bloques con tres parcelas de 3 m por 3 m (9 m²), doce parcelas en total. A cada parcela, se le asignó al azar el tratamiento “diseño de siembra” con tres niveles: *Medicago sativa* L. -alfalfa- consociada con gramínea - *Dactylis glomerata* L. -pasto ovillo- ($\alpha\alpha$ +PO, hileras alternas de las especies a 0,175 m), alfalfa pura sembrada con alta densidad ($\alpha\alpha$, hileras a 0,175 m) y alfalfa pura sembrada con baja densidad ($\alpha\alpha^{1/2}$, hileras distanciadas a 0,35 m). En otoño (17/mar/17), se sembró 400 semillas viables/m² para los tratamientos $\alpha\alpha$ +PO (50% de cada especie) y $\alpha\alpha$, y 200 semillas viables/m² en los tratamientos $\alpha\alpha^{1/2}$. Con esto se logró que la distancia entre plantas en la hilera sea igual en todos los tratamientos, pero con distintos arreglos

espaciales entre plantas. Las plantas en los tratamientos con alta densidad $\alpha\alpha$ +PO y $\alpha\alpha$ -tuvieron un arreglo espacial más equidistantes que los tratamientos de baja densidad $\alpha\alpha^{1/2}$ - (rectangularidad 6 y 12 respectivamente, Mattera *et al.*, 2009, 2013). Este diseño experimental involucra parcelas con diseños aditivos y sustitutivos de alfalfa -competencia intra e interespecífica- (Cruz y Lemaire, 1986; Cruz y Soussana, 1997; Figura 2.1).

Al inicio del estado reproductivo de alfalfa, cada una de las doce parcelas se dividió en dos sub-parcelas y se les asignó aleatoriamente el tratamiento de “defoliación” con dos niveles: temprana, más frecuente (TE) y tardía, menos frecuente (TA). Éstos se corresponden a botón floral temprano (E3) e inicios de floración (E5) respectivamente, de la escala de desarrollo morfológico definido por Kalu y Fick (Kalu y Fick, 1981; Fick y Mueller, 1989). Las defoliaciones TE fueron definidas como defoliaciones anticipadas respecto a la defoliación tradicional en el manejo de alfalfa (10% de floración, Kloster y Zanivoni, 2007; Kloster *et al.*, 2022), asociado en este trabajo a las defoliaciones TA.

Se estableció así un arreglo factorial con parcelas divididas en bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al factor diseño de siembra y la parcela dividida, a los tratamientos de defoliación. Los seis tratamientos resultantes fueron $\alpha\alpha^{1/2}$ -TE, $\alpha\alpha^{1/2}$ -TA, $\alpha\alpha$ -TE, $\alpha\alpha$ -TA, $\alpha\alpha$ +PO -TE y $\alpha\alpha$ +PO -TA (Tabla 2.2).

4.2.2. Condiciones ambientales

Durante el período de cortes la temperatura fue en promedio de 24,5°C, incrementándose entre octubre y febrero (20 y 26,5°C en promedio respectivamente, Figura 3.1a). Por su parte la radiación incidente tuvo un valor promedio de 20 MJ/m².d, sin embargo, durante gran parte del período evaluado (desde el 11/nov al 21/ene aproximadamente), mantuvo valores superiores a este valor (Figura 3.1b). Finalmente, el

fotoperíodo, inició el período experimental con valores de 13,98 hs, alcanzó el máximo valor (15,46 hs) durante el 19 y el 22 de diciembre y concluyó el período experimental con 13,75 hs a fines de verano. Se traspasó el umbral de 14 hs (fotoperíodo crítico, Teixeira *et al.*, 2011) el 18 de octubre y el 23 de febrero, en aumento y disminución, respectivamente (Figura 3.1c).

4.2.3. Mediciones

En fechas seleccionadas (Tabla 4.1), además de realizar los cortes de canopeo casi completo (5 cm sobre el suelo, capítulos 2 y 3), se realizaron cortes adicionales en cada subparcela, utilizando un marco especial con diseño 3D de 900 cm² de base y 80 cm de alto. Este marco presenta marcas cada 10 cm en su altura que permite cortar y cosechar submuestras por estrato vertical. Cada corte corresponde a una única muestra por parcela, dos hileras en los tratamientos de alta densidad ($\alpha\alpha$ y $\alpha\alpha$ +PO) y una hilera en los tratamientos de baja densidad ($\alpha\alpha^{1/2}$). En cada corte se obtuvieron 3 submuestras, cada una correspondió a un tercio de la altura del canopeo (Mattera *et al.*, 2013), por encima del remanente de 5 cm sobre el suelo. Esto se asoció para el análisis con los estratos apical, medio y basal, respectivamente, buscando asemejar las muestras obtenidas al patrón de consumo por estratos establecido para bovinos (Laca *et al.*, 1993, 1994). Las muestras de alfalfa fueron separadas en sus componentes tallo (T) y hoja (folíolo+pecíolo, H). Este material se secó en estufa (60 °C) hasta peso seco constante (no fueron corregidas a 105°C), pesadas y ajustadas a una misma unidad de superficie (m²). Se determinó así el peso parcialmente seco de alfalfa (PS, g/m²) para hojas, tallos y total de la biomasa, y la relación hoja:tallo (PS H/PS T).

Todas las variables de oferta de materia seca (MS) fueron expresadas como tasa de crecimiento (TC) en tiempo térmico (TT_{ac}) para compensar en el análisis las diferencias

en la duración de los períodos de rebrote entre los tratamientos (Tabla 4.1). Para esto, se calculó el tiempo térmico acumulado entre cortes usando como temperatura base (t_b)= 1°C cuando la temperatura media ($t_{med.}$) fue menor a 15°C y t_b = 5°C cuando la $t_{med.}$ superaba ese valor (Brown *et al.*, 2005). De esta manera se establecieron los valores de TC de alfalfa, TC de hojas y TC tallos de alfalfa a partir del cociente entre la oferta de MS, o sus componentes individuales, y el tiempo térmico acumulado en el mismo período ($gMS/m^2 \cdot ^\circ Cd$).

Finalmente se hallaron los valores promedios entre los tres cortes realizados para hallar un único valor de TC de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas (TC_H), TC tallos (TC_T) y la relación hoja:tallo, por estrato (apical, medio y basal), para cada uno de los tratamientos evaluados.

Tabla 4.1: Resumen de variables ambientales de interés durante el ciclo del cultivo. El tiempo térmico acumulado (TT_{ac}), cantidad de días por temperatura media (t_m). Se consideró una temperatura base (t_b) para alfalfa de 1°C cuando la temperatura media (t_m) < 15°C, y 5°C cuando la t_m > 15°C (Brown *et al.*, 2005). Se presentan datos promedios.

Corte		Defoliación temprana	Defoliación tardía	Diferencia
C1	Fecha	6/nov	17/nov	
	Días de rebrote	20	31	11
	TT _{ac} (°Cdía)	320	522	202
	Fotoperiodo (hs)	14,65	14,99	0,32
	Rad. Inc. ac. (MJ/m ²)	380	589	209
	Temp. prom. diaria (°C)	20,23	21,23	0,98
C3	Fecha	15/dic	6/ene	
	Días de rebrote	16	25	9
	TT _{ac} (°Cdía)	313	495	182
	Fotoperiodo (hs)	15,44	15,34	-0,1
	Rad. Inc. ac. (MJ/m ²)	352	495	209
	Temp. prom. diaria (°C)	24,58	24,95	0,37
C5	Fecha	25/ene	1/mar	
	Días de rebrote	19	27	8
	TT _{ac} (°Cdía)	443	570	127
	Fotoperiodo (hs)	14,93	13,75	-1,18
	Rad. Inc. ac. (MJ/m ²)	418	570	68
	Temp. prom. diaria (°C)	26,24	26,42	0,18

- **Contenido de minerales**

Una submuestra por estrato del último corte (C5, Tabla 4.1), de la pastura en su conjunto (sin diferenciar por especie -alfalfa y pasto ovillo-), fue utilizada para analizar el contenido de minerales -N (% o 10.000 ppm) y P, Ca, Mg, Na y Cu (ppm)- en el canopeo. La determinación de N se realizó mediante el método de Kjeldahl. Las mediciones de P, Ca, Mg, Na y Cu se realizaron mediante una digestión ácida de la muestra, seguida de la determinación en el digesto por espectrometría de emisión por plasma inducido (LABSPA, CERZOS – CONICET).

4.2.4. Análisis estadístico

Se ajustó un modelo estadístico acorde al diseño experimental utilizado, un factorial en bloques completos con parcelas divididas y medidas repetidas en el espacio. El experimento consistió en seis tratamientos (tipo de pastura con tres niveles y tratamiento de defoliación con dos niveles) en cuatro bloques, doce parcelas principales totales (diseño de siembra), veinticuatro subparcelas totales (momento de corte) y tres estratos (apical, medio y basal). Las variables evaluadas fueron TC de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas y TC tallos de alfalfa (TC_H y TC_T), relación hoja:tallo de alfalfa y contenido de minerales (N, P, Ca, Mg, Na y Cu) de la pastura, por estrato. Se realizó un análisis de varianza, con los efectos fijos “diseño de siembra”, “tratamiento de defoliación” y “estrato” y los efectos aleatorios “bloque”, “parcela” y “subparcela”. Los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro Wilks) y homogeneidad de varianzas (gráfico de dispersión de residuos vs. predichos) fueron probados y aceptados.

Las diferencias significativas fueron evaluadas por medio de comparaciones múltiples (Tukey). Para los análisis se utilizó el paquete nlme v3.1-155 (Pinheiro *et al.*, 2021) y emmeans v1.7.3 (Lenth, 2022) del software R, versión 2022.02.0 (R Core Team, 2022)

(R Core Team, 2022). La variabilidad vertical se analizó a través del coeficiente de variación entre estratos (CV_e).

4.3. Resultados

4.3.1. Estratificación vertical de la oferta en alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo

La tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa) presentó diferencias entre estratos, siendo un 35% más baja para los estratos apical y basal respecto del estrato medio (Figura 4.1, Tabla 4.2 y Tabla A4.1).

Tabla 4.2: Resultados del análisis de varianza, efectos del diseño de siembra (tres niveles: pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo, alfalfa pura con alta densidad y alfalfa pura con baja densidad de siembra), el tratamientos de defoliación (dos niveles: temprana y tardía), el estrato (tres niveles: apical, medio y basal) y su interacción sobre: la tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa), TC de hojas (H), de tallos (T) y relación hoja:tallo de alfalfa, contenido fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), nitrógeno (N), sodio (Na) y cobre (Cu) en la pastura (n=4). Se muestran los valores de $F_{(gln, gld)}$ y p: *** p<0,001; ** p<0,01; *p<0,05 y ns= diferencias no significativas.

