



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados



**DESARROLLO DE MODELOS PREDICTIVOS PARA LA
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA DINÁMICA
POBLACIONAL DURANTE LA FASE DE
ESTABLECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS
CULTIVADAS EN SIEMBRA DIRECTA**

Ing. Agr. Rodrigo T. Zarza Fuentes

Tesis

**Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

Córdoba, 2019

**DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO PARA LA
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA DINÁMICA
POBLACIONAL DURANTE LA FASE DE
ESTABLECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS
CULTIVADAS EN SIEMBRA DIRECTA**

Rodrigo T. Zarza Fuentes

Comisión Asesora de Tesis

Director: Ing. Agr. (PhD) Mónica Balzarini

Asesores: Ing. Agr. (MPhil.) Mónica Rebuffo (Codirector)

Ing. Agr. (Ph.D.) Alejandro La Manna

Tribunal Examinador de Tesis

Ing. Agr. (Dr) Alejandro La Manna

Ing. Agr. (Dr) Arnaldo Mangeaud

Ing. Agr. (Dr) Mónica Sacido

Presentación formal académica

Julio 2019

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Cuando la gratitud no es expresada con hechos y actitud, no sirve a nadie.

- A Dra. Mónica Balzarini, Directora de Tesis, por brindarme la posibilidad de realizar este trabajo, y los valiosos aportes durante la redacción de este manuscrito.
- A mis co-directores de tesis, M.Phil. Mónica Rebuffo y Dr. Alejandro La Manna por su apoyo y las horas de dedicación que permitieron culminar esta etapa.
- A Dr. Fernando Lattanzi, Dra.Silvina Stewart, MSc.Ximena Cibils y MSc Carlos Rossi por sus aportes a la redacción de los artículos.
- A Dra. Cecilia Bruno y Dr. Mariano Córdoba, a los estudiantes y becarios de la Cátedra de Estadística y Biometría de la FCA de UNC.
- Al personal de apoyo de INIA “La Estanzuela”, especialmente al personal de la Sección de Forrajas, Biblioteca y Dirección.
- A los productores lecheros Gerardo Rodríguez (SJ) y Omar y Maren Braga (FL) por facilitarme las actividades de campo y de transferencias al sector productivo.
- Al INIA, Uruguay, por la financiación concedida a este trabajo.
- Y a todos los aquellos que me alentaron a seguir adelante en algunos momentos en los que la vida me puso a prueba,

“Es mejor saber después de haber pensado y discutido que aceptar los saberes que nadie discute para no tener que pensar”. Fernando Savater (1947- ?) Filósofo español.

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hijos Maia y Mateo

y a mi “jefa” Mónica.

RESUMEN

La intensificación y la marginalidad de las áreas incorporadas al sector lechero en la última década en Uruguay se asocian a incrementos en los riesgos de fallas durante el establecimiento. El éxito de una pastura requiere una correcta implantación y rápida cobertura del suelo; una evaluación temprana podría aportar herramientas para alcanzar estos objetivos. La densidad de plantas logradas puede ser un predictor de biomasa en sistemas pastoriles intensivos donde las leguminosas ofrecen un alimento de alta calidad y bajo costo. La alfalfa (*Medicago sativa* L.) tiene un crecimiento estival que combina alto potencial de crecimiento y persistencia; trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) es otra alternativa perenne, aunque de persistencia limitada que, en suelos pesados, constituye una alternativa de alto potencial. Ambas especies en forma pura o en mezclas (bienales o perennes de larga duración) integran las rotaciones forrajeras en los sistemas pastoriles. Este trabajo registró conteos de plántulas de estas pasturas a las 3, 7 y 12 semanas desde la siembra en una red de ensayos en Uruguay (tres localidades y tres años en cada localidad). A través del uso de diferentes densidades de siembra se simularon diferentes niveles de logros en la implantación de pasturas puras de alfalfa y trébol rojo, así como en mezclas bienales de trébol rojo con *Cichorium intybus* L. o *Bromus catharticus* Vahl. y en mezclas perennes de larga duración donde la alfalfa se acompañó de *Festuca arundinacea* Schreb. o de *Dactylis glomerata* L. con *Trifolium repens* L. como leguminosa acompañante. Los recuentos de plantas se usaron como predictores de la producción acumulada anual de forraje. La relación entre productividad de forraje y densidad de plantas durante el monitoreo del establecimiento fue ajustada con un polinomio de segundo orden. La variabilidad ambiental, clasificando los ambientes en tres categorías (bueno, intermedio y pobre), se incorporó al modelo mediante un efecto aleatorio de ambiente. La densidad de plantas de alfalfa y de trébol rojo a las 3 semanas después de la siembra proporcionó una buena medida del establecimiento de la pastura y permitió la predicción de la productividad de biomasa (error <20%) tanto en las pasturas puras como en mezclas. La precisión de esta predicción varió en función de la calidad del ambiente. Las pasturas sembradas en ambientes intermedios y relativamente buenos produjeron biomásas más relacionadas con la densidad de plantas durante el establecimiento que las pasturas de ambientes más pobres. Se calcularon probabilidades de superar producciones umbrales

bajo distintos escenarios de calidad de implantación de las leguminosas (puras o en mezclas) estimada por recuentos tempranos de plántulas, que constituyen una herramienta útil para la presupuestación forrajera de los sistemas lecheros bajo diferentes contextos ambientales.

Palabras clave: número de plantas, biomasa, leguminosas forrajeras, densidad de siembra.

ABSTRACT

The intensification and marginalization of the areas incorporated to the dairy sector in the last decade in Uruguay are associated with increases in the risks of failures during the establishment. The success of a pasture requires a correct implantation and rapid coverage of soil; an early evaluation could provide tools to achieve these objectives. Plants density could be a predictor of biomass in intensive pastoral systems where legumes offer a high quality and low-cost feed. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) has a summer growth that combines high potential for growth and persistence; red clover (*Trifolium pratense* L.) is another perennial alternative although of limited persistence, that in heavy soils, constitutes a high potential alternative. Both legumes, either in pure stands or in mixtures (biennial or long-term perennials), integrate forage rotations in pastoral systems. This study recorded seedling counts at 3, 7 and 12 weeks after sowing in a network of trials in Uruguay (three localities and three years in each locality). Using different planting densities, different levels of achievements were simulated in the implantation of pure alfalfa and red clover pastures, as well as in biennial mixtures of red clover with *Cichorium intybus* L. or *Bromus catharticus* Vahl. and in long-lasting perennial mixtures where alfalfa was accompanied by *Festuca arundinacea* Schreb. or *Dactylis glomerata* L. with *Trifolium repens* L. as accompanying legume. Plant counts were used as predictors of cumulative annual forage production. The relationship between forage productivity and plant density during establishment was adjusted under several scenarios. Environmental variability, classifying the environments into three categories (good, intermediate and poor), was incorporated into the model by means of a random effect. The density of alfalfa and red clover plants at 3 weeks after planting provided a good measure of pasture establishment and allowed prediction of biomass productivity (error <20%) both in pure pastures and in mixtures. The accuracy of prediction varied with the quality of the environment. Pastures planted in intermediate and relatively good environments produced biomasses more related to the plant density achieved than the pastures in poorer environments. Probabilities of surpassing threshold productions were calculated under different scenarios of legume implantation quality (pure or in mixtures) estimated by early counts of seedlings, that constitute a useful tool for forage budgeting of dairy systems under different environmental contexts.

Key words: number of plants, biomass, forage legumes, planting density.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
DENSIDAD DE PLÁNTULAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE UNA PASTURA COMO INDICADOR DE PRODUCTIVIDAD	6
<i>Implantación y productividad de pasturas puras de alfalfa</i>	6
<i>Implantación y productividad de pasturas puras de trébol rojo</i>	8
<i>Implantación y productividad de pasturas mezclas bienales</i>	9
<i>Implantación y productividad de pasturas mezclas de ciclo largo</i>	11
HIPÓTESIS	14
OBJETIVO GENERAL.....	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
CAPÍTULO 2	16
MATERIALES Y MÉTODOS	16
DATOS	16
<i>Pastura pura de alfalfa (Medicago sativa L.)</i>	21
<i>Pastura pura de trébol rojo (Trifolium pratense L.)</i>	22
<i>Pasturas mezclas bienales</i>	23
<i>Pasturas mezclas de ciclo largo</i>	24
ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	25
<i>Dinámica de plantas durante el establecimiento del cultivo</i>	25
<i>Relaciones entre productividad y densidad de plantas</i>	26
CAPÍTULO 3	29
RESULTADOS	29
IMPLANTACIÓN DE PASTURAS	29
<i>Monofítica de alfalfa</i>	29
<i>Monofítica de trébol rojo</i>	30
<i>Pasturas mezclas bienales</i>	32

<i>Pasturas mezclas de ciclo largo</i>	34
RELACIONES ENTRE PRODUCTIVIDAD Y DENSIDAD DE PLANTAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE LA PASTURA	36
<i>Monofítica de alfalfa</i>	36
<i>Monofíticas de trébol rojo</i>	40
<i>Pasturas mezclas bienales</i>	47
<i>Pasturas mezcla de ciclo largo</i>	52
PROBABILIDADES DE SUPERAR UMBRALES DE RENDIMIENTOS SEGÚN AMBIENTE Y DENSIDAD DE PLANTAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE LA PASTURA	59
<i>Monofítica de alfalfa</i>	59
<i>Monofítica de trébol rojo</i>	61
<i>Pasturas mezclas bienales</i>	63
<i>Pasturas mezclas de perennes de ciclo largo</i>	64
CAPÍTULO 4	66
DISCUSIÓN	66
IMPLANTACIÓN	66
PRODUCTIVIDAD	69
ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE RENDIMIENTO A PARTIR DE MODELOS AJUSTADOS.....	76
CAPÍTULO 5	79
CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA CITADA	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características del suelo en los sitios experimentales. Unidad cartográfica (Unidad), tipo de suelo, porosidad total del suelo (PT), densidad aparente del suelo (DA), acidez del suelo en el agua (pH), carbono orgánico (C), fósforo (P Bray I), potasio (K) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	17
Tabla 2.2. Fecha de siembra y precipitación estacional acumulada en el año 1 (A1), año 2 (A2) y año 3 (A3) después de la siembra para nueve ambientes.....	19
Tabla 2.3. Precipitación estacional y anual para cada uno de los sitios (promedio de 30 años, período 1971 a 2000). Datos generados por la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información (GRAS) INIA 2019.....	20
Tabla 2.4. Altura de corte y número de cortes por año para la pastura de <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1, año 2 y año 3 (A1, A2 y A3, respectivamente).	21
Tabla 2.5. Altura de corte promedio y número de cortes por año para la pastura de <i>Trifolium pratense</i> L. puro (TPP) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1 y año 2 (A1 y A2, respectivamente).	22
Tabla 2.6. Densidades de siembra utilizadas para dos pasturas bienales de <i>Trifolium pratense</i> L. asociadas con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L. (MBC) o con la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB).....	23
Tabla 2.7. Altura de corte promedio y número de cortes por año para dos pasturas bienales de <i>Trifolium pratense</i> L. asociadas con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L. (MBC) o con la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB), en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1 y año 2 (A1 y A2, respectivamente).	23
Tabla 2.8. Densidades de siembra utilizadas para <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y en las mezclas perennes de ciclo largo con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb (MLF).	24
Tabla 2.9. Altura de corte promedio y número de cortes por año para dos mezclas perennes de ciclo largo donde la leguminosa principal <i>Medicago sativa</i> L. (ALF) fue acompañada de <i>Trifolium repens</i> L. y <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o de <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1, año 2 y año 3 (A1, A2 y A3, respectivamente).	25
Tabla 3.1. Análisis de varianza para la densidad de plantas de una pastura pura de <i>Medicago sativa</i> L. sembrada en nueve ambientes, con seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.	29
Tabla 3.2. Análisis de varianza para la densidad de plantas de una pastura pura de <i>Trifolium pratense</i> L. sembrado en nueve ambientes, con seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.	31

Tabla 3.3. Análisis de varianza para la densidad de plantas de <i>Trifolium pratense</i> L. en dos mezclas bienales sembradas en ocho ambientes, seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.	32
Tabla 3.4. Análisis de varianza para la densidad de plantas de <i>Medicago sativa</i> L. en tres pasturas (pura y dos mezclas de ciclo largo) sembradas en tres ambientes, seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.	34
Tabla 3.5. Rendimiento de <i>Medicago sativa</i> L. pura (kg MS ha ⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha ⁻¹). Continuación. ..	37
Tabla 3.5.1. Rendimiento de <i>Medicago sativa</i> L. pura (kg MS ha ⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha ⁻¹). Continuación. ..	38
Tabla 3.6. Coeficientes de regresión utilizados para estimar el rendimiento de <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) en función del recuento de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes.	39
Tabla 3.7. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para pasturas de <i>Medicago sativa</i> L. pura.	41
Tabla 3.8. Predicciones de rendimiento (kg MS ha ⁻¹) y error de predicción (MAD) en función de la densidad de plantas de <i>Medicago sativa</i> L. a las 3 semanas después de la siembra de pasturas puras para diferentes ambientes.	42
Tabla 3.9. Rendimiento de <i>Trifolium pratense</i> L. puro (kg MS ha ⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha ⁻¹). Continuación. ..	43
Tabla 3.9.1. Rendimiento de <i>Trifolium pratense</i> L. puro (kg MS ha ⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha ⁻¹). Continuación. ..	44
Tabla 3.10. Coeficientes de regresión utilizados para estimar el rendimiento de <i>Trifolium pratense</i> L. puro (TPP) en función del recuento de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes.	45
Tabla 3.11. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para pasturas de <i>Trifolium pratense</i> L. puro.	46
Tabla 3.12. Rendimiento de <i>Trifolium pratense</i> L. puro (kg MS ha ⁻¹) estimado para el primer corte (C1), el año 1 (A1) y año 2 (A2) en función de la densidad de plantas promedio registradas en el recuento temprano (3 semanas después de la siembra).	47
Tabla 3.13. Rendimiento de forraje (kg MS ha ⁻¹) para el año 1 (A1) y año 2 (A2) en las pasturas bienales de <i>Trifolium pratense</i> L. (TP) con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L.	

(MBC) o la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB) en diferentes ambientes en función de la densidad de siembra de TP (kg semilla ha ⁻¹). Continuación.....	48
Tabla 3.13.1. Rendimiento de forraje (kg MS ha ⁻¹) para el año 1 (A1) y año 2 (A2) en las pasturas bienales de <i>Trifolium pratense</i> L. (TP) con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L. (MBC) o la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB) en diferentes ambientes en función de la densidad de siembra de TP (kg semilla ha ⁻¹). Continuación.....	49
Tabla 3.14. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de pasturas mezclas bienales que incluyen <i>Trifolium pratense</i> L. (TP) con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L. (MBC) o la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB) en función del recuento de plantas de TP durante la implantación en diferentes de ambientes.....	50
Tabla 3.15. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para dos mezclas bienales de <i>Trifolium pratense</i> L. con la compuesta <i>Cichorium intybus</i> L. (MBC) o la gramínea <i>Bromus catharticus</i> Vahl. (MBB) como especies acompañantes. ...	51
Tabla 3.16. Rendimiento anual de <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y en mezclas con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF) para el año 1, año 2 y año 3 de producción después de la siembra (A1, A2 y A3, respectivamente).....	52
Tabla 3.17. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de forraje (kg MS ha ⁻¹) de tres tipos de pasturas: <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y mezclas con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF) en función de la densidad de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes. Continuación.....	53
Tabla 3.17.1. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de forraje (kg MS ha ⁻¹) de tres tipos de pasturas: <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y mezclas con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF) en función de la densidad de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes. Continuación.....	54
Tabla 3.18. Criterios de ajuste para predecir el rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas de <i>Medicago sativa</i> L. durante el establecimiento, momento de conteo y calidad del ambiente por tipo de pastura: <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y mezclas con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF). Continuación.	56
Tabla 3.18.1. Criterios de ajuste para predecir el rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas de <i>Medicago sativa</i> L. durante el establecimiento, momento de conteo y calidad del ambiente por tipo de pastura: <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y mezclas con <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF). Continuación.	57
Tabla 3.19. Rendimiento de forraje anual predicho (kg MS ha ⁻¹) y errores de predicción (MAD) en función de la densidad de plantas de <i>Medicago sativa</i> L. registradas a las 3 semanas después de la siembra para diferentes calidades ambientales por tipo de pasturas: <i>Medicago sativa</i> L. pura (ALFP) y <i>Dactylis glomerata</i> L. (MLD) o <i>Festuca arundinacea</i> Schreb. (MLF).	58

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Densidad de plantas de *Medicago sativa* L. en conteos tempranos, intermedios y tardíos (3, 7 y 12 semanas después de la siembra, SDS) para diferentes densidades de siembra usadas para simular calidades de implantación de la pastura pura de *Medicago sativa* L. Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² ($p < 0,05$). 30
- Figura 3.2. Densidad de plantas de *Trifolium pratense* L. en conteos tempranos, intermedio y tardíos (3, 7 y 12 semanas después de la siembra, SDS) para diferentes densidades de siembra usadas para simular calidades de implantación de la pastura pura de *Trifolium pratense* L. Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) se conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² ($p < 0,05$). 31
- Figura 3.3. Densidad de plantas de *Trifolium pratense* L. (TP) para dos mezclas bienales con *Cichorium intybus* L. (MBC) o *Bromus catharticus* Vahl. (MBB), en función de la densidad de siembra de *Trifolium pratense* L., en tres momentos de conteo: temprano, intermedio y tardío (3, 7 y 12 semanas después de la siembra - SDS, respectivamente). Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² ($p < 0,05$). 33
- Figura 3.4. Densidad de plantas de *Medicago sativa* L. para tres años de siembra en Colonia, Uruguay, según momento de conteo de plántulas temprano (A), medio (B) y tardío (C) para cinco densidades de siembra de *Medicago sativa* L. en tres tipos de pastura: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas perennes de ciclo largo con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF)..... 35
- Figura 3.5. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 2.000 kg MS ha⁻¹ en cultivos de *Medicago sativa* L. pura en el primer corte (A) y 10.000 kg MS ha⁻¹ en el año 1 (B), año 2 (C) y año 3 (D) en función de la densidad de plantas por m² registradas a las 3 semanas después de la siembra para diferentes calidades de ambientes (círculo: bueno; cuadrado: intermedio; triángulo: pobre). 60
- Figura 3.6. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 2.000 kg MS ha⁻¹ en cultivos de *Trifolium pratense* L. puro en el primer corte (A) y 10.000 kg MS ha⁻¹ en el año 1 (B) y año 2 (C) en función de la densidad de plantas por m² registradas a las 3 semanas después de la siembra para tres calidades ambientes (bueno: círculo; intermedio: cuadrado; pobre: triángulo). 62
- Figura 3.7. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹ en función de la densidad de plantas por m² de *Trifolium pratense* L. (TR) registradas a las tres semanas después de la siembra para la mezcla con *Cichorium intybus* L. en el año 1 (A) y año 2 (C) y con *Bromus catharticus* Vahl. en el año 1 (B) y año 2 (D) para tres calidades de ambientes (bueno, intermedio y pobre). 64

Figura 3.8. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹ en función del número de plantas por m² de *Medicago sativa* L. registradas a las tres semanas después de la siembra para *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y las mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) en el año 1 (A1), año 2 (A2) y año 3 (A3) para tres calidades de ambientes (bueno, intermedio y pobre). ...65

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ALFP: Pastura pura de alfalfa

AIC: Criterio de información de Akaike

A1: Año 1 después de la siembra

A2: Año 2 después de la siembra

A3: Año 3 después de la siembra

BIC: Criterio bayesiano de Schwarz

COL: Colonia, Uruguay

C1: Primer corte de forraje

DP: Densidad de plantas

FL: Florida, Uruguay

MB: Mezcla bienales

MBB: Mezcla bienal de *Trifolium pratense* L. con *Bromus catharticus* Vahl.

MBC: Mezcla bienal de *Trifolium pratense* L. con *Cichorium intybus* L.

ML: Pasturas mezclas de ciclo largo

MLD: Pasturas mezclas de ciclo largo de *Medicago sativa* L. con *Dactylis glomerata* L. y *Trifolium repens* L.

MLF: Mezclas de ciclo largo *Medicago sativa* L. con *Festuca aruninacea* Shreb. y *Trifolium repens* L.

MLM: Modelo lineal mixto

MS: Materia seca

SDS: Semanas después de la siembra

SJ: San José, Uruguay

TP: *Trifolium pratense* L. en mezcla

TPP: *Trifolium pratense* L. puro

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

Uruguay, ubicado en la zona baja de la Cuenca del Río de la Plata, conforma el Distrito Uruguayense dentro de la región Pampeana (Cabrera y Willink, 1973). La vegetación de pastizales naturales ocupa el 80 % del territorio; la disminución en su estado de conservación se ha asociado a la evolución histórica de la ganadería, en particular la calidad de los suelos (Panario y Bidegain, 1997). La conservación de los pastizales naturales también se ha visto afectada durante las últimas décadas por el avance de la agricultura, principalmente soja, y la forestación (Paruelo *et al.*, 2005), dos de las transformaciones más importantes ocurridas en los pastizales de la Cuenca del Río de la Plata. En numerosas regiones latinoamericanas de suelos fértiles, la agricultura gana espacios en el uso de territorios de la mano de cultivos de grano, los que indirectamente llevan a intensificar también los procesos productivos vinculados a la ganadería y la lechería (Errea *et al.*, 2011). Esta intensificación en ganadería y lechería implica aumentos en la carga animal, reducción de los tiempos de barbecho y el uso de rotaciones más cortas con cultivos forrajeros anuales para pastoreo y producción de ensilajes, y en consecuencia aumento de los riesgos de erosión del suelo en regiones con precipitaciones intensas.

El pisoteo por el incremento de la carga animal es otro de los factores derivados, que genera efectos perjudiciales sobre las condiciones físicas del suelo y el crecimiento vegetal durante el establecimiento del pastizal. La densidad aparente y la macroporosidad se identificaron como dos de las propiedades clave relacionadas con la calidad del suelo (Sparling *et al.*, 2004). Asimismo, la producción de forraje bajo condiciones húmedas puede reducirse debido al pastoreo y pisoteo (Hamilton y Horne, 1988; Ledgard *et al.*, 1996; Nie y Norton, 2009).

A nivel regional el sector agropecuario uruguayo ha procesado una reconversión productiva con diferente intensidad según los rubros de especialización (MGAP, 2011). Desde 1970 al presente, el sector lácteo ha pasado de importador a exportar más del 60%

de la producción nacional de leche. El crecimiento del sector se ha atribuido al aumento en la productividad e ingreso predial mediante la incorporación permanente y creciente de tecnologías (Durán y La Manna, 2009). Una de las estrategias asociadas con dicho crecimiento ha sido la combinación del forraje, el alimento más económico en la dieta de las vacas lecheras, con concentrados y/o ensilaje. Estos sistemas exhiben un proceso acelerado de intensificación, que implica cambios en el manejo del suelo desde el laboreo hacia la siembra directa para evitar la pérdida de materia orgánica (Ernst *et al.*, 2007).

El proceso de adopción de la siembra directa, iniciado en Argentina y Uruguay a comienzo de los 90, ha tenido una evolución lineal creciente de adopción (Siri Prieto *et al.*, 2006). Esta tecnología permitió levantar algunas de las restricciones productivas de la agricultura convencional al eliminar el laboreo del suelo, reduciendo los riesgos de erosión hídrica (Terra y García Préchac, 2001). El uso de la siembra directa ha mejorado las propiedades físicas y la acumulación de materia orgánica a nivel superficial (García-Préchac *et al.*, 2004) que han generado cambios en la actividad biológica del suelo (Zerbino, 2012). Estos cambios no son específicos del tipo de siembra; el pastoreo directo de los animales también genera compactación, especialmente en los micro-relieves producidos por el desplazamiento lateral en las huellas animales cuando el contenido de agua en el suelo se encuentra en el límite superior de plasticidad. Estas condiciones de compactación por pisoteo implican mayores restricciones físicas para las plantas ya instaladas, así como aquellas que se pretenden instalar (Pérez-Gomar, 2005). Los efectos de los animales sobre la compactación del suelo están relacionados con algunos factores de manejo, como las condiciones de humedad del suelo al momento del pastoreo, la carga animal por unidad de superficie, la duración del pastoreo y la categoría animal, entre otros (Terra y García Préchac, 2001).

Una tendencia similar se observó con el mayor uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas pastoriles de producción. El aumento de las aplicaciones de fertilizantes implicó una mayor actividad vehicular pesada, lo que condujo a una mayor compactación del suelo (Glab, 2014) que reduce el establecimiento y el desarrollo posterior de todas las especies, desde cereales hasta leguminosas forrajeras. Las relaciones entre las propiedades físicas del suelo, como la macro-porosidad, el volumen de aire retenido por la porosidad del suelo, la densidad aparente, y el rendimiento de pasturas y cultivos fueron

determinadas por Drewry *et al.* (2008). Estos autores indican que la macroporosidad óptima del suelo para el rendimiento máximo de pasturas y cultivos oscila entre 6 y 17% v/v, pero las relaciones muestran una baja respuesta del rendimiento para los sistemas pastoriles, particularmente relacionadas con valores críticos u óptimos de las propiedades físicas del suelo. Martínez *et al.* (2011) también confirmaron que la reducción de macroporos causada por el aumento en la densidad aparente del suelo tiene efectos negativos en el desarrollo fenológico de las pasturas anuales, ya que promueve la abscisión foliar, reduce la altura y aumenta el diámetro del tallo.

El aumento de la carga animal ha sido la estrategia de los productores con restricciones en el área de pastoreo para sostener la viabilidad económica del sistema. Si no existe un adecuado manejo del pastoreo, por ejemplo, en términos de determinación de las condiciones de humedad del suelo, categorías de animales, altura de ingreso, remanente de salida, se podría estar favoreciendo el proceso de compactación y por ende la reducción del potencial productivo de las especies forrajeras que integran la rotación del sistema (Terra y García Préchac, 2001; Perez Gomar *et al.*, 2014). Las especies forrajeras perenes templadas tienen semilla de menor tamaño que los cereales de grano y, por tanto, requieren menor profundidad de siembra. Estas características implican mayores riesgos de fallas en la implantación, si se considera que las semillas pueden ubicarse en la región de suelo compactada por efecto del pisoteo animal o como producto del pasaje de maquinaria agrícola. Formoso (2007) señala que existe un aumento en las fallas de implantación en las áreas que la lechería y ganadería han incorporado a sus rotaciones pastoriles, debido al avance de la agricultura sobre las áreas más productivas. Bajo este escenario, es importante poder establecer rápidamente qué nivel de implantación se logra, debido a que la densidad de plantas está estrechamente relacionada con la productividad un año después de la siembra (Thomson, 1984; Peyraud *et al.*, 2009).

