



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

EL PASTOREO: UN FACTOR CLAVE PARA LA PRODUCTIVIDAD EN LOS SISTEMAS INTEGRADOS

ALEJANDRA MABEL PLANISICH-WILKINSON

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

DIRECTOR: Dr. Julio R. Galli

CO- DIRECTOR: PhD. Santiago A. Utsumi

2025

EL PASTOREO: UN FACTOR CLAVE PARA LA PRODUCTIVIDAD EN LOS SISTEMAS INTEGRADOS

Alejandra Mabel Planisich-Wilkinson

Ingeniera agrónoma – Universidad Nacional de Rosario

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR, Zavalla, Santa Fe, durante el período comprendido entre los años 2013 y 2021, bajo la dirección del Dr. Julio R. Galli.

Alejandra Mabel Planisich-Wilkinson (firma)

Dr. Julio R. Galli (firma)

Dr. Santiago A. Utsumi (firma)

Defendida: 11 de marzo de 2025.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Julio Galli y Santiago Utsumi por brindarme la oportunidad de realizar esta experiencia única. Por las enseñanzas y el tiempo compartido.

A Oscar Di Marco y Mónica Agnusdei. Lo compartido con ustedes, fue fundamental durante todo el trayecto de este trabajo.

Un agradecimiento profundo a Martín Nalino, compañero de vida y protagonista en este trayecto.

A mi madre, mi hermana y su familia, que siempre apoyan y acompañan todos mis proyectos. Fabiana y tía Ely, por estar siempre con la palabra justa.

A mis compañeros de cátedra: Luciana, Marcelo L., Martín, Marcelo S., Alex y Gabriel. Por su ayuda en las aulas y en el campo, para así llegar a cumplir con todas las actividades.

A mis compañeros de maestría, mi "familia balcarceña". Lía, Lauri, Gabi, Andrés, Nelsis y Lucas. La charla y el intercambio con ustedes, sigue dando sus frutos.

También quiero agradecer a la Dirección de Campo de la FCA-UNR, en sus distintas gestiones. Pablo, Ceci, Martín, Emanuel e Iván. Sin su trabajo, sería impensable desarrollar trabajos como éste.

A todo el personal de campo de la FCA que en estos años estuvo involucrado, pero especialmente a Julio y Sofi, "tamberos de la facu", por su ayuda y esos mates que acompañan en todo momento.

Agradezco muchísimo la oportunidad de realizar este recorrido en un entorno como el brindado por la FCA-UNR. En especial, fue muy grato y enriquecedor trabajar con estudiantes de la facultad que se involucraron a través de ayudantías o prácticas pre-profesionales. A todos ellos gracias por traer sus inquietudes y a la vez, diversión a cada una de las actividades.

A Micaela, Brenda y Gonzalo, con su guía desde el posgrado, alivianan muchísimo el trabajo de todos los estudiantes.

A los docentes de las cátedras que siempre estuvieron para el intercambio y asesoramiento. Sergio, Bety y Néstor (Manejo de Tierras). Nidia y Cacho Gosparini (Fisiología vegetal).

Al equipo del Instituto de Investigación en Señales e Inteligencia Artificial (sinc(i)), UNL/CONICET. Leo G., Leo R., José C., Luciano MR., Mariano F., Juan C. Por su asesoramiento en la implementación y análisis acústico.

DEDICATORIA

A Martín Nalino
Por tu apoyo incondicional

PUBLICACIONES Y ARTÍCULOS DE DIFUSIÓN

Revista internacional

- PLANISICH, A.; UTSUMI, S. A.; LARRIPA, M.; GALLI, J. R. 2021. Grazing of cover crops in integrated crop-livestock systems. *Animal*. 15 (1). 100054.