Variable	Efecto Diseño (D) F y p	Efecto Defoliación (C) F y p	Efecto Estrato (E) F y p	Interacción Tipo, F y p	Referencia
TC_Alfalfa	(2,6) 16,09 **	(1,9) 97,46 ***	(2,36) 20,92 ***	ns	Figura 4.1
TC_H	(2,6) 11,33 **	(1,9) 35,58 ***	(2,36) 93,59 ***	C x E (2,36) 9,69 ***	Figura 4.2 a
TC_T	(2,6) 13,78 **	(1,9) 106,36 ***	(2,36) 176,17 ***	ns	Figura 4.2 b
hoja:tallo	ns	(1,9) 113,6 ***	(2,36) 674,12 ***	C x E (2,36) 9,65 ***	Figura 4.3
P	ns	ns	ns	D x E (4,24) 4 *	Figura 4.4
Ca	ns	(1,6) 14,72 **	(2,24) 14,46 ***	D x C (2,6) 7,1 *	Figura 4.5
Mg	ns	ns	(2,24) 28,49 ***	C x E (2,24) 6,44 **	Figura 4.6
N	ns	(1,6) 8,48 *	(2,24) 123,58 ***	ns	Figura 4.7
Na	ns	ns	ns	ns	
Cu	ns	ns	ns	ns	

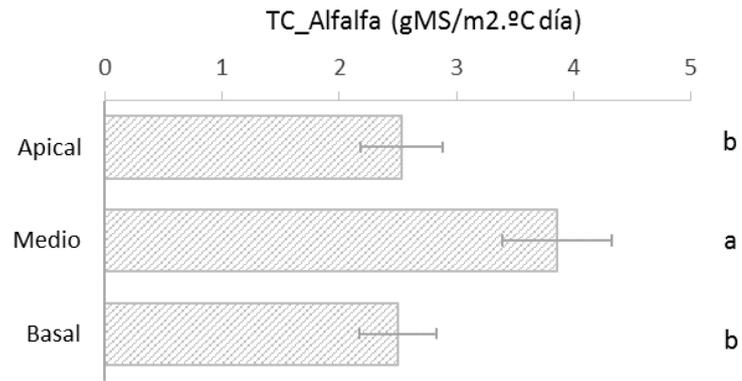


Figura 4.1: Tasa de crecimiento de alfalfa (TC_Alfalfa, gMS/m².°Cd) por estrato (apical, medio y basal). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$).

Por su parte, el diseño de siembra afectó la TC_Alfalfa (Tabla 4.2 y Tabla A4.1). La pastura consociada con pasto ovido (PO), presentó TC_Alfalfa un 40% más baja que la observada en las pasturas puras de alfalfa, independientemente de su densidad de siembra ($2 \pm 0,45$ gMS/m².°Cd vs. $3,45 \pm 0,29$ gMS/m².°Cd). Sin embargo, esta disminución en las TC_Alfalfa fue similar entre los tres estratos y, por lo tanto, no hubo efectos sobre la variabilidad vertical en las TC_Alfalfa. Los valores de contraste entre las medias fueron para $\alpha\alpha-\alpha\alpha+PO$ $t=4,5$ y $p=0,009$ $\alpha\alpha^{1/2}-\alpha\alpha+PO$ $t=5,2$ y $p=0,005$ y $\alpha\alpha^{1/2}-\alpha\alpha$ $t=-0,67$ y $p=0,8$.

De la misma manera, la defoliación temprana (TE) presentó 60% menos TC_Alfalfa respecto a la tardía (TA), para todos los estratos ($1,64 \pm 0,17$ gMS/m².°Cd vs. $4,28 \pm 0,3$ gMS/m².°Cd, Tabla 4.2 y Tabla A4.1). Esto implicó, que no hubiera un efecto neto sobre la variabilidad vertical en las TC_Alfalfa debida a modificaciones en los tratamientos de defoliación.

4.3.2. Estratificación vertical de la calidad de alfalfa y de la pastura

- **Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa**

El diseño de siembra afectó las tasas de crecimiento de hojas (TC_H) y tallos (TC_T). Independientemente del estrato evaluado, la pastura consociada con pasto ovillo tuvo un 40% menos TC_H ($0,99 \pm 0,16$ gMS/m².°Cd vs. $1,65 \pm 0,18$ gMS/m².°Cd, Tablas 4.2 y A4.2) y 43% menos TC_T ($0,97 \pm 0,17$ gMS/m².°Cd vs. $1,7 \pm 0,2$ gMS/m².°Cd, Tablas 4.2 y A4.3), respecto a las pasturas puras de alfalfa. Esto determinó que la relación hoja y tallo (hoja:tallo), no se viera afectada por los diseños de siembra evaluados. Los valores de contraste entre las medias fueron para $\alpha\alpha\text{-}\alpha\alpha\text{+PO}$ $t=4,1$ y $p=0,01$ $\alpha\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\alpha\text{+PO}$ $t=4$ y $p=0,015$ y $\alpha\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\alpha$ $t=0,08$ y $p=0,99$ para TC_H. Para la TC_T los contrastes entre las medias fueron para $\alpha\alpha\text{-}\alpha\alpha\text{+PO}$ $t=3,8$ y $p=0,02$ $\alpha\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\alpha\text{+PO}$ $t=5$ y $p=0,005$ y $\alpha\alpha^{1/2}\text{-}\alpha\alpha$ $t=1,2$ y $p=0,5$.

El manejo de la defoliación también afectó ambos componentes del crecimiento aéreo. El efecto sobre la TC_H dependió del estrato observado (Figura 4.2, Tablas 4.2 y A4.2), los estratos apical y medio tuvieron 57% menos TC_H con defoliación TE, mientras que el estrato basal no se vio afectado por el tratamiento de defoliación. Las TC_T, fueron un 67% más bajas en la defoliación TE independientemente del estrato observado (Figura 4.2b, Tablas 4.2 y A4.3). Estas diferencias en el efecto de la defoliación sobre los componentes del crecimiento aéreo generaron una menor variabilidad vertical en la TC_H con defoliación TE (50% y 62%, para el coeficiente de variación entre estratos -CV_e- de TE y TA respectivamente), mientras que no hubo efectos sobre la variabilidad vertical en las TC_T.

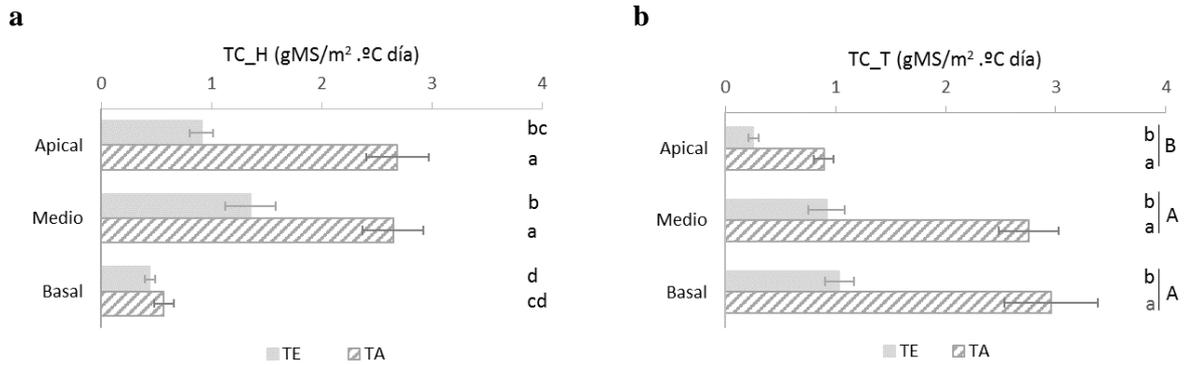


Figura 4.2: Tasa de crecimiento de hojas (TC_H, gMS/m²·°Cd, panel a) y tallos (TC_T, gMS/m²·°Cd, panel b) de alfalfa, por estrato (apical, medio y basal) y para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras minúsculas muestran diferencias significativas entre estratos y tratamiento de defoliación, panel a. Letras minúsculas muestran diferencias significativas entre tratamientos de defoliación dentro de cada estrato y letras mayúsculas entre estratos, panel b.

Debido a la forma diferencial en que el tratamiento de defoliación afectó a los componentes del crecimiento aéreo en los distintos estratos, la relación hoja:tallo presentó un efecto interacción entre el tratamiento de defoliación y el estrato (Tablas 4.2 y A4.4). Si bien, la relación hoja:tallo fue mayor en defoliación TE que TA para todos los estratos, la magnitud de esta diferencia varió entre estratos. La relación hoja:tallo en el estrato apical fue un 55% mayor en defoliación TE respecto a TA, en el estrato medio fue 85% más alta y en el estrato basal 164% (Figura 4.3). Esto determinó que la variabilidad vertical en la relación hoja:tallo fuera un 12% menor en los tratamientos TE (93% y 106%, CV_e para TE y TA respectivamente).

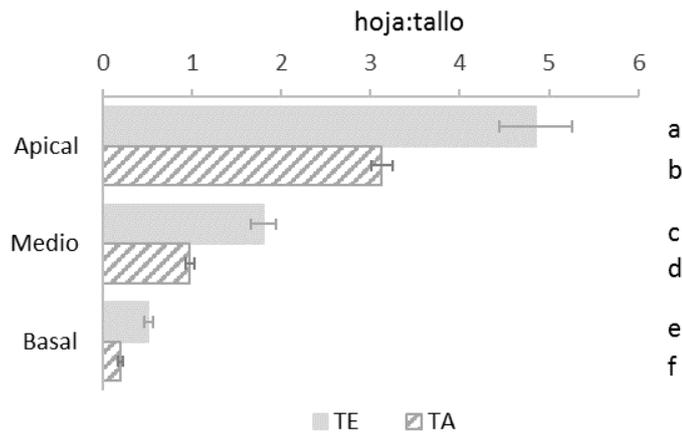


Figura 4.3: Relación hojas y tallo de alfalfa (hoja:tallo) por estrato (apical, medio y basal) y para dos tratamientos de defoliación (temprana-TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha= 0,05$). Letras minúsculas muestran diferencias significativas para estratos y tratamientos de defoliación.

• Contenido de minerales en la pastura

El efecto del diseño de siembra y el tratamiento de defoliación sobre la estratificación vertical de los minerales mostró un comportamiento particular para cada uno de los minerales evaluados.

Solo el diseño de siembra tuvo efecto sobre la estratificación vertical del contenido de fósforo -P, ppm- (Tablas 4.2 y A4.5). En la pastura consociada con pasto ovillo el contenido de P fue 112% mayor en el estrato basal que en el apical (Figura 4.4). Lo contrario ocurrió en la pastura pura de alfalfa con alta densidad de siembra, en donde el contenido de P fue 48% menor en el estrato basal que en el apical (Figura 4.4). La pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra no presentó estratificación vertical en el contenido de P (Figura 4.4). La variabilidad vertical (CV_e) fue similar, para los diseños densos ya sean consociados con pasto ovillo o puros (35% y 34%, respectivamente) y fue menos variable (28%) en la pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra.