La adopción de sistemas de producción basados en la siembra directa puede estar limitada por la ocurrencia de restricciones físicas del suelo asociadas a procesos degradativos (Gentile *et al.*, 2005). La agricultura uruguaya tiene una particular combinación de factores que determinan la potencial ocurrencia de estos problemas: suelos de texturas medias a pesadas con baja capacidad de infiltración de agua, clima húmedo, y frecuente tráfico de maquinarias y animales. En este contexto, la siembra directa ha

establecido cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo que, si bien influyen en la implantación y posterior productividad de las pasturas templadas, comprenden un proceso multidimensional donde interactúan también factores ambientales y agronómicos que determinan la densidad de plántulas durante el establecimiento (Formoso, 2007). Johnson y Wichern (2002) analizaron cómo contribuyen las distintas variables y sus interacciones y recomendaron evaluar la dinámica de las poblaciones de especies forrajeras a través de herramientas de análisis multivariado. Estas relaciones pueden ser luego usadas para modelar el efecto de la densidad poblacional de algunas de las especies forrajeras templadas más frecuentes, como *Medicago sativa* L. (alfalfa), expresada como densidad de plantas (DP) en la etapa de establecimiento.

Aun cuando todo modelo es una representación simplista de un sistema productivo, su identificación, estimación y validación es de constante interés en ciencias aplicadas como la Agronomía. Su uso podría permitir un mejor conocimiento del funcionamiento, como así también de las interacciones y las interrelaciones causa-efecto que ocurren dentro del mismo. Los modelos ajustados y validados con un fin predictivo particular son usados luego para la obtención de información sobre posibles comportamientos del sistema según el escenario planteado para las variables de entrada. En la actualidad, el uso de éstos es amplio en el área de producción animal, basados en aspectos relacionados con el comportamiento de animales bajo pastoreo directo y a la producción de gramíneas forrajeras bajo distintos regímenes de temperatura, nitrógeno y agua (Palliser y Woodward, 2002). La predicción de biomasa en sistemas pastoriles ha integrado estos avances mediante la incorporación de técnicas estadísticas, que se han destacado como herramientas de predicción en el área agrícola (Bustos Molina, 2005) y que también se han aplicado en gramíneas forrajeras (Pascual Sánchez *et al.*, 2017). Los modelos desarrollados se basan generalmente en la integración de las relaciones del rendimiento de forraje con las variables edáficas y climáticas (Fick, 1984; Han *et al.*, 2003; Quiroga *et al.*, 1992; Selirio y Brown, 1979; Sharratt *et al.*, 1987; Sharratt *et al.*, 1989; Trnka *et al.*, 2006) Otros autores han modelado la relación entre el rendimiento y la DP durante el establecimiento (Shewmaker *et al.*, 2002; Vázquez *et al.*, 2016). Establecer un modelo predictivo sobre la dinámica poblacional en la fase de establecimiento y su impacto en la productividad de pasturas templadas, tanto puras como en mezclas, ofrecería una herramienta útil para la

toma de decisiones de técnicos y productores en sistemas lecheros intensivos con base pastoril.

En predios comerciales, la producción de las rotaciones forrajeras utilizadas se estima a través de la presupuestación o balance forraje/requerimientos animales. La base de esa información surge de la investigación nacional desarrollada en diferentes regiones y sistemas productivos como promedios estacionales y anuales de biomasa sobre ambientes productivos diferentes. La correlación entre la DP y la producción de biomasa podría incorporarse para mejorar el conjunto de multi-modelos para gramíneas perennes, que integra estudios independientes que asocian las condiciones climáticas y del suelo, la vegetación y el manejo con la productividad de forraje (Sándor *et al.*, 2017). El rendimiento de biomasa podría usarse como un indicador de la viabilidad económica de los sistemas lecheros basados en pasturas (Schader *et al.*, 2014), por tanto, es crucial predecirlo en las primeras etapas de cultivo.

Las leguminosas forrajeras templadas se siembran tanto en pasturas puras como en mezclas con especies forrajeras no-leguminosas. Éstas, además de la palatabilidad y el adecuado balance que proveen a la dieta animal, tienen la ventaja de favorecer la fijación de nitrógeno atmosférico. Las mezclas de leguminosas con gramíneas generalmente mejoran la distribución estacional y proporcionan más forraje que las correspondientes pasturas monofíticas en un amplio rango de ambientes (Baylor, 1974; Sleugh *et al.*, 2000; Barletta *et al.*, 2013; Sturludóttir *et al.*, 2014). En una pastura mezcla cada especie contribuye con la productividad total de forraje y además con su calidad (Baylor, 1974; Frame y Laidlaw, 2005; Porqueddu y Gonzales, 2006). Mezclar especies constituye una práctica agrícola tradicional con interés creciente debido a su impacto en la agricultura sostenible y ecológica (Porqueddu *et al.*, 2003; Frame y Laidlaw, 2005; Nyfeler *et al.*, 2006; Vasilev, 2006). La elección de las leguminosas puras, así como de las especies que componen la mezcla, es determinante para garantizar sustentabilidad y equilibrio de la pastura (Peeters *et al.*, 2006) y para la reducción de espacios vacíos e improductivos (Lloyd *et al.*, 2007). La mayor longevidad y productividad de pasturas mezclas permite reducir la erosión de suelo y la invasión de malezas (Droslom y Smith, 1976; Tracy y Sanderson, 2000; Sanderson *et al.*, 2001). La clasificación de las mezclas puede hacerse en

función del ciclo de las especies que la integran; usualmente se trabaja con mezclas bienales (MB) y mezclas largas (ML) (Wilson, 1940).

DENSIDAD DE PLÁNTULAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE UNA PASTURA COMO INDICADOR DE PRODUCTIVIDAD

IMPLANTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS PURAS DE ALFALFA

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es considerada como una leguminosa forrajera perenne con alto contenido de proteínas, calcio y vitaminas, con una baja proporción de celulosa (Ghanizadeh *et al.*, 2014). Su sistema radicular profundo y fuerte contribuye a la reducción de la erosión del suelo, mejora la infiltración del agua y favorece el crecimiento de microorganismos del suelo (Rezaei *et al.*, 2007; Shahriari *et al.*, 2007). Además, su gran vigor durante todo el período de crecimiento es beneficioso para el control de malezas (Martin *et al.*, 2001). Esta combinación de características hace de la alfalfa un recurso forrajero adecuado para la producción lechera en Uruguay. Dentro de las principales leguminosas templadas cultivadas, alfalfa alcanza la mayor productividad (Díaz Lago *et al.*, 1996), aunque las condiciones de acidez en algunos suelos de Uruguay (Bordoli *et al.*, 2012) son restrictivas para su crecimiento óptimo (pH 6,0 - 6,5; McLean y Brown, 1984). El éxito de una pastura pura de alfalfa (ALFP) está asociado con el establecimiento de la pastura, debido a que la producción de forraje depende del adecuado ajuste entre la DP por unidad de área y el contenido de humedad del suelo (Hycka, 1983). La mayoría de las investigaciones han analizado la dinámica de la población durante el ciclo de vida del cultivo, puesto que la DP inicial se reduce a medida que la pastura envejece (Hycka, 1983; Soto y López, 1986; Sevilla *et al.*, 2002). La DP está asociada con la competencia entre plantas, el efecto de las enfermedades, las condiciones ambientales y el manejo de cosecha del forraje (Dolling *et al.*, 2011; Mattera *et al.*, 2013). Dada la dinámica de la DP, la determinación del momento de conteo para medir la DP establecidas es un foco de investigación.

Existen varios estudios relacionados con la DP y su productividad, así como las causas de la reducción de la DP en los cultivos de forraje. Sin embargo, pocas investigaciones han identificado cuándo evaluar el establecimiento en relación con la producción de biomasa. En monocultivos de alfalfa, el aumento de la biomasa de forraje durante el primer año luego de la siembra se atribuyó al aumento de la DP (Cowett y Sprague, 1962; Rumbaugh, 1963). Resultados similares fueron reportados por Hansen y Krueger (1973), Bolger y Meyer (1983) y Volenec *et al.* (1987). Sin embargo, Kephart *et al.* (1992) registraron una reducción en el tamaño de las plantas y el rendimiento individual con el aumento de la DP. La tasa de mortalidad después de la siembra es un factor clave que determina la DP en cultivos de ALFP, donde la mortalidad de las plantas aumenta a mayores densidades de siembra (Palmer y Wynn-Williams, 1976). Douglas *et al.* (1998) también indicaron que la mayor DP inicial (310 plántulas m⁻²) disminuyó con el tiempo. (Rashidi *et al.*, 2009) determinaron que del 50 al 60% de las semillas de alfalfa sembradas emergen, pero 60 al 80% de las plántulas emergidas mueren durante el primer año. Teixeira *et al.* (2007) indicaron que la reducción en la DP puede ser parcial o totalmente compensada por el aumento en algunos componentes del rendimiento. Una densidad menor a 200 tallos m⁻² es una situación donde se reduce significativamente la producción de alfalfa (Cummings *et al.*, 1999). Min *et al.*, (2000) no observaron diferencias en el rendimiento o la calidad del forraje entre poblaciones con densidades contrastantes (100 y 278 plantas m⁻²). Resultados similares fueron obtenidos por Shewmaker *et al.* (2002) para cultivares de diferentes grupos de dormancia (II a V) con un rango de densidades de siembra entre 9 y 22 kg semilla ha⁻¹. Lamb *et al.* (2003) establecieron que la interacción entre la DP y la etapa de madurez en la cosecha de forraje influye generando aumentos en el rendimiento de hojas y tallos durante la etapa de botón floral, mientras que, durante la etapa de vainas verdes, los aumentos de forraje se registraron solo hasta 180 plantas m⁻², disminuyendo aún más a 450 plantas m⁻².

Abadouz *et al.* (2010), estudiaron el efecto de la densidad y distribución de plantas en la producción de semillas de alfalfa, no registraron un efecto significativo de la DP en los componentes del rendimiento (el número de vainas por inflorescencia, semilla por vaina o peso de semilla). Dolling *et al.* (2011) realizaron un ensayo de tres años en dos sitios en el suroeste de Australia, usando 1 a 8 kg semilla ha⁻¹, y obtuvieron un cultivo más productivo en el primer verano a la densidad de siembra más alta en comparación con las

densidades más bajas. Sin embargo, las densidades de siembra evaluadas en este ensayo son relativamente bajas en comparación con las utilizadas en la región Pampeana, donde la disponibilidad de agua es menos restrictiva. En las zonas lecheras de Uruguay, las densidades de siembra utilizadas para los cultivos de alfalfa pura oscilan entre 12 y 20 kg semilla ha⁻¹ (Rebuffo *et al.*, 2000).

IMPLANTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS PURAS DE TRÉBOL ROJO

El trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) ocupa el segundo lugar después de la alfalfa en términos de semillas producidas y comercializadas, así como en el número de cultivares de leguminosas forrajeras disponibles en todo el mundo (Boller *et al.*, 2010). La especie suele incorporarse en sistemas pastoriles de producción sostenibles porque tiene una alta capacidad anual de fijación de nitrógeno (~ 150 kg N ha⁻¹) (Pirhofer-Walzl *et al.*, 2012), un alto contenido de proteína cruda que conduce a altas ingestas voluntarias y mejoras en el rendimiento del ganado (Baldissera *et al.*, 2014) (Frame *et al.*, 1998; Lüscher *et al.*, 2014) y altos niveles de polifenol enzimático que mejoran directamente la utilización de nitrógeno en rumiantes para carne vacuna y leche (Winters y Minchin, 2005; Lee *et al.*, 2006 ;Van Ranst *et al.*, 2011). En la región pampeana, el TP es una leguminosa forrajera perenne de vida corta. Los cultivares de floración temprana, sin latencia invernal (Annicchiarico *et al.*, 2015), se comportan como bienales y se recomiendan para pasturas de rotación corta en sistemas lecheros debido a su rápido crecimiento, hábito de crecimiento erecto, tolerancia al pastoreo y alta producción de forraje de otoño-invierno (Ayala *et al.*, 2010).

La reducción del crecimiento de pasturas cuando el barbecho ha sido pisoteado por el ganado ha sido reportada por Pérez-Gomar *et al.* (2014) y Zegwaard *et al.* (1998) . Sin embargo, la relación entre la densidad de siembra y la productividad bajo esta condición ha sido escasamente estudiada para pasturas puras de trébol rojo (TPP). Además, algunas investigaciones han obtenido resultados inconsistentes para esta relación para inter-siembra de cultivares de TPP con latencia invernal (Singer y Meek, 2012; Queen *et al.*, 2009; Singer *et al.*, 2006; Mutch *et al.*, 2003). Mutch *et al.* (2003) informaron incrementos en biomasa con una mayor DP durante el establecimiento para el cultivar con latencia intermedia y

solo en uno de dos años de siembra evaluados, mientras que Singer *et al.* (2006) determinaron una relación lineal positiva entre DP y biomasa forrajera siempre. Por el contrario, Singer y Meek (2012) comprobaron que un modelo no lineal simple era mejor para explicar esta relación. Queen *et al.* (2009) describieron un comportamiento contrastante asociado a las condiciones climáticas; donde la correlación entre biomasa y DP contada a 3, 5, 7, 14 y 20 SDS fue estadísticamente significativa a las 7 SDS.

Al igual que en las ALFP, las pasturas de TPP también registran pérdidas de plantas con el paso del tiempo. Barletta *et al.* (2013) en el norte de la provincia de Buenos Aires analizaron los factores que determinaron la abundancia de trébol rojo en pasturas de 2-3 años de edad. La aparición de enfermedades y el daño en las raíces por los insectos, las propiedades químicas del suelo y la tecnología utilizada por el agricultor para el establecimiento de las pasturas fueron los principales factores involucrados en la reducción de poblaciones de trébol rojo. Estos autores determinaron una correlación positiva altamente significativa entre la textura del suelo y la mejora del drenaje con la DP de trébol rojo durante el establecimiento.

IMPLANTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS MEZCLAS BIENALES

Dentro de las leguminosas, el trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) (TP) es ampliamente utilizado en MB y su uso se remite al siglo XVI (Fussell, 1964; Cave *et al.*, 2015). Las especies acompañantes de TP en la región generalmente son dos, la compuesta *Cichorium intybus* L. (CI) o la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (BC). CI es una hierba perenne que se utiliza en Sudamérica, Nueva Zelanda y Europa como forraje por su producción anual uniforme, apetecibilidad y excelente valor nutritivo. Cuando CI se integra a una mezcla, proporciona adaptación al pastoreo y resistencia de la pastura a la sequía por la capacidad de su raíz primaria para penetrar el subsuelo (Lancashire, 1978; Rumball, 1986; Hume *et al.*, 1995; Cave *et al.*, 2015). BC es una gramínea nativa de la región semiárida pampeana de Sudamérica que se ha expandido ampliamente en MB y ML en varias regiones templadas del mundo (Planchuelo y Peterson, 2000; Maddaloni y Ferrari, 2002; Melin *et al.*, 2003; Abbott y Pistorale, 2010; Refi y Spiller, 2013). BC tiene alta palatabilidad y calidad, incluidas sus inflorescencias, característica que la diferencia de

otras gramíneas forrajeras que pierden calidad en la etapa reproductiva (Charlton y Stewart, 1999).

Diversos estudios confirman el buen comportamiento del TP en mezcla con CI o BC en diferentes sistemas de producción. La inclusión de CI en MB con leguminosas aumenta el rendimiento y la composición nutricional del forraje, además de reducir los parásitos internos en vacunos (Hume *et al.*, 1995; Scales *et al.*, 1995; Barry, 1998). La presencia de CI en ambientes de baja fertilidad en secano aumenta la persistencia y el rendimiento de forraje de la pastura mezcla, así como la cantidad de agua disponible en el perfil superior del suelo (Belesky *et al.*, 2000; Skinner *et al.*, 2004).

Diversos autores concuerdan en la importancia de establecer una medida del éxito alcanzado durante la etapa de implantación. El conteo de plantas es una medida rápida y directa pero que no siempre es práctica, por lo que se han desarrollado índices indirectos como la relación entre la DP durante el establecimiento y las semillas viables sembrada por m² denominada coeficiente de logro (CL). Hume *et al.* (1995), Colabelli *et al.* (2002) y Moliterno (2000) han usado este índice para la evaluación de TP en MB. Hume *et al.* (1995), con densidades de siembra de 1 kg semilla ha⁻¹ para CI y 5 kg semilla ha⁻¹ para TP, determinó a las 5 SDS un CL de 82 % para CI (46 plantas m⁻²) y 61 % para TP (101 plantas m⁻²). Moliterno (2000) estimó menores CL 6 SDS de otoño (27,8 y 34,8 % para TP y CI, respectivamente). Colabelli *et al.* (2002) observaron diferencia en el CL del TP sembrado en otoño en comparación a la primavera, de 26,5 vs 45,1 %. Tozer *et al.* (2016) compararon la DP establecidas de distintas mezclas de gramíneas, leguminosas y compuestas, determinando que el CL fue mayor en las mezclas que en pasturas puras de leguminosas. Además, señalaron que el CL fue mayor en siembras de primavera que en otoño en sitios más húmedos, y lo inverso ocurrió en los sitios más secos. Belesky *et al.* (2007) evaluaron la producción anual de forraje de dos cultivares de BC en el suroeste de Virginia (USA), determinando que el rendimiento de primavera-verano fue influenciado por el método de siembra (cobertura vs siembra directa) y varió con la fecha de cosecha durante el período de crecimiento.

El análisis de la habilidad combinatoria permite evaluar el comportamiento de cada componente de la mezcla. Arturi *et al.* (2012) trabajaron con BC y CI en mezcla con TP en suelos agrícolas del valle del río Salado (Argentina). Sus resultados mostraron que las

mezclas de TP con BC produjeron rendimientos más altos que las pasturas monofíticas de TP debido a la habilidad combinatoria positiva de estas especies. Hume *et al.* (1995) evaluaron la producción de CI en diferentes mezclas y determinaron que la contribución promedio de CI (63% del rendimiento total de biomasa de la pastura mezcla) fue 3 veces mayor que la contribución de TPP (21%).

La predicción de biomasa anual esperada en una pastura recientemente instalada es clave para el manejo de sistemas pastoriles lecheros. Por ello, se ha avanzado en la identificación de modelos predictivos de productividad de forraje en pasturas monofíticas, especialmente en gramíneas y leguminosas forrajeras (Pascual Sánchez *et al.*, 2017; Zarza *et al.*, 2018). Algunos modelos desarrollados se han basado en la integración de las relaciones del rendimiento de forraje con variables edáficas y climáticas (Selirio y Brown, 1979; Fick y Onstad, 1984; Sharratt *et al.*, 1987, 1989; Quiroga *et al.*, 1992; Han *et al.*, 2003; Trnka *et al.*, 2006). Otros investigadores consideran la relación entre el rendimiento y la DP durante el establecimiento de la pastura (Min *et al.*, 2000; Shewmaker *et al.*, 2002; Vazquez *et al.*, 2016). Powell *et al.* (2007) demostraron mediante el uso de un modelo predictivo del establecimiento en Nueva Zelanda que la siembra temprana de CI redujo las pérdidas de plantas al momento de su primer pastoreo otoñal. Li *et al.* (2011) integraron dos modelos de predicción y validaron las predicciones de biomasa en una amplia gama de tipos de suelos y zonas climáticas de Nueva Zelanda, donde se logró un ajuste del coeficiente de determinación (r^2) de 0,777 y una desviación media cuadrática (RMSD) de 21% relativo a la productividad media.

IMPLANTACIÓN Y PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS MEZCLAS DE CICLO LARGO

En pasturas mezclas de especies de ciclo largo (ML) generalmente alfalfa, trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y *Lotus corniculatus* L. componen la fracción leguminosa en la región pampeana y son acompañadas por diferentes gramíneas. En Nueva Zelanda y también en Argentina, la gramínea acompañante para alfalfa generalmente es pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.) y con menor frecuencia falaris (*Phalaris aquatica* L.) o raigrás perenne (*Lolium perenne* L.) (Iversen *et al.*, 1955; Esparza *et al.*, 2009). Cullen (1965) determinó que la inclusión de pasto ovillo o festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb.) en

pasturas con alfalfa redujo el enmalezamiento de las mezclas a pesar de la menor velocidad de establecimiento de las gramíneas. Baylor (1974) observó que la inclusión de leguminosas en pasturas de gramíneas incrementaba el rendimiento de forraje, así como su calidad y distribución estacional. Droslom y Smith (1976) confirmaron los resultados de Cullen (1965) y determinaron reducciones en la erosión de suelo cuando las pasturas incluyen leguminosas y gramíneas, favoreciendo una mayor longevidad de las pasturas en relación con los monocultivos de leguminosas o gramíneas. Igualmente, en el noreste de USA se combinan gramíneas con leguminosas para mantener una composición botánica diversa que beneficia la persistencia, rendimiento, estabilidad y productividad de las pasturas (Tracy y Sanderson, 2000; Sanderson *et al.*, 2001).

En Rafaela (Santa Fe, Argentina) también se ha registrado el incremento en el rendimiento, así como la reducción de malezas en cultivares de alfalfa con latencia invernal intermedia sembrados en mezclas con festuca alta, BC o pasto ovilla (Bruno *et al.*, 1987). Sin embargo, Juan *et al.* (1995) destacaron la inestabilidad de las mezclas de gramíneas con cultivares de alfalfa sin latencia en la misma región, y adjudicaron la pérdida de las gramíneas a la alta frecuencia de pastoreo que impone el manejo recomendado para este tipo de cultivares. Ustarroz y Brunetti (1994) evaluaron cultivares de alfalfa sin reposo invernal y con intermedio (grupo 9 y 6), incluyendo festuca alta como gramínea, con resultados similares a Bruno *et al.* (1987). Estos autores concluyeron que las mezclas eran más estables con cultivares intermedios por su mejor aptitud combinatoria con festuca alta que los sin latencia. Refi y Spiller (2011) señalan también a festuca alta y BC como las principales gramíneas acompañantes de alfalfa en la zona centro y sur de Santa Fe (Argentina) sobre una gran diversidad de suelos.

En el presente trabajo se evalúa la dinámica de implantación a nivel experimental de dos de las leguminosas forrajeras más utilizadas en los sistemas lecheros en Uruguay (alfalfa y trébol rojo), sembradas en forma pura y en mezcla, en siembra directa bajo condiciones de secano y se construyen modelos de predicción, basados en la DP logradas durante el establecimiento (contadas en un momento óptimo) que permite predecir valores de biomasa en ambientes de diferente calidad. Los valores predichos por los modelos ajustados con datos experimentales son usados para estimar la probabilidad de obtener o

superar determinados valores de rendimiento según la DP lograda de la leguminosa forrajera determinada en momentos tempranos de la implantación.

HIPÓTESIS

Al aumentar la densidad de plantas logradas durante el establecimiento de una pastura se incrementa la productividad, que se estabiliza cuando el nivel de competencia entre plantas afecta el desarrollo individual de cada. Sin embargo, esta relación entre el número de plantas y la productividad de la pastura es diferente entre especies de leguminosas. Diferencias en la capacidad de intercepción de la luz, fotosíntesis, o en la distribución de la materia seca entre diferentes órganos de la planta, son algunos de los factores que pueden hacer que una misma DP lograda durante la implantación implique diferente productividad de forraje. Sin embargo, en todos los casos, un número bajo de plantas impactará negativamente sobre el rendimiento futuro de la pastura.

La DP registrada durante el establecimiento depende del momento (semanas después de la siembra) en el cual se realiza el conteo. Cuando no existen diferencias significativas entre los momentos de conteo, la DP lograda a las pocas semanas desde la siembra permite tomar decisiones tempranas sobre la implantación, evitando atrasos en resiembras o definiendo estrategias de fertilización o pastoreo. Así, la predicción de la biomasa a partir de la DP establecida durante la implantación facilita el manejo de las pasturas y la toma de decisión. Sin embargo, esta relación entre DP logradas durante la implantación y la productividad en biomasa de la leguminosa forrajera puede ser diferente en las siembras puras de leguminosas respecto a siembras de las leguminosas en mezclas que incluyen otras forrajeras.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este estudio fue modelar la relación entre el número de plantas de la leguminosa forrajera obtenidas durante el establecimiento de la pastura y su producción de biomasa como herramienta para predecir la producción de forraje a partir de información sobre la calidad de implantación obtenida en forma temprana.

Se evalúa la capacidad predictiva de tres momentos de recuento de plántulas de la leguminosa forrajera utilizando la DP como indicador de la productividad de forraje. Aunque muchos factores abióticos y bióticos pueden influir en la implantación de las pasturas, los modelos ajustados pueden utilizarse como herramienta para la toma de decisiones tempranas sobre el manejo de la pastura en áreas con pobre establecimiento y mejorar la presupuestación forrajera.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer el momento óptimo para realizar conteos de plántulas en la fase de implantación de una pastura con la finalidad de utilizar el número de plantas como un indicador de la productividad forrajera a esperar.

2. Desarrollar un modelo predictivo, para la biomasa cosechada en pasturas sembradas bienales o perennes en forma pura y/o mezclas, a partir del número de plantas de la leguminosa forrajera contadas durante el establecimiento.

3. Determinar la capacidad predictiva del número de plantas como indicador de productividad en pasturas de especies de leguminosas sembradas en forma puras o en mezclas.

4. Estimar la probabilidad de superar un rendimiento esperado promedio a partir del número de plantas de la leguminosa durante el periodo de establecimiento de la pastura.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

DATOS

Se diseñaron cuatro ensayos multi-ambientales con el objetivo de evaluar las dos leguminosas más frecuentes y sus mezclas dentro de los sistemas lecheros a nivel nacional. Los ensayos se sembraron bajo siembra directa, práctica generalmente adoptada en la región para evitar la pérdida de materia orgánica. Se ubicaron en tres sitios diferentes (Tabla 2.1) y se repitieron durante tres años consecutivos (2012, 2013 y 2014) lo que generó nueve ambientes de evaluación. A continuación, se presentan los detalles para cada leguminosa en forma pura y luego cada una de las mezclas asociadas.

Tabla 2.1. Características del suelo en los sitios experimentales. Unidad cartográfica (Unidad), tipo de suelo, porosidad total del suelo (PT), densidad aparente del suelo (DA), acidez del suelo en el agua (pH), carbono orgánico (C), fósforo (P Bray I), potasio (K) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Sitio	Longitud W	Latitud S	Unidad	Tipo de suelo	PT (%)	DA (g/cm ⁻³)	pH	C (%)	P Bray I (ppm P)	K (meq/100 g)	CIC (meq/100 g)
Colonia	57°41'	34°20''	Ecilda Paullier- Las Brujas	Limo- arcilloso	51,20	1,29	6,2	2,35	24,3	0,63	29
Florida	56°24'	34°20'	Tala Rodríguez	Arcilloso	46,86	1,41	5,5	1,54	49,6	0,37	18,9
San José	56°49'	34°15'	Tala Rodríguez	Limo- arcilloso	49,23	1,34	5,7	1,83	7,2	0,57	27,2

Las áreas experimentales se ubicaron en suelos con una historia de más de 10 años de labranza cero y que estuvieran dentro del circuito de pastoreo del rodeo lechero. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro réplicas en cada sitio. Las áreas reservadas para la siembra de segundo y tercer año se plantaron con gramíneas forrajeras anuales de invierno (*Avena sativa* L.) y de verano (*Sorghum bicolor* (L.) Moench subsp. *drummondii*), y se permitió el pastoreo. Las condiciones previas a la siembra fueron las mismas para los tres años.