Publicaciones de difusión

- PLANISICH, A.; LARRIPA, M.; GALLI J. 2017. Evaluación de raigrás anual bajo pastoreo. *Agromensajes de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR*. 47:14-19.
- PLANISICH, A.; LARRIPA, M.; MONTICO, S.; BONEL, B.; DI LEO, N.; GALLI, J. R. 2017. A largo plazo el pastoreo del cultivo de cobertura aumenta los rendimientos de la soja sucesora. 40° Congreso Argentino de Producción Animal. *Revista Argentina de Producción Animal*. Vol. 37(1).
- GALLI, J.; PLANISICH, A. 2018. El rol del pastoreo en los sistemas integrados agrícolas-ganaderos. *Revista Acaecer*. 509: 44-50.
- ROTH LAGOS, G.; PAGANINI, J.; SALLOVITZ, M.; LARRIPA, M.; PLANISICH, A. 2018. Efecto de la altura de pastoreo sobre la productividad de raigrás anual y la respuesta animal en sistemas integrados. *II Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias*.
- PLANISICH, A. 2019. Disertación en el seminario: "El pastoreo y los sistemas integrados". Organizado por la Secretaría de posgrado de la FCA-UNR.
- JIMENEZ-ROSALES, J.; PLANISICH, A.; ALMIRÓN, S.; SALLOVITZ, M.; GALLI, J. 2019. Ganancia de peso y comportamiento en pastoreo de vaquillonas holando argentino con diferentes intensidades de pastoreo. *IV Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias*.
- SALLOVITZ, M.; PIGHIN, R.; PICCOLOTTI, N.; BIASI, V.; ZANAVRE, S.; GOTTI, G.; BARBERO, S.; FIORE, A.; TOMASSETTI, A.; PLANISICH, A. 2022. El pastoreo de cultivos de servicio no afecta la producción de los cultivos de cosecha sucesores. *VII Jornadas de Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR - I Reunión Argentina – Chile de Ciencias Agrarias*.
- BONEL, B.; MONTICO, S.; DI LEO, N.; PLANISICH, A.M.; GALLI, J. R. 2022. ¿Es posible pastorear los cultivos de servicio sin perder beneficios en el suelo? *Agromensajes de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR*. 64: 3-6.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA.....	4
PUBLICACIONES Y ARTÍCULOS DE DIFUSIÓN	5
ÍNDICE GENERAL	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
LISTADO DE ABREVIATURAS	12
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	16
CAPÍTULO 1:	17
INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	17
Introducción.....	17
Hipótesis general	19
Objetivo general	19
Organización de la tesis	20
Revisión bibliográfica	21
Sustentabilidad y sistemas integrados agrícola ganaderos.....	21
Crecimiento de las pasturas, intensidad de defoliación y manejo del pastoreo	24
Producción animal y proceso de pastoreo	28
Estimación de consumo y biotelemetría acústica.....	32
CAPÍTULO 2:	34
EXPERIMENTO 1: EFECTO DEL PASTOREO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS ESTIMADO A MEDIANO PLAZO	34
INTRODUCCIÓN.....	34
MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
Descripción del área de trabajo.....	36
Procedimiento experimental	38
Evaluación de la producción de raigrás anual	42
Evaluación de la producción animal	43
Evaluación de la producción del cultivo de soja.....	43
Evaluación del sistema integrado	44
Análisis estadístico.....	44
RESULTADOS	47
Producción de raigrás anual.....	47
Efecto acumulado del pastoreo en la producción de biomasa total	50
Calidad nutricional del raigrás anual	51

Producción animal.....	52
Producción del cultivo de soja	55
Efecto acumulado del pastoreo en el rendimiento en grano del cultivo de soja.....	57
Producción del sistema integrado.....	57
DISCUSIÓN.....	59
Producción de biomasa total de raigrás anual	59
Respuesta animal	61
Rendimiento del cultivo de soja	64
Evaluación del sistema integrado	67
CONCLUSIONES	68
CAPÍTULO 3:	69
EXPERIMENTO 2: IMPORTANCIA DE LA INTERFASE PLANTA-ANIMAL EN LA PRODUCTIVIDAD ANIMAL ESTIMADA EN EL DE CORTO PLAZO.....	69
INTRODUCCIÓN.....	69
MATERIALES Y MÉTODOS.....	71
Respuesta animal	71
Procedimiento experimental.....	71
Comportamiento ingestivo y consumo de materia seca.....	71
Procedimiento experimental.....	71
Descripción de los equipos de registro acústico	72
Registros acústicos y animales experimentales	73
Procesamiento de registros acústicos y variables analizadas	74
Análisis estadístico.....	77
RESULTADOS	80
Respuesta animal	80
Comportamiento ingestivo y consumo de materia seca.....	82
Tiempos de pastoreo y rumia.....	82
Consumo de materia seca y comportamiento ingestivo	83
Asignación de movimientos mandibulares y tasa de bocados.....	84
DISCUSIÓN.....	90
CONCLUSIONES	95
CAPÍTULO 4:	96
EXPERIMENTO 3: VERIFICACIÓN DEL MÉTODO ACÚSTICO PARA SU USO EN ANIMALES JÓVENES (Ajuste metodológico).....	96
INTRODUCCIÓN.....	96
MATERIALES Y MÉTODOS.....	97
Procedimiento experimental	97
Registros Acústicos	99