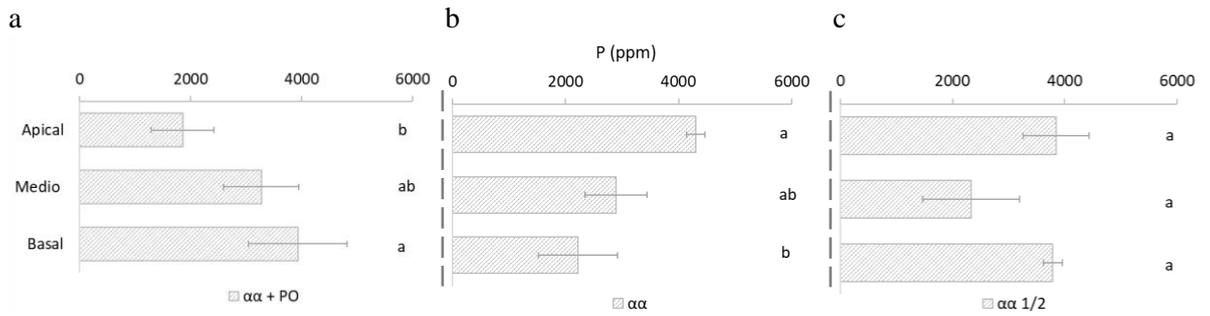


Figura 4.4: Contenido de fósforo (P, ppm) para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo – $\alpha\alpha$ +PO, panel a-, alfalfa pura con alta densidad – $\alpha\alpha$, panel b- y alfalfa pura con baja densidad – $\alpha\alpha$ 1/2, panel c-) y tres estratos (apical, medio y basal). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre estratos, para cada diseños de siembra: $\alpha\alpha$ +PO, $\alpha\alpha$ y $\alpha\alpha$ 1/2, respectivamente.

El contenido de calcio (Ca, ppm) tuvo una marcada estratificación vertical (Tablas 4.2 y A4.6) que no se vio afectada por los tratamientos de diseño de siembra y manejo de la defoliación evaluados. El contenido de Ca fue 28% menor en el estrato basal que en los estratos apical y medio (Figura 4.5a). Sin embargo, el diseño de siembra y el tratamiento de defoliación presentaron un efecto de interacción para el contenido de calcio global del canopeo (Tablas 4.2 y A4.6). Así, los diseños consociados con pasto ovillo, presentaron un 40% menos Ca en los tratamientos de defoliación TE respecto a los TA (Figura 4.5b), sin diferenciarse de los diseños puros de alfalfa bajo ninguno de los tratamientos de defoliación. A su vez, para las pasturas puras de alfalfa el contenido de Ca no presentó diferencias bajo ninguno de los tratamientos de defoliación evaluados (Figura 4.5b).

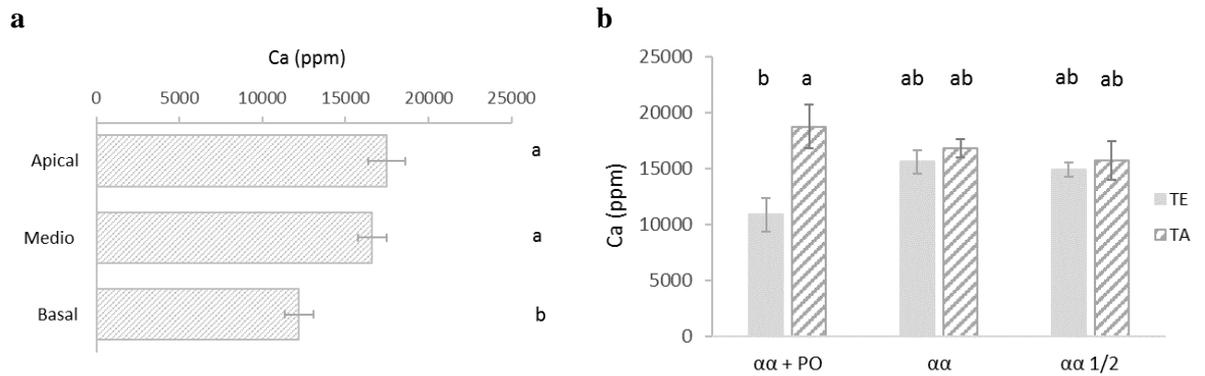


Figura 4.5: Contenido de calcio (Ca, ppm) por estrato (panel a) y para tres diseños de siembra (pastura de alfalfa consociada con pasto ovillo - $\alpha\alpha$ +PO-, alfalfa pura con alta densidad - $\alpha\alpha$ - y alfalfa pura con baja densidad - $\alpha\alpha$ 1/2-) y para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-, panel b). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

Solo el manejo de la defoliación, afectó el patrón de estratificación vertical del contenido de magnesio -Mg, ppm- (Tablas 4.2 y A4.7). El contenido de Mg fue similar en los estratos apical y medio independientemente del manejo de la defoliación, pero fue 22% menor en el estrato basal de defoliación TA (Figura 4.5). Esto determinó una menor variabilidad (CV_e) en los tratamientos TE (12%), respecto a los TA (31%).

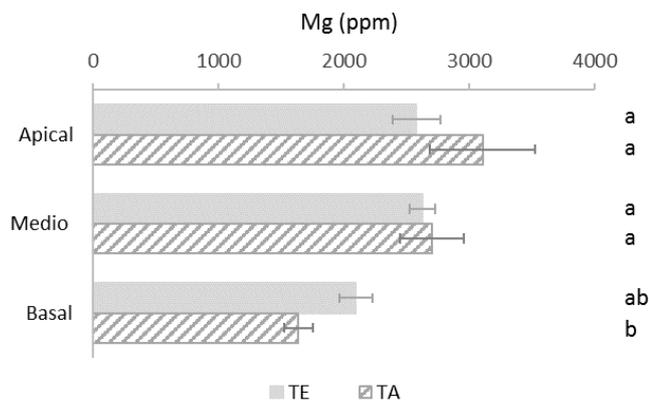


Figura 4.6: Contenido de magnesio (Mg, ppm) por estrato (apical, medio y basal), para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

Por su parte el contenido de nitrógeno (N, ppm), tuvo una marcada estratificación vertical (Tablas 4.2 y A4.8), que no se vio afectada por ninguno de los tratamientos

evaluados. Fue máximo en el estrato apical y decreció hacia el estrato basal, la diferencia más marcada se observó entre el estrato basal y medio (35%, Figura 4.7a). Por su parte, el manejo de la defoliación afectó el contenido global de N en el canopeo (Tablas 4.2 y A4.8). Los tratamientos de defoliación TE presentaron un 23% más nitrógeno que los tratamientos TA (Figura 4.7b).

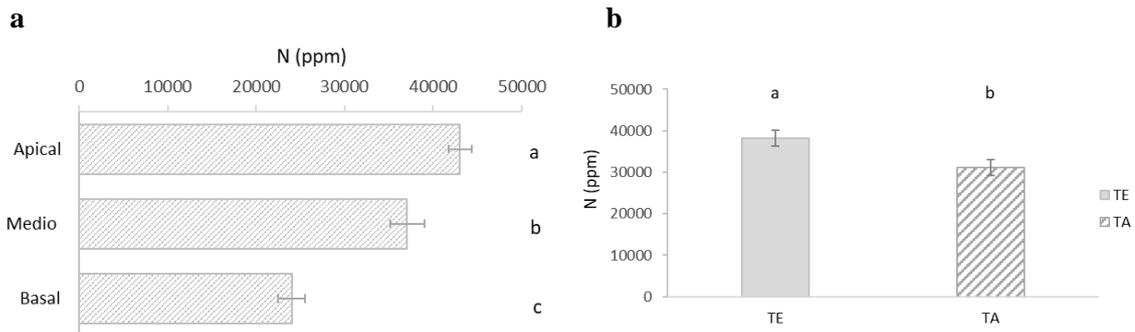


Figura 4.7: Contenido de nitrógeno (N, ppm) por estrato (panel a) y para dos tratamientos de defoliación (temprana -TE- y tardía -TA-, panel b). Se muestran valores promedios, barras de error (EE) y diferencias significativas ($\alpha=0,05$). Letras diferentes muestran diferencias significativas.

Tanto el contenido de sodio (Na) como el de cobre (Cu), no presentaron un patrón marcado de distribución entre estratos y no fueron afectados por el diseño de siembra o el manejo de la defoliación (Tablas 4.2, A4.9 y A4.10). Los contenidos de estos minerales fueron en promedio 331 ± 32 ppm y 53 ± 4 ppm, para Na y Cu respectivamente.

4.4. Discusión

4.4.1. Estratificación vertical de la oferta en alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo

Las TC_Alfalfa presentaron el patrón comúnmente aceptado para la especie, con una mayor concentración de materia seca (MS) en el estrato medio del canopeo, disminuyendo tanto hacia el ápice como hacia la base de la planta (Brown *et al.*, 2005;

Cangiano y Ventroni, 2022). Y, contrariamente a lo esperado (predicción 1 y 2), este patrón no fue alterado por las prácticas de manejo evaluadas.

En la pastura consociada con pasto ovilla, como ya se había visto en los capítulos 2 y 3, las TC_Alfalfa disminuyeron marcadamente, y con similar magnitud en todos los estratos del canopeo. Esto refuerza la idea planteada en los capítulos anteriores, las plantas de pasto ovilla generaron una alta competencia por los recursos aéreos frente a alfalfa y, ésta competencia, fue similar en todos los estratos del canopeo. Por otro lado, había quedado demostrado que la pastura pura de alfalfa con baja densidad de siembra aumentó sus TC por planta, igualando las TC_Alfalfa por superficie de la pastura pura con alta densidad de siembra (capítulos 2 y 3). Sumado a esto, los resultados de este capítulo mostraron que, esta respuesta compensatoria, fue similar en todos los estratos -apical, medio y basal- del canopoeo. Es decir que los arreglos de siembra evaluados para las pasturas puras de alfalfa no difirieron en cuanto a la intercepción y distribución de luz dentro del canopeo (Mattera *et al.*, 2013).

Similar a lo anterior, el manejo de la defoliación no afectó la estratificación de la oferta de materia seca (MS) en alfalfa. La defoliación temprana (TE) afectó las TC_Alfalfa, pero la magnitud del cambio fue similar en todos los estratos. Esto estaría relacionado a la fuerte regulación fisiológica de la deposición de órganos aéreos en alfalfa, tanto el filocrono como la tasa de ramificación y senescencia no serían afectadas por cambios en el manejo de la defoliación (Teixeira *et al.*, 2007b). La ramificación tiene un desfase con la aparición de nudos, iniciándose aproximadamente en el cuarto nudo desde el ápice (Brown *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2007b), mientras que la iniciación y el desarrollo de nuevos brotes se detiene, y la senescencia se incrementa, a medida que se cierra el canopeo (Teixeira *et al.*, 2007b). Estos patrones de crecimiento definirían, en forma combinada, la mayor acumulación de órganos aéreos en las partes medias del

canopeo, con una disminución hacia el ápice, por el retraso de la ramificación, y hacia la base, por el aumento de la senescencia y menor actividad de ramificación por sombreado de estos estratos.

4.4.2. Calidad forrajera

- **Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa**

El diseño de siembra no afectó la estratificación de la oferta de los componentes aéreos en alfalfa (predicción 1). Es decir, que los tres diseños de siembra evaluados generaron similares relaciones competitivas, distribución de luz dentro del canopeo y patrones de estratificación de órganos aéreos (Lemaire *et al.*, 2005; Mattera *et al.*, 2013).