En todos los ensayos, la siembra se realizó de abril a junio después del control de malezas, que consistió en la aplicación de 3 l N- (fosfometil) glicina 480 g l de i.a tres meses antes de la siembra y el control posterior se realizó en la fecha de siembra usando 2 l de N- (fosfometil) glicina 480 g l de i.a y 0.5 l de flumetsulam 120 g l de i.a. Durante el desarrollo de las pasturas, el control de las malezas se realizó usando flumetsulam 120 g l de i.a y 2-4 DB isobutil éster 930 g l de i.a. Las dosis de aplicación se ajustaron al nivel de maleza en cada tipo de pastura. Las precipitaciones registradas en cada ambiente durante los años de ejecución de los ensayos se expresan como la precipitación estacional acumulada en mm (Tabla 2.2). La Tabla 2.3 resume la precipitación promedio estacional para un período de 30 años de los tres sitios experimentales. La dosis de fertilizante fosfato sólido (0-46/47-0) aplicado en la siembra se determinó de acuerdo con el análisis del suelo en cada sitio, con el objetivo de alcanzar los niveles críticos de fósforo para cada leguminosa (20 y 15 ppm de P₂O₅ para alfalfa y trébol rojo, respectivamente (Hernández, 2008), tanto para las pasturas puras como para las mezclas. Durante la evaluación de las pasturas se realizaron aplicaciones de mantenimiento durante el otoño de cada año.

Tabla 2.2. Fecha de siembra y precipitación estacional acumulada en el año 1 (A1), año 2 (A2) y año 3 (A3) después de la siembra para nueve ambientes.

Ambiente	Fecha de siembra	Precipitación estacional acumulada (mm)											
		A1				A2				A3			
		Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Oto.	Inv.	Prim.	Ver.
COL 2012	1-Jun	251	199	462	393	215	86	342	507	312	214	810	274
FL 2012	26-Jun	220	294	502	440	351	175	498	594	347	229	682	168
SJ 2012	22-Jun	196	336	531	450	253	100	501	636	301	185	716	186
COL 2013	1-Jun	215	86	342	507	312	214	810	274	90	321	229	271
FL 2013	7-Jun	351	175	498	594	347	229	682	168	123	372	168	197
SJ 2013	13-May	253	100	501	636	301	185	716	186	103	222	158	289
COL 2014	29-Abr	312	214	810	274	90	321	229	271	469	273	303	311
FL 2014	24-Abr	347	229	682	168	123	372	168	197	502	353	245	300
SJ 2014	25-Abr	301	185	716	186	103	222	158	289	514	330	250	261

Tabla 2.3. Precipitación estacional y anual para cada uno de los sitios (promedio de 30 años, período 1971 a 2000). Datos generados por la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información (GRAS) INIA 2019.

Sitio	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Anual
Colonia	323	226	273	316	1138
Florida	334	272	295	284	1185
San José	312	255	276	275	1118

Se utilizó una sembradora experimental de siembra directa autopropulsada con dos discos abiertos y ruedas compactadoras. Las parcelas tenían 6 m de largo y 1,2 m de ancho, seis surcos con un espaciamento entre líneas de 0,17 m. A las leguminosas se le aplicaron sus respectivos inoculantes comerciales siguiendo las instrucciones del fabricante, cepa *Sinorhizobium meliloti* U-143 para *Medicago sativa* L. y *Rhizobium leguminosarum trifolii* U-204 para *Trifolium pratense* L. y *Trifolium repens* L. Las plantas germinadas se registraron a lo largo de los dos surcos centrales de cada parcela (0,68 m²), dejando 2 m al final de cada surco para evitar efectos de borde y se contaron en tres momentos: 3, 7 y 12 SDS, correspondientes a etapas temprana (cotiledón), intermedia (primera hoja trifoliada) y tardía (de tres a cuatro hojas trifoliadas) del establecimiento, respectivamente.

La biomasa forrajera aérea del primer corte (C1) y la biomasa acumulada en el año 1 (A1), año 2 (A2) y año 3 (A3) después de la siembra se determinaron con una segadora rotativa marca Honda (HCR 216) de doble hélice dejando un remanente de 5,5 cm sobre el nivel del suelo. Las parcelas fueron cortadas mecánicamente a la misma altura inmediatamente después del muestreo. Los residuos de pasto del corte mecánico no se devolvieron a los sitios para simular las condiciones de pastoreo. Las submuestras para cada uno de los tratamientos se secaron en un horno de aire forzado (60 °C) hasta peso constante y se pesaron para obtener la producción de materia seca. En las mezclas se realizó separación manual de las especies para determinar la contribución de cada una, en base a su contenido de MS y expresada en kg MS ha⁻¹.

PASTURA PURA DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.)

La pastura pura de alfalfa (ALFP) se sembró con el cultivar ‘Estanzuela Chaná’, de latencia intermedia (VII). La semilla utilizada para la siembra cumplía con los estándares comerciales en Uruguay (promedio de 86% de germinación, 98% de pureza y 2,21 mg semilla⁻¹). Se sembraron seis densidades (4, 8, 12, 16, 20 y 24 kg semilla ha⁻¹) para simular diferentes calidades de establecimiento, donde las menores densidades de siembra simulaban una condición restrictiva en la implantación.

El primer corte se realizó cuando la altura de la alfalfa era de 20-25 cm, y los siguientes se realizaron cuando las plantas alcanzaron durante la etapa de rebrote altura media de 35 cm (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Altura de corte y número de cortes por año para la pastura de *Medicago sativa* L. pura (ALFP) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1, año 2 y año 3 (A1, A2 y A3, respectivamente).

Ambiente	Altura de corte (cm)				Cortes por año		
	C1	A1	A2	A3	A1	A2	A3
COL 2012	25	35	37	36	5	8	6
FL 2012	26	33	33	33	4	9	7
SJ 2012	25	31	31	34	5	7	8
COL 2013	27	38	41	37	3	5	8
FL 2013	20	22	32	28	5	9	5
SJ 2013	26	32	35	35	5	8	7
COL 2014	27	44	38	34	4	8	7
FL 2014	25	36	31	33	6	6	7
SJ 2014	28	37	34	36	6	8	6
Media	25	34	35	34	5	8	7

PASTURA PURA DE TRÉBOL ROJO (*Trifolium pratense* L.)

La pastura pura de trébol rojo (TPP) se estableció con ‘Estanzuela 116’, el cultivar más comúnmente usado en Uruguay, diploide de floración temprana (Ayala *et al.*, 2010). Cada ensayo se estableció en siembra directa, con seis densidades de siembra de TPP (3, 6, 9, 12, 15 y 18 kg semilla ha⁻¹) para simular diferentes calidades de implantación del cultivo, con menores densidades de siembra correspondientes a un establecimiento más pobre. La semilla sembrada tenía 95% de capacidad de germinación, 98% de pureza y 1,88 mg semilla; por lo tanto, el lote de semillas tenía 495 SV por gramo. La productividad del forraje se evaluó considerando la altura (Tabla 2.5) para el C1 durante la primavera-verano y los cortes acumulados durante A1 y A2.

Tabla 2.5. Altura de corte promedio y número de cortes por año para la pastura de *Trifolium pratense* L. puro (TPP) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1 y año 2 (A1 y A2, respectivamente).

Ambiente	Altura de corte (cm)			Cortes por año	
	C1	A1	A2	A1	A2
COL 2012	42	35	30	5	6
FL 2012	34	25	23	3	7
SJ 2012	27	27	22	5	6
COL 2013	32	41	33	3	7
FL 2013	18	24	25	4	6
SJ 2013	22	33	28	4	7
COL 2014	46	52	29	4	5
FL 2014	26	35	25	5	4
SJ 2014	27	35	27	6	5
Media	30	34	27	4	6

PASTURAS MEZCLAS BIENALES

Se evaluaron dos tipos de mezclas bienales (MB); la leguminosa *Trifolium pratense* L. ‘Estanzuela 116’ (TP) acompañado de *Cichorium intybus* L. (CI) ‘INIA LE Lacerta’ (MBC) o *Bromus catharticus* Vahl. (BC) ‘INIA Leona’ (MBB), con seis densidades de siembra que simulaban diferentes niveles de implantación (Tabla 2.6). Todas las especies se sembraron en la misma línea a una profundidad de 10-20 mm. La semilla de la leguminosa fue inoculada con la cepa U-204 y fue mezclada con el acompañante correspondiente para la confección de cada MB. El ensayo multi-ambiental se estableció en tres sitios, durante tres años en Colonia, Florida y San José (2012, 2013 y 2014; Tabla 2.1), aunque en Florida solo se pudo evaluar 2013 y 2014 (Tabla 2.7).

Tabla 2.6. Densidades de siembra utilizadas para dos pasturas bienales de *Trifolium pratense* L. asociadas con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o con la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB).

Mezcla	Especies	Densidades (kg semilla ha ⁻¹)					
MBC	<i>Trifolium pratense</i> L.	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	<i>Cichorium intybus</i> L.	1,5	3,0	5,5	6,0	7,5	9,0
MBB	<i>Trifolium pratense</i> L.	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	<i>Bromus catharticus</i> Vahl.	3,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0

Tabla 2.7. Altura de corte promedio y número de cortes por año para dos pasturas bienales de *Trifolium pratense* L. asociadas con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o con la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB), en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1 y año 2 (A1 y A2, respectivamente).

Ambiente	Altura de corte (cm)			Cortes por año	
	C1	A1	A2	A1	A2
COL 2012	57	41	30	5	7
FL 2012	29	31	23	4	8
SJ 2012	38	34	26	4	6
COL 2013	35	46	40	3	6
FL 2013	23	33	31	4	6
SJ 2013	22	32	32	4	7
COL 2014	42	55	35	4	6
FL 2014	34	43	34	5	5
SJ 2014	24	31	34	6	5
Media	34	38	32	4	6

PASTURAS MEZCLAS DE CICLO LARGO

La evaluación de las mezclas perennes de ciclo largo (ML) solo se realizó en los ambientes de Colonia durante tres años (2012, 2013 y 2014) (Tabla 2.2). La evaluación incluyó alfalfa ‘Estanzuela Chaná’ en forma pura (ALFP) y sus ML asociadas. Ambas ML incluyeron el cultivar ‘Estanzuela Chaná’ como leguminosa principal (alfalfa), la primera se acompañó con *Dactylis glomerata* L. ‘INIA Perseo’ a la que se hará referencia como MLD y la otra con *Festuca arundinacea* Schreb. ‘INIA Fortuna’ (MLF). Ambas incluyeron como leguminosa complementaria *Trifolium repens* L. (trébol blanco) ‘Estanzuela Zapicán’. Todas las especies se sembraron en la misma línea y se usaron cinco densidades de siembra para generar variabilidad en la densidad de plantas establecidas, simulando distintos niveles de logro de la implantación (Tabla 2.8). Las densidades utilizadas para las ML se definieron con los mismos criterios que para ALFP y se evaluaron durante el mismo periodo de tiempo (Tabla 2.9).

Tabla 2.8. Densidades de siembra utilizadas para *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y en las mezclas perennes de ciclo largo con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb (MLF).

Tipo de pastura	Especie	Densidades (kg semilla ha ⁻¹)				
ALFP	<i>Medicago sativa</i> L.	4	8	12	16	20
	<i>Medicago sativa</i> L.	4	8	12	16	20
MLD	<i>Trifolium repens</i> L.	1	1,5	2	2,5	3
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	4	6	8	10	12
MLF	<i>Medicago sativa</i> L.	4	8	12	16	20
	<i>Trifolium repens</i> L.	1	1,5	2	2,5	3
	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	3	6	9	12	15

Tabla 2.9. Altura de corte promedio y número de cortes por año para dos mezclas perennes de ciclo largo donde la leguminosa principal *Medicago sativa* L. (ALF) fue acompañada de *Trifolium repens* L. y *Dactylis glomerata* L. (MLD) o de *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) en diferentes ambientes para primer corte (C1), año 1, año 2 y año 3 (A1, A2 y A3, respectivamente).

Ambiente	Altura de corte (cm)				Cortes por año		
	C1	A1	A2	A3	A1	A2	A3
COL 2012	36	32	34	29	5	8	7
COL 2013	25	31	33	31	3	7	7
COL 2014	34	38	39	33	5	7	5
Media	32	34	35	31	4	7	6

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

DINÁMICA DE PLANTAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO

La densidad de plantas (DP) en cada una de las pasturas evaluadas se analizó usando un modelo mixto generalizado con distribución de Poisson para el componente aleatorio y una función de enlace log (Ecuación 2.1):

$$\log(E(DP_{ijkl})) = \mu + A_i + S_j + D_k + B_{l(i)} + A \times S_{ij} + A \times D_{ik} + S \times D_{jk} + A \times S \times D_{ijk} + P_{ijkl} \quad (2.1)$$

donde DP_{ijkl} es la densidad de plantas logradas expresadas como plantas por m^2 para el ambiente i , bajo la densidad de siembra k , registrada en la semana j después de la siembra y en el bloque l ; μ es la media poblacional; A_i es el efecto del ambiente i -ésimo ($i = 1, \dots, 9$); S_j es el efecto del j -ésimo momento de conteo ($j = 1, 2, 3$); D_k es el efecto de la densidad de siembra usada para simular diferentes calidades de implantación de pastura ($k = 1, \dots, 6$); $B_{l(i)}$ es el efecto del bloque l ($l = 1, \dots, 4$) en el ambiente i ; P_{ijkl} es el efecto de la parcela dentro del bloque l para densidad k y ambiente i , el cual es estimable ya que en el ensayo se repiten observaciones sobre cada parcela. Los términos $B_{l(i)}$ y P_{ijkl} se trataron como aleatorios. El efecto aleatorio de la parcela se incluyó en el modelo para inducir correlaciones entre las observaciones realizadas en una sola parcela en los diferentes momentos de recuento. La significación estadística de los efectos en el modelo se evaluó utilizando PROC GLIMMIX en el software SAS (SAS Institute, 2004), y se calculó la

diferencia mínima significativa (DMS) (ajustada para comparaciones múltiples) para la comparación de medias de tratamiento ($\alpha = 0,05$).

En las MB el efecto de ambiente i -ésimo se corresponde con 8 ambientes ya que FL2012 fue descartado por los daños causados por el ingreso de vacunos durante la etapa de establecimiento. En las ML el valor es 3, ya que se evaluaron solo 3 ambientes, Colonia 2012, 2013 y 2014.

RELACIONES ENTRE PRODUCTIVIDAD Y DENSIDAD DE PLANTAS

La relación entre la biomasa (kg MS ha^{-1}) y la DP se modeló con un polinomio de segundo grado que incluyó efectos aleatorios de ambientes (Ecuación 2.2).

$$R_{ij} = \beta_0 + \beta_1 DP_j + \beta_2 DP_j^2 + A_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.2)$$

donde R_{ij} es la biomasa (obtenida en C1, A1, A2 o A3) del ambiente i relacionada con el momento de conteo de plántulas j ; β_0 es la intersección; β_1 es el coeficiente que relaciona la DP con la productividad; β_2 es el coeficiente de regresión incluido para modelar la curvatura; DP_j es la densidad de plantas en el momento del conteo j (3, 7 o 12 SDS); A_i es el efecto aleatorio del ambiente i , y ε_{ij} es un término de error aleatorio con distribución normal de media cero y varianza constante.

El mejor predictor lineal insesgado (BLUP) de los efectos del ambiente, calculado a partir de la ecuación (2.2), se utilizó para la clasificación de los nueve ambientes según su nivel de productividad forrajera. El proxy para ambientes buenos, intermedios y pobres se obtuvo promediando los tercios superior, intermedio y menor de los BLUPs de ambiente para ALFP, TP y ML. En las MB con ocho ambientes, los ambientes buenos surgen del promedio de los tres valores de BLUPs más altos, mientras que el intermedio y el pobre se obtienen promediando los tres BLUPs intermedios y los dos más pequeños.

A partir del recuento de las plantas obtenidas a las 3, 7 y 12 SDS se realizó la predicción de biomasa (Ecuación 2.2) para C1, A1, A2 y A3, la cual fue evaluada mediante validación cruzada del tipo leave one out (Wong, 2015). Este procedimiento consistió en dejar fuera del análisis uno de los ambientes para posteriormente validar la predicción del modelo en ese ambiente. El procedimiento se repite para todos los ambientes. En cada una

de las etapas de la validación, la biomasa predicha por el modelo ajustado fue comparada con la biomasa observada en el subconjunto de datos dejado fuera del análisis y se calcularon los errores de predicción, como la diferencia entre ambos valores. Los errores de predicción se elevaron al cuadrado, se promediaron y la raíz cuadrada del error de predicción cuadrático medio (MSPE) se expresó como porcentaje de la media de biomasa, para obtener un error de predicción relativo al nivel de productividad de la especie y el ambiente.

También se calculó la media de los valores absolutos de los errores de predicción, Desviación Absoluta Media (MAD; Pham-Gia y Hung, 2001). La MAD también se expresó como porcentaje de la biomasa promedio para los diferentes escenarios. El criterio de información Akaike (AIC) se utilizó para evaluar la bondad del ajuste para los valores de biomasa en cada ensayo; los valores mínimos de AIC entre modelos alternativos para las mismas productividades fueron usados para seleccionar el mejor modelo (Akaike, 1974). Para el análisis de la dinámica de plántulas y para el ajuste de los modelos predictivos se utilizó el software R (www.R-org.com).

En todos los ensayos, el modelo ajustado se utilizó para obtener probabilidades de obtención de determinados valores de biomasa según las plántulas de leguminosa forrajera contada para ambientes de diferentes calidades. El cálculo de probabilidades se realizó de manera empírica mediante simulaciones Monte Carlo, que se ejecutaron 1.000 veces para cada modelo de regresión ajustado. Los rangos de variación para los parámetros de error en las simulaciones de Monte Carlo fueron de 1.000 y 3.500 kg MS ha⁻¹ para C1 y las biomásas acumuladas anuales del A1, A2 y A3, respectivamente. Para simular valores de biomasa en ambientes relativamente buenos, a la predicción del modelo polinómico ajustado se le adicionó el BLUP de ambiente bueno. Se utilizó el mismo procedimiento para obtener 1.000 biomásas potenciales para ambientes intermedios y pobres. La frecuencia relativa a lo largo de 1.000 series de valores de biomasa por encima de un umbral dado, en cada ambiente, se usó como estimador de la probabilidad de obtener un rendimiento superior al umbral. De esta manera, se calculó la probabilidad de obtener una producción de biomasa del C1 por encima de 2.000 kg MS ha⁻¹ y de una biomasa acumulada anual mayor a 10.000 kg MS ha⁻¹ para A1, A2 y A3 en ALFP y ML y para A1 y A2 en TP y ML. Estos valores umbral corresponden a rendimientos promedio para C1 y la producción acumulada de A1 y A2 de TP y A1, A2 y A3 en ALFP en las condiciones de

Uruguay, según los resultados de la Evaluación Nacional de Cultivares del acuerdo INIA-INASE (INIA, 2017).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

IMPLANTACIÓN DE PASTURAS

MONOFÍTICA DE ALFALFA

Las evaluaciones de la implantación de la pastura pura de alfalfa mostraron que los ambientes, el momento y la densidad de siembra incidieron sobre la densidad de plantas. La interacción entre la densidad de siembra y momento fue altamente estadísticamente significativa. También el momento de conteo dentro de un ambiente dado influyó en la DP registrada, con los valores más bajos en los conteos tardíos para todas las densidades y todos los ambientes (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Análisis de varianza para la densidad de plantas de una pastura pura de *Medicago sativa* L. sembrada en nueve ambientes, con seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.

Efecto	Num DF	Den DF	Valor F	Pr > F
Ambiente	8	135	12,67	<,0001
Repetición (Ambiente)	27	135	1,15	0,2965
Momento	2	324	156,12	<,0001
Densidad	5	324	255,28	<,0001
Ambiente*Momento	16	324	152,87	<,0001
Ambiente*Densidad	40	324	1,15	0,2526
Momento*Densidad	10	324	7,63	<,0001
Ambiente*Momento*Densidad	80	324	9,52	<,0001

La DP de ALFP fue proporcional a la densidad de siembra utilizada para simular diferentes calidades de implantación (Figura 3.1). En densidades bajas (4 y 8 kg semilla ha⁻¹) se determinó la máxima DP (77 y 170 plantas m⁻², respectivamente) a 7 SDS. Sin embargo, cuando las densidades simulaban implantaciones buenas (16, 20 y 24 kg semilla ha⁻¹) se registró una DP similar en los momentos de conteo temprano e intermedio (3 y 7 SDS, respectivamente). La menor DP se registró en el conteo tardío (12 SDS) independientemente de la densidad de siembra usada.

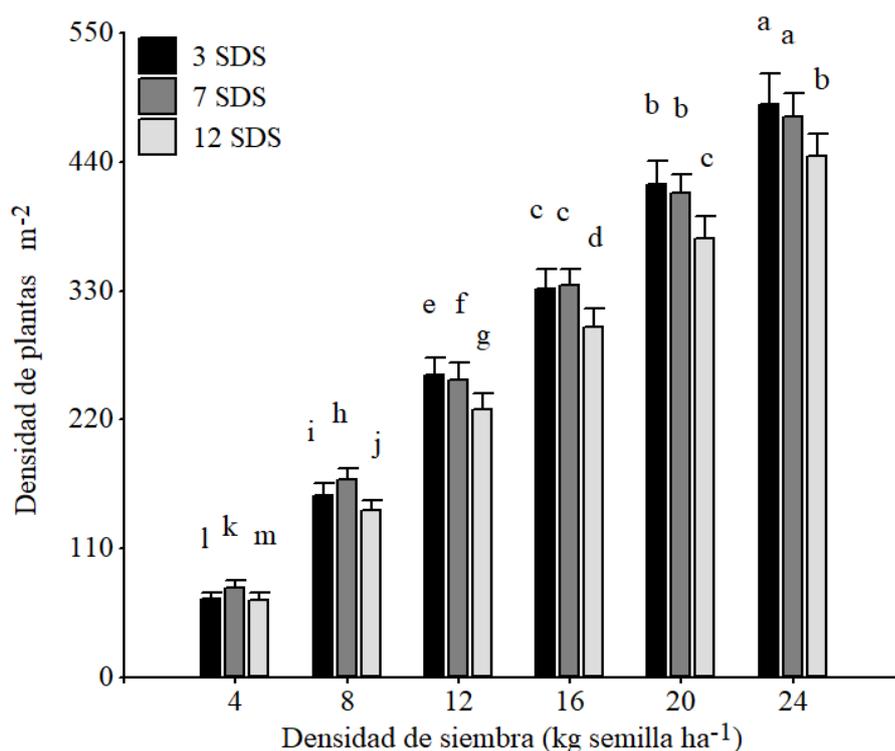


Figura 3.1. Densidad de plantas de *Medicago sativa* L. en conteos tempranos, intermedios y tardíos (3, 7 y 12 semanas después de la siembra, SDS) para diferentes densidades de siembra usadas para simular calidades de implantación de la pastura pura de *Medicago sativa* L. Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² ($p < 0,05$).

MONOFÍTICA DE TRÉBOL ROJO

En el caso de la pastura de TPP, la DP también dependió de la densidad de siembra y del ambiente, sino también del momento de conteo (Tabla 3.2). Como se esperaba, las poblaciones de TPP incrementaron con el aumento de la densidad de siembra (Figura 3.2). Si bien la menor DP se registró a las 3 SDS, en las densidades bajas (3 y 6 kg semilla ha⁻¹) se estabilizó entre 7 y 12 SDS la DP. Cuando se usaron mayores densidades de siembra (12 a 18 kg semilla ha⁻¹) se observó una disminución de la DP después de 7 SDS.

Tabla 3.2. Análisis de varianza para la densidad de plantas de una pastura pura de *Trifolium pratense* L. sembrado en nueve ambientes, con seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.

Efecto	GL Num	GL Den	Valor F	Pr > F
Ambiente	8	135	18,06	<,0001
Repetición (Ambiente)	27	135	3,88	<,0001
Momento	2	323	133,17	<,0001
Densidad	5	323	204,84	<,0001
Ambiente*Momento	16	323	71,42	<,0001
Ambiente*Densidad	40	323	1,53	0,0254
Momento*Densidad	10	323	33,17	<,0001
Ambiente*Momento*Densidad	80	323	3,54	<,0001

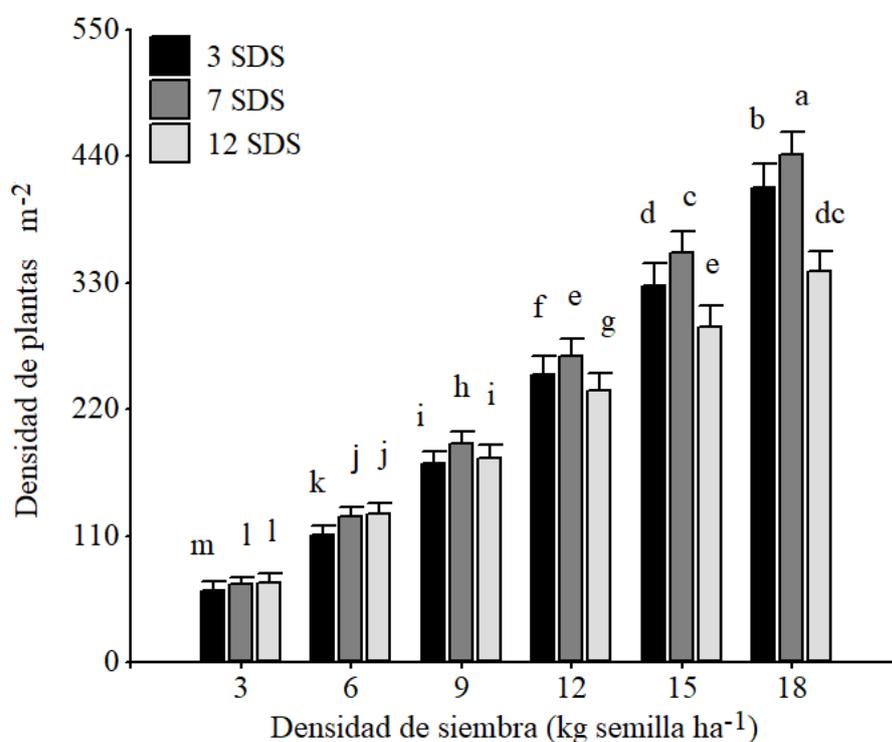


Figura 3.2. Densidad de plantas de *Trifolium pratense* L. en conteos tempranos, intermedio y tardíos (3, 7 y 12 semanas después de la siembra, SDS) para diferentes densidades de siembra usadas para simular calidades de implantación de la pastura pura de *Trifolium pratense* L. Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) se conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² (p < 0,05).