Procesamiento de las señales y variables analizadas	100
Consumo de materia seca	101
Análisis estadístico	102
RESULTADOS	105
Pasturas y sesiones de pastoreo.....	105
Consumo de materia seca y comportamiento ingestivo.....	106
Asignación de movimientos mandibulares.....	107
Descripción de los sonidos.....	109
Modelo para estimación de CMS en vaquillonas	110
DISCUSIÓN.....	114
Consumo y comportamiento ingestivo.....	114
Variables acústicas y modelo de predicción	117
CONCLUSIONES	121
CAPÍTULO 5:	122
DISCUSIÓN GENERAL.....	122
CONCLUSIÓN FINAL.....	127
AGRADECIMIENTOS FINALES	128
BIBLIOGRAFÍA.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema integrado agrícola-ganadero de rotación anual de raigrás anual bajo pastoreo y soja sucesora	18
Figura 2: Características estructurales y morfogénicas que determinan el índice de área foliar y su relación con el ambiente y manejo de la defoliación	25
Figura 3: a) Acumulación neta de biomasa (AN) en raigrás perenne, tasa de crecimiento promedio (TCP) y tasa de crecimiento instantánea (TCI), porcentaje de intercepción lumínica (%IL) en un ciclo de rebrote. b) TCP en rebrotes de Índices de Área Foliar inicial: 0,5; 0,8; 1,1; 3,4; 5,3 y 6,8 numerados del 1 al 6 respectivamente.	26
Figura 4: Relación entre la tasa de crecimiento promedio (TCP) y el Índice de Área Foliar (IAF) promedio de pasturas defoliadas intermitentemente rebrotando desde IAF de 0,5; 0,8; 1,1; 3,4; 5,3 y 6,8 (líneas sólidas, enumeradas de 1 a 6 respectivamente) y con pastoreo continuo (línea de guiones).....	27
Figura 5: Escalas temporo-espaciales del proceso de pastoreo, comportamiento ingestivo y su relación con las principales características de las pasturas.....	30
Figura 6: Relación entre la estructura de la pastura y la tasa de consumo en rumiantes.	31
Figura 7: Diseño de campo.....	39
Figura 8: Vaquillonas holando argentino en las 4 intensidades de pastoreo y su altura objetivo	41
Figura 9: Biomasa total (kgMS/ha) de raigrás anual promedio a) de 2013 a 2015 y b) de 2016 a 2019.	47
Figura 10: Biomasa remanente (kgMS/ha) de raigrás anual a) 2013 a 2015 y b) de 2016 a 2019..	50
Figura 11: a) Digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS, %) evaluada entre 2014 y 2019, y b) contenido de proteína bruta (PrB, %) entre 2017 y 2019.....	52
Figura 12: Relación lineal entre Carga animal (cab/ha) y la Altura de pastoreo (cm) promedios para los años de 2014 a 2019.....	54
Figura 13: Relación cuadrática entre la GPV (kg/día, línea roja) y Producción de carne (kg/ha, línea azul) con la altura para los años 2014 a 2019.	55
Figura 14: Rendimiento de grano promedio de cada año del cultivo de soja (kgMS/ha).	56
Figura 15: Fracción de una señal de sonido de un turno de pastoreo editada y procesada mediante el programa Audacity	72
Figura 16: Dispositivo para el registro acústico.....	72
Figura 17: Vaquillonas del Experimento 1 con equipos de registro acústico durante la grabación de pastoreo en períodos de 24 h.....	73
Figura 18: Fracción de una señal de sonido editada y procesada mediante el programa Audacity. Se muestra la identificación y segmentación de actividades de Pastoreo, Rumia y Otro.	75
Figura 19: Modelo de análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan la producción de carne (kg/ha) y el efecto de la altura de pastoreo (cm), para los años 2018 y 2019 (N=24).	78
Figura 20: Modelo de análisis por paso de las variables que determinan el consumo de materia seca utilizando los datos obtenidos en 2018 (N=16).....	79
Figura 21: Modelo de análisis por paso de las variables que determinan el tiempo por bocado utilizando los datos obtenidos en 2018 y 2019 (N=29).....	79