Por el contrario, y tal como se esperaba (predicción 2), el manejo de la defoliación modificó la estratificación vertical de los componentes aéreos de alfalfa (Figura 4.2). La defoliación TE, determinó relaciones hoja:tallo más estables entre los estratos (Figura 4.3). Esto se asoció, por un lado, a una menor disminución del contenido de hojas (H) en el estrato basal (Figura 4.2a), posiblemente debido a una menor altura (Figura 2.5) y una mayor llegada de luz a los estratos inferiores del canopeo (Lemaire *et al.*, 2005; Mattera *et al.*, 2013). Por otro lado, hubo una fuerte disminución de la acumulación de tallos (T) en los tratamientos TE (Figura 4.2b). Esto se asoció a un menor desarrollo y altura de las plantas (capítulo 2) y una mejor distribución de la luz dentro del canopeo, lo que determina una menor necesidad de estructuras de sostén que elonguen T en busca de posiciones mejor iluminadas (Lemaire *et al.*, 2005). Datos similares fueron reportados por Teixeira *et al.* (2007a), estos autores encontraron que cuando alfalfa era defoliada con más frecuencia la biomasa se distribuía homogéneamente entre las distintas categorías de brotes (dominantes, intermedios y suprimidos), mientras que cuando se defoliaba menos frecuentemente predominaban los brotes dominantes. Estos autores asociaron las

diferencias a aumentos en el índice de área foliar y menor transmisión de la radiación fotosintéticamente activa dentro del canopeo cuando los canopeos eran menos frecuentemente defoliados.

- **Contenido de minerales en la pastura**

Contrariamente a lo esperado (predicción 3 y 4), las prácticas de manejo evaluadas afectaron parcialmente a la variabilidad vertical del contenido de minerales y, el tipo de respuesta, fue específica para cada uno de los minerales evaluados.

El contenido de fósforo (P) mostró una estratificación vertical diferencial en función al diseño de siembra evaluado (Figura 4.4). El contenido de este elemento es similar en alfalfa que en pasto ovillo, entre 2.000 y 3.000 ppm (Meissner *et al.*, 1999; Juknevičius *et al.*, 2007). Sin embargo, su concentración dentro de los distintos órganos es contrastante. Mientras que alfalfa presenta una mayor concentración en hojas que en tallos (3.600 y 2.500 ppm, respectivamente -Lanyon y Griffith, 1988-), pasto ovillo presenta menor concentración de P en las láminas que en las vainas (1.400 y 2.000 ppm respectivamente -Whitehead, 2000-). Esto justificaría, en parte, altas concentración de fósforo en los estratos basales de los tratamientos consociados con pasto ovillo, donde el contenido de vainas es mayor. Sin embargo, es posible que los altos valores observados en este caso (3.900 ppm) estén asociados a tallos más finos de alfalfa por ser canopeos más bajos (Figura 2.5), generando un aporte adicional de este elemento (Lanyon y Griffith, 1988). Por otro lado la menor concentración de P en el estrato basal de los tratamientos puros de alfalfa con alta densidad de siembra, se debería a un mayor contenido de tallos gruesos, más lignificados y con menor contenido de P (Lanyon y Griffith, 1988). Por el contrario, en los estratos apicales del diseño consociado con pasto ovillo, la presencia de láminas de la gramínea generaría un efecto de dilución del P por

su menor contenido en este elemento. Mientras que, en los diseños puros de alfalfa, los estratos apicales presentan los mayores contenidos de P por la alta proporción de hojas en estos estratos. La pastura pura de alfalfa con baja densidad no presentó diferencias significativas entre estratos, los estratos basales tuvieron valores mayores posiblemente asociados a un contenido de tallos más finos, mientras que los estratos apicales obtuvieron valores mayores por estar compuestos casi exclusivamente por hojas de alfalfa. A su vez, esta pastura presentó valores adecuados de P para la nutrición animal, mientras que el estrato apical de la pastura consociada con pasto ovillo y el estrato basal de la pastura pura de alfalfa con alta densidad, no llegaron a cubrir los requerimientos animales tanto para producción de carne como leche (3.600 ppm; Stockdale, 1999; Juknevičius *et al.*, 2007). Sin embargo, si bien el tratamiento consociado con pasto ovillo, presentó altos valores de variabilidad entre estratos para el contenido de P, este aumentó desde el ápice hacia la base de los tallos, generando un aporte de calidad en estos estratos.

El contenido de calcio (Ca) mostró una marcada estratificación en su distribución y evidenció una interacción entre el diseño de siembra y el manejo de la defoliación (Figura 4.5). El Ca se concentra mayoritariamente, más de tres veces, en hojas y láminas que en tallos de alfalfa o vainas de pasto ovillo, y su concentración es superior en alfalfa respecto a pasto ovillo (15.000 vs. 3.000 ppm; Lanyon y Griffith, 1988; Whitehead, 2000; Juknevičius *et al.*, 2007). Esto justifica, por un lado, la estratificación encontrada en el contenido de Ca, similar a la estratificación en las TC_H, los estratos con mayor contenido de hojas tuvieron mayores contenidos de Ca, independientemente del diseño de siembra y el tratamiento de defoliación (Figura 4.2 y 4.3). Pero también, el efecto generado en los diseños consociados con pasto ovillo y defoliaciones tempranas, respondería a un mayor contenido de MS de pasto ovillo en estos tratamientos (capítulo 2, Figura 2.3). Este mayor contenido de MS de pasto ovillo, con concentraciones menores

de Ca respecto a alfalfa, generaría un efecto de dilución del contenido de Ca total de la pastura. A pesar de las diferencias encontradas, en todos los casos el contenido de Ca fue superior a los requerimientos animales tanto para producción de carne como leche (4.000-5.000 ppm; Juknevičius *et al.*, 2007, Stockdale, 1999).

La estratificación vertical del contenido de magnesio (Mg) solo fue afectada por el manejo de la defoliación (Figura 4.6). El contenido de Mg es similar en hojas y tallos de alfalfa (4.400 vs. 3.500 ppm), superior en hojas que en vainas de pasto ovinillo (2.500 vs. 1.000 ppm) y en alfalfa respecto a pasto ovinillo (3.000 vs. 1.500-2.000 ppm; Lanyon y Griffith, 1988; Whitehead, 2000; Juknevičius *et al.*, 2007). Las escasas diferencias en valores absolutos en el contenido de este mineral entre órganos aéreos y entre las especies evaluadas, podría justificar la falta de respuesta a los cambios en el diseño de siembra. Por otro lado, el manejo de la defoliación generó una menor caída en el contenido de Mg en el estrato basal de los tratamientos de defoliación TE (Figura 4.6), asociado a un mayor contenido de hojas en este estrato (Figura 4.2A y 4.3), con mayor contenido de Mg respecto a las hojas superiores (Lanyon y Griffith, 1988). Esto determinó una menor variabilidad vertical en la distribución de este elemento y contenido aceptable para la alimentación animal, incluso en los estratos basales de los tratamientos de defoliación TE (2.000 ppm). Por el contrario el estrato basal en defoliación TA presentó contenidos de Mg por debajo de los requerimientos animales (1.600 ppm; Stockdale, 1999; Juknevičius *et al.*, 2007).

El contenido de N, por su parte, presentó una marcada estratificación vertical y fue afectado por la frecuencia de defoliación. El contenido de este elemento es muy superior en alfalfa que en pasto ovinillo. Y está fuertemente concentrado en las hojas y láminas, respecto a los tallos y vainas, 56.000 vs. 20.000 ppm en alfalfa (Lanyon & Griffith, 1988) y 13.500 vs. 5.000 ppm en pasto ovinillo (Whitehead, 2000). Esto justificó que el patrón de

distribución de N se asoció estrechamente al patrón de distribución de la relación hoja:tallo de alfalfa (Figura 4.3). Fue máximo en los estratos apicales, donde la relación hoja:tallo fue máxima, pero también donde la radiación interceptada es máxima, lo que favorece la partición de este elemento hacia esas posiciones del canopeo (Lanyon y Griffith, 1988; Lemaire *et al.*, 1992, 2005). Y disminuyó hacia los estratos basales con menor contenido de hojas y mayor sombreo. Así mismo la defoliación TE aumentó el contenido de este elemento sin afectar la distribución dentro de la planta, asociado, a la mayor proporción de hojas en todos los estratos de este tratamiento respecto a la defoliación TA (Figura 4.3).

El contenido de Na y Cu es muy bajo tanto en alfalfa como en pasto ovillo, aproximadamente 500 y 3 ppm respectivamente y no presentan una distribución diferencial entre órganos aéreos o una distribución vertical definida como el resto de los minerales evaluados (Whitehead, 2000; Sonohat *et al.*, 2002; Juknevičius *et al.*, 2007). Esto podría justificar que en este trabajo no se haya encontrado una distribución vertical marcada de estos elementos, ni efectos debidos al diseño de siembra o el manejo de la defoliación. Los valores observados están muy por debajo de lo requerido por animales en producción, 1.000 ppm Na y 10.000 ppm Cu (Stockdale, 1999; Juknevičius *et al.*, 2007). Sin embargo no habría que perder de vista que la selectividad animal podría hacer que los contenidos de estos minerales en la dieta cosechada por los animales sean superiores y adecuados a sus requerimientos (Gregorini *et al.*, 2015).

4.5. Conclusiones

El diseño de siembra tuvo escasa influencia en la variabilidad vertical de la oferta de materia seca y la relación hoja:tallo característica de los cultivos de alfalfa. Sin embargo,

afectó la variabilidad vertical en el contenido de fósforo. Este elemento se distribuyó más homogéneamente en los diseños puros de alfalfa de baja densidad de siembra frente a ambos diseños densos, ya sean puros o consociados. Así mismo, aunque sin afectar la variabilidad vertical, el diseño de siembra afectó el contenido global de calcio. Los diseños consociados con pasto ovillo y con defoliaciones frecuentes presentaron los menores contenidos de este elemento.

La frecuencia de defoliación no generó cambios en la variabilidad vertical de la oferta de materia seca, pero sí en la calidad nutricional. La defoliación temprana disminuyó la variabilidad vertical de la relación hoja:tallo y del contenido de magnesio. Y, aunque sin afectar la variabilidad vertical, aumentó el contenido de nitrógeno en todo el canopeo.

Capítulo 5. Conclusión general

El presente trabajo de tesis analizó diferentes prácticas de manejo (diseño de siembra -densidad de siembra, arreglo espacial y especies- y manejo de la defoliación) y su impacto en la oferta y la calidad, de las pasturas en general y la alfalfa en particular. A continuación, se sintetizan los principales hallazgos de esta tesis, se mencionan algunas implicancias prácticas de sus resultados, y finalmente se esbozan posibles futuras líneas de investigación.