PASTURAS MEZCLAS BIENALES

La DP de trébol rojo en MB no solo dependió de la densidad de siembra y del ambiente, sino también del momento de conteo y el tipo de mezcla (Tabla 3.3). Como era esperable, la misma aumentó con el incremento en la densidad de siembra en ambas MB (Figura 3.3). El modelo indicó la interacción significativa entre el momento de conteo y la densidad de siembra, ya que la DP a las 3, 7 y 12 SDS fue distinta según la densidad de siembra. Se observó en ambas MB que en densidades de siembra que simulan mala calidad de implantación (2 a 6 kg semilla ha⁻¹ de TP) no hubo diferencias significativas en la DP de la leguminosa entre momentos de conteo. Sin embargo, en condiciones de buena implantación (simuladas con más de 6 kg semilla ha⁻¹ de TP) se observó una disminución en el recuento de plántulas a las 12 SDS, no existiendo diferencias estadísticamente significativas en DP entre las 3 y 7 SDS.

Tabla 3.3. Análisis de varianza para la densidad de plantas de *Trifolium pratense* L. en dos mezclas bienales sembradas en ocho ambientes, seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.

Efecto	GL Num	GL Den	Valor F	Pr > F
Ambiente	7	264	28,29	<,0001
Mezcla	1	576	1,94	0,1639
Momento	2	576	110,46	<,0001
Densidad	5	576	424,40	<,0001
Ambiente: Mezcla	7	576	1,25	0,2707
Ambiente: Momento	14	576	155,05	<,0001
Ambiente: Densidad	35	576	1,26	0,1525
Mezcla: Momento	2	576	13,68	<,0001
Mezcla: Densidad	5	576	2,73	0,0188
Momento: Densidad	10	576	24,93	<,0001
Ambiente: Mezcla: Momento	14	576	21,17	<,0001
Ambiente: Mezcla: Densidad	35	576	2,00	0,0007
Ambiente: Momento: Densidad	70	576	2,74	<,0001
Mezcla: Momento: Densidad	10	576	2,45	0,0071
Ambiente: Momento: Mezcla: Densidad	70	576	1,52	0,0058

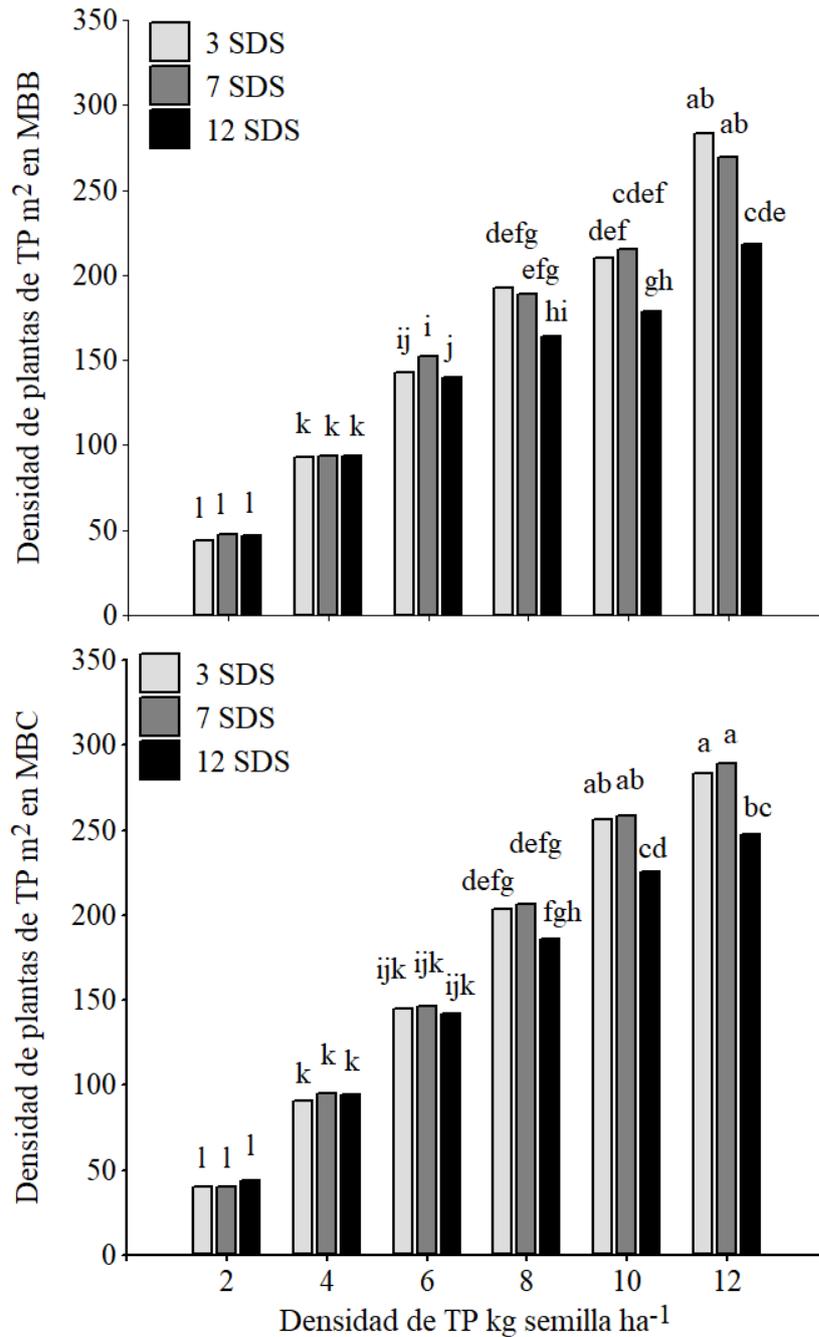


Figura 3.3. Densidad de plantas de *Trifolium pratense* L. (TP) para dos mezclas bienales con *Cichorium intybus* L. (MBC) o *Bromus catharticus* Vahl. (MBB), en función de la densidad de siembra de *Trifolium pratense* L., en tres momentos de conteo: temprano, intermedio y tardío (3, 7 y 12 semanas después de la siembra - SDS, respectivamente). Los tres sitios (Colonia, Florida y San José) y años de siembra (2012, 2013 y 2014) conforman 9 ambientes de implantación diferentes. Letras distintas indican diferencia significativa entre las medias de densidad de plantas por m² (p < 0,05).

PASTURAS MEZCLAS DE CICLO LARGO

La DP de alfalfa se analizó comparando pasturas monofíticas de alfalfa y dos mezclas de ciclo largo (MLD y MLF) donde la densidad de siembra de alfalfa fue común en todas (4, 8, 12, 16 y 20 kg semilla ha⁻¹ de alfalfa, Tabla 2.8). La DP de alfalfa fue estadísticamente diferente entre las densidades sembradas ($p < 0,0001$) usadas independientemente del momento de conteo, y los ambientes incidieron en la DP de alfalfa según el tipo de pasturas (Tabla 3.4). La relación entre la DP lograda y la densidad de siembra de alfalfa en la pastura pura fue similar a la registrada en las ML cuando los recuentos de plantas se realizaron a los 3 y 7 SDS (Figura 3.4a y 3.4b). En contraste, las DP de alfalfa en las ML disminuyeron con las densidades altas ($p < 0,0001$) respecto a ALFP en el conteo tardío (Figura 3.4c), y dentro de éstas la MLF siempre mostró una DP menor que MLD.

Tabla 3.4. Análisis de varianza para la densidad de plantas de *Medicago sativa* L. en tres pasturas (pura y dos mezclas de ciclo largo) sembradas en tres ambientes, seis densidades de siembra y tres momentos de conteo de plántulas.

Efecto	GL Num	GL Den	Valor F	Pr > F
Ambiente	2	108	27,39	<,0001
Pastura	2	288	0,63	0,5335
Momento	2	288	415,62	<,0001
Densidad	4	288	468,49	<,0001
Ambiente: Pastura	4	288	12,58	<,0001
Ambiente: Momento	4	288	226,46	<,0001
Ambiente: Densidad	8	288	7,06	<,0001
Ambiente: Pastura: Momento	8	288	48,04	<,0001
Ambiente: Pastura: Densidad	16	288	24,15	<,0001
Pastura: Momento	4	288	64,43	<,0001
Pastura: Densidad	8	288	19,61	<,0001
Momento: Densidad	8	288	13,98	<,0001
Ambiente: Momento: Densidad	16	288	1,61	0,0656
Pastura: Momento: Densidad	16	288	5,08	<,0001
Ambiente: Momento: Pastura: Densidad	32	288	4,29	<,0001

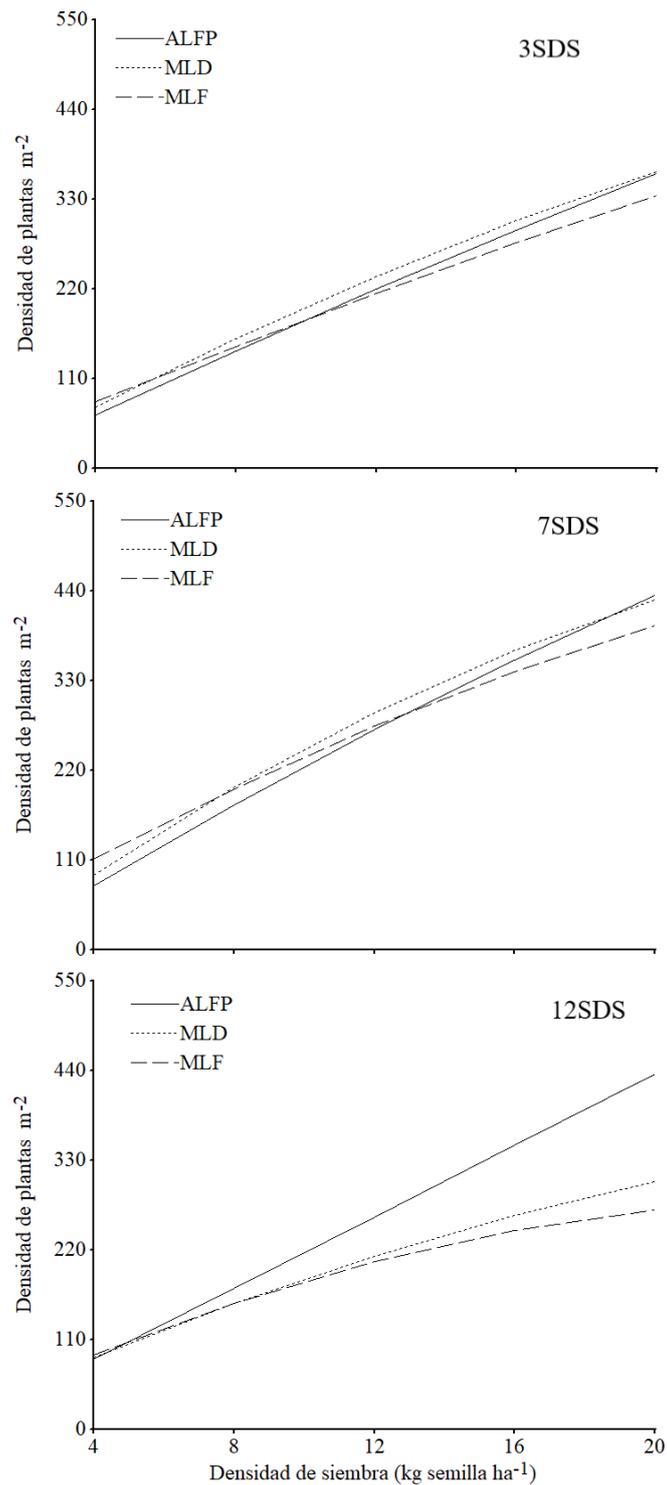


Figura 3.4. Densidad de plantas de *Medicago sativa* L. para tres años de siembra en Colonia, Uruguay, según momento de conteo de plántulas temprano (A), medio (B) y tardío (C) para cinco densidades de siembra de *Medicago sativa* L. en tres tipos de pastura: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas perennes de ciclo largo con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF).

RELACIONES ENTRE PRODUCTIVIDAD Y DENSIDAD DE PLANTAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE LA PASTURA

MONOFÍTICA DE ALFALFA

La productividad de ALFP se incrementó cuando las densidades de siembra fueron mayores. En la mayoría de los ambientes con 12 kg semilla ha⁻¹ o más se observaron los máximos rendimientos (Tabla 3.5).

Los coeficientes de regresión estimados por el modelo de predicción de productividad en relación a la DP logradas durante el establecimiento de la pastura se muestran en la Tabla 3.6. Para el conteo de las 3 y 12 SDS, el rendimiento mostró una relación cuadrática con la DP tanto para C1, como para A1 y A2.

Tabla 3.5. Rendimiento de *Medicago sativa* L. pura (kg MS ha⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Periodo de evaluación producción forraje †	Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Ambiente								
		COL2012	COL2013	COL2014	FL2012	FL2013	FL2014	SJ 2012	SJ2013	SJ2014
		kg DM ha ⁻¹								
C1	4	925b*	657c	926b	1125b	215c	849b	502b	626c	1185c
	8	1473a	1093b	1052b	1155b	447bc	834b	842ab	1086b	1528bc
	12	1558a	1332ab	1302ab	1108b	752a	821b	1055a	1182b	1822ab
	16	1556a	1497a	1563a	1394ab	770a	1156ab	1103a	1474ab	2037ab
	20	1686a	1621a	1660a	1578ab	669ab	1098ab	1124a	1286ab	1999ab
	24	1735a	1683a	1603a	2033a	861a	1590a	1255a	1641a	2186a
A1	4	7165d	3116c	5421e	3542b	5755c	7077b	5414c	8466b	10061d
	8	10025c	4099b	7415d	6217a	6968abc	8528ab	7789b	9186ab	11950c
	12	11330ab	4039b	8411cd	6039a	7772a	8355ab	9526a	9492ab	13059abc
	16	10248bc	4557ab	9147bc	6403a	7470ab	9443ab	9449a	9959ab	12576bc
	20	10633abc	5017a	9810b	6578a	6269bc	8253b	9756a	10169a	14279a
	24	11648a	4541ab	11667a	7972a	7348ab	11030a	10265a	10278a	13726ab

† C1, primer corte; A1, año 1.

* Por ambiente y período de evaluación (por columna), letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre rendimientos de forraje ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.5.1. Rendimiento de *Medicago sativa* L. pura (kg MS ha⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Periodo de evaluación producción forraje†	Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Ambiente								
		COL2012	COL2013	COL2014	FL2012	FL2013	FL2014	SJ 2012	SJ2013	SJ2014
kg DM ha ⁻¹										
A2	4	15212b*	7220c	13829b	11439b	12106a	8757ab	10311b	10111b	15903a
	8	19290a	9612b	15560ab	14000a	13302a	10473a	11457b	11745a	15985a
	12	20619a	9661b	15175ab	15109a	14290a	10108ab	13894a	11728a	17129a
	16	18779a	11592ab	16318a	14740a	14644a	10487a	14156a	12406a	16993a
	20	19619a	11737a	17038a	14503a	14683a	8212b	14056a	12785a	17114a
	24	20699a	11970a	17080a	15360a	14981a	9619ab	14799a	12662a	17276a
A3	4	7331b	11258c	8030b	6953a	4386a	7160b	9916b	8490b	9095ab
	8	7647ab	13065b	9298a	9171a	4757a	8640a	9312b	9296ab	8509b
	12	8587ab	13460ab	9001a	9070a	4368a	8005ab	11397ab	9180ab	9668ab
	16	8609ab	13474ab	9133a	7917a	4584a	8807a	10168b	9541ab	9854a
	20	8713ab	13609ab	9431a	6556a	4033a	8425a	10675b	11098a	9583ab
	24	9116a	14440a	9619a	8423a	4389a	8445a	12840a	9846ab	9653ab

† A2, año 2; A3, año 3.

* Por ambiente y período de evaluación (por columna), letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre rendimientos de forraje ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.6. Coeficientes de regresión utilizados para estimar el rendimiento de *Medicago sativa* L. pura (ALFP) en función del recuento de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes.

Periodo de evaluación producción forraje †	Momento de conteo SDS‡	Coeficientes de Regresión§			Calidad Ambiental¶		
		β_0	β_1	β_2	Bueno	Intermedio	Pobre
				kg MS ha ⁻¹			
C1	3	617	3,06	-0,002	342	2	-344
	7	658	2,66		316	16	-332
	12	551	3,69	-0,004	249	21	-270
A1	3	6138	13,48	-0,010	2787	-178	-2609
	7	6339	11,04		2623	-42	-2581
	12	6202	12,52	-0,010	2467	-48	-2418
A2	3	11423	11,36	-0,010	2725	227	-2952
	7	11300	11,69	-0,010	2538	308	-2845
	12	10860	18,52	-0,020	2439	410	-2849
A3	3	8170	4,50		2068	59	-2127
	7	7713	4,41		1962	77	-2039
	12	7827	8,31	-0,010	2064	-8	-2056

† C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ β_0 , ordenada al origen expresada como kg MS ha⁻¹; β_1 , el coeficiente que relaciona el aumento en la densidad de plantas con el rendimiento de forraje, expresado como kg MS ha⁻¹; β_2 , coeficiente de regresión para el término cuadrático.

¶ Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

Los BLUPs de efectos ambientes, basados en la desviación del rendimiento promedio de un ambiente con respecto al rendimiento promedio general (kg MS ha⁻¹), fueron usados para clasificar los ambientes como bueno, intermedio y pobre. El intercepto de cada regresión se obtiene sumando el BLUP del efecto de ambiente o al coeficiente β_0 .

Usando los modelos ajustados (Ecuación 2; Tabla 3.6), se predijo la productividad de ALFP según la DP registrada en diferentes momentos de conteo. Usar la DP registrada a las 3, 7 o 12 SDS no generó mayores diferencias en la calidad de predicción de forraje. Los conteos tempranos y tardíos presentaron errores de predicción similares. Si bien, los momentos de conteos intermedios y tardíos mostraron una mayor frecuencia de valores bajos de AIC respecto a los conteos tempranos (Tabla 3.7), los errores de predicción (MAD) de los conteos tardíos fueron similares a los obtenidos utilizando los momentos tempranos. Por lo tanto, los conteos tempranos podrían ser un buen predictor de forraje especialmente para el rendimiento anual de alfalfa en ambientes buenos.

La Tabla 3.8 muestra la predicción de forraje a partir de la DP a las 3 SDS y el error de predicción (MAD) para todos los ambientes. Como era esperable en ALFP, el rendimiento anual fue mayor para A2. En ambientes de calidad buena e intermedia, los errores de predicción de la biomasa acumulada en A1, A2 y A3 no superaron el 20%; sin embargo, los errores de predicción aumentaron en ambientes de mala calidad.

MONOFITICAS DE TRÉBOL ROJO

En el caso de TPP, el rendimiento de forraje también fue diferente entre ambientes y densidades de siembra usadas para simular la calidad de la implantación (Tabla 3.9). El rendimiento en forraje para el C1, A1 y A2 se relacionó con la DP mediante los modelos reportados en la Tabla 3.10 (coeficientes de regresión). Esta relación siempre fue estadísticamente significativa ($p < 0,001$), independientemente del momento en que se contaron las plántulas para determinar la DP. Los modelos de mejor ajuste fueron cuadráticos para las biomásas anuales acumuladas, y lineal para la producción de forraje en el C1.

Tabla 3.7. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para pasturas de *Medicago sativa* L. pura.

Calidad Ambiental †	Momento de conteo SDS‡	Periodo de evaluación producción forraje §							
		C1		A1		A2		A3	
		AIC¶	MAD#	AIC	MAD	AIC	MAD	AIC	MAD
Buena	3	1070	18	1300	11	1305	11	1300	10
	7	1084	20	1290	10	1299	11	1308	11
	12	1067	17	1277	10	1302	11	1304	11
Intermedio	3	1041	20	1324	20	1292	11	1232	10
	7	1036	19	1318	20	1301	12	1211	10
	12	1040	19	1323	20	1289	11	1216	9
Pobre	3	1084	34	1262	17	1320	16	1315	18
	7	1087	33	1270	19	1310	15	1312	18
	12	1078	33	1267	17	1314	15	1310	17

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

¶ Criterio de información de Akaike; un valor inferior indica un mejor ajuste.

Desviación Absoluta Promedio entre el rendimiento observado y el predicho por el modelo, expresada como porcentaje de la biomasa promedio (%).

Tabla 3.8. Predicciones de rendimiento (kg MS ha⁻¹) y error de predicción (MAD) en función de la densidad de plantas de *Medicago sativa* L. a las 3 semanas después de la siembra de pasturas puras para diferentes ambientes.

Calidad Ambiental †	Período de producción de forraje §							
	C1		A1		A2		A3	
	Forraje KgMS ha ⁻¹	MAD‡ %	Forraje KgMS ha ⁻¹	MAD %	Forraje KgMS ha ⁻¹	MAD %	Forraje KgMS ha ⁻¹	MAD %
Bueno	1496	19	11419	19	16005	11	10864	17
Intermedio	1338	23	8719	20	13725	12	9236	11
Pobre	949	38	6131	26	10987	17	7174	31
Media	1261	27	8756	22	13572	13	9091	14

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

§ C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

‡ MAD, media de la desviación absoluta entre el rendimiento observado y el predicho (expresado como porcentaje del rendimiento promedio).

Tabla 3.9. Rendimiento de *Trifolium pratense* L. puro (kg MS ha⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Periodo de producción forraje †	Densidad de siembra	Ambiente								
		COL 2012	COL 2013	COL	FL 2012	FL 2013	FL 2014	SJ 2012	SJ 2013	SJ 2014
kg MS ha ⁻¹										
C1	3	1861d*	1733d	2067d	1029c	255c	1290d	875c	819d	1467d
	6	2834c	2237c	3620b	1195bc	377c	1639c	1211b	1048c	1840c
	9	3851a	2511c	3452b	1576a	604b	2578b	1409a	1630ab	2212ab
	12	3172b	3068b	3530b	1594ab	569b	2483b	1469a	1549b	2572b
	15	3283b	3344b	3197c	1575ab	709b	2346b	1477a	1731a	2930a
	18	3353b	3785a	4007a	1653a	1091a	2844a	1344ab	1741a	2856a
A1	3	11980c	7890f	15946c	2059b	6266f	7642c	8629c	7405c	11961c
	6	13400b	9002d	17540a	2548b	7625e	9610b	10282b	8968b	12854b
	9	15378a	8392e	16738b	3315a	8670c	11543a	11798a	10553a	13514a
	12	14108b	9760c	16223bc	3473a	8167d	11125a	11305a	10913a	13828a
	15	14950a	11414a	16584bc	3596a	9272b	11185a	11484a	10987a	13804a
	18	13559b	10951b	18224a	3659a	9838a	11637a	11546a	10961a	13540a

† C1, primer corte; A1, año 1.

* Por ambiente y período de evaluación (por columna), letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre rendimientos ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.9.1. Rendimiento de *Trifolium pratense* L. puro (kg MS ha⁻¹) para los ambientes generados por la combinación de los tres sitios (Colonia, Florida y San José) repetidos durante tres años con diferentes densidades de siembra (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Periodo de producción forraje †	Densidad de siembra	Ambiente								
		COL 2012	COL 2013	COL 2014	FL 2012	FL 2013	FL 2014	SJ 2012	SJ 2013	SJ 2014
		kg MS ha ⁻¹								
A2	3	11968d*	11541e	4000d	8186c	8145bc	2546e	9740d	7759e	9789e
	6	13222c	12815d	6172c	8688c	7919c	3132d	11794c	9204d	9925d
	9	13719b	13642c	7856a	10244b	9353a	3559c	12760b	10292c	10523c
	12	14424a	14241b	7219b	10316b	8508bc	4129b	12790b	10622bc	10132bc
	15	14796a	14256b	7852a	10086b	8815ab	4574a	13194b	11245a	10735a
	18	14484a	15581a	7919a	11489a	9591a	4586a	14184a	10923ab	10307ab

† A2, año.

* Por ambiente y período de evaluación (por columna), letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre rendimientos ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.10. Coeficientes de regresión utilizados para estimar el rendimiento de *Trifolium pratense* L. puro (TPP) en función del recuento de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes.

Periodo de producción forraje †	Momento de conteo SDS‡	Coeficientes de Regresión§			Ambiente¶		
		β_0	β_1	β_2	Bueno	Intermedio	Pobre
					kg MS ha ⁻¹		
C1	3	1326	4,22		1014	-88	-926
	7	1260	4,35		926	-10	-916
	12	1195	5,00		910	-64	-846
A1	3	9195	9,15	-0,01	3863	-314	-3549
	7	8555	13,45	-0,01	3806	-254	-3552
	12	8566	15,26	-0,02	3678	-106	-3572
A2	3	8221	10,32	-0,01	3505	-111	-3394
	7	7834	12,68	-0,01	3172	85	-3257
	12	7638	15,48	-0,02	3294	-21	-3274

† C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ β_0 , ordenada al origen expresada como kg MS ha⁻¹; β_1 , el coeficiente que relaciona el aumento en el número de plantas con el rendimiento de forraje, expresado como kg MS ha⁻¹; β_2 coeficiente de regresión para el término cuadrático.

¶ Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

Los errores de predicción de biomasa acumulada en A2 para TPP estuvieron por debajo del 20 % en todos los ambientes (Tabla 3.11). La DP fue un buen predictor de la productividad de forraje acumulado en A1 en ambientes de calidad intermedia y buena, y solo en ambientes de buena calidad para C1. Los momentos de conteos intermedios (7 SDS) mostraron los valores de AIC más bajos para predecir biomasa acumulada en A1 y en A2 en la mayoría de los ambientes; sin embargo, los errores de predicción (MAD) fueron similares a los obtenidos usando los conteos tempranos o tardíos. Los MAD también fueron similares para los modelos que usan DP registrada en diferentes momentos de conteo, pero fueron consistentemente menores en los ambientes buenos.

Tabla 3.11. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para pasturas de *Trifolium pratense* L. puro.

Ambiente †	Momento de conteo SDS‡	Periodo de producción forraje§					
		C1		A1		A2	
		AIC¶	MAD#	AIC	MAD	AIC	MAD
Buena	3	1148	18	1294	7	1258	9
	7	1145	18	1293	7	1245	8
	12	1142	18	1294	6	1247	8
Intermedio	3	1148	22	1244	10	1227	11
	7	1145	20	1234	10	1216	10
	12	1142	25	1230	9	1217	9
Pobre	3	1054	21	1350	28	1326	17
	7	1080	24	1336	26	1315	17
	12	1062	22	1341	26	1323	17

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2.