Figura 22: Ganancia de peso vivo (GPV; $R^2 = 0,79$; RCME = 0,11) de los años 2018 y 2019.	80
Figura 23: a) Biomasa ofrecida en función de la altura de pastoreo ($R^2 = 0,66$; RCME = 7,22; $p < 0,001$). b) Carga animal en función de la biomasa ofrecida, promedio de los años 2018 y 2019.	81
Figura 24: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan la producción de carne (kg/ha) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para los años 2018 y 2019 (N=24).	82
Figura 25: Respuesta del comportamiento ingestivo a la intensidad de pastoreo. a) Consumo de materia seca. b) Tasa de consumo de materia seca (gMS/h). c) Peso de bocado (gMS). d) Masticaciones totales por gMS (Mtot.gMS).	84
Figura 26: Respuesta de los movimientos mandibulares a la intensidad de pastoreo. a) Tasa de movimientos mandibulares. b) Tasa de bocados (B/min)	86
Figura 27: Respuesta de los movimientos compuestos a la intensidad de pastoreo. a) Proporción de movimientos compuestos (MC/MM). b) Movimientos compuestos por bocado.	86
Figura 28: Respuesta de las masticaciones a la intensidad de pastoreo y de la tasa de bocados a los movimientos mandibulares por bocado. a) Masticaciones total por bocado (Mtot/B). b) Tasa de bocados (B/min)	87
Figura 29: Respuesta de las masticaciones por bocado al peso de bocado	87
Figura 30: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan el consumo (gMS/día) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para la campaña 2018-19 (N=16).	88
Figura 31: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan el tiempo por bocado (s/B) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para las campañas 2018-19 y 2019-20 (N = 29).....	89
Figura 32: Diseño de campo con la ubicación de las parcelas experimentales para las sesiones individuales de pastoreo de cada tipo de pastura.	98
Figura 33: Vaquillonas y vacas en los turnos de pastoreo de alfalfa (a) y raigrás anual (b)..	99
Figura 34: Marcación de los sitios de 1 m ² y corte de los remanentes en las parcelas de alfalfa (a) y raigrás anual (b).....	102
Figura 35: Relación del consumo de materia seca (CMS, gMS) con el tiempo real de pastoreo (min) y la energía de consumo (EC; (-) , adimensional).....	111
Figura 36: Correlación entre consumo de materia seca y variables acústicas y movimientos mandibulares totales (n) y tasas de los respectivos movimientos mandibulares (n/min). ...	112
Figura 37: Análisis del pastoreo desde distintas dimensiones y su efecto sobre la productividad del sistema integrado.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitaciones y temperaturas (T°) mensuales entre los años 2012 y 2021.....	37
Tabla 2: Manejo general del raigrás anual en cada año.....	40
Tabla 3: Manejo general del cultivo de soja en cada año.....	42
Tabla 4: Tasa de crecimiento (TC, kgMS/ha/día) y Días de crecimiento (n°) de raigrás anual.	49
Tabla 5: Análisis de la varianza del modelo para estimar la tendencia de la biomasa total de raigrás a través de los años (efecto acumulado) para los tratamientos con pastoreo de intensidad media baja (IMB-Sj) y baja (IB-Sj) y cultivo de servicio sin pastoreo (CS-Sj). Evaluado entre los años 2013 y 2019.	51
Tabla 6: Promedios de altura de pastoreo (cm), carga animal (CA, cab/ha), ganancia de peso vivo (GPV, kg/d) y producción de carne (kg/ha) en las distintas intensidades de pastoreo. .	53
Tabla 7: Promedio de rendimiento de grano de soja (kgMS/ha), rango entre el valor máximo y mínimo, coeficiente de variación (CV, %) y desvío estándar (DE, kgMS/ha) de cada tratamiento entre 2014 y 2020.	57
Tabla 8: Análisis de la varianza del modelo para estimar la tendencia del rendimiento en grano de soja a través de los años (efecto acumulado) evaluado entre los años 2014 y 2020.	57
Tabla 9: Producción anual de los sistemas en términos de energía (Gj/ha) y proteína digestible humana.....	58
Tabla 10: Peso vivo de las vaquillonas, altura del raigrás anual promedios y error estándar en las fechas de obtención de los registros acústico.	74
Tabla 11: Registros acústicos para el registro del tiempo de pastoreo y rumia, determinación del comportamiento ingestivo y cálculo del consumo de materia seca de vaquillonas holando argentino.....	74
Tabla 12: Efecto de la intensidad de pastoreo de raigrás anual sobre los tiempos diarios de pastoreo y rumia (min) de vaquillonas holando argentino.	82
Tabla 13: Edad, peso, dentición y tamaño de la cabeza de las vacas y vaquillonas.	97
Tabla 14: Características de las pasturas utilizadas en las sesiones de pastoreo.....	105
Tabla 15: Tiempo real promedio (min) de las sesiones de pastoreo.	106
Tabla 16: Efecto de la categoría y la pastura sobre el consumo de materia seca y el comportamiento ingestivo.	107
Tabla 17: Efecto de la categoría y la pastura sobre la asignación de los movimientos mandibulares.	109
Tabla 18: Efecto de la categoría y la pastura sobre las variables acústicas.	110
Tabla 19: Modelos de predicción del consumo de materia seca (CMS).	113
Tabla 20: Modelos seleccionados para diferente número de variables considerando los efectos de la pastura (alfalfa vs. raigrás anual) y la categoría (vaca vs. vaquillona).	113