5.1. Principales hallazgos del trabajo de tesis

El avance de la agricultura ha generado una serie de cambios en la práctica de la actividad ganadera. Este fenómeno ha conducido a distintos procesos de intensificación de las actividades ganaderas, uno de ellos basado en la intensificación de procesos. La intensificación basada en procesos requiere de la planificación de las siembras y del uso eficiente de las pasturas en sistemas de producción animal (Horan y Roche, 2020). Uno de los objetivos sería efficientizar el diseño de siembra de pasturas y su utilización a fin de obtener pasturas densas, productivas, de calidad y persistentes, y un uso eficiente de las mismas de manera de aumentar el flujo de forraje hacia el animal. La estructura de la pastura define la oferta y la calidad y condiciona el consumo de forraje y la producción animal.

La alfalfa (*Medicago sativa* L.), tiene una estructura marcadamente heterogénea tanto vertical como temporalmente. En este sentido, existe abundante información de los efectos generados por cambios en el diseño, el arreglo espacial entre plantas y la frecuencia de defoliación sobre el compromiso entre la oferta y la calidad en cultivos puros de alfalfa (Teixeira *et al.*, 2007b, 2008; Mattera *et al.*, 2009, 2013; Sardiña *et al.*, 2015; Berone *et al.*, 2017; Olivo, 2018). También los efectos sobre la digestibilidad y el contenido de proteína han sido ampliamente estudiadas (Sheaffer *et al.*, 2000; Ta *et al.*,

2020; Ordoñez *et al.*, 2021; Eckberg *et al.*, 2022; Hoppen *et al.*, 2022). Sin embargo, se desconoce cómo estas prácticas de manejo influyen sobre otros atributos de la calidad como puede ser el contenido de minerales. Así como también se cuenta con escasa información acerca de los resultados obtenidos al variar las densidades de siembra y los vecinos acompañantes en cultivos consociados, o por la interacción de estas herramientas de control de la estructura cuando se las aplica en conjunto con diferentes manejos de la defoliación.

Esta tesis demostró que los cambios en el diseño de siembra no tuvieron impacto en la oferta de materia seca y afectaron muy poco a las variables morfológicas asociadas a la calidad forrajera. Los diseños consociados con pasto ovinillo no tuvieron efectos en la oferta de materia seca de la pastura, pero la oferta de alfalfa cuando estuvo consociada con pasto ovinillo fue un 50% menor a la observada en las pasturas puras de alfalfa, sin afectar la calidad general de alfalfa (relación hoja:tallo y altura de alfalfa, capítulo 2). La distribución estacional de alfalfa no se vio modificada por la presencia de pasto ovinillo, la oferta fue en promedio un 50% menor en todos los cortes y la calidad de alfalfa no se vio afectada (capítulo 3). Así mismo, el vecino pasto ovinillo no tuvo efecto sobre la distribución vertical de la oferta de alfalfa (40% más baja, en promedio, para todos los estratos), y tuvo escaso efecto en la calidad de la pastura (no modificó la relación hoja:tallo de alfalfa, pero modificó la estratificación vertical de fósforo -P-; capítulo 4). Los diseños puros de alfalfa con baja densidad de siembra no difirieron en ningún aspecto de los diseños puros con alta densidad, excepto en la estratificación vertical de P (capítulo 4). Estos resultados en su conjunto muestran que pasto ovinillo ejerció una fuerte competencia por los recursos aéreos en la pastura y que, en canopeos densos, esta competencia inter específica fue similar a la ocasionada por la competencia entre plantas de alfalfa (intra específica). Así mismo, los mecanismos de regulación tamaño:densidad

de alfalfa permitieron compensar la menor densidad de siembra, igualando oferta y calidad, tanto dentro del perfil, como durante todo el ciclo reproductivo.

Hubo algunos efectos conjuntos del diseño de siembra y el manejo de la defoliación. La pastura consociada con pasto ovilla presentó una oferta de materia seca similar entre ambos tratamientos de defoliación (botón floral temprano $\approx 390^\circ\text{Cdía}$, más frecuente e inicio de floración $\approx 530^\circ\text{día}$, menos frecuente; Kalu y Fick, 1981*b*; Fick y Mueller, 1989) asociada a la respuesta favorable de las tasas de crecimiento (TC) de pasto ovilla a las defoliaciones más frecuentes (capítulo 2). Sin embargo, la mayor oferta de pasto ovilla observada en la pastura consociada defoliada en botón floral temprano, respecto al mismo diseño de siembra defoliado en inicio de floración, generó una caída del 40% en el contenido global de calcio. Asociado a un efecto de dilución por aumentos en los contenidos de materia seca de la gramínea con menor contenido de calcio que alfalfa (capítulo 4). A su vez, cuando la defoliación se realizó a inicios de floración, el diseño consociado con pasto ovilla fue un 13% más bajo respecto a los tratamientos puros de alfalfa con alta densidad de siembra. Pero esto no repercutió en otros componentes del crecimiento aéreo, ni en la oferta de materia seca (capítulo 2). Estos resultados sugieren que la interacción entre los diseños de siembra y el manejo de la defoliación son escasos y asociados a un mayor aporte de la gramínea a la oferta total de la pastura.

Los cambios en el tratamiento de defoliación tuvieron las mayores respuestas tanto en oferta de materia seca como en calidad de pasturas de base alfalfa. Las pasturas defoliadas en botón floral temprano tuvieron, en generales, un 50% menos oferta de materia seca, una relación hoja:tallo un 15% mayor y un 35% menor altura (capítulo 2). La defoliación en botón floral temprano permitió estabilizar la oferta de materia seca durante el ciclo reproductivo de alfalfa, ésta fue un 37% menos variable y no presentó los picos productivos que se observaron cuando la defoliación se realizó en inicio de

floración. Lo mismo sucedió con la calidad, debido a una menor acumulación de tallos, principalmente en los cortes muy productivos de primavera, y una distribución más estable de la relación hoja:tallo en la defoliación en botón floral temprano respecto a la defoliación en inicio de floración (capítulo 3). A su vez, el manejo de la defoliación no modificó la variabilidad vertical de la oferta de materia seca, pero sí lo hizo respecto a la calidad. Las pasturas defoliadas en botón floral temprano presentaron un 12% menos de variabilidad vertical, asociada a un mayor contenido de hojas en los estratos basales de estos tratamientos. A su vez, esto determinó una menor variabilidad (60% menos) en el contenido de magnesio, asociado a un aumento de este mineral en los estratos basales de los tratamientos con defoliación más frecuente. Finalmente, estos tratamientos permitieron incrementar un 23% el contenido de nitrógeno en todo el canopeo, mejorando la calidad general de la biomasa ofrecida en las defoliaciones en botón floral temprano. Estos resultados reafirman lo reportado por otros autores (Cangiano y Ventroni, 2022), mayores frecuencias de defoliación disminuyen la oferta de materia seca pero, en contraposición, aumentan la calidad del forraje ofrecido.

Por lo anterior, se deduce que pasto ovillo no fue un buen acompañante para alfalfa si lo que se busca es promover la productividad o la calidad de ésta. Y que botón floral temprano (Fick y Mueller, 1989), puede ser un signo visual sólido para la determinación del manejo de la defoliación a campo, así como también, para estabilizar la oferta y la calidad del forraje ofrecido tanto temporal como verticalmente.

5.2. Implicancias prácticas

Los resultados de este trabajo demostraron que cambios en prácticas de manejo como el diseño de siembra y la defoliación, tienen la potencialidad de modificar la oferta

y la calidad de pasturas de base alfalfa, pero también, modular su variabilidad temporal y vertical y, por lo tanto, el aprovechamiento animal de estos forrajes.

En este sentido, cambios en la frecuencia de defoliación asociados a aprovechamientos más tempranos a los tradicionalmente utilizados (botón floral temprano vs. 10% de floración) demostraron mejorar la calidad del forraje. Como ya ha sido mostrado en otros trabajos, esto tiene la potencialidad de mejorar la performance animal a pesar de la menor oferta de materia seca (Berone et al., 2020; Moot et al., 2020). Pero también, se podría mejorar el aprovechamiento del forraje por parte de los animales al disminuir las fluctuaciones temporales y dentro del perfil vertical del canopeo.

Es decir, que defoliaciones en botón floral temprano serían recomendables en aquellos planteos de altos requerimientos, que requieran forraje de muy buena calidad (relación hoja:tallo, altura y contenido de minerales), con una mejor distribución temporal y vertical de la oferta.

5.3. Perspectivas para futuras investigaciones

Los resultados hallados en esta tesis generan nuevas inquietudes respecto a la respuesta de pasturas de base alfalfa a prácticas de manejo asociadas al diseño de siembra y la defoliación:

- Si bien estos resultados mostraron que el vecino gramínea fue igualmente competitivo que el vecino alfalfa, esto podría haber sido debido a las características competitivas de pasto ovido (Haynes, 1980; Roscher *et al.*, 2016). Es decir que otras gramíneas con adecuadas características de calidad y oferta para asociar en pasturas de base alfalfa, como pueden ser nuevas

variedades de festuca o falaris, podrían mostrar otras respuestas debidas a su menor capacidad competitiva.

- Así mismo, en este trabajo la relación alfalfa:pasto ovillo fue aproximadamente 50:50, lo que podría haber sido demasiado si lo que se busca es una pastura consociada pero de base alfalfa (Casler y Walgenbach, 1990). Mayores proporciones de alfalfa podrían provocar diferentes relaciones competitivas en la consociación y cambiar, por lo menos parcialmente, los resultados encontrados en esta tesis.
- Si bien los resultados de este trabajo, al igual que los reportados por otros autores, demostraron que defoliación más frecuentes aumentan la calidad de alfalfa, pero también su estabilidad temporal y vertical. Es posible que estas pautas de defoliación generen pasturas menos persistentes en el tiempo por agotamiento de las reservas (Eckberg *et al.*, 2022). Ensayos que evalúen persistencia a largo plazo, bajo este manejo de la defoliación en las etapas reproductivas de alfalfa, serían deseables para generalizar las conclusiones a pasturas de base alfalfa en distintos ciclos de crecimiento.
- Ya que algunas de las respuestas se asociaron parcialmente a efectos del grado de dormición del material usado en este trabajo (menos sensibles a los cambios en el fotoperíodo), que podría haber potenciado la escasa variabilidad temporal de los tratamientos defoliados más frecuentemente (Ventroni *et al.*, 2010). Evaluar otros materiales, con diferencias en el grado de dormición, sería de interés para poder ampliar los resultados a los que se llegó con este trabajo.

- Finalmente, es necesario ampliar la información disponible respecto al contenido de minerales y su distribución en distintas pasturas. Así como también el efecto que tienen distintas prácticas de manejo sobre estos componentes del forraje.

Bibliografía general

Ackerly T, Putnam D, Orloff S. 2000. Quantifying the yield/quality tradeoff. En: C Cooperative Extension, University of California D, ed. 2000 National Alfalfa Symposium. Las Vegas, NV.

Aponte A, Samarappuli D, Berti MT. 2019. Alfalfa-grass mixtures in comparison to grass and alfalfa monocultures. *Agronomy Journal* **111**, 628-638.

Argentina SMN. smn.gob.ar/estadisticas. <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.
Accedido octubre de 2023.

Arnott G, Ferris CP, O'connell NE. 2017. Review: welfare of dairy cows in continuously housed and pasture-based production systems. *Animal* **11**, 261-273.