¶ Criterio de información de Akaike; un valor inferior indica un mejor ajuste.

Desviación Absoluta Promedio entre el rendimiento observado y el predicho por el modelo, expresada como porcentaje de la biomasa promedio (%).

Los rendimientos predichos con la DP registrada a 3 SDS se muestra en la Tabla 3.12. En ambientes de buena calidad, el rendimiento excedió al de los ambientes intermedios en A1 y A2 en 40% y 33%, respectivamente. Por otro lado, los ambientes pobres mostraron una reducción de 3.500 kg MS ha⁻¹ en comparación con los intermedios.

Tabla 3.12. Rendimiento de *Trifolium pratense* L. puro (kg MS ha⁻¹) estimado para el primer corte (C1), el año 1 (A1) y año 2 (A2) en función de la densidad de plantas promedio registradas en el recuento temprano (3 semanas después de la siembra).

Ambiente†	Período de producción de forraje §					
	C1		A1		A2	
	Forraje kg MS ha ⁻¹	MAD# %	Forraje kg MS ha ⁻¹	MAD %	Forraje kg MS ha ⁻¹	MAD %
Bueno	3050	18	14674	7	13286	9
Intermedio	1982	22	10485	10	10026	11
Pobre	1106	21	6994	28	6437	17
Media	2046	20	10718	15	9916	12

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

§ C1, primer corte; A1, año 1; A2, año 2.

MAD, media de la desviación absoluta entre el rendimiento observado y el predicho (expresado como porcentaje del rendimiento promedio).

PASTURAS MEZCLAS BIENALES

A pesar de las diferencias estadísticas en la DP que se observaron entre los momentos de conteos de plántulas y también entre las densidades de siembra usadas, el ambiente fue el efecto que mostró una mayor contribución en la explicación de la variabilidad en productividad forrajera, tanto para la biomasa acumulada en A1 como en A2 (Tabla 3.13).

La relación funcional entre la DP de trébol rojo y el rendimiento total de las MB se ajustó con una regresión cuadrática para los tres momentos de conteo, donde además fue necesario incluir un efecto aleatorio de ambiente (predicho para cada ambiente mediante la metodología BLUP) (Tabla 3.14).

Tabla 3.13. Rendimiento de forraje (kg MS ha⁻¹) para el año 1 (A1) y año 2 (A2) en las pasturas bienales de *Trifolium pratense* L. (TP) con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB) en diferentes ambientes en función de la densidad de siembra de TP (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Tipo de mezcla	Ambiente†	Período de cosecha	Densidad de siembra (kg semilla ha ⁻¹)					
			2	4	6	8	10	12
MBC	COL 2012	A1	14034b	15716b	16119b	15178c	15633b	15653c
		A2	14536b	16564a	17595a	16467b	16451b	17167ab
	COL 2013	A1	6407g	8710gh	9773g	9412gh	9740f	10871g
		A2	13774b	15710b	15357b	15444c	16353b	16799b
	COL 2014	A1	15900a	16488a	17667a	18624a	18831a	17762a
		A2	6916g	7840i	8775h	9090hi	10180f	11873f
	FL 2013	A1	7947f	9207fg	9946g	10311f	9344f	9889hij
		A2	6911g	7987hi	8069h	8570i	8041g	9721ij
	FL 2014	A1	12005c	12200c	12477c	12999d	14084c	14511d
		A2	5061h	6193j	6742i	5932j	6798h	7737k
	SJ 2012	A1	9467e	9792ef	10188fg	9955fg	10159f	9502j
		A2	10144d	9916ef	11264de	11161e	12046de	10211ghij
	SJ 2013	A1	6372g	8232hi	9966g	9383gh	10092f	10012ghij
		A2	10247d	10478de	10899ef	10431ef	11224e	10676gh
	SJ 2014	A1	9588de	11204d	11802cd	12715d	12368d	12918e
		A2	8957e	10443e	9672g	9762fgh	9708f	10541ghi

† Generado por la combinación de sitio (Colonia, Florida y San José) y año de siembra (2012, 2013 y 2014).

Por ambiente y edad de pastura (por fila), letras diferentes indican rendimientos significativamente diferentes ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.13.1. Rendimiento de forraje (kg MS ha⁻¹) para el año 1 (A1) y año 2 (A2) en las pasturas bienales de *Trifolium pratense* L. (TP) con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB) en diferentes ambientes en función de la densidad de siembra de TP (kg semilla ha⁻¹). Continuación.

Tipo de mezcla	Ambiente†	Período de cosecha	Densidad de siembra (kg semilla ha ⁻¹)					
			2	4	6	8	10	12
MBB	COL 2012	A1	13412d	15769b	14828c	18209a	15366bc	15512bc
		A2	11584d	13358bc	13770b	12775c	14855a	13488bc
	COL 2013	A1	5983e	7137d	9484c	10097b	11727a	10395b
		A2	11234e	13837d	14372c	15069b	16379a	14688bc
	COL 2014	A1	14386d	17385b	17037b	15923c	18852a	17213b
		A2	5460d	6932c	6467c	7688b	8524a	8212ab
	FL 2013	A1	8798d	10296c	9865c	10448c	11142b	12128a
		A2	6527d	7929b	8164b	7779b	7241c	8488a
	FL 2014	A1	7011d	8702c	9563b	10039b	11279a	10732a
		A2	4786c	4315d	5680b	6240a	6388a	6396a
	SJ 2012	A1	8622d	9388c	11076b	11656ab	12149a	11305b
		A2	9928d	11381bc	12202ab	11514bc	12399a	10955c
	SJ 2013	A1	6481d	8924c	8651c	10166b	10398ab	10779a
		A2	10104c	10976b	10403bc	12396a	12152a	11893a
	SJ 2014	A1	9030d	10356c	11250b	13268a	12586a	12677a
		A2	7966c	9550ab	9044b	9407ab	9573ab	9853a

† Generado por la combinación de sitio (Colonia, Florida y San José) y año de siembra (2012, 2013 y 2014).

Por ambiente y edad de pastura (por fila), letras diferentes indican rendimientos significativamente diferentes ($\alpha=0,05$).

Tabla 3.14. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de pasturas mezclas bienales que incluyen *Trifolium pratense* L. (TP) con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB) en función del recuento de plantas de TP durante la implantación en diferentes de ambientes.

Tipo de mezcla	Período de producción de forraje †	Momento de conteo SDS‡	Coeficientes de Regresión§			Calidad Ambiental¶		
			β_0	β_1	β_2	Bueno	Intermedio	Pobre
						kg MS ha ⁻¹		
MBC	A1	3	10466	11.46	-0.01	4254	-338	-2498
		7	10229	14.83	-0.02	4471	-402	-2578
		12	10142	16.93	-0.03	4636	-569	-2522
	A2	3	9670	9.53	-0.01	5045	-471	-2892
		7	9339	15.02	-0.03	5171	-599	-2848
		12	9163	18.18	-0.03	5196	-648	-2817
MBB	A1	3	8414	31.46	-0.05	4116	-726	-2018
		7	8410	30.96	-0.05	4173	-826	-1956
		12	8490	32.17	-0.05	4404	-965	-1971
	A2	3	8175	17.96	-0.03	3661	608	-3049
		7	7911	22.06	-0.04	3836	501	-3058
		12	7911	24.4	-0.05	3794	432	-2961

† A1, año 1; A2, año 2.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ β_0 , ordenada al origen expresada como kg MS ha⁻¹; β_1 , el coeficiente que relaciona el aumento en el número de plantas con el rendimiento de forraje, expresado como kg MS ha⁻¹; β_2 , coeficiente de regresión para el término cuadrático.

¶ Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

El análisis comparativo de los criterios de información entre los modelos ajustados para los diferentes momentos de conteos (3, 7 y 12 SDS) permitió identificar el mejor momento para el monitoreo de la implantación en cada MB (Tabla 3.15). Para la mezcla MBC, los conteos realizados a las 12 SDS mostraron los valores más bajos de AIC (mejor ajuste del rendimiento), independientemente de la calidad del ambiente y el período de evaluación. Para la MBB, los valores de AIC, si bien difieren según la calidad del ambiente y el período de evaluación, sugieren buenos ajustes. Se observó que aún desde el recuento temprano de plántulas (3 SDS) se pueden obtener buenas predicciones del rendimiento tanto en A1 como en A2. Si bien en la MBC, los modelos de mejor ajuste fueron aquellos basados en la DP a las 12 SDS, los MAD fueron similares para modelos basados en DP determinada en diferentes momentos desde la siembra.

Tabla 3.15. Criterios de ajuste para la estimación del rendimiento en función de la densidad de plantas establecidas en diferentes momentos de conteo y calidades del ambiente para dos mezclas bienales de *Trifolium pratense* L. con la compuesta *Cichorium intybus* L. (MBC) o la gramínea *Bromus catharticus* Vahl. (MBB) como especies acompañantes.

Tipo de mezcla	Calidad ambiental †	Momento de conteo SDS‡	Período de evaluación de forraje§			
			A1		A2	
			AIC¶	MAD#	AIC	MAD
MBC	Bueno	3	839	9	842	5
		7	852	8	857	5
		12	814	8	820	5
	Intermedio	3	1237	12	1197	4
		7	1235	12	1196	5
		12	1235	13	1194	5
	Pobre	3	1223	4	1247	13
		7	1220	4	1246	12
		12	1214	4	1244	14
MBB	Bueno	3	870	5	832	5
		7	874	5	826	5
		12	872	6	835	6
	Intermedio	3	1242	6	1251	12
		7	1235	7	1250	11
		12	1245	8	1247	11
	Pobre	3	1236	2	1233	13
		7	1236	1	1229	13
		12	1239	2	1232	14

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

§ A1, año 1; A2, año 2.

¶ Criterio de información de Akaike; un valor inferior indica un mejor ajuste.

Desviación Absoluta Promedio entre el rendimiento observado y el predicho por el modelo, expresada como porcentaje de la biomasa promedio (%).

PASTURAS MEZCLA DE CICLO LARGO

El rendimiento de ALFP y de las ML para A1, A2 y A3 se relacionaron positivamente con la DP de alfalfa durante el establecimiento. La relación fue estadísticamente significativa ($p < 0,0001$), independientemente del momento en que se realizó el conteo de plántulas de alfalfa. El rendimiento anual fue diferente entre ambientes, tanto para ALFP como para las ML (Tabla 3.16); la alfalfa siempre rindió más en ALFP que en MLD y MLF. El rendimiento de alfalfa en MLD fue similar o mayor al registrado en la MLF. Todas las pasturas alcanzaron el mayor rendimiento en A2, independiente del ambiente.

Tabla 3.16. Rendimiento anual de *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y en mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) para el año 1, año 2 y año 3 de producción después de la siembra (A1, A2 y A3, respectivamente).

Año	Tipo de Pastura	Período de evaluación de forraje§		
		A1	A2	A3
		kg MS ha ⁻¹		
2012	ALFP	12385a*	16625a	9342d
	MLD	9148c	16436a	9142d
	MLF	10255b	14493c	9459d
2013	ALFP	4166g	9964f	12973a
	MLD	5121f	11564e	8981d
	MLF	6137e	14382cd	8150e
2014	ALFP	8041d	15584b	8979d
	MLD	12855a	13627d	11802b
	MLF	12583a	14927bc	11030c

§ A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

* Por columna y año, diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas en rendimiento de forraje ($p < 0,05$).

Tabla 3.17. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de forraje (kg MS ha⁻¹) de tres tipos de pasturas: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) en función de la densidad de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes. Continuación.

Período de producción de forraje †	Tipo de Pastura	Momento de conteo SDS‡	Coeficientes de Regresión§			Calidad Ambiental¶		
			β_0	β_1	β_2	Bueno	Intermedio	Pobre
A1	ALFP	3	5612	15,40	-0,01	4598	-782	-3816
		7	5847	10,25		3918	-269	-3649
		12	5659	11,55	-0,01	3561	-296	-3265
	MLD	3	7548	10,45	-0,013	3643	179	-3822
		7	7730	6,12	-0,004	3783	-85	-3698
		12	7680	7,85	-0,005	3636	66	-3702
	MLF	3	8070	6,07		2912	1090	-4002
		7	7498	8,92	-0,01	3164	668	-3832
		12	8185	16,06	-0,02	1756	-90	-1665
A2	ALFP	3	11403	16,05	-0,01	2871	837	-3708
		7	10974	17,95	-0,02	2162	1323	-3485
		12	10497	23,44	-0,03	2018	1226	-3243
	MLD	3	11381	17,09	-0,01	2402	-445	-1957
		7	11461	10,66	-0,01	1835	-205	-1630
		12	11628	12,36	-0,05	2169	-441	-1728

† A1, año 1; A2, año 2.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ β_0 , ordenada al origen expresada como kg MS ha⁻¹; β_1 , el coeficiente que relaciona el aumento en el número de plantas con el rendimiento de forraje, expresado como kg MS ha⁻¹; β_2 , coeficiente de regresión para el término cuadrático.

¶ Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

Tabla 3.17.1. Coeficientes de regresión utilizados para predecir el rendimiento de forraje (kg MS ha⁻¹) de tres tipos de pasturas: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) en función de la densidad de plantas durante la implantación del cultivo bajo diferentes calidades de ambientes. Continuación.

Período de producción de forraje †	Tipo de Pastura	Momento de conteo SDS‡	Coeficientes de Regresión§			Calidad Ambiental¶		
			β_0	β_1	β_2	Bueno	Intermedio	Pobre
A2	MLF	3	11704	14,88	-0,01	427	308	-735
		7	11232	14,53	-0,005	407	33	-441
		12	11728	32,33	-0,03	2201	-1082	-1119
A3	ALFP	3	9045	9,44	-0,01	2506	-859	-1646
		7	8881	9,84	-0,01	2632	-1178	-1454
		12	8882	10,29	-0,01	2709	-1216	-1493
	MLD	3	8338	13,32	-0,021	1471	-623	-848
		7	8090	11,98	-0,015	1532	-760	-771
		12	8312	12,8	-0,019	1433	-690	-743
	MLF	3	7416	13,24	-0,02	1513	374	-1886
		7	7080	12,61	-0,01	1667	54	-1720
		12	7642	22,6	-0,04	76	36	-112

† A2, año 2; A3, año 3.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ β_0 , ordenada al origen expresada como kg MS ha⁻¹; β_1 , el coeficiente que relaciona el aumento en el número de plantas con el rendimiento de forraje, expresado como kg MS ha⁻¹; β_2 , coeficiente de regresión para el término cuadrático.

¶ Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

El rendimiento de alfalfa presentó una relación cuadrática con la DP durante el establecimiento (Tabla 3.17), excepto en A1 donde la relación fue lineal para ALFP y para MLF con DP determinadas de manera temprana o intermedia. La obtención de los BLUP de efectos ambiente permitió clasificar los ambientes como buenos, intermedios o pobre en relación a su promedio de rendimiento. Debido a la variabilidad ambiental, al modelo promedio poblacional ajustado para cada uno de los periodos de producción de forraje se le adicionó el BLUP del efecto de ambiente, el que sumado a la ordenada al origen estimada para cada modelo (β_0) produce un desplazamiento de los valores predichos por el modelo hacia valores mayores o menores a la media de rendimiento según el ambiente de implantación se clasifique como bueno o pobre, respectivamente.

La identificación del momento de conteo que logra la mejor predicción de rendimiento para cada ambiente se determinó ajustando modelos con conteos de plántulas realizados en distintos momentos del establecimiento de la pastura y seleccionando el mejor modelo mediante el criterio de ajuste de AIC y contemplando el error de predicción (MAD) expresado como porcentaje del valor promedio de rendimiento (Tabla 3.18). Los valores más bajos de AIC en las predicciones de rendimiento se registraron con conteos de plántulas realizados a las 3 SDS para ALFP en ambientes buenos, con conteos de plántulas realizados a las 7 SDS en ambientes de calidad intermedia y con evaluaciones de DP realizadas a las 12 SDS en ambientes pobres. En cambio, para ambas ML los conteos más tardíos (12 SDS) produjeron las mejores predicciones de rendimiento, incluso en ambientes buenos. Sin embargo, cuando se compara el valor de error de predicción porcentual, las diferencias entre momentos de conteos fueron poco significativas en ambos tipos de pastura.

Los modelos ajustados para la relación DP y rendimiento fueron sometidos a procesos de validación cruzada para cada uno de los ambientes (Tabla 3.19). Independientemente de la calidad ambiental, el rendimiento en A2 siempre fue mayor que en A1 y A3 para todas las pasturas. Las diferencias entre ambiente bueno y pobre se magnificaron en A1. Los valores de errores de predicción de rendimiento en función de DP durante el establecimiento condicionado al ambiente fueron inferiores al 20% en todas las pasturas, excepto en los ambientes más pobres o de menor rendimiento.

Tabla 3.18. Criterios de ajuste para predecir el rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas de *Medicago sativa* L. durante el establecimiento, momento de conteo y calidad del ambiente por tipo de pastura: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF). Continuación.

Tipo de mezcla	Calidad de ambiente†	Momento de conteo SDS ‡	Período de producción de forraje§					
			A1		A2		A3	
			AIC¶	MAD (%) #	AIC	MAD (%)	AIC	MAD (%)
ALFP	Bueno	3	339	12	353	9	333	6
		7	340	10	355	9	334	6
		12	341	10	356	8	333	6
	Intermedio	3	343	18	359	9	334	6
		7	341	16	358	9	335	6
		12	346	15	360	9	337	6
	Pobre	3	298	35	334	14	335	10
		7	298	30	337	14	334	10
		12	288	28	331	14	335	9
MLD	Bueno	3	340	10	341	7	325	4
		7	339	10	339	6	324	5
		12	337	10	335	7	321	4
	Intermedio	3	320	14	365	8	335	5
		7	320	14	364	7	355	6
		12	316	14	363	8	333	5
	Pobre	3	310	25	342	9	356	6
		7	313	26	341	8	335	7
		12	312	25	342	10	357	6

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

¶ Criterio de información de Akaike; un valor inferior indica un mejor ajuste.

Desviación Absoluta Promedio entre el rendimiento observado y el predicho por el modelo, expresada como porcentaje de la biomasa promedio (%).

Tabla 3.18.1. Criterios de ajuste para predecir el rendimiento de forraje en función de la densidad de plantas de *Medicago sativa* L. durante el establecimiento, momento de conteo y calidad del ambiente por tipo de pastura: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF). Continuación.

Tipo de mezcla	Calidad de ambiente†	Momento de conteo SDS ‡	Período de producción de forraje§					
			A1		A2		A3	
			AIC¶	MAD (%) #	AIC	MAD (%)	AIC	MAD (%)
MLF	Bueno	3	353	11	336	4	330	5
		7	352	11	353	4	330	5
		12	350	6	341	5	328	5
	Intermedio	3	318	14	354	5	323	5
		7	313	13	336	4	321	5
		12	311	8	350	6	359	5
	Pobre	3	297	24	324	5	350	6
		7	299	22	330	5	350	6
		12	312	13	336	6	319	6

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

‡ SDS, semanas después de la siembra.

§ A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

¶ Criterio de información de Akaike; un valor inferior indica un mejor ajuste.

Desviación Absoluta Promedio entre el rendimiento observado y el predicho por el modelo, expresada como porcentaje de la biomasa promedio (%).

Tabla 3.19. Rendimiento de forraje anual predicho (kg MS ha⁻¹) y errores de predicción (MAD) en función de la densidad de plantas de *Medicago sativa* L. registradas a las 3 semanas después de la siembra para diferentes calidades ambientales por tipo de pasturas: *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF).

Tipo de mezcla	Calidad ambiental †	Período de producción de forrajes§					
		A1		A2		A3	
		Forraje (kg MS ha ⁻¹)	MAD# (%)	Forraje (kg MS ha ⁻¹)	MAD (%)	Forraje (kg MS ha ⁻¹)	MAD (%)
ALFP	Bueno	12654	12	16966	9	12983	6
	Intermedio	7274	18	14933	9	9618	6
	Pobre	4241	35	10388	14	8831	10
MLD	Bueno	12676	10	16302	7	11429	4
	Intermedio	9212	14	13455	8	9334	5
	Pobre	5212	25	11943	9	9109	6
MLF	Bueno	12185	11	14462	4	10697	5
	Intermedio	10362	14	14342	5	9558	5
	Pobre	5271	24	13299	5	7298	6

† Clasificación realizada en función de la media de los BLUPs de efectos de ambientes.

§ A1, año 1; A2, año 2; A3, año 3.

#MAD, media de la desviación absoluta entre el rendimiento observado y el predicho (expresado como porcentaje del rendimiento promedio).

PROBABILIDADES DE SUPERAR UMBRALES DE RENDIMIENTOS SEGÚN AMBIENTE Y DENSIDAD DE PLANTAS DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE LA PASTURA

MONOFÍTICA DE ALFALFA

Considerando las magnitudes de las diferencias entre la capacidad predictiva de los modelos (Ecuación 2) basados en la DP registrada para cada momento de conteo y en efectos de ambiente, en ALFP se utilizó el modelo basado en conteos de plántulas realizadas a las 3 SDS para simular valores de rendimiento de forraje para distintas DP. Se simularon 1.000 valores de rendimiento con cada modelo y se calculó las probabilidades de que el rendimiento exceda un umbral específico (probabilidad estimada como frecuencia de veces que se cumple la condición). Los umbrales fueron definidos en función de valores de referencia a nivel nacional para pasturas de alfalfa.

La probabilidad de obtener ALFP con rendimientos de forraje superiores a 2.000 kg MS ha⁻¹ en C1 (Figura 3.5A) fue inferior a 0,4, independientemente de la DP y la calidad ambiental. La probabilidad de obtener rendimientos superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹ en A1, A2 o A3 fueron aumentando en función del aumento de la DP durante la implantación y variaron según la calidad ambiental (Figura 3.5B, 3.5C, 3.5C). En ambientes buenos, esta probabilidad fue superior a 0,8 con 300 plantas m⁻². Sin embargo, éstas no superaron 0,5 y 0,2 en ambientes intermedios y pobres, respectivamente, incluso cuando se alcanzó una DP alta (466 plantas m⁻² a las 3 SDS). En el A2 en ambientes buenos, la probabilidad de superar 10.000 kg MS ha⁻¹ fue alta, independientemente de la DP logradas. En ambientes intermedios, la probabilidad de superar 10.000 kg MS ha⁻¹ fue superior a 0,8 con 64 plantas m⁻²; mientras que, en ambientes pobres, bajo ninguna de las DP logradas se alcanza a producir forraje por encima de 10.000 kg MS ha⁻¹.

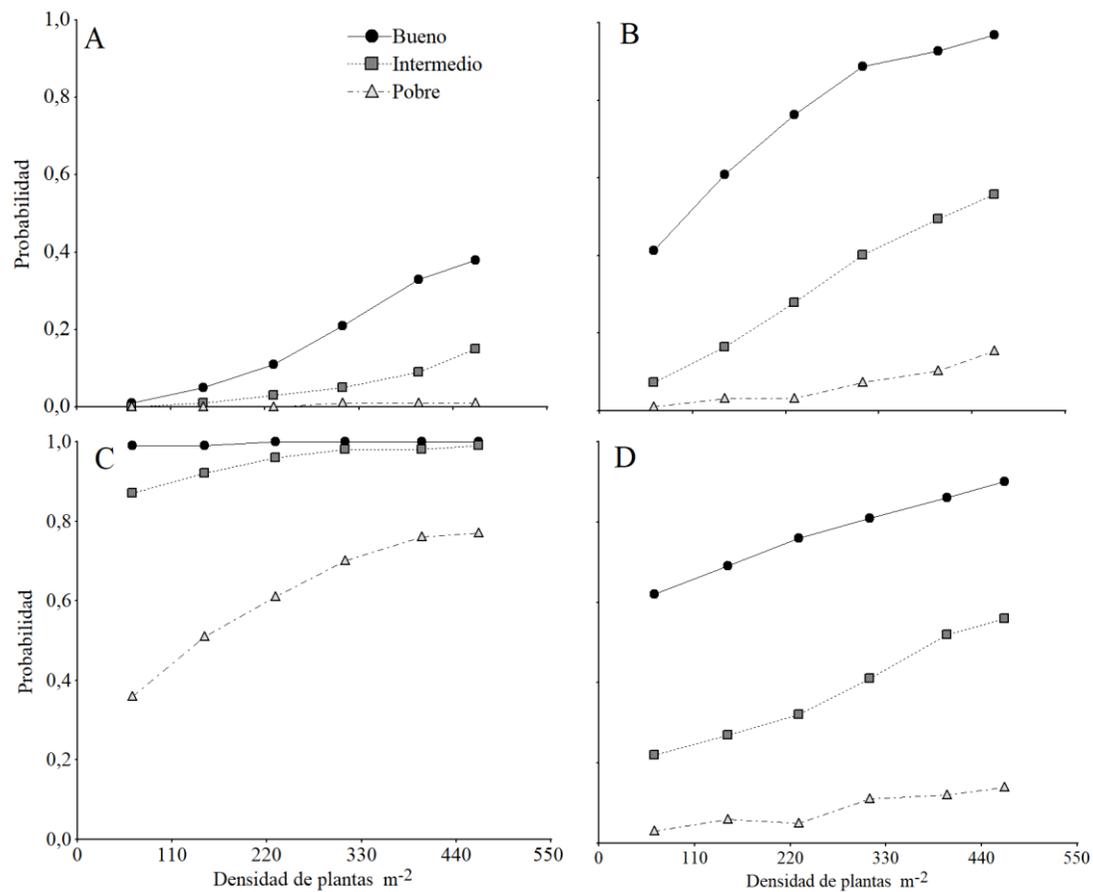


Figura 3.5. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 2.000 kg MS ha⁻¹ en cultivos de *Medicago sativa* L. pura en el primer corte (A) y 10.000 kg MS ha⁻¹ en el año 1 (B), año 2 (C) y año 3 (D) en función de la densidad de plantas por m² registradas a las 3 semanas después de la siembra para diferentes calidades de ambientes (circulo: bueno; cuadrado: intermedio; triangulo: pobre).

MONOFÍTICA DE TRÉBOL ROJO

Sobre la base de los modelos de predicción de rendimientos ajustados para pasturas pura de trébol rojo, se usó la DP a las 3 SDS y los valores de BLUP de efectos ambientales para predecir rendimientos según calidades de implantación y de ambiente. Se calcularon las probabilidades esperadas de superar rendimientos promedios a nivel nacional (Figura 3.6). La probabilidad de superar rendimientos de 2.000 kg MS ha⁻¹ en C1 fue mayor al 0,75 en ambientes de buena calidad, independientemente de la DP (Figura 3.6A). Sin embargo, en ambientes intermedios fue necesario lograr al menos 400 plantas m⁻² a las 3 SDS para alcanzar esos valores de probabilidad, y más de 466 plantas m⁻² en ambientes pobres. El efecto de ambiente fue mayor que el efecto de la DP para la determinación de la probabilidad de superar rendimientos de 10.000 kg MS ha⁻¹, tanto para A1 como para A2 (Figura 3.6B y 3.6C). En ambientes buenos, las probabilidades fueron superiores a 0,80 con DP tan baja como 64 plantas m⁻²; sin embargo, en ambientes más restrictivos, con la misma DP las probabilidades fueron inferiores a 0,50 y 0,20 en intermedios y pobres, respectivamente.