LISTADO DE ABREVIATURAS

CS: Cultivo de servicio
A: Número de arranques
AB: Arranques por bocados
AIC: Criterio de información de Akaike
AT: Tasa de arranque (A/min)
B: Número de bocados
CA: Carga animal (cab/ha)
CMS: Consumo de materia seca (gMS)
Cp: Coeficiente Cp de Mallow
CS-Sj: Raigrás anual (cultivo de servicio) sin pastoreo/soja
CV: Coeficiente de variación
DIVMS: Digestibilidad in vitro de la materia seca (%)
EB: Energía promedio por bocado
EC: Energía de consumo
EE: Error estándar
EgMS: Energía por gMS
EM: Energía de las masticaciones puras
EMC: Energía de las masticaciones de los movimientos compuestos
EMCt: Energía total de las masticaciones de movimientos compuestos
EMt: Energía total de las masticaciones puras
FDN: Fibra insoluble en detergente neutro (%)
GPV: Ganancia de peso vivo (kg/día)
IAF: Índice de área foliar
IA-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad alta/soja
IB-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad baja/soja
IMA-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad media alta/soja
IMB-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad media baja/soja
M: Número de masticaciones puras
MB: Masticaciones puras por bocado
MC: Números de movimientos compuestos
MCB: Movimientos compuestos por bocado
MCT: Tasa de movimientos compuestos (MC/min)
MM: Número de movimientos mandibulares
MMB: Movimientos mandibulares por bocado
MMT: Tasa movimientos mandibulares (MM/min)

MT: Tasa de masticaciones puras (M/min)
Mtot: Número de masticaciones totales
MtotB: Masticaciones totales por bocado
PA: Proporción de arranques
PB: Peso de bocado (gMS)
PM: Proporción de masticaciones puras
PMC: Proporción de movimientos compuestos
Pmtot: Proporción de masticaciones totales
PrB: Proteína bruta (%)
Prod. Car: Producción de carne (kg/ha)
R²aj: R² ajustado
Sj-Sj: Soja pura sin cultivo de servicio
T: Tiempo de pastoreo (min)
TB: Tasa de bocados (B/min)
TC: Tasa de crecimiento (kgMS/ha/día)
TCMS: Tasa de consumo de materia seca (gMS/h)
Vc: Vaca
Vq: Vaquillona