Atis I, Celiktas N, Can E, Yilmaz S. 2019. The effects of cutting intervals and seeding rates on forage yield and quality of alfalfa. *Turkish Journal of Field Crops* **24**, 12-20.

Baldissera TC, Frak E, Carvalho PCDF, Louarn G. 2014. Plant development controls leaf area expansion in alfalfa plants competing for light. *Annals of Botany* **113**, 145-157.

Bargo F, Delahoy JE, Schroeder GF, Muller LD. 2006. Milk fatty acid composition of dairy cows grazing at two pasture allowances and supplemented with different levels and sources of concentrate. *Animal Feed Science and Technology* **125**, 17-31.

Bélanger G, Tremblay GF, Seguin P, Lajeunesse J, Bittman S, Hunt D. 2020. Cutting management of alfalfa-based mixtures in contrasting agroclimatic regions. *Agronomy Journal* **112**, 1160-1175.

Belesky D ~P. 2005a. Growth of *Dactylis glomerata* along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: II. Mechanisms of leaf dry matter production. *Agroforestry Systems* **65**, 91-98.

Belesky DP. 2005b. Growth of *Dactylis glomerata* along a light gradient in the central Appalachian region of the eastern USA: I. Dry matter production and partitioning. *Agroforestry Systems* **65**, 81-90.

Berone GD, Dinuci E, Fernández H, Gastaldi L, Mattera J, Spada M. 2017. Calibración y validación de un modelo de crecimiento para alfalfa (*Medicago sativa* L.). *RIA* **43**, 256-265.

- Berone GD, Sardiña MC, Moot DJ.** 2020. Animal and forage responses on lucerne (*Medicago sativa* L.) pastures under contrasting grazing managements in a temperate climate. *Grass and Forage Science* **75**, 192-205.
- Berti MT, Samarappuli D.** 2018. How does sowing rate affect plant and stem density, forage yield, and nutritive value in glyphosate-tolerant alfalfa? *Agronomy* **8**, 1-12.
- Brink G, Hall M, Shewmaker G, Undersander D, Martin N, Walgenbach R.** 2010. Changes in alfalfa yield and nutritive value within individual harvest periods. *Agronomy Journal* **102**, 1274-1282.
- Briske DD, Heitschmidt RK.** 1991. An ecological perspective. En: Heitschmidt RK, Stuch JW, eds. *Grazing management: an ecological perspective*. Portland, Oregon, 11-26.
- Brown HE, Moot DJ, Teixeira EI.** 2005. The components of lucerne (*Medicago sativa*) leaf area index respond to temperature and photoperiod in a temperate environment. *European Journal of Agronomy* **23**, 348-358.
- Cangiano CA, Pece MA.** 2005. Acumulación de biomasa aérea en rebrotes de alfalfa en Balcarce. *Revista Argentina de Producción Animal* **25**, 39-52.
- Cangiano C, Ventroni L.** 2022. Crecimiento y manejo de la defoliación. En: Basigalup DH, ed. *Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argetina*. Buenos Aires, 507-549.
- Casler MD, Walgenbach RP.** 1990. Ground Cover Potential of Forage Grass Cultivars Mixed with Alfalfa at Divergent Locations. *Crop Science* **30**, 825-831.
- Chapman DF.** 2016. Using ecophysiology to improve farm efficiency: Application in temperate dairy grazing systems. *Agriculture* **6**, 1-19.
- Chilibroste P.** 2002. Integración de patrones de consumo y oferta de nutrientes para vacas lecheras en pastoreo durante el período otoño invernal. X Congreso Latinoamericano de Buiatría. XXX Jornadas Uruguayas de Buiatría. 90-96.
- Chilibroste P, Gibb MJ, Soca P, Mattiauda DA.** 2015. Behavioural adaptation of grazing dairy cows to changes in feeding management: Do they follow a predictable pattern?
- Chilibroste P, Gibb M, Tamminga S.** 2005. Pasture characteristics and animal

performance. En: Dijkstra J, Forbes JM, France J, eds. Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. CABI Publishing, 681-706.

Collino DJ, Dardanelli JL, De Luca MJ, Racca RW. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture* **45**, 383-390.

Cruz P, Lemaire G. 1986. Analyse des relations de compétition dans une association de luzerne (*Medicago sativa* L.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) I. Effets sur les dynamiques de croissance en matière sèche. *Agronomie* **6**, 727-734.

Cruz P, Soussana JF. 1997. Mixed crops. En: Lemaire G, ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Verlag Berlin Heidelberg, 131-144.

Davidson JL, Milthorpe FL. 1965. The Effect of Temperature on the Growth of Cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Annals of Botany* **29**, 407-417.

Devkota NR, Kemp P. 1999. Morphological aspects of pasture species in the shade in relation to various managements practices under silvopastoral systems. *Inst. Agric. Anim. Sci* **19**, 1-26.

Distel RA, Arroquy JI, Lagrange S, Villalba JJ. 2020. Designing Diverse Agricultural Pastures for Improving Ruminant Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **4**, 1-18.

Dove H. 1996. Constraints to the modelling of diet selection and intake in the grazing ruminant. *Aust. J. Agric. Res* **47**, 257-75.

Duchini PG, Guzatti GC, Echeverria JR, Américo LF, Sbrissia AF. 2019. Can a mixture of perennial grasses with contrasting growth strategies compose productive and stable swards? *Agronomy Journal* **111**, 224-232.

Eckberg JO, Wells SS, Jungers JM, Lamb JAFS, Sheaffer CC. 2022. Alfalfa forage yield, milk yield, and nutritive value under intensive cutting. *Agrosystems, Geosciences and Environment* **5**, 1-12.

Fazio LE, Mattioli GA, Picco SJ, Relling AE, Rosa DE. 2013. *Nutrición mineral y vitamínica de Bovinos*. (G Mattioli, Ed.).

Fick GW, Mueller SC. 1989. *Alfalfa quality, maturity, and mean stage of development*.

Cornell Cooperative Extension.

Gatti ML. 2015. Mecanismos de regulación de la competencia entre una gramínea C3 anual y otra perenne en comunidades multiespecíficas implantadas. Facultad de agronomía - Universidad de Buenos Aires.

Gatti ML, Ayala Torales AT, Cipriotti PA, Golluscio RA. 2013. Leaf and tiller dynamics in two competing C 3 grass species: Influence of neighbours and nitrogen on morphogenetic traits. *Grass and Forage Science* **68**, 151-164.

Gatti ML, Cornaglia PS, Golluscio RA. 2023. Morphogenetic and structural responses to tree-shading in three temperate perennial grasses: implications for growth, persistence and defoliation practices. *Agroforestry Systems* **97**, 549-559.

Ghani MU, Kamran M, Ahmad I, Arshad A, Zhang C, Zhu W, Lou S, Hou F. 2022. Alfalfa-grass mixtures reduce greenhouse gas emissions and net global warming potential while maintaining yield advantages over monocultures. *Science of the Total Environment* **849**, 157765.

Gosse G, Lemaire G, Chartier M, Balfourier F. 1988. Structure of a Lucerne Population (*Medicago sativa* L.) and Dynamics of Stem Competition for Light During Regrowth. *The Journal of Applied Ecology* **25**, 609-617.

Grace N, Knowles S, Sykes A. 2010. *Managing Mineral Deficiencies in Grazing Livestock*.

Gregorini P, Villalba JJ, Provenza FD, Beukes PC, Forbes JM. 2015. Modelling preference and diet selection patterns by grazing ruminants: A development in a mechanistic model of a grazing dairy cow, MINDY. *Animal Production Science* **55**, 360-375.

Hakl J, Pisarčík M, Fuksa P, Šantrůček J. 2021. Potential of lucerne sowing rate to influence root development and its implications for field stand productivity. *Grass and Forage Science* **76**, 378-389.

Hall MH, Smiles WS, Dickerson RA. 2000. Morphological Development of Alfalfa Cultivars Selected for Higher Quality. *Agronomy Journal* **92**, 1077-1080.

Haynes RJ. 1980. Competitive aspects of the grass-legume association. *Advances in Agronomy* **33**, 227-261.

Hoppen SM, Neres MA, Ta H, Yang X, Mills A, Jáuregui J, Moot DJ. 2022. Canopy dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) genotypes of three fall dormancies grown under contrasting defoliation frequencies. *European Journal of Agronomy* **140**, 126601.

Horan B, Roche JR. 2020. Defining resilience in pasture-based dairy-farm systems in temperate regions. *Animal Production Science* **60**, 55-66.

Illius AW, Gordon IJ, Milne JD, Wright W. 1995. Costs and benefits of foraging on grasses varying in canopy structure and resistance to defoliation. *Functional Ecology* **9**, 849-903.

Jáuregui JM, Ojeda JJ, Berone GD, Lattanzi FA, Baudracco J, Fariña SR, Moot DJ. 2022. Yield gaps of lucerne (*Medicago sativa* L.) in livestock systems of Argentina. *Annals of Applied Biology* **181**, 22-32.

Jaurena M, Durante M, Devincenzi T, et al. 2021. Native Grasslands at the Core: A New Paradigm of Intensification for the Campos of Southern South America to Increase Economic and Environmental Sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **5**, 547834.

Jones GB, Tracy BF. 2015. Evaluating seasonal variation in mineral concentration of cool-season pasture herbage. *Grass and Forage Science* **70**, 94-101.

Jones GB, Tracy BF. 2018. Persistence and productivity of orchardgrass and orchardgrass/alfalfa mixtures as affected by cutting height. *Grass and Forage Science* **73**, 544-552.

Juknevičius S, Sabienė N, Juknevi S. 2007. The content of mineral elements in some grasses and legumes. *Ekologija* **53**, 44-52.

Kallenbach RL, Nelson CJ, Coutts JH. 2002. Yield, quality, and persistence of grazing- and hay-type alfalfa under three harvest frequencies. *Agronomy Journal* **94**, 1094-1103.

Kalu BA, Fick GW. 1981. Quantifying Morphological Development of Alfalfa for Studies of Herbage Quality. *Crop Science* **21**, 267-271.

Kalu BA, Fick GW. 1983. Morphological Stage of Development as a Predictor of Alfalfa Herbage Quality. *Crop Science* **23**, 1167-1172.

Kloster A, Zaniboni M, Sardiña C. 2022. Manejo y utilización de pasturas de alfalfa

para producción de carne. En: Basigalup D, ed. Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argentina. Buenos Aires, 507-549.

Kloster AM, Zanivoni CM. 2007. Manejo y utilización de pasturas de alfalfa en producción de carne. En: Hijano EH, Basigalup DH, eds. La alfalfa en la Argentina. Buenos Aires, 277-301.

Laca EA, Ungar ED, Demment MW. 1994. Mechanisms of handling time and intake rate of a large mammalian grazer. *Applied Animal Behaviour Science* **39**, 3-19.

Laca EA, Ungar ED, Seligman N, Demment MW, Laca EA. 1993. Effects of sward height and bulk density on hite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. *Grass and Forage Science* **47**, 91-102.

Lanyon LE, Griffith WK. 1988. Nutrition and Fertilizer Use. Alfalfa and Alfalfa Improvement. John Wiley & Sons, Ltd, 333-372.