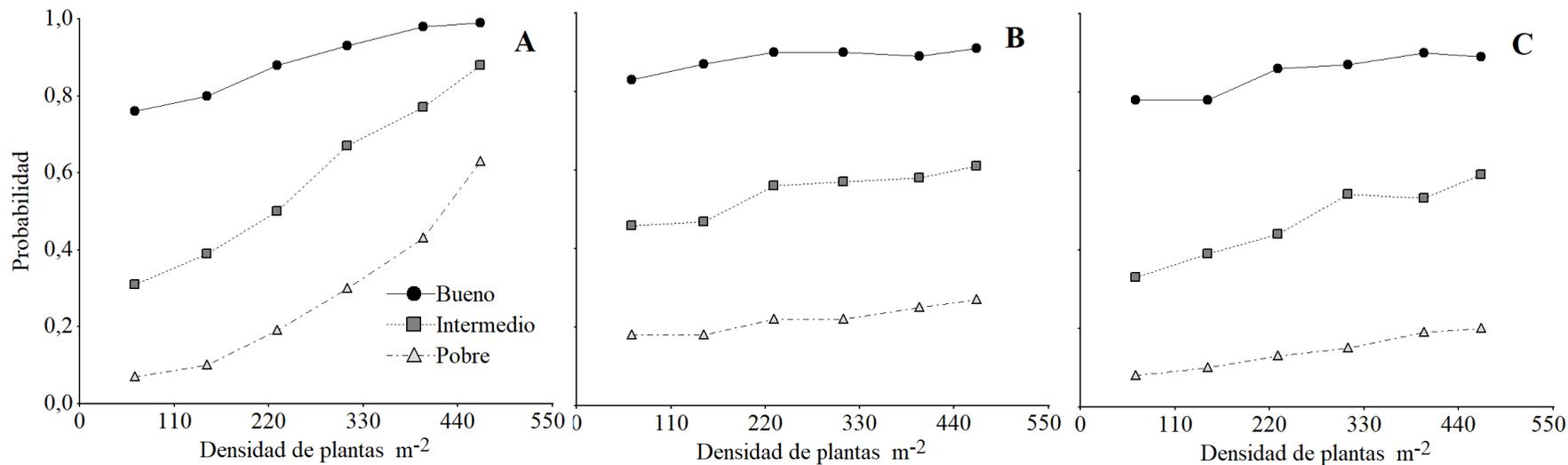


Figura 3.6. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 2.000 kg MS ha⁻¹ en cultivos de *Trifolium pratense* L. puro en el primer corte (A) y 10.000 kg MS ha⁻¹ en el año 1 (B) y año 2 (C) en función de la densidad de plantas por m² registradas a las 3 semanas después de la siembra para tres calidades ambientes (bueno: círculo; intermedio: cuadrado; pobre: triángulo).

PASTURAS MEZCLAS BIENALES

Se utilizó la DP lograda a las 3 SDS y los promedios de BLUP de efectos ambientales para calcular probabilidades de exceder umbrales de rendimiento en las distintas mezclas bienales. Ambas MB superan el rendimiento de 10.000 kg MS ha⁻¹ en ambientes de buena calidad, independientemente de la DP de trébol rojo, tanto en A1 como en A2. Por el contrario, las estimaciones de probabilidad difieren entre las MB en A1 para ambientes de calidad intermedia. Cuando la DP de trébol fue baja (50 plantas m⁻²), la probabilidad de que MBC supere rendimientos de 10.000 kg MS ha⁻¹ fue de 0,7 (Figura 3.7A), mientras que en MBB esa probabilidad fue menor y cercana a 0,2 (Figura 3.7B). La diferencia entre MB disminuyó cuando la DP de la leguminosa fue superior a 200 plantas m⁻², alcanzando valores de probabilidad superiores a 0,9 de exceder rendimientos de 10.000 kg MS ha⁻¹. En ambientes de calidad intermedia, no se observaron diferencias entre MB en A2, donde se alcanzaron las probabilidades máximas con más de 250 plantas m⁻². En ambientes pobres, ambas MB alcanzarían rendimientos mayores a 10.000 kg MS ha⁻¹ sólo con altos conteos de plántulas de trébol (más de 200 plantas m⁻² a las 3 SDS).

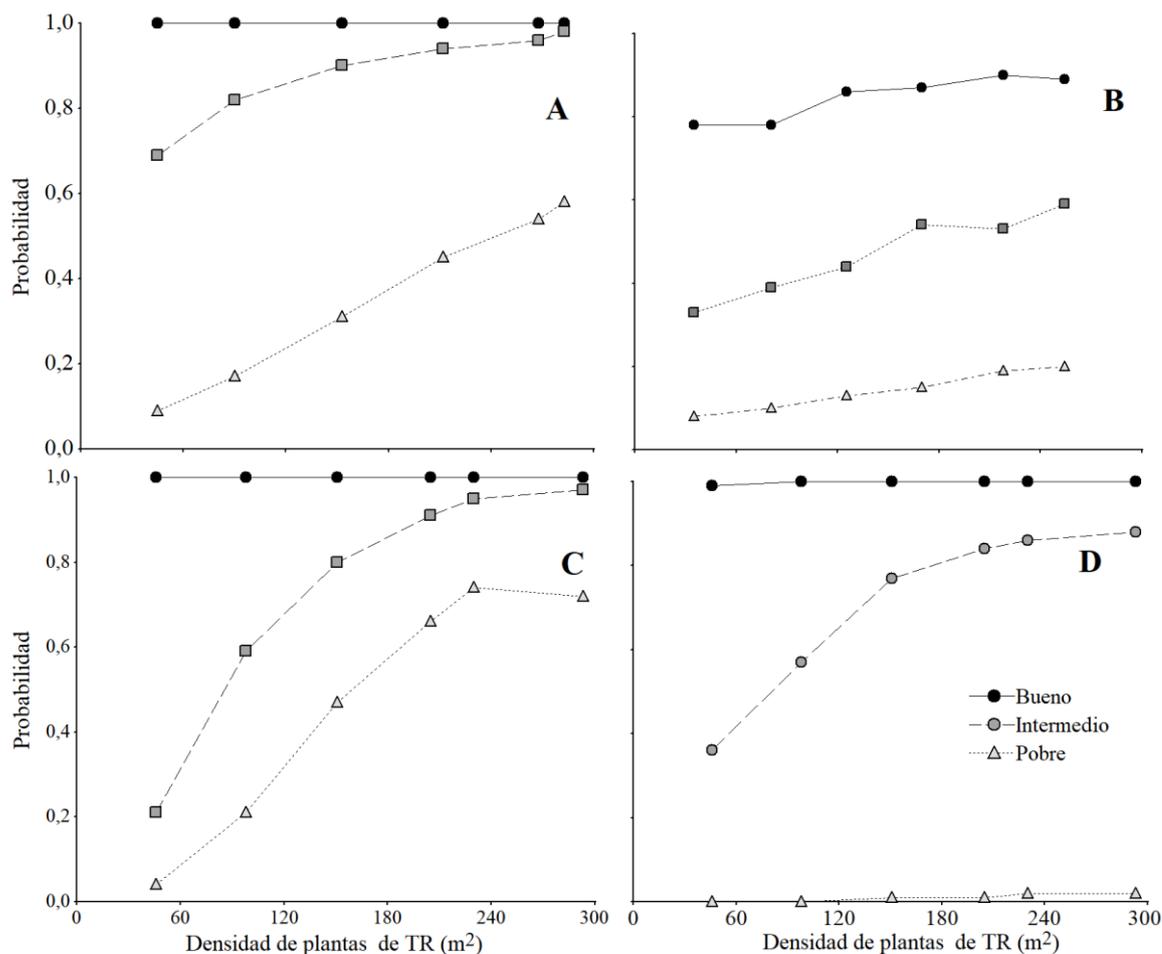


Figura 3.7. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹ en función de la densidad de plantas por m² de *Trifolium pratense* L. (TR) registradas a las tres semanas después de la siembra para la mezcla con *Cichorium intibus* L. en el año 1 (A) y año 2 (C) y con *Bromus catharticus* Vahl. en el año 1 (B) y año 2 (D) para tres calidades de ambientes (bueno, intermedio y pobre).

PASTURAS MEZCLAS DE PERENNES DE CICLO LARGO

A partir de los modelos de predicción de rendimientos ajustados y la DP promedio general para todos los ambientes a las 3 SDS se calcularon las probabilidades de superar rendimientos de forraje para A1, A2 y A3 de 10.000 kg MS ha⁻¹ (Figura 3.8) para las tres pasturas de especies perennes de ciclo largo. El efecto ambiental fue incluido en los modelos que relacionan rendimiento con DP para condicionar los resultados a las diferentes calidades de ambiente. En ambientes buenos, tanto la ALFP como las ML superaron en A1, independientemente de la DP, los 10.000 kg MS ha⁻¹. Sin embargo, en

ambientes intermedios, solo MLF superó los 10.000 kg MS ha⁻¹ con DP mayores a 300 plantas m⁻². Las ML alcanzaron su mayor rendimiento en el A2. MLF no mostró diferencias en rendimiento de forraje independientemente del ambiente y de la DP en A2. ALFP superó 10.000 kg MS ha⁻¹ para ambientes buenos, mientras que el rendimiento de las ML no superó 10.000 kg MS ha⁻¹.

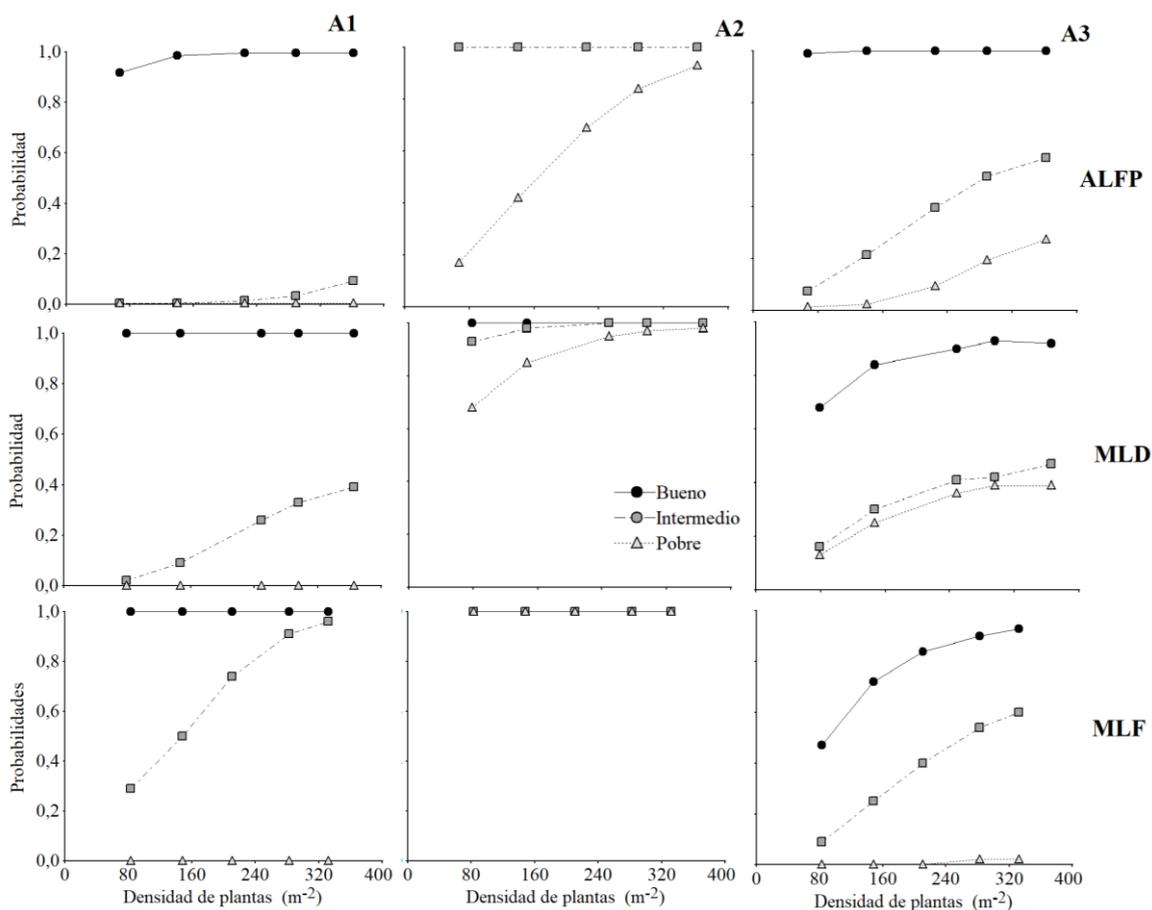


Figura 3.8. Probabilidad estimada de alcanzar rendimientos de forraje superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹ en función del número de plantas por m² de *Medicago sativa* L. registradas a las tres semanas después de la siembra para *Medicago sativa* L. pura (ALFP) y las mezclas con *Dactylis glomerata* L. (MLD) o *Festuca arundinacea* Schreb. (MLF) en el año 1 (A1), año 2 (A2) y año 3 (A3) para tres calidades de ambientes (bueno, intermedio y pobre).

DISCUSIÓN

En este estudio se evalúa la capacidad predictiva del recuento de plantas de leguminosa, realizado en distintos momentos de la implantación de una pastura pura de alfalfa o trébol rojo o de una mezcla que contenga estas leguminosas con otras especies acompañantes. Aunque numerosos factores abióticos y bióticos pueden influir en la productividad de las pasturas, los resultados muestran que los modelos ajustados en función de los recuentos de plántulas (DP) para las distintas calidades de ambientes, predijeron con bajo error de predicción, los rendimientos de forraje principalmente el acumulado en el primer año de vida de la pastura. El amplio rango de densidades de siembra usado en los ensayos, generaron distintos tamaños de población de plántulas, simulando diferentes condiciones de implantación que pueden ocurrir en el monitoreo de las pasturas.

IMPLANTACIÓN

La interacción entre densidad de siembra, momento de conteo y ambiente donde se llevó a cabo el ensayo fue estadísticamente significativa; es decir que la diferencia en conteos de plántulas en los distintos momentos de recuento no fueron las mismas entre ambientes. El efecto de ambiente resultó importante para explicar la variabilidad en los rendimientos e incluso contribuyó más que la DP en la determinación de forraje. Consecuentemente, los modelos ajustados para predecir rendimiento en función de la DP fueron distintos para aquellos ambientes de diferente nivel productivo. No obstante, condicionado a los efectos aleatorios de ambiente, la DP resultó informativa respecto al nivel de productividad de la pastura. La estrategia de vida de las distintas especies forrajera define la importancia relativa de cada una de las etapas que conforman sus ciclos de vida, del mismo modo los factores bióticos y abióticos que regulan esas etapas. La DP de una

población depende de la combinación adecuada, en tiempo y espacio, de la presencia de semillas que germinen, y de las condiciones para su desarrollo embrionario y crecimiento (Harper, 1977). Cuando esta combinación de factores no ocurre durante el establecimiento de la pastura, es común que se produzcan reducciones en la DP que podrían estar asociadas con la falta de sitios seguros para la semilla en el suelo (Fowler, 1986; Keddy y Constabel, 1986). Tales sitios proporcionan el estímulo necesario para romper la latencia, la germinación y la ausencia de efectos de competidores, depredadores, patógenos y sustancias tóxicas para la semilla. Las reducciones de DP pueden conducir a importantes mermas en la productividad de la pastura. Pero el efecto de la DP de leguminosas sobre el rendimiento puede ser diferente no solo entre ambientes de diferentes niveles de producción, sino entre diferentes tipos de pasturas. Las pasturas monofíticas de leguminosas podrían ser más variables o susceptibles a las pérdidas de plántulas que las pasturas mezclas.

En las pasturas puras de alfalfa, los conteos de plantas durante la implantación mostraron que, con una alta densidad de siembra, la DP aumentó hasta 7 SDS y luego disminuyó (12 SDS). Esta reducción del tamaño población cuando existe DP alta ha sido reportada por otros autores (Palmer y Wynn-Williams, 1976; Douglas *et al.*, 1998; Sevilla *et al.*, 2002). La reducción de la DP a las 12 SDS observada en este trabajo fue consistente con los hallazgos reportados por Dolling *et al.* (2011) para un rango de densidades de siembra (1 a 8 kg semilla ha⁻¹) más estrecho que el utilizado en este estudio (6 a 14 kg semilla ha⁻¹). Esta dinámica de las plántulas emergentes conduce a inferir diferencias en los recuentos de plántulas que se realizan en diferentes momentos del establecimiento, y la necesidad de determinar momentos óptimos para el monitoreo de las pasturas. Los resultados de la tesis sugieren que conteos de plantas tan tempranos como aquellos realizados a las 3 SDS son suficientes para predecir niveles de productividad futura de la pastura.

En la implantación de las pasturas puras de trébol rojo (TPP), en las densidades de siembra bajas (3 a 9 kg semilla ha⁻¹) la DP fue creciendo hasta las 7 SDS, momento a partir del cual se estabilizaron los conteos. En las densidades intermedias o altas, la DP disminuyó luego de las 7 SDS. No obstante, los errores de predicción de los modelos ajustados para predecir rendimiento a partir de recuento de plántulas a distintas SDS también indicaron que el recuento temprano (3 SDS) resulta suficiente para producir

niveles de rendimiento. Tanto en las pasturas puras de alfalfa como de trébol rojo, resulta crítico para los sistemas lechero-basados en pastoreo predecir productividad o adelantar un rendimiento esperado. Las predicciones tempranas de forraje permiten tomar decisiones de manejo que dependen de la disponibilidad de forraje. La relación entre la DP de leguminosas y el rendimiento constituye una herramienta de predicción para el manejo de las pasturas en forma temprana. Blaser *et al.* (2006) demostraron que la DP en el establecimiento era proporcional a la densidad de siembra, comportamiento similar al que se obtuvo en esta tesis durante la implantación de pasturas puras. En TPP la reducción de DP entre 7 y 12 SDS fue mayor en las densidades de siembra más alta que para todas las combinaciones de sitio y año (ambientes). La disminución en la DP después de 7 SDS puede estar relacionada con la mortalidad de plántulas por competencia (Black, 1960). Teixeira *et al.* (2007) indicaron que la reducción de la DP en esta etapa puede ser parcial o totalmente compensada por el aumento en algunos componentes del rendimiento; en particular, densidades de tallos inferiores a 200 tallos m⁻² reducen significativamente la producción de forraje (Cummings *et al.*, 1999).

La determinación del comportamiento del trébol rojo en pasturas puras o acompañado con otras especies motivó la inclusión de ensayos con dos pasturas mezclas de ciclo corto que incluyen al trébol rojo como leguminosa. Para ello, al igual que en las pasturas de leguminosas puras, se generó un rango amplio de plántulas utilizando seis densidades de siembra diferentes para las distintas mezclas bienales. Durante la implantación, las plántulas de trébol rojo se contaron a las 3, 7 y 12 SDS. Independientemente de cuál fue el acompañante y del momento de conteo, la DP de trébol rojo no varió entre SDS cuando se usaron bajas densidades de siembras (2 a 6 kg semilla ha⁻¹ de TP). En contraste, se observó una reducción en el DP de trébol rojo a las 12 SDS cuando se utilizaron altas densidades de siembra, como se observó en las pasturas puras.

Sanderson *et al.* (2000), quienes reportaron DP semanal hasta las 7 SDS en pasturas de mezcla de ciclo corto con trébol rojo, y Hayes *et al.* (2017), quienes contaron las plántulas de trébol rojo a las 12 SDS en una mezcla con BC, no determinaron un momento óptimo para el monitoreo de la implantación de esta leguminosa en mezcla. Se han reportado dinámicas similares en la DP con altas densidades de siembra en pasturas puras (Palmer y Wynn-Williams, 1976; Douglas *et al.*, 1998; Sevilla *et al.*, 2002; Zarza *et al.*, 2018). Blaser *et al.* (2006) observaron un comportamiento similar en la DP de trébol rojo

sembrado en mezclas con trigo y triticale. Con la reducción de la DP, Teixeira *et al.* (2007) registraron una compensación en los componentes del rendimiento debido al aumento en la densidad de tallos. La inclusión de especies de la familia *Compositae*, tales como CI, o gramíneas como BC, no afectó la dinámica de la DP de trébol rojo en el rango de densidades de siembra analizadas, lo que indica que el inicio de las relaciones competitivas en esta leguminosa ocurre al mismo tiempo en las especies acompañantes.

Este estudio mostró que el comportamiento de la DP de alfalfa durante la implantación en las mezclas con especies perennes de ciclo largo fue similar a ALFP a las 3 y 7 SDS, y que ambas ML alcanzaron una DP menor a la ALFP a las 12 SDS. La similitud de las pendientes de las regresiones (Figura 3.4) en MLD y MLF permite concluir que estas gramíneas no generaron cambios en la DP de alfalfa en forma temprana (hasta 7 SDS). Posteriormente, se establecieron relaciones de competencia en el surco en las ML que disminuyeron la DP de alfalfa en comparación con la ALFP. Este efecto de la competencia entre especies ha sido reportado en pasturas mixtas, donde el factor luz reduce el crecimiento de las especies forrajeras cuando el agua disponible no es limitante (McGowan y Williams, 1973). El rápido desarrollo de la alfalfa debido al mayor tamaño de semilla con respecto a las gramíneas acompañantes pudo haber favorecido a esta especie en la competencia interespecífica inicial (hasta las 7 SDS). Varios estudios indican la ventaja inicial en tamaño de plántula de la alfalfa sobre especies de semilla más pequeñas (Dear *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2011; Swan *et al.*, 2014;), aunque la tasa de crecimiento relativo tiende a correlacionarse negativamente con el aumento del tamaño de la semilla.

PRODUCTIVIDAD

Los modelos de productividad de forraje desarrollados en esta tesis relacionaron el rendimiento con la DP durante el establecimiento incluyendo un efecto aleatorio de ambiente con el objetivo de incorporar la variabilidad ambiental observada en los rendimientos a través de los distintos ambientes pastoriles de Uruguay. Para ello, los ensayos se llevaron a cabo en nueve ambientes con diferencias en suelos y también en algunos casos correspondiente al mismo sitio con diferencias climáticas entre años. El

efecto ambiental se evaluó utilizando la metodología BLUP dentro del marco teórico de los modelos lineales mixtos (West *et al.*,2015). Este marco de trabajo ha sido usado para modelar calidad de sitio en estudios forestales (Carrero, *et al.*, 2008) y diferencias ambientales incluso en producciones de tipo animal (Piccardi *et al.*,2013). Aunque la inclusión del efecto ambiental aleatorio al modelo no se ha aplicado a las leguminosas forrajeras perennes, se ha implementado con éxito en otros modelos de producción para obtener estimaciones precisas del rendimiento vegetal (Silva *et al.*,2018; Zarza *et al.*, 2018). La inclusión de un efecto aleatorio de ambiente que relaciona la productividad con la DP en el establecimiento de la pastura permitió modelar la variabilidad entre ambientes y clasificar los ambientes de estudios en buenos, intermedios y pobres en función del rendimiento del forraje (Ecuación 2.2). Los BLUP de los efectos ambientales se agregaron a la ordenada al origen de los modelos predictivos para obtener ecuaciones de predicción diferentes para distintos tipos de ambientes (buenos, intermedios y pobres). Así las ecuaciones de los modelos ajustados ganan capacidad predictiva y pueden ser utilizadas para el monitoreo de nuevas pasturas en sistemas lecheros del Uruguay. El recuento durante el establecimiento, según el momento óptimo señalado para cada tipo de pastura, de las plantas de alfalfa o trébol rojo establecidas constituye el principal input del modelo lineal que predice rendimiento condicionada a la calidad ambiental del sitio y año donde se ha realizado la implantación. Cuando el sitio y las condiciones climáticas actuales y pronosticadas para el año en curso se consideran buenas o propicias para el desarrollo de estas leguminosas, entonces deberá usarse el modelo predictivo que incluye el efecto aleatorio de ambientes buenos. El modelo de predicción cambiará en ambientes intermedios o pobres. Las diferencias en los modelos a usar se refieren a niveles productivos promedios diferentes entre ambientes, pero en todos ellos la relación entre la DP y la productividad es lineal y estadísticamente significativa. Es decir que la DP constituye un buen indicador de productividad. Este indicador produce mejores predicciones de rendimientos en ambientes buenos que en ambientes pobres, independientemente del tipo de pasturas.

El sitio Florida (involucrado en los ensayos) presentó la mayor densidad aparente y la menor porosidad total. Sus propiedades de suelo fueron menos favorables para el crecimiento de alfalfa debido a la disponibilidad limitada de O₂ a nivel radicular (Striker y Colmer, 2017). Los efectos aleatorios de ambientes relacionados a este sitio fueron

relativamente bajos (desvíos menores a la media de rendimiento) y llevaron a clasificar los ambientes como de pobre calidad. Contrariamente, en los sitios Colonia y San José los efectos aleatorios de ambientes fueron positivos, excepto en aquellas situaciones donde la lluvia anual (Tabla 2.2), y particularmente la lluvia de primavera, excedieron los valores promedio históricos. La diferencia de rendimientos de leguminosas entre ambientes clasificados como buenos y como pobres fueron notorias durante la etapa experimental.

Varios modelos de producción de forraje se han ajustado para ALFP, aunque generalmente solo basados en variables climáticas (Selirio y Brown, 1979; Fick, 1984; Sharratt *et al.*, 1987; Quiroga *et al.*, 1992). Sin embargo, pocos modelos se han desarrollado considerando a la DP en la implantación como variable predictora del rendimiento de forraje (Shewmaker *et al.*, 2002; Min *et al.*, 2000). Los resultados obtenidos en esta tesis confirman la relación entre la DP y la producción de forraje de pasturas de alfalfa, ya sea en el C1 como en A1, A2 y A3. La DP se relacionó estadísticamente con el forraje, a través de un modelo polinomial de segundo orden, independientemente del momento en que se contaron las plantas. El coeficiente de regresión para el término cuadrático siempre fue negativo, lo que indica que los rendimientos de forraje aumentaron con la DP hasta un cierto valor o umbral a partir del cual se estabilizan. Con este tipo de relación curvilínea es posible identificar valores umbrales a partir de los cuales el rendimiento se estabiliza en algún valor independientemente de la DP. El presente estudio confirma el umbral identificado por Dolling *et al.* (2011) y Lamb *et al.* (2003), cercano a 200 plantas m⁻² para pasturas de alfalfa pura.