RESUMEN

Los sistemas integrados agrícolas ganaderos con pastoreo de cultivos de servicio (CS) han resurgido como una opción superadora de los sistemas intensificados centrados en el monocultivo agrícola predominantes en la región Pampeana. El objetivo de esta tesis fue evaluar en el corto y mediano plazo el efecto de distintos niveles de intensidad de pastoreo sobre la productividad global de un sistema integrado agrícola ganadero del sur de la provincia de Santa Fe (rotación raigrás anual (*Lolium multiflorum*) – soja (*Glicine max*)) y en sus subsistemas de producción de raigrás anual (CS), producción animal individual y por unidad de superficie de vaquillonas holando argentino y del cultivo de soja sucesor. Se plantearon 3 experimentos: 1) Efecto del pastoreo sobre la productividad de los sistemas integrados estimado a mediano plazo. Sobre un diseño experimental de 3 bloques completos aleatorizados (repeticiones), se aplicaron 6 tratamientos que incluyeron monocultivo de soja, rotación de raigrás anual sin pastoreo – soja, y rotación de raigrás anual pastoreado con 4 intensidades – soja. El experimento se desarrolló entre 2012 y 2021, y se recolectó información principalmente a partir del 2014 para completar una base de datos de al menos 6 años. Se evaluó la productividad total de cada sistema, así como la producción de biomasa total del raigrás anual, la productividad animal como ganancia de peso vivo (GPV) y producción de carne por ha, y el rendimiento del cultivo de soja sucesor en cada tratamiento. Se realizó pastoreo continuo con vaquillonas holando argentino de $242 \pm 19,7$ kg de PV inicial. 2) Importancia de la interfase planta-animal en la productividad animal estimada en el corto plazo. Sobre el diseño anterior, durante 2 años, se estudió el comportamiento ingestivo y el consumo de materia seca alcanzado por las vaquillonas en cada intensidad de pastoreo para explicar la respuesta animal en cada tratamiento. Para esto se utilizó el método acústico. 3) Verificación del método acústico para su uso en animales jóvenes (Ajuste metodológico). Se evaluó y adaptó el método acústico para su uso en vaquillonas a partir de un ensayo comparativo con vacas. La productividad total del sistema se incrementó en los tratamientos con intensidad de pastoreo moderada (10 - 15 cm) en 6,70 % en términos de energía (Mj/ha) y un 8,00 % como proteína digestible humana (kg/ha). La producción total de raigrás anual fue mayor en las intensidades moderadas a bajas (15 – 20 cm) y si bien se registró una variación interanual, la mayoría de los años superó a la producción de los pastoreos más intensos y al CS sin pastoreo, dejando un remanente de biomasa similar al CS sin pastoreo. La producción de carne por ha en todos los años tuvo una respuesta cuadrática a la intensidad de pastoreo, el mayor valor se produjo a los 13,4 cm de altura promedio con un rango interanual de 9,05 a 15,7 cm. Esta respuesta fue resultado de las elevadas GPV en las intensidades intermedias a bajas y una carga animal intermedia. El rendimiento en grano de soja no se afectó con el pastoreo de los CS en ninguno de los años, y tuvo un rendimiento promedio de $3989 \pm 37,9$ kgMS/ha. Pese a la variabilidad interanual, los tratamientos

pastoreados mostraron una tendencia de mayor estabilidad en el rendimiento agrícola. Respecto a la GPV, el consumo diario fue el principal determinante. El consumo diario se explicó mayormente por la tasa de consumo promedio (TCMS) la cual fue máxima en alturas superiores a los 15 cm. A su vez, la TCMS fue determinada por el peso de bocados. Fue factible utilizar el método acústico para evaluar el comportamiento ingestivo y el consumo de vaquillonas en una escala diaria. Sin embargo, se requirió ajustar el modelo existente desarrollado en vacas adultas. Los ajustes se debieron principalmente a las diferencias entre ambas categorías en la relación de la energía del sonido de las masticaciones y cada unidad de consumo (gMS). En conclusión, es posible diversificar los sistemas agrícolas del sur de Santa Fe a partir del pastoreo de los CS. La intensidad de pastoreo cumple un rol importante en la determinación de los componentes de rendimiento del sistema. A intensidades intermedias, cercanas a los 15 cm, es posible lograr elevados niveles de producción animal sin perjudicar el rendimiento agrícola. La implementación del método acústico permitió medir de forma no invasiva los factores determinantes del comportamiento ingestivo y la respuesta productiva resultante.

Palabras clave: intensidad de pastoreo – rendimiento de soja - respuesta animal - comportamiento ingestivo - biotelemedría acústica.

ABSTRACT

GRAZING: A KEY FACTOR FOR PRODUCTIVITY IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS

The aim of this thesis was to evaluate in the short and medium - term the effect of varying levels of grazing intensity on the overall productivity of an integrated crop-livestock system in the southern Santa Fe (annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) – soybean double crop rotation). Three experiments were conducted: 1) Effect of grazing on the productivity of integrated systems estimated in the medium-term: Over a randomized complete blocks design with three replicates, six treatments were applied including soybean monoculture, rotation of annual ryegrass without grazing - soybean, and annual ryegrass grazed at four different intensities - soybean. The experiment was carried out between 2012 and 2021, to create a database of at least six-years. The total productivity, total herbage production of annual ryegrass