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

Lemaire G, Khaity M, Onillon B, Allirand JM, Chartier M, Gosse G. 1992. Dynamics of accumulation and partitioning of n in leaves stems and roots of lucerne (*medicago sativa* L) in a dense canopy. *Annals of Botany* **70**, 429-432.

Lemaire G, Millard P. 1999. An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants. *Journal of Experimental Botany* **50**, 15-28.

Lenth R. 2022. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.3. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.

Maamouri A, Louarn G, Béguier V, Julier B. 2017. Performance of lucerne genotypes for biomass production and nitrogen content differs in monoculture and in mixture with grasses and is partly predicted from traits recorded on isolated plants. *Crop and Pasture Science* **68**, 942-951.

Maamouri A, Louarn G, Gastal F, Béguier V, Julier B. 2015. Effects of lucerne genotype on morphology, biomass production and nitrogen content of lucerne and tall fescue in mixed pastures. *Crop and Pasture Science* **66**, 192-204.

Marriott CA, Carrère P. 1998. Structure and dynamics of grazed vegetation. *Ann. Zootech.* **47**, 359-369.

Mattera J, Romero LA, Cuatrín AL, Cornaglia PS, Grimoldi AA. 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, Romero L, Cuatrin A, Grimoldi AA. 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.

Meissner HH, Zacharias PJK, O'Regain PJ. 1999. Forage quality (feed value). En: Tainton NM, ed. *Veld management in South Africa*. Pietermaritzburg, 139-168.

Mitchell ML, Clark SG, Butler KL, Nie Z, Burnett VF, Meyer R, Zollinger R, Seymour GR. 2020. Harvest interval affects lucerne (*Medicago sativa* L.) taproot total yield, starch, nitrogen and water-soluble carbohydrates. *Journal of Agronomy and Crop Science* **206**, 619-629.

Moot DJ, Brown HE, Teixeira EI, Pollock KM. 2003. Crop growth and development affect seasonal priorities for lucerne management. *NZGA: Research and Practice Series* **11**, 201-208.

Moot DJ, Pollock KM, Lewis B. 2012a. Plant population, yield and water use of lucerne sown in autumn at four sowing rates. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 97-102.

Moot D, Robertson MJ, Pollock K. 2001. Validation of the APSIM-Lucerne model for phenological development in a cool-temperate climate. 10th Australian Agronomy Conference, Hobart. Tasmania, 1-5.

Moot DJ, Smith MC, Mills A. 2020. Liveweight production, dry matter yield and seasonal composition from dryland lucerne and lucerne/grass mixes over five years. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **63**, 272-300.

Moot D, Teixeira E, Brown H. 2012b. Alfalfa. Irrigation and drainage paper -Crop yield response to water. 212-219.

Morales-Almaráz E, Soldado A, González A, Martínez-Fernández A, Domínguez-Vara I, De La Roza-Delgado B, Vicente F. 2010. Improving the fatty acid profile of

dairy cow milk by combining grazing with feeding of total mixed ration. *Journal of Dairy Research* **77**, 225-230.

Ojeda JJ, Caviglia OP, Agnusdei MG, Errecart PM. 2018. 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.

Olivo SM. 2018. Producción de biomasa de alfalfa (*Medicago Sativa L.*) en respuesta al arreglo espacial de siembra y frecuencia de corte. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce-Argentina.

Olivo S, Mattera J. 2022. Establecimiento de alfalfa: aspectos ecofisiológicos y agronómicos. En: Basigalup D, ed. Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argetnina. Buenos Aires, 142-174.

Olivo S, Mattera J, Salvaggiotti F, Collino D. 2022. Ambiente y rendimiento potencial de alfalfa Abordaje desde la ecofisiología. En: Basigalup D, ed. Investigación, producción e industrialización de la alfalfa en Argetnina. Buenos Aires, 62-111.

Oltjen JW, Gunter SA. 2015. Managing the herbage utilisation and intake by cattle grazing rangelands. *Animal Production Science* **55**, 397-410.

Ordoñez V, Nescier ID los M, Dovis VL, Gioco JO, Bonvin CE, Rainaudo MB. 2021. Incidencia de distintas frecuencias de corte en parámetros nutritivos de pasturas de alfalfa (*Medicago sativa L.*) de distinto grado de reposo invernal. *FAVE Sección Ciencias Veterinarias* **20**, 16-21.

Park SE, Benjamin LR, Watkinson AR. 2003. The theory and application of plant competition models: An agronomic perspective. *Annals of Botany* **92**, 741-748.

Parsons AJ. 1988. The effects of season and management on the growth of grass swards. En: Hall C and, ed. *The Grass Crop: The Physiological Basis of Production*. London, 129-177.

Parsons AJ, Thornley JHM, Newman J, Penning PD. 1994. A Mechanistic Model of Some Physical Determinants of Intake Rate and Diet Selection in a Two-Species Temperate Grassland Sward. *Functional Ecology* **8**, 187-204.

Peri PL, Lucas RJ, Moot DJ. 2007a. Dry matter production, morphology and nutritive value of *Dactylis glomerata* growing under different light regimes. *Agroforestry Systems*

70, 63-79.

Peri PL, Moot DJ, Jarvis P, McNeil DL, Lucas RJ. 2007b. Morphological, Anatomical, and Physiological Changes of Orchardgrass Leaves Grown under Fluctuating Light Regimes. *Agronomy Journal* **99**, 1502-1513.

Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, Core TR. 2021. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-155. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.

Quintero C, Boschetti G. 2004. Fósforo en pasturas. Sistemas ganaderos en siembra directa. 1° Simposio Nacional. Hacia una ganadería competitiva. AAPRESID. 11-12 de mayo de 2004. Rosario, Santa Fé, 115-119.

R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,. Available at: <https://www.R-project.org/>.

Rawnsley RP, Donaghy DJ, Fulkerson WJ, Lane PA. 2002. Changes in the physiology and feed quality of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) during regrowth. *Grass and Forage Science* **57**, 203-211.

Robison GD, Massengale MA. 1968. Effect of Harvest Management and Temperature on Forage Yield, Root Carbohydrates, Plant Density and Leaf Area Relationships in Alfalfa (*Medicago sativa* L. cultivar 'Moapa') 1. *Crop Science* **8**, 147-151.

Romero NA, Comerón EA, Ustarroz E. 1995. Crecimiento y utilización de la alfalfa. En: Hijano EH, Basigalup DH, eds. La alfalfa en la Argentina. Buenos Aires, 149-172.

Roscher C, Schmid B, Kolle O, Schulze ED. 2016. Complementarity among four highly productive grassland species depends on resource availability. *Oecologia* **181**, 571-582.

Rubio G, Micucci F, García F. 2012. Ciclado de nutrientes y fertilización de ras. En: Álvarez R, Prystupa P, Rodríguez M, Álvarez C, eds. Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Buenos Aires, 275-297.

Sardiña C, Diez M, Ottaviano C. 2015. Densidad de siembra y arreglo espacial de plantas en un cultivo de alfalfa (*Medicago Sativa* L.). INTA. EEA General Villegas. Memoria técnica 2014-2015, 98-101.

Sheaffer CC, Martin NP, Lamb JAFS, Cuomo GR, Grimsbo Jewett J, Quering SR.

2000. Leaf and stem properties of alfalfa entries. *Agronomy Journal* **92**, 733-739.

Sheaffer CC, Miller DW, Marten GC. 1990. Grass Dominance and Mixture Yield and Quality in Perennial Grass-Alfalfa Mixtures. *Journal of Production Agriculture* **3**, 480-485.

Sim RE, Moot DJ, Brown HE, Teixeira EI. 2015. Sowing date affected shoot and root biomass accumulation of lucerne during establishment and subsequent regrowth season. *European Journal of Agronomy* **68**, 69-77.

Sonohat G, Sinoquet H, Varlet-Grancher C, Rakocevic M, Jacquet A, Simon JC, Adam B. 2002. Leaf dispersion and light partitioning in three-dimensionally digitized tall fescue-white clover mixtures. *Plant, Cell and Environment* **25**, 529-538.

Stockdale CR. 1999. Effects of season and time since defoliation on the nutritive characteristics of three irrigated perennial pasture species in northern Victoria 2. Macro-minerals. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **39**, 567-577.

Ta HT, Teixeira EI, Brown HE, Moot DJ. 2020. Yield and quality changes in lucerne of different fall dormancy ratings under three defoliation regimes. *European Journal of Agronomy* **115**, 126012.

Tahir M, Li C, Zeng T, Xin Y, Chen C, Javed HH, Yang W, Yan Y. 2022. Mixture Composition Influenced the Biomass Yield and Nutritional Quality of Legume–Grass Pastures. *Agronomy* **12**, 1-14.

Teixeira EI, Brown HE, Meenken ED, Moot DJ. 2011. Growth and phenological development patterns differ between seedling and regrowth lucerne crops (*Medicago sativa* L.). *European Journal of Agronomy* **35**, 47-55.

Teixeira EI, Moot DJ, Brown HE. 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 EI, Moot DJ, Brown HE, Fletcher AL. 2007a. The dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) yield components in response to defoliation frequency. *European Journal of Agronomy* **26**, 394-400.

Teixeira EI, Moot DJ, Brown HE, Pollock KM. 2007b. 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.

Teixeira EI, Moot DJ, Mickelbart M V. 2007c. Seasonal patterns of root C and N reserves of lucerne crops (*Medicago sativa* L.) grown in a temperate climate were affected by defoliation regime. *European Journal of Agronomy* **26**, 10-20.

Tesar MB, Marble VL. 1988. Alfalfa Establishment. En: Hanson AA, Barnes, D. K.Hill RRJ, eds. *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. Madison, Wisconsin, USA: John Wiley & Sons, Ltd, 303-332.

Tozer PR, Bargo F, Muller LD. 2003. Economic analyses of feeding systems combining pasture and total mixed ration. *Journal of Dairy Science* **86**, 808-818.

Ungar ED, Noy-Meir I. 1988. Herbage intake in relation to availability and sward structure: Grazing processes and optimal foraging. *Journal of Applied Ecology* **25**, 1045-1062.

Vasileva V, Naydenova Y. 2017. Nutritive value of forage biomass from mixtures of alfalfa with cocksfoot and tall fescue. *Journal of Global Environment Agricultural Society Science* **5**, 121-129.

Ventroni LM, Volenec JJ, Cangiano CA. 2010. Fall dormancy and cutting frequency impact on alfalfa yield and yield components. *Field Crops Research* **119**, 252-259.

Volenec JJ, Cherney JH, Johnson KD. 1987. Yield Components, Plant Morphology, and Forage Quality of Alfalfa as Influenced by Plant Population 1. *Crop Science* **27**, 321-326.

Wang ZF, Xu AK, Yu HZ, Zhou YC. 2008. Study on leaf production of alfalfa at different planting densities. XXI International grassland congress/ VIII International rangeland congress. 137.

Whitehead DC. 2000. Uptake and concentrations of nutrient elements in grassland herbage. *Nutrient elements in grassland*. New York: CABI, 41-69.