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la DP durante el establecimiento se puede utilizar como un buen indicador del rendimiento futuro de forraje en ALFP condicionado a la inclusión de efectos aleatorios de ambiente. Así, se logra una mayor precisión en la predicción del forraje en ambientes de productividad buena o intermedia que en aquellos pobres. El rendimiento en A2 fue la variable mejor predicha por los modelos para todos los ambientes. Este resultado probablemente se asocie con el tipo de cultivar de alfalfa incluido en los ensayos. ‘Estanzuela Chaná’ expresa todo su potencial productivo en A2 (INIA, 2017; Ayala *et al.*, 2010), cuando el cultivo está bien establecido; en años subsiguientes, el rendimiento puede disminuir debido a la pérdida de persistencia de este cultivar.

El momento apropiado para evaluar la DP en el establecimiento de pasturas puras de alfalfa no se ha discutido en la literatura, ya que la mayoría de las investigaciones se han centrado en un solo momento de conteo. Lamb *et al.* (2003) y Hycka (1983) evaluaron el establecimiento basándose en los recuentos tempranos (3 SDS), mientras que Soto y López (1986) lo hicieron en un momento intermedio (8 SDS). La DP reportada por Mattera *et al.* (2013) y Dolling *et al.* (2011) se realizaron a 18 y 25 SDS, respectivamente, más tardío que el presente estudio. Si bien en esta tesis los valores de AIC indicaron mejores ajustes del rendimiento cuando se incluyeron DP registradas en conteos a 12 SDS, la capacidad predictiva alcanzada con los conteos tardíos fue prácticamente similar a la alcanzada con datos de 3 SDS (diferencia del 1%). Esta relación sugiere que la DP a 3 SDS podría considerarse un buen predictor del rendimiento esperado de una pastura pura de alfalfa para A1 y, por lo tanto, es un recurso valioso para la toma de decisiones tempranas a nivel predial. Sin embargo, la calidad de la predicción dependerá de la calidad ambiental. Por lo tanto, la disponibilidad de información para el sitio como tipo de suelo, compactación, fertilidad, así como la precipitación en el año de siembra permitirá identificar cuál de los modelos ajustados deberá usarse para que las predicciones se ajusten a las condiciones ambientales locales. La predicción del rendimiento en C1 fue solo exitosa en buenos ambientes.

Los resultados sugieren que una densidad de siembra de 12 kg semilla ha⁻¹ podría ser apropiada para sembrar ALFP en Uruguay. El momento del recuento de plántulas evaluado en este estudio no demostró ser estadísticamente importante para mejorar la precisión de la predicción del rendimiento, razón por la cual los conteos tan tempranos como 3 SDS pueden resultar útiles para tomar decisiones de manejo en pasturas puras de alfalfa. Si se alcanza el nivel de establecimiento de 200-250 plántulas m⁻², el agricultor puede esperar los rendimientos máximos posibles para ‘Estanzuela Chaná’. Claramente, el rendimiento anual de ALFP depende de muchas variables, pero en Uruguay en particular, aparte de los suelos pesados y compactados, un exceso de precipitaciones estacionales probablemente sea uno de los factores más importantes que afectan el rendimiento.

La relación de DP y rendimiento en pasturas puras de trébol rojo ya sea para C1 o el acumulado anual, también fue bien ajustada con modelos lineales polinómicos, independientemente del momento en que se evaluó el establecimiento (Tabla 3.10). La relación lineal de primer orden entre la DP y rendimiento para C1 podría significar que no

hay compensación por la ramificación de la corona en esta etapa inicial. La pendiente negativa de los términos cuadráticos de los modelos ajustados para explicar el rendimiento en A1 y A2 (Tabla 3.10) indica que la producción de forraje de pasturas puras de trébol rojo no aumenta en la misma proporción que el incremento de la DP. Dicha relación ha sido reportada por White y Harper (1970) y Black (1960) para otras pasturas basadas en leguminosas.

Luego, en ambas pasturas puras la gran heterogeneidad entre ambientes hace necesario la utilización de algún predictor de calidad ambiental para mejorar la predicción del rendimiento en función de la DP. Así, la DP a las 7 y 12 SDS (Tabla 3.11) pudo predecir el rendimiento con errores de predicción menores al 20% en ambientes de buena calidad, independientemente del período de evaluación de TPP. La predicción fue similar en ambientes intermedios para A1 y A2, y en ambientes pobres para A2. Sin embargo, al monitorear el establecimiento de pasturas en una etapa tan temprana como 3 SDS, se concluye que la DP también se puede usar como un predictor de la producción de biomasa en TPP en ambientes buenos. Las estimaciones realizadas a partir de la DP a las 3 SDS siempre mostraron errores de predicción menores al 20% en ambientes de buena calidad para todos los períodos de evaluación, así como para A1 y A2 en los ambientes intermedios. Varias prácticas de manejo podrían implementarse en forma temprana ante la predicción de rendimientos bajos como respuesta del monitoreo de la DP a las 3 SDS. En este sentido, una práctica común es la resiembra, pero generalmente estas decisiones se toman a las 12 SDS o inclusive en forma posterior esperando una recuperación de la DP. Estas esperas podrían retrasar la resiembra y generar mayores dificultades en la nueva implantación; algunos estudios asocian este retraso en la fecha de siembra con un menor rendimiento (Kirby, 1969; Aydın *et al.*, 2010). Por lo tanto, son claras las ventajas de tener un modelo predictivo ajustado con la DP a las 3 SDS en lugar de a 12 SDS.

A nivel de pasturas mezclas existen solo algunos antecedentes del uso de la DP como predictor de rendimiento (Min *et al.*, 2000; Shewmaker *et al.*, 2002;). Este trabajo de tesis sugiere que el rendimiento de forraje de MB se puede predecir a partir de la DP de la leguminosa por medio de una relación cuadrática (Tabla 3.14) en términos promedios poblacional. El rendimiento anual creció hasta una DP de trébol rojo de 160 plantas m⁻², no registrándose aumentos en el rendimiento por encima de ese umbral. Los coeficientes de regresión cuadráticos negativos de los modelos podrían explicarse por esta estabilización

del rendimiento de forraje que se observó en ambas MB. La compensación entre los componentes del rendimiento podría ser parte de la explicación de esta estabilización de rendimientos, así como también lo puede ser la disminución en la densidad de tallos por planta reportada para altas densidades (Cummings *et al.*, 1999; Teixeira *et al.*, 2007).

Las estimaciones de los efectos ambientales (BLUP) se utilizaron para identificar diferencias en los modelos de predicción de rendimiento bajo diferentes calidades de ambientes (Calegario *et al.*, 2005; Carrero *et al.*, 2008). Los valores de BLUP estimados fueron más altos para MBC que para MBB. Esto puede deberse a la gran capacidad de absorción de agua del CI desde la capa superficial del suelo (Lancashire, 1978; Rumball, 1986; Hume *et al.*, 1995; Cave *et al.*, 2014), que aumenta los valores de productividad de forraje en ambientes de buena calidad.

Los resultados obtenidos (Tabla 3.15) indican que, independientemente del tipo de mezcla, los recuentos tempranos (3 SDS) podrían proporcionar buenas estimaciones de rendimiento con errores de predicción menores al 15%. Esto demuestra que tanto en TPP como en las MB, donde el trébol rojo es la leguminosa principal, el conteo a las 3 SDS puede ser útil para tomar decisiones tempranas de manejo, como, por ejemplo, momentos de pastoreo, resiembra o estrategia de fertilización.

Al trabajar con especies perennes de ciclo largo, en este caso incluyendo la alfalfa como leguminosa principal, el rendimiento anual (Tabla 3.16) para cada pastura varió entre años de siembra incluso dentro de un mismo sitio, lo que podría asociarse a la respuesta de los componentes de las ML a las condiciones climáticas. Tilman y Downing (1994) determinaron que las pasturas polifíticas toleran mejor el estrés ambiental con rendimientos más estable a lo largo del tiempo. Los resultados de nuestro trabajo confirman este concepto, donde las precipitaciones ocurridas durante la evaluación podrían explicar parte de las variaciones en la producción anual de cada pastura. Los menores rendimientos del A1 en la siembra 2013 coincidieron con precipitaciones invernales bajas y abundantes lluvias estivales. Ambas condiciones afectaron también a ALFP donde en la etapa de implantación se redujo el crecimiento invernal (Mittra y Stickler, 1961). En MLD se registró un rendimiento menor que en MLF. La mayor precipitación invernal en las siembras 2012 y 2014 permitió un mejor desarrollo invernal de todas las pasturas. En cambio, los excesos hídricos en la primavera 2014 redujeron la producción de ALFP, en

contraste con las ML que alcanzaron mejores rendimientos, que podrían explicarse por la complementariedad de sus componentes. Gross *et al.* (2007) determinaron que la complementariedad entre grupos funcionales podría ser importante para mejorar el rendimiento.

Independientemente del año climático de la siembra, el rendimiento en A2 para las ML siempre fue mayor que en A1 y A3, mientras que en ALFP se observó un comportamiento similar, excepto en la siembra 2013, donde el mayor rendimiento ocurrió en A3 (Tabla 3.16). La producción del A2 de ALFP fue condicionada por el régimen hídrico; las lluvias de primavera-verano 2013/14 y 2015/16 favorecieron el crecimiento, mientras que los excesos en la primavera 2014 limitaron su desarrollo (Mittra y Stickler, 1961). El crecimiento de la MLD siguió el mismo patrón que ALFP, con el menor rendimiento en los ambientes del año 2013. Weil (1988), Smit *et al.* (1973) y Hamilton *et al.* (1969) establecieron que algunas especies como pasto ovilla pueden competir eficazmente con la alfalfa, lo que dejaría sin efecto la compensación de la leguminosa en verano. En contraste, MLF fue la pastura más estable entre años de siembra, con 14.600 kg MS ha⁻¹ promedio. Esta estabilidad fue descrita por Sleugh *et al.* (2000), Chamblee (1958) y Aberg *et al.* (1943), quienes observaron una distribución estacional más uniforme por la compensación interespecífica de alfalfa con gramíneas invernales perennes. Los rendimientos en A3 también variaron en función del año de siembra; ambas ML y ALFP tuvieron rendimientos similares en la siembra 2012, mientras que en 2013 y 2014 alcanzaron rendimientos diferentes.

Los valores de error obtenidos para la predicción en ambientes buenos en el presente estudio (5 a 11 %) fueron similares a los obtenidos por (Baxter *et al.*, 2017) en la comparación de métodos de muestreo no destructivos para predecir el rendimiento de una pastura de alfalfa asociada con trigo.

ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DE RENDIMIENTO A PARTIR DE MODELOS AJUSTADOS

El cálculo de los valores de probabilidad realizados en esta tesis a partir de los modelos ajustados provee información adicional para la toma de decisiones en función de DP bajo los destinos escenarios pastoriles. La variabilidad en la productividad de una pastura es alta y dependiente de números factores que son representados en el modelo desarrollado por un término de error aleatorio. Luego el uso del modelo basado en DP condicionado a la calidad del ambiente en un contexto de simulación de errores aleatorios proporciona una dimensión de la variabilidad del rendimiento esperable dentro de cada ambiente incluso para una misma DP durante el establecimiento. A partir de esa variabilidad de rendimientos fue posibles obtener estimaciones de la probabilidad de superar determinados rendimientos. Manejar las probabilidades de alcanzar un rendimiento objetivo al momento de hacer las predicciones de forraje en un sistema intensivo para el monitoreo constituye una valiosa herramienta. Los cálculos de probabilidad consideraron la DP a las 3 SDS. Para las leguminosas puras (ALFP y TPP) se estimó la probabilidad de superar la media de rendimiento para Uruguay en C1 (2.000 kg MS ha⁻¹). Para todas las pasturas estudiadas se determinó la probabilidad de superar producciones anuales mayores a 10.000 kg MS ha⁻¹ (Díaz Lago *et al.*, 1996; INIA, 2017). Las probabilidades fueron similares en todas las pasturas para los ambientes buenos, donde se alcanzaron valores altos, cercanos o iguales a 1 en A1, lo que sugiere que los productores pueden superar ese rendimiento en el primer año de vida de la pastura en ambientes sin limitaciones.

La probabilidad de obtener rendimientos mayores a 2.000 kg MS ha⁻¹ con TPP en C1 fue superior a 0,75 en ambientes buenos, independientemente de la DP (Figura 3.6 A). En contraste, esta probabilidad en ALFP alcanzó tan solo 0,4 en ambientes buenos y con el máximo de DP registrado (Figura 3.5 A). La probabilidad obtener altos rendimientos en C1 disminuye en ambas pasturas puras de leguminosas en ambientes intermedios y pobres, con valores inferiores a 0,2 en TPP. En ALFP es necesario lograr al menos 400 plantas m⁻² para superar 0,75 de probabilidad en ambientes intermedios, mientras que, en aquellos pobres se requeriría de 466 plantas m⁻² a 3 SDS para alcanzar 0,6 de probabilidad en C1. La calidad del ambiente tuvo un impacto mayor que la DP en la estimación de las

probabilidades de alcanzar rendimientos superiores a 10.000 kg MS ha⁻¹, tanto para A1 como para A2 (Figuras 3.5B; 3.5C; 3.6B y 3.6C). En ambientes de buena calidad, las probabilidades fueron superiores al 0,8 con DP tan bajas como 64 plantas m⁻²; sin embargo, en ambientes más restrictivos, con la misma DP las probabilidades fueron inferiores al 0,5 y 0,2 (intermedios y pobres, respectivamente). Particularmente la TPP se muestra más estable en los valores de probabilidad para un determinado ambiente si se le compara con A1 y A2 de ALFP. La TPP se estabiliza en un umbral de 220 plantas m⁻², tanto en ambientes intermedios como en pobres. La ALFP mostró un comportamiento diferente a TPP respecto al umbral de plantas y el nivel de probabilidad que se logra, haciendo que 220 plantas m⁻² en ambientes intermedios tengan una probabilidad similar al ambiente bueno, mientras que en ambientes pobres el umbral se desplaza hacia valores superiores a 400 plantas m⁻².

Independientemente de la DP de trébol rojo, en las pasturas mezclas de ambientes buenos se excedieron los 10.000 kg MS ha⁻¹, tanto en A1 como A2, comportamiento similar al informado por Zarza *et al.* (2018) para TPP. La mezcla MBC en un rango de DP de 50 a 200 plantas m⁻² alcanzó valores de probabilidad mayores, que podrían estar explicados por el mayor desarrollo y capacidad de crecimiento de CI (Lancashire, 1978; Rumball, 1986; Hume *et al.*, 1995; Cave *et al.*, 2014) en comparación con BC. En el mismo ambiente, las probabilidades de altos rendimientos en A2 indican el mismo comportamiento para ambas MB, asumiendo que en MBB, BC hubiera podido compensar la producción de forraje a través del aumento del número de macollos en relación con la MBC. En ambientes restrictivos, un aumento en la DP total de la mezcla no aumentaría las probabilidades de obtener mayores rendimientos.

Para mezclas de perennes de ciclo largo, los cálculos de probabilidad para ambientes buenos mostraron que las MLD y MLF lograron una probabilidad igual a la ALFP de obtener buenos rendimientos tanto para el A1 como el A2, mientras que en A3 la probabilidad decrece y es más marcado el descenso en MLF (Figura 3.8 A3). La MLD presenta probabilidades similares para los ambientes intermedios y pobres en un rango de 240 a 360 plantas m⁻². Sin embargo, la MLF no logra aportar forraje en ambientes pobres. Para ambientes con limitaciones las ML en el A2 reflejan la capacidad de compensación a la que refieren Sturludóttir *et al.* (2014) y Sleugh *et al.* (2000), quienes determinaron que

éstas logran rendimientos más constantes que las pasturas monofíticas para un amplio rango de ambientes.

CONCLUSIONES

Los modelos lineales mixtos que expresan la producción de forraje en función de la DP lograda durante el establecimiento de manera ambiente-específico constituyen una herramienta predictiva que puede ser usada en el monitoreo de la implantación de pasturas. Particularmente en este trabajo se han desarrollado modelos para predecir el forraje esperado usando como input el recuento de DP de alfalfa o trébol rojo durante el establecimiento de pasturas puras y mezclas en ambientes de sistemas pastoriles del Uruguay.

Si bien los conteos de plántulas realizados a las 7 SDS semanas desde las siembras registran el mayor número de plantas establecidas, los recuentos a las 3 SDS resultaron suficientes para la anticipación del forraje esperable, condicionado a la calidad del ambiente, confirmando las hipótesis relacionadas al momento de conteo. No es posible predecir el rendimiento a partir de la DP durante el establecimiento sin considerar en el modelo predictivo la variabilidad entre ambientes, que en esta tesis fue principalmente variabilidad edafoclimática. El monitoreo temprano del establecimiento de la pastura y la obtención de un valor predicho de rendimiento para su primer año o una probabilidad de superar determinados umbrales de rendimiento en el año permite tomar decisiones tempranas para el manejo de pasturas principalmente de aquellas de mala implantación.

Las predicciones de rendimientos para el segundo y tercer año de vida de las pasturas puras o en mezclas a partir de las densidades de plantas y según el ambiente, como se planteó en las hipótesis de trabajo, podrían ser suficientes para la presupuestación de forraje en el sistema de producción.

La precisión de las predicciones de los rendimientos en función de la DP durante el establecimiento es dependiente del ambiente. Por lo tanto, información sobre la calidad ambiental esperada permitiría a los productores y técnicos mejorar las predicciones de biomasa. Los errores de predicción de los modelos evaluados estuvieron en un rango de 9-20%.

Conteos que registren entre 150 y 300 plantas m^{-2} se asociaron con una probabilidad del 65% y 80% de obtener altos rendimientos en pasturas puras de alfalfa. En pasturas puras de trébol rojo, con más de 220 plantas m^{-2} se obtuvieron probabilidades altas de obtener rendimientos superiores a 10.000 kg MS ha^{-1} . A medida que los ambientes van siendo más limitantes, las DP asociadas a la obtención de altos rendimientos se incrementó en ambas pasturas monofíticas de leguminosas.

Las pasturas mezclas lograron rendimientos menos variables en relación a la DP que las pasturas monofíticas. La DP de la leguminosa principal registrada a las 3 SDS en mezclas resultó un buen predictor del rendimiento total, al igual que en las leguminosas puras. Por tanto, se rechaza la hipótesis que refiere a la diferente relación entre tipos de pasturas. En ambientes buenos las MB superaron 10.000 kg MS ha^{-1} para A1 y A2 en un amplio rango de DP (60 a 300 plantas m^{-2}), independientemente del acompañante. En ambientes intermedios, con un rango de 150 a 300 plantas m^{-2} las probabilidades de altos rendimiento logran valores superiores a 0,6. En las ML, independientemente de cual fuera la gramínea acompañante, también se logró superar 10.000 kg MS ha^{-1} en A1 y A2 con un amplio rango de densidades de plantas (80 a 330 plantas m^{-2}), mientras que en ambientes intermedios solo en el A2 se lograron altas probabilidades. Estos resultados confirman que DP bajas no siempre implican bajos rendimientos como se plantea en la hipótesis, debido a la dependencia con el ambiente.

La aplicación del modelo desarrollado permitirá manejar en forma más eficientes las pasturas durante el primer año. Contando las plántulas a las 3 SDS y con información de ambiente (suelo, precipitaciones) se podrá optar por una de las ecuaciones generadas y se obtendrá una probabilidad de rendimiento. El uso del BLUP introduce el efecto de ambiente y que con el número de plántulas se logra un ajuste más preciso que el tradicional de la presupuestación mediante valores tabulados de diferentes pasturas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abadouz, G., Gorttapeh, A. H., Rahnema, A. A., y Behradfar, A. (2010). Effect of row spacing and seeding rate on yield component and seed yield of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Notulae Scientia Biologicae*, 2(1), 74–80.
- Abbott, L. y Pistorale, S. (2010). Determination of variance components and heritability in prairie grass (*Bromus catharticus* Vahl.). *Agriscientia*, 27(1-2), 115–123.
- Aberg, E., Johnson, I. J. y Wilsie, C. P. (1943). Associations between species of grasses and legumes. *Journal of the American Society of Agronomy*, 35, 357–369.
- Akaike H. (1974). A new look at the statistical identification model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716–723.
- Annicchiarico, P., Barrett, B., Brummer, E. C., Julier, B. y Marshall, A. H. (2015). Achievements and challenges in improving temperate perennial forage legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(1-3), 327–380.
- Ayala, W., Bemhaja, M., Cotro, B., Do Canto, J., García, J., Olmos, F., ... y Silva, J. (2010). *Forrajeras; catálogo de cultivares 2010*. Montevideo, Uruguay: INIA.
- Aydın, N., Mut, Z., Mut, H., y Ayan, I. (2010). Effect of autumn and spring sowing dates on hay yield and quality of oat (*Avena sativa* L.) genotypes. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9 (10), 1539–1545.
- Arturi, M. J., Aulicino, M. B., Ansín, O., Gallinger, G. y Signorio, R. (2012). Combining ability in mixtures of prairie grass and clovers. *American Journal of Plant Sciences*, 3(10), 1355–1360.
- Barletta, P., Camarasa, J., Carta, H., De Andrés, A., Méndez, D., O'Gorman, J. M., Ojuez, C., Perez, G., Scheneiter, O. y Varea, I. (2013). Abundancia de trébol rojo y trébol blanco en pasturas del centro y norte de la provincia de Buenos Aires. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 39(1), 1–10.
- Barry, T. N. (1998). The feeding value of chicory (*Cichorium intybus*) for ruminant livestock. *The Journal of Agricultural Science*, 131(3), 251–257.
- Baxter, L. L., West, C. P., Brown, C. P., y Green, P. E. (2017). Comparing nondestructive sampling techniques for predicting forage mass in alfalfa–tall wheatgrass pasture. *Agronomy Journal*, 109(5), 2097–2106.
- Baylor J.E. 1974. Satisfying the nutritional requirements of grass–legume mixtures. En: D.A. Mays (Ed.), *Forage fertilization*. (pp 171–188). Madison: ASA, CSSA, SSSA.
- Belesky, D. P., Turner, K. E. y Ruckle, J. M. (2000). Influence of nitrogen on productivity and nutritive value of forage chicory. *Agronomy Journal*, 92(3), 472–478.
- Belesky, D. P., Ruckle, J. M. y Abaye, A. O. (2007). Seasonal distribution of herbage mass and nutritive value of Prairiegrass (*Bromus catharticus* Vahl). *Grass and Forage Science*, 62(3), 301–311.

- Black, J. N. (1960). An assessment of the role of planting density in competition between red clover (*Trifolium pratense* L.) and lucerne (*Medicago sativa* L.) in the early vegetative stage. *Oikos*, 11(1), 26–42.
- Blaser, B. C., Gibson, L. R., Singer, J. W. y Jannink, J. L. (2006). Optimizing seeding rates for winter cereal grains and frost-seeded red clover intercrops. *Agronomy Journal*, 98(4), 1041–1049.
- Bolger, T. P., y Meyer, D. W. (1983). Influence of plant density on alfalfa yield and quality. En: *Proceedings American Forage and Grassland Conference* (pp.37-41), Eau Claire, WI. 23–26 Jan. Lexington, KY: AFGC.
- Boller, B., Schubiger, F.X., y Kölliker R. (2010). Red clover. En: B. Boller, U.K. Posselt y F. Veronesi (Eds.). *Fodder Crops and Amenity Grasses. Handbook of Plant Breeding* (vol 5, pp.439–455). New York, USA: Springer Science+Business Media.
- Bruno, O. A., Romero, L. A., Fossati, J. L., y Quaino, O. R. (1987). Evaluación de mezclas simples de alfalfa y gramíneas bajo pastoreo. En: Producción de pasturas para engorde y producción de leche. IICA/BID. PROCISUR. Montevideo (Uruguay). *Diálogo*, 19, 121–125.
- Bustos Molina J.R. 2005. Inteligencia Artificial en el Sector Agropecuario. En: Seminario de Investigación I/ 2005-II/ 299622/ Versión 1.1. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.docentes.unal.edu.co/jrbustosm/docs/estado2.pdf>.
- Cabrera, A. L. y Willink, A. (1973). Biogeografía de América Latina. Washington, DC.: Organización de Estados Americanos. (Monografía OEA, Serie Biología no.18).
- Calegario, N., Maestri, R., Leal, C. L., y Daniels, R. F. (2005). Growth estimate of Eucalyptus stands based on nonlinear multilevel mixed-effects model theory. *Ciência Florestal*, 15(3), 285–292.
- Carrero, O., Jerez, M., Macchiavelli, R., Orlandoni, G., y Stock, J. (2008). Ajuste de curvas de índice de sitiomediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia*, 33(4), 265–272.
- Casanova O.N. y Cerveñansky, A.E. (2004). Manejo de la fertilización fosfatada y azufre en instalación y refertilización de alfalfa. En: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná: AACS. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E7B8DBC03015EDCB8525799900609B78/\\$FILE/CasanovaPyS%20en%20Alfalfa.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E7B8DBC03015EDCB8525799900609B78/$FILE/CasanovaPyS%20en%20Alfalfa.pdf)
- Cave, L. M., Kenyon, P. R., Morris, S. T., Lopez-Villalobos, N. y Kemp, P. D. (2015). Ewe lamb diet selection on plantain (*Plantago lanceolata*) and on an herb and legume mix, including plantain, chicory (*Cichorium intybus*), red clover (*Trifolium pratense*) and white clover (*Trifolium repens*). *Animal Production Science*, 55(4), 515–525.
- Chamblee, D. S. (1958). Some above-and below-ground relationships of an alfalfa-orchardgrass mixture. *Agronomy Journal*, 50(8), 434–437.
- Charlton, J. F. L. y Stewart, A. V. (1999). Pasture species and cultivars used in New Zealand—a list. *Proceedings of the conference-New Zealand Grassland Association* 61, 147–166.
- Colabelli, M. R., Urcola, H., y Agnusdei, M. G. (2002). Intersiembra de leguminosas en suelos de aptitud agrícola. 1. Efecto de la época de intersiembra y de la distancia entre surcos sobre

- el establecimiento de las especies intersembradas. *Avances en Producción Animal*, 27, 77–86.
- Cowett, E. R. y Sprague, M. A. (1962). Factors affecting tillering in alfalfa 1. *Agronomy Journal*, 54(4), 294–297.
- Cullen, N. A. (1965). A comparison of the yield and composition of various mixtures of lucerne and grass sown in alternate rows with lucerne sown as a pure stand. *New Zealand journal of agricultural research*, 8(3), 613–624.
- Cummings, D. C., Stritzke, J. F., Berberet, R. C. y Raun, W. R. (1999). Alfalfa productivity and stand longevity as influenced by weeds and fertility. *Proceedings of the Southern Weed Science Society*, 52, p. 39.
- Dear, B. S., Hodge, A., Lemerle, D., Pratley, J. E., Orchard, B. A. y Kaiser, A. G. (2006). Influence of forage legume species, seeding rate and seed size on competitiveness with annual ryegrass (*Lolium rigidum*) seedlings. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(5), 627–636.
- Díaz Lago J., García J.A. y Rebuffo M. (1996). Crecimiento de leguminosas en La Estanzuela. Montevideo (Uruguay): INIA. (Serie Técnica no.71).
- Dolling, P. J., Lyons, A. M. y Latta, R. A. (2011). Optimal plant densities of lucerne (*Medicago sativa*) for pasture production and soil water extraction in mixed pastures in south-western Australia. *Plant and soil*, 348(1-2), 315–327.
- Douglas, M. H., George, N. J. y Johnstone, P. D. (1998). Effect of drill type on establishment of overdrilled lucerne. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 41(2), 161–170.
- Drewry, J. J., Cameron, K. C. y Buchan, G. D. (2008). Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Soil Research*, 46(3), 237–256.
- Droslom, P. N., y Smith, D. (1976). Adapting species for mixtures. En: R.I. Papendick, P.A. Sanchez, G.B. Triplett (Eds.). *Multiple Cropping*. (pp.223–234). Madison, Wisconsin: ASA, CSSA, SSSA (ASA Special Publication Number no.27).
- Durán, H., y La Manna, A. (2009). Implicancias productivas, económicas y ambientales de la intensificación de la producción de leche pastoril en Uruguay. En *Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas*, (pp. 81–84). Montevideo, Uruguay. Resúmenes expandidos. La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión no. 587).
- Errea, E., Peyrou, J., Secco, J., y Souto, G. (2011). Transformaciones en el agro uruguayo: nuevas instituciones y modelos de organización empresarial. Montevideo: Universidad Católica del Uruguay. 207p.
- Ernst, O., Siri-Prieto, G., Bentancur, O., Carballo, C., y Lazbal, E. (2007). Siembra directa en sistemas lecheros: evolución y situación actual en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 11(2), 78–86.
- Esparza, J. Z., Garay, A. H., Pérez, J. P., Haro, J. G. H., Gallardo, F. O., Hernández, P. A. M., ... y Carrillo, A. R. Q. (2009). Análisis de crecimiento estacional de una pradera asociada alfalfa-pasto ovinillo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 47(2), 173–178.

- Fick, G. W. (1984). Simple simulation models for yield prediction applied to alfalfa in the Northeast. *Agronomy Journal*, 76(2), 235–239.
- Fick, G. W., y Onstad, D. (1984). ALSIM (Level 0). Description, performance, and user instructions for base-line model of alfalfa yield and quality. *Agron. Mimeo*, 83.
- Fowler, C. A. (1986). An event approach to the study of speech perception from a direct-realist perspective. En: IG Mattingly, N O'Brien (eds.), *Status Report on Speech Research*, (pp.139–169). Haskins Laboratories, New Haven, CT.
- Formoso F. (2007). Conceptos sobre implantación de pasturas. En: *Jornada de Instalación y Manejo de Pasturas* (pp. 19–39). La Estanzuela: INIA. (Actividades de Difusión no. 483).
- Frame, J., Charlton, J. F. L. y Laidlaw, A. S. (1998). Red clover. En: J Frame, JFL Charlton, AS Laidlaw (eds.), *Temperature forage legumes* (pp, 181–224). Wallingford, Oxon, UK: CAB International.
- Frame J.y Laidlaw A.S. (2005). Prospects for temperate forage legumes. En: S.G. Reynolds y J. Frame, J. (Eds.) *Grasslands: Developments. Opportunities. Perspectives* (pp. 1–28). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Science Enfield, New Hampshire, USA: Publishers, Inc.
- Fussell, G. E. (1964). The grasses and grassland cultivation of Britain. *Grass and Forage Science*, 19(1), 49–54.
- García-Préchac, F.; Ernest, O.; Siri-Prieto, G.; Terra; J.A. (2004). Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1–13.
- Gentile, R. M., Martino, D. L., y Entz, M. H. (2005). Influence of perennial forages on subsoil organic carbon in a long-term rotation study in Uruguay. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105(1-2), 419–423.
- Ghanizadeh, N., Moghaddam, A. y Khodabandeh, N. (2014). Comparing the yield of alfalfa cultivars in different harvests under limited irrigation condition. *International Journal of Biosciences*, 4(1), 131–138.
- Głąb, T. (2014). Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. *Soil and Tillage Research*, 144, 8–19.
- Gross, N., Suding, K. N., Lavorel, S.y Roumet, C. (2007). Complementarity as a mechanism of coexistence between functional groups of grasses. *Journal of Ecology*, 95(6), 1296–1305.
- Hamilton, D. T. y Horne, D. J. (1988). The effect of treading damage on pasture utilization and topsoil structure. En: D.J. Horne y I.F.H. Furkert (Eds.). *Proceedings of the Fourth National Land Drainage Seminar* (pp.133–141). Palmerston North, New Zealand.
- Hamilton, R. I., Scholl, J. M. y Pope, A. L. (1969). Performance of three grass species grown alone and with alfalfa under intensive pasture management: animal and plant response. *Agronomy Journal*, 61(3), 357–361.
- Han, D., O'Kiely, P., y Sun, D. W. (2003). Application of water-stress models to estimate the herbage dry matter yield of a permanent grassland pasture sward regrowth. *Biosystems Engineering*, 84, (1), 101–111.

- Hansen L.H. y Krueger C.R. (1973). Effect of establishment method, variety, and seeding rate on the production and quality of alfalfa under dryland and irrigation. *Agronomy Journal*, 65, 755–759.
- Harper J.L. (1977). The recruitment of seedling populations. En: *Population Biology of Plants* (pp. 111–148). London: Academic Press.
- Hayes, R. C., Li, G. D., Sandral, G. A., Swan, T. D., Price, A., Hildebrand, S., ... Peoples, M. B. (2017). Enhancing composition and persistence of mixed pasture swards in southern New South Wales through alternative spatial configurations and improved legume performance. *Crop and Pasture Science*, 68(12), 1112.
- Howarth R.E., Cheng K.-J., Majak W. and Costerton J.W. (1984). Ruminant bloat. En: L.P. Milligan, W.L. Grovum y A. Dobson A. (Eds.) *Control of digestion and metabolism in ruminants* (pp. 516–527). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Hume, D. E., Lyons, T. B., y Hay, R. J. M. (1995). Evaluation of ‘Grasslands Puna’ chicory (*Cichorium intybus* L.) in various grass mixtures under sheep grazing. *New Zealand journal of agricultural research*, 38(3), 317–328.
- Hycka, M. (1983). Alfalfa in the dryland: Rate of seeding. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei (Spain)*, 16, 329–340.
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria), INASE (Instituto Nacional de Semillas). 2017. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras: anuales, bianuales y perennes. Montevideo, Uruguay: INIA-INASE. Recuperado de: http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_EF/Año2017/PubForrajerasPeriodo2017.pdf.
- Iversen C.E., Calder W., Kennigton B., Walsh M., Topp E., Flay A.H. y Robertson R.M. (1955). Lucerne and its place in South Island farming (pp.52–72). En: *The Proceedings of the Lincoln Farmers' Conference*. Lincoln, Canterbury Agricultural College, Lincoln, New Zealand.
- Juan, N. A., Romero, L. A., Bruno, O. A. (1995). Conservación del forraje de alfalfa. En: E. Hijano, A. Navaro (eds.), *La Alfalfa en La Argentina*, (cap.9. pp. 173–194). San Juan, Argentina: INTA.
- Johnson R.A. y D.W. Wichern (2002). Clustering, distance methods and ordination. En: *Applied Multivariate Statistical Analysis*, (cap.12, pp. 671–739), Prentice Hall. New Jersey. USA.
- Keddy, P. A. y Constabel, P. (1986). Germination of ten shoreline plants in relation to seed size, soil particle size and water level: an experimental study. *The Journal of Ecology*, 74(1), 133–141.
- Kephart, K. D., Twidwell, E. K., Bortnem, R. y Boe, A. (1992). Alfalfa yield component responses to seeding rate several years after establishment. *Agronomy Journal*, 84(5), 827–831.
- Kirby, E. J. M. (1969). The effect of sowing date and plant density on barley. *Annals of Applied Biology*, 63(3), 513–521.
- Lamb, J. F., Sheaffer, C. C. y Samac, D. A. (2003). Population density and harvest maturity effects on leaf and stem yield in alfalfa. *Agronomy Journal*, 95(3), 635–641.

- Lancashire, J. A. (1978). Improved species and seasonal pasture production. *Proc. Agron. Soc. New Zealand*, 8, 123–127.
- Ledgard S.F., Thom E.R., Singleton P.L., Thorrold B.S., Edmeades D.C. y Lomas J. (1996). Environmental impacts of dairy systems. En: *Proceedings 48th Ruakura Farmers' Conference* (pp. 26–33). Wellington, New Zealand: Ministry of Agriculture and Fisheries.
- Lee, M. R., Olmos Colmenero, J. D. J., Winters, A. L., Scollan, N. D. y Minchin, F. R. (2006). Polyphenol oxidase activity in grass and its effect on plant-mediated lipolysis and proteolysis of *Dactylis glomerata* (cocksfoot) in a simulated rumen environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(10), 1503–1511.
- Li, F. Y., Snow, V. O. y Holzworth, D. P. (2011). Modelling the seasonal and geographical pattern of pasture production in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 54(4), 331–352.
- Lloyd, D., Johnson, B. y O'Brien, S. (2007). Sown pasture grasses and legumes for marginal cropping lands in southern inland Queensland. *Tropical Grasslands*, 41(3), 164–173.
- Lüscher, A., Mueller-Harvey, I., Soussana, J. F., Rees, R. M. y Peyraud, J. L. (2014). Potential of legume-based grassland–livestock systems in Europe: a review. *Grass and Forage Science*, 69(2), 206–228.
- Maddaloni J. y Ferrari L. 2002. Forrajeras y pasturas del ecosistema templado húmedo de la Argentina. 2ª. ed. Buenos Aires, Argentina: INTA, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Martin, S. G., Van Acker, R. C. y Friesen, L. F. (2001). Critical period of weed control in spring canola. *Weed Science*, 49(3), 326–333.
- Martínez, I., Ovalle, C., Del Pozo, A., Uribe, H., Valderrama, N., Prat, C., ... y Zagal, E. (2011). Influence of conservation tillage and soil water content on crop yield in dryland compacted Alfisol of Central Chile. *Chilean Journal of agricultural research*, 71(4), 615–622.
- Mattera, J., Romero, L. A., Cuatrín, A. L., Cornaglia, P. S., y Grimoldi, A. A. (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.
- Min D.H., King J.R., Kim D.A., Lee H.W. (2000). Stand Density Effects on Herbage Yield and Forage Quality of Alfalfa. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* 13, 929–934.
- McGowan, A. A., y Williams, W. A. (1973). Factors affecting competition between subterranean clover and a barley cover crop. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 13(60), 56–62.
- McLean E. O. y Brown J.R. 1984. Crop response to lime in the midwestern United States. En: F. Adams (Ed.) *Soil Acidity and Liming* (pp. 267–303). Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA. (Agronomy Serie no.12).
- Melin, A., Arzadún, M. y Ibarra, C. (2003). Producción y complementariedad según altura de corte y fertilización nitrogenada en mezclas gramínea: alfalfa. *Revista. Argentina de Producción. Animal*, 23, 199–200.
- Mitra, M. K., y Stickler, F. C. (1961). Excess water effects on different crops. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 64(4), 275–286.

- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2011). Anuario OPYPA. Montevideo, Uruguay: OPYPA, MGAP
- Moate, P. J., Clarke, T., Davis, L. H. y Laby, R. H. (1997). Rumen gases and bloat in grazing dairy cows. *The Journal of Agricultural Science*, 129(4), 459–469.
- Molitero, E. A. (2000). Caracterización de la producción inicial de diversas mezclas forrajeras. *Agrociencia Uruguay*, 4(1), 31–49.
- Mutch, D. R., Martin, T. E. y Kosola, K. R. (2003). Red clover (*Trifolium pratense*) suppression of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technology*, 17(1), 181–185.
- Nie, Z., y Norton, M. R. (2009). Stress tolerance and persistence of perennial grasses: the role of the summer dormancy trait in temperate Australia. *Crop Science*, 49(6), 2405–2411.
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Frossard, E., y Lüscher, A. (2006). Regulation of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. En: *Sustainable grassland productivity*. Proceedings of the 21st General Meeting of the European Grassland Federation, Badajoz, Spain, 3-6 April 2006 (pp. 246–248). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos (SEEP).
- Palmer, T. P. y Wynn-Williams, R. B. (1976). Relationships between density and yield of lucerne. *New Zealand journal of experimental agriculture*, 4(1), 71–77.
- Paruelo J., Guerschman J.P. y Verón. S. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 87,14–23.
- Palliser, C.C. y Woodward, S.L. (2002). Using models to predict methane reduction in pasture-fed dairy cows. En: 1st International Congress on Environmental Modelling and Software, Lugano, Switzerland.
- Panario, D., y Bidegain, M. (1997). Climate change effects on grasslands in Uruguay. *Climate Research*, 9(1-2), 37–40.
- Pascual Sánchez, I. D. L. A., Ortiz Díaz, A. A., Ramírez de la Rivera, J. y Figueredo León, A. (2017). Predicción del rendimiento y la calidad de tres gramíneas en el valle del cauto. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11(3), 144–158.
- Peeters, A., Parente, G. y Le Gall, A. (2006). Temperate legumes: key-species for sustainable temperate mixtures. *Grassland Science in Europe*, 11, 205–220.
- Pérez-Gomar, E. (2005). *Qualidade física de um vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio* (tese de doutorado). Santa María, RS, Brasil. Recuperado de: <http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Teses/ENRIQUE-PEREZ-GOMAR-CAPURRO-TESE.pdf>.
- Perez Gomar, E., Secco, D., Reichert, J. M. y Reinert, D. J. (2014). Compressibilidade e elasticidade de um Vertissolo afetado pela intensidade de pastejo bovino. *Ciência Rural*, 44(2), 283–288.
- Peyraud, J. L., Le Gall, A. y Lüscher, A. (2009). Potential food production from forage legume-based-systems in Europe: an overview. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 48, 115–135.
- Pham-Gia, T. y Hung, T. L. (2001). The mean and median absolute deviations. *Mathematical and Computer Modelling*, 34(7-8), 921–936.

- Piccardi, M., Funes, A. C., Balzarini, M. y Bó, G. A. (2013). Some factors affecting the number of days open in Argentinean dairy herds. *Theriogenology*, 79(5), 760–765.
- Pirhofer-Walzl, K., Rasmussen, J., Høgh-Jensen, H., Eriksen, J., Søgaard, K. y Rasmussen, J. (2012). Nitrogen transfer from forage legumes to nine neighbouring plants in a multi-species grassland. *Plant and soil*, 350(1-2), 71–84.
- Planchuelo, A. M. y Peterson, P. M. (2000). The species of bromus (*Poaceae: Bromeae*) in South America. En: S.W.L. Jacobs y J. Everett J. (Eds.). *Grasses: systematics and evolution* (pp. 89–101). Australia: CSIRO.
- Porqueddu C., Parente G. y Elsaesser, M. 2003. Potential of grasslands. *Grassland Science in Europe*, 8, 11–20.
- Porqueddu C. y Gonzales F. 2006. Role of potential of annual pasture legumes in Mediterranean farming systems. *Grassland Science in Europe*, 11, 221–231.
- Powell, A. M., Kemp, P. D., Jaya, I. K. D. y Osborne, M. A. (2007). Establishment, growth and development of plantain and chicory under grazing. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 69, 41–45.
- Queen, A., Earl, H., y Deen, W. (2009). Light and moisture competition effects on biomass of red clover underseeded to winter wheat. *Agronomy Journal*, 101(6), 1511–1521.
- Quero-Carrillo, A. R., Hernández-Guzmán, F. J., Velázquez-Martínez, M., Gámez-Vázquez, H. G., Landa-Salgado, P., y Aguilar-López, P. (2016). Métodos de establecimiento de pasturas en zonas áridas de México utilizando semillas crudas o cariósides. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 4(1), 29–37.
- Quiroga, G. H. M., Winch, J. E y Brown, D. M. (1992). Estimación de la calidad de la alfalfa utilizando parámetros climatológicos. *ITEA Producción Vegetal*, 88, 133–141.
- Rashidi, M., Zand, B. y Abbassi, S. (2009). Response of seed yield and seed yield components of alfalfa (*Medicago sativa*) to different seeding rates. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 5(6), 786–790.
- Rebuffo M., Risso D. y Restaino E. 2000. (Eds.). *Tecnología en alfalfa*. Montevideo, Uruguay: INIA. (INIA Boletín de Divulgación no. 69).
- Refi, R. O., y Spiller, L. C. (2013). Acumulación de forraje y persistencia en mezclas binarias de gramíneas y leguminosas. *Revista Argentina de Producción Animal*, 31(2), 111–128.
- Rumball, W. (1986). Grasslands puna' chicory (*Cichorium intybus* L.). *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 14(1), 105–107.
- Rumbaugh, M. D. (1963). Effects of population density on some components of yield of alfalfa. *Crop Science*, 3(5), 423–424.
- Sanderson, M. A., Tracy, B. F., Skinner, R. H., Gustine, D. L. y Byers, R. (Diciembre 2000). Changes in the plant species composition of northeastern grazinglands during the 20th century. En: *Proceedings of the First National Conference on Grazing Lands* (pp. 365–372). Las Vegas, NV.
- Sándor, R., Barcza, Z., Acutis, M., Doro, L., Hidy, D., Köchy, M., ...y Rolinski, S. (2017). Multi-model simulation of soil temperature, soil water content and biomass in Euro-Mediterranean grasslands: Uncertainties and ensemble performance. *European Journal of Agronomy*, 88, 22–40.

- SAS Institute Inc. (2004). SAS 9.1.3 Help and Documentation, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Scales, G. H., Knight, T. L. y Saville, D. J. (1995). Effect of herbage species and feeding level on internal parasites and production performance of grazing lambs. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 38(2), 237–247.
- Schader, C., Jud, K., Meier, M. S., Kuhn, T., Oehen, B. y Gattinger, A. (2014). Quantification of the effectiveness of greenhouse gas mitigation measures in Swiss organic milk production using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 73, 227–235.
- Selirio, I. S. y Brown, D. M. (1979). Soil moisture-based simulation of forage yield. *Agricultural Meteorology*, 20(2), 99–114.
- Sevilla G.H., Pasinato A.M. and García J.M. 2002. Forage production and plating density of irrigated alfalfa comparing different seeding densities. *Archivo Latinoamericano de Producción Animal*, 10, 164–170.
- Shahriari, M. H., Savaghebi-Firoozabadi, G., Azizi, M., Kalantari, F. y Minai-Tehrani, D. (2007). Study of growth and germination of *Medicago sativa* (Alfalfa) in light crude oil-contaminated soil. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(1), 46–51.
- Sharratt, B. S., Baker, D. G., y Sheaffer, C. C. (1987). Climatic effect on alfalfa dry matter production Part II. Summer harvests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(2-3), 121–129.
- Sharratt, B. S., Sheaffer, C. C., y Baker, D. G. (1989). Base temperature for the application of the growing-degree-day model to field-grown alfalfa. *Field Crops Research*, 21 (2), 95–102.
- Shewmaker, G. E., Hopwood, M. H. y Roemer, R. L. (2002). Implication of seeding rates and seed coating with improved alfalfa varieties. En *Proceedings 32nd. Western Alfalfa and Forage Conference*. University of California. Department of Agronomy and Range Science Extension, University of California, Davis. Recuperado de: <http://alfalfa.ucdavis.edu/%2BSymposium/proceedings/2002/02-185>.
- Silva, G. C. C., Calegario, N., Da Silva, A. A. L., Da Cruz, J. P. y Leite, H. G. (2018). Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. *Forest Ecology and Management*, 408, 36–44.
- Singer, J. W. y Meek, D. W. (2012). Relationship between interseeded red clover biomass and plant number. *Crop Science*, 52(2), 981–985.
- Singer, J. W., Casler, M. D. y Kohler, K. A. (2006). Wheat effect on frost-seeded red clover cultivar establishment and yield. *Agronomy Journal*, 98(2), 265–269.
- Siri Prieto, G., Bentancur, O., Carballo Douton, C., Ernst, O. y Lazbal, E. (2006). *Nivel de adopción y situación de la siembra directa en establecimientos de producción lechera: 2da. encuesta quinquenal*. Montevideo, Uruguay: INIA. (Serie FPTA-INIA no. 16).
- Skinner, R. H., Gustine, D. L. y Sanderson, M. A. (2004). Growth, water relations, and nutritive value of pasture species mixtures under moisture stress. *Crop science*, 44(4), 1361–1369.
- Sleugh, B., Moore, K. J., George, J. R. y Brummer, E. C. (2000). Binary legume–grass mixtures improve forage yield, quality, and seasonal distribution. *Agronomy Journal*, 92(1), 24–29.
- Smith, D., Jacques, A. V. A. y Balasko, J. A. (1973). Persistence of several temperate grasses grown with alfalfa and harvested two, three, or four times annually at two stubble heights. *Crop Science*, 13(5), 553–556.

- Soto L. and López H. 1986. Seeding rates in alfalfa (*Medicago sativa*) varieties. *Agricultura Técnica (Santiago)*, 46, 451–458.
- Striker G.G. y Colmer T.D. (2017). Flooding tolerance of forage legumes. *Journal of Experimental Botany*, 68, 1851–1872.
- Sparling, G. P., Schipper, L. A., Bettjeman, W. y Hill, R. (2004). Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104(3), 523–534.
- Sturludóttir, E., Brophy, C., Bélanger, G., Gustavsson, A. M., Jørgensen, M., Lunnan, T. y Helgadóttir, Á. (2014). Benefits of mixing grasses and legumes for herbage yield and nutritive value in Northern Europe and Canada. *Grass and forage science*, 69(2), 229–240.
- Swan, A. D., Peoples, M. B., Hayes, R. C., Li, G. D., Casburn, G. R., McCormick, J. I. y Dear, B. S. (2014). Farmer experience with perennial pastures in the mixed farming areas of southern New South Wales: on-farm participatory research investigating pasture establishment with cover-cropping. *Crop and Pasture Science*, 65(10), 973–987.
- Teixeira, E. I., Moot, D. J., Brown, H. E. y Fletcher, A. L. (2007). The dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) yield components in response to defoliation frequency. *European Journal of Agronomy*, 26(4), 394–400.
- Terra, J. A. y García Préchac, F. (2001). Evolución de indicadores de calidad de suelos en sistemas forrajeros con siembra directa. En: *Reunión técnica sobre siembra directa* (pp.40–41). Memorias. Las Brujas, Canelones, Uruguay: INIA.
- Thomson, D. J. (1984). The nutritive value of white clover. En: D.J. Thomson. *Forage Legumes* (pp. 78–92). Maidenhead: British Grassland Society. (British Grassland Society Occasional Symposium No. 16).
- Tilman, D. y Downing, J. A. (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367(6461), 363.
- Tozer, K. N., Douglas, G. B., Moss, R. A., Rennie, G. M., Knight, T. L., Cameron, C. A., ... y Beutrais, J. (2016). Effect of seed mix, sowing time, summer fallow, site location and aspect on the establishment of sown pasture species on uncultivable hill country. *New Zealand journal of agricultural research*, 59(4), 389–411.
- Tracy, B. F. y Sanderson, M. A. (2000). Patterns of plant species richness in pasture lands of the northeast United States. *Plant Ecology*, 149(2), 169–180.
- Trnka, M., Eitzinger, J., Gruszczynski, G., Buchgraber, K., Resch, R. y Schaumberger, A. (2006). A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and forage science*, 61(3), 253–271.
- Ustarroz E. y Brunetti M. (1994). Ganancia de peso vivo individual y por ha en pasturas de alfalfa con distintos grados de reposo invernal. *Revista Argentina de Producción Animal*, 14, (Supl. 1), 93–94.
- Van Ranst, G., Lee, M. R. y Fievez, V. (2011). Red clover polyphenol oxidase and lipid metabolism. *Animal*, 5(4), 512–521.
- Vasilev, E. 2006. Productivity of subterranean clover (*Tr. subterraneum* L.) in pasture mixtures with some perennial grasses for the conditions of Central North Bulgaria. *Plant Sciences Sofia*, 43, 149–152. (In Bulgarian).

- Vázquez, P., Adema, E., Llorens, E., Butti, L., Poey, S., Stefanazzi, I., y Babinec, F. (2016). *Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa*. Anguil, La Pampa, Argentina: Centro Regional La Pampa-San Luis, INTA EEA Anguil. http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_pt102.pdf
- Volenc, J. J., Cherney, J. H. y Johnson, K. D. (1987). Yield Components, Plant morphology, and forage quality of alfalfa as influenced by plant population. *Crop science*, 27(2), 321–326.
- Ward, P. R., Palta, J. A. y Waddell, H. A. (2011). Root and shoot growth by seedlings of annual and perennial medic, and annual and perennial wheat. *Crop and Pasture Science*, 62(5), 367–373.
- Weil, R. R. (1988). Performance of orchardgrass, smooth brome grass, and ryegrass in binary mixtures with alfalfa. *Agronomy Journal*, 80(3), 509–514.
- West B.T., Welch K.B. y Galecki A.T. (2014). *Linear-Mixed Models: a practical guide using statistical software*. 2a.ed. Boca Raton: Chapman and Hall / CRC Press.
- White, J. y Harper, J. L. (1970). Correlated changes in plant size and number in plant populations. *The Journal of Ecology*, 58, 467–485.
- Wilson, P. W. (1940). *Biochemistry of symbiotic nitrogen fixation*. Madison: University of Wisconsin Press.
- Winters, A. L. y Minchin, F. R. (2005). Modification of the Lowry assay to measure proteins and phenols in covalently bound complexes. *Analytical Biochemistry*, 346(1), 43–48.
- Wong, T. T. (2015). Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. *Pattern Recognition*, 48(9), 2839–2846.
- Zarza, R., Rebuffo, M., La Manna, A. y Balzarini, M. (2018). Plant density in red clover (*Trifolium pratense* L.) pastures as an early predictor of forage production. *European Journal of Agronomy*, 101, 193–199.
- Zegwaard, K. E., Balks, M. R. y Singleton, P. L. (1998). The effect of cattle trampling and pugging on selected soil properties. En: *Proceedings of the New Zealand Soil Society Conference, Gisborne* (pp. 101–102). Lincoln, NZ: New Zealand Soil Science Society.
- Zerbino M.S. 2012. Indicadores biológicos para evaluar los agroecosistemas. 1. Macrofauna del suelo. En: *Uso de la biodiversidad para la evaluación del impacto de la intensificación agrícola y el diseño de agroecosistemas sustentables* (pp.58–69). Las Brujas, Canelones, Uruguay: INIA. (Serie Actividades de Difusión no.674).