Xue Z, Wang Y, Palmer E, Zhang Y. 2023. Intercropping of orchardgrass and alfalfa improves soil fertility, forage yield, feeding values and land use efficiency while limiting ruminal greenhouse gas emissions. *Grass and Forage Science* **78**, 275-287.

Yang X, Brown HE, Teixeira EI, Moot DJ. 2021. Development of a lucerne model in

APSIM next generation: 1 phenology and morphology of genotypes with different fall dormancies. *European Journal of Agronomy* **130**, 126372.

Yang X, Brown HE, Teixeira EI, Moot DJ. 2022. Development of a lucerne model in APSIM next generation: 2 canopy expansion and light interception of genotypes with different fall dormancy ratings. *European Journal of Agronomy* **139**, 126570.

Anexo: Análisis estadísticos

En esta sección se recopilan los resultados de los análisis de varianza (ANOVA) de efectos variables en el orden en que se tratan en los distintos capítulos.

Capítulo 2: Oferta total y calidad forrajera en pasturas base alfalfa

Tabla A2.1: Eficiencia de intercepción de la radiación por los canopeos.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mRa_PromMax)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	6	414.4191	<.0001
Pastura	2	4	2.5392	0.1941
corte	1	6	97.9641	0.0001
Pastura:corte	2	6	3.9473	0.0805

Tabla A2.2: Oferta forrajera de la pastura y de las especies componentes: tasa de crecimiento. Pastura.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_TCPast)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	764.3516	<.0001
Pastura	2	6	0.1324	0.8785
corte	1	9	32.6321	0.0003
Pastura:corte	2	9	4.4563	0.0452

Tabla A2.3: Oferta forrajera de la pastura y de las especies componentes: tasa de crecimiento. Alfalfa.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_TCA1f)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	56.17665	<.0001
Pastura	2	6	12.76851	0.0069
corte	1	9	38.78243	0.0002
Pastura:corte	2	9	0.45540	0.6480

Tabla A2.4: Oferta forrajera de la pastura y de las especies componentes: tasa de crecimiento. Pasto ovillo.

“corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_TCP0)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	3	1466.8245	<.0001
corte	1	3	17.4563	0.025

Tabla A2.5: Calidad de la oferta forrajera. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Hojas.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_TCpecFol)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	493.2352	<.0001
Pastura	2	6	29.3325	0.0008
corte	1	9	52.9466	<.0001
Pastura:corte	2	9	0.6754	0.5330

Tabla A2.6: Calidad de la oferta forrajera. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Tallos.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_TCT11)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	229.78913	<.0001
Pastura	2	6	21.59340	0.0018
corte	1	9	56.67152	<.0001
Pastura:corte	2	9	0.78982	0.4830

Tabla A2.7: Calidad de la oferta forrajera. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Relación hoja:tallo.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_HvsT)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	54.29665	<.0001
Pastura	2	6	0.69404	0.5356
corte	1	9	12.25311	0.0067
Pastura:corte	2	9	0.51682	0.6131

Tabla A2.8: Calidad de la oferta forrajera. Altura total de alfalfa.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra) y “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía).

```
> anova(mPE1_Alt)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	9	654.7932	<.0001
Pastura	2	6	9.3200	0.0144
corte	1	9	267.8076	<.0001
Pastura:corte	2	9	5.6641	0.0256

Capítulo 3: Variabilidad temporal de la oferta y la calidad forrajera en alfalfa

Tabla A3.1: Oferta temporal de alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo de alfalfa.

“Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “N_corte”: número/fecha de corte.

```
> anova(mPE2_LOG_TCA1f)# tampoco da efecto N_corte
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	74	233.39966	<.0001
Pastura	2	6	56.12953	0.0001
corte	1	9	174.43989	<.0001
N_corte	5	74	4.97175	0.0006
Pastura:corte	2	9	0.86950	0.4516
Pastura:N_corte	10	74	0.80405	0.6252
corte:N_corte	5	74	6.71213	<.0001
Pastura:corte:N_corte	10	74	0.71611	0.7067

Tabla A3.2: Calidad: Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Hojas.
 “Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “N_corte”:número/fecha de corte.

```
> anova(mPE2_LOG_TCFOLA1f)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	73	144.41137	<.0001
Pastura	2	6	67.47339	0.0001
corte	1	9	170.21432	<.0001
N_corte	5	73	9.35386	<.0001
Pastura:corte	2	9	1.34143	0.3091
Pastura:N_corte	10	73	0.90904	0.5296
corte:N_corte	5	73	5.12691	0.0004
Pastura:corte:N_corte	10	73	0.49644	0.8871

Tabla 3.3: Calidad: Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Tallos.
 “Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “N_corte”:número/fecha de corte.

```
> anova(mPE2_LOG_TCTLLA1f)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	74	43.84535	<.0001
Pastura	2	6	40.36676	0.0003
corte	1	9	126.84790	<.0001
N_corte	5	74	3.34447	0.0089
Pastura:corte	2	9	0.61969	0.5596
Pastura:N_corte	10	74	0.70216	0.7194
corte:N_corte	5	74	9.70329	<.0001
Pastura:corte:N_corte	10	74	0.70857	0.7136

Tabla A3.4: Calidad: Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Relación hoja:tallo.
 “Pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “N_corte”:número/fecha de corte.

```
> anova (mPE2_LOG_Hvst_A1f)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	66	98.25385	<.0001
Pastura	2	6	3.00324	0.1248
corte	1	9	66.14587	<.0001
N_corte	5	66	41.38798	<.0001
Pastura:corte	2	9	3.05761	0.0970
Pastura:N_corte	10	66	0.88109	0.5551
corte:N_corte	5	66	25.88766	<.0001
Pastura:corte:N_corte	10	66	0.80596	0.6236

Capítulo 4: Variabilidad vertical de la oferta y la calidad forrajera en pasturas base alfalfa

Tabla A4.1: Estratificación vertical de la oferta en alfalfa: Tasa de crecimiento aéreo de alfalfa. “pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mE3_LOG_TCA1f)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	36	47.25134	<.0001
pastura	2	6	16.09003	0.0039
corte	1	9	97.46321	<.0001
ESTRATO	2	36	20.92283	<.0001
pastura:corte	2	9	0.99994	0.4054
pastura:ESTRATO	4	36	1.04336	0.3985
corte:ESTRATO	2	36	2.88930	0.0686
pastura:corte:ESTRATO	4	36	0.98847	0.4262

Tabla A4.2: Estratificación de la calidad de la pastura. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Hojas.

“pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mE3_LOG_TCFOLPEC)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	36	0.05067	0.8232
pastura	2	6	11.32676	0.0092
corte	1	9	35.57795	0.0002
ESTRATO	2	36	93.58517	<.0001
pastura:corte	2	9	1.04568	0.3905
pastura:ESTRATO	4	36	0.73399	0.5748
corte:ESTRATO	2	36	9.69940	0.0004
pastura:corte:ESTRATO	4	36	0.69428	0.6008

Tabla A4.3: Estratificación de la calidad de la pastura. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Tasa de crecimiento: Tallos.

“pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mE3_LOG_TCTLL)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	36	0.02336	0.8794
pastura	2	6	13.77929	0.0057
corte	1	9	106.35986	<.0001
ESTRATO	2	36	176.17427	<.0001
pastura:corte	2	9	1.00677	0.4031
pastura:ESTRATO	4	36	1.02036	0.4099
corte:ESTRATO	2	36	2.14160	0.1322
pastura:corte:ESTRATO	4	36	0.94872	0.4473

Tabla A4.4: Estratificación de la calidad de la pastura. Componentes del crecimiento aéreo de alfalfa. Relación hoja:tallo.

“pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mE3_LOG_Hvst)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	36	4.8017	0.0350
pastura	2	6	2.2044	0.1915
corte	1	9	113.5997	<.0001
ESTRATO	2	36	674.1222	<.0001
pastura:corte	2	9	0.4230	0.6675
pastura:ESTRATO	4	36	0.7715	0.5509
corte:ESTRATO	2	36	9.6519	0.0004
pastura:corte:ESTRATO	4	36	0.4411	0.7781

Tabla A4.5: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Fósforo (P).

“pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_P)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	193.60671	<.0001
Pastura	2	4	0.14760	0.8673
corte	1	6	4.03671	0.0913
Estrato	2	24	0.70268	0.5052
Pastura:corte	2	6	0.61047	0.5737
Pastura:Estrato	4	24	4.00786	0.0125
corte:Estrato	2	24	0.55089	0.5836
Pastura:corte:Estrato	4	24	0.66193	0.6245

Tabla A4.6: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Calcio (Ca).

“pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_Ca)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	715.3815	<.0001
Pastura	2	4	0.4974	0.6413
corte	1	6	14.7291	0.0086
Estrato	2	24	14.4591	0.0001
Pastura:corte	2	6	7.1083	0.0261
Pastura:Estrato	4	24	0.6933	0.6039
corte:Estrato	2	24	1.3682	0.2737
Pastura:corte:Estrato	4	24	1.1851	0.3425

Tabla A4.7: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Magnesio (Mg).
 “pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_Log_Mg)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	25766.339	<.0001
Pastura	2	4	0.484	0.6481
corte	1	6	0.191	0.6774
Estrato	2	24	28.488	<.0001
Pastura:corte	2	6	3.693	0.0900
Pastura:Estrato	4	24	1.014	0.4201
corte:Estrato	2	24	6.437	0.0058
Pastura:corte:Estrato	4	24	2.594	0.0620

Tabla A4.8: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Nitrógeno (N).
 “pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_Nt)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	792.7625	<.0001
Pastura	2	4	0.1251	0.8857
corte	1	6	8.4786	0.0269
Estrato	2	24	123.5791	<.0001
Pastura:corte	2	6	1.1236	0.3851
Pastura:Estrato	4	24	2.5433	0.0658
corte:Estrato	2	24	1.0626	0.3613
Pastura:corte:Estrato	4	24	0.1257	0.9717

Tabla A4.9: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Sodio (Na).
 “pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovillo, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_Na)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	47.41215	<.0001
Pastura	2	4	0.28923	0.7633
corte	1	6	0.00391	0.9522
Estrato	2	24	2.63178	0.0926
Pastura:corte	2	6	2.01900	0.2136
Pastura:Estrato	4	24	0.52425	0.7189
corte:Estrato	2	24	0.00233	0.9977
Pastura:corte:Estrato	4	24	0.20762	0.9317

Tabla A4.10: Estratificación de la calidad de la pastura. Contenido de Minerales. Cobre (Cu).
 “pasutra”=tipo de pastura (alfalfa y pasto ovilla, alfalfa con alta densidad de siembra y alfalfa con baja densidad de siembra), “corte”= manejo de la defoliación (temprana o tardía) y “ESTRATO”: estrato (apical, medio y basal).

```
> anova(mM_Cu)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	1051.8115	<.0001
Pastura	2	4	1.2050	0.3894
corte	1	6	0.6059	0.4659
Estrato	2	24	1.7434	0.1964
Pastura:corte	2	6	0.4311	0.6685
Pastura:Estrato	4	24	1.5795	0.2120
corte:Estrato	2	24	0.2686	0.7667
Pastura:corte:Estrato	4	24	0.4914	0.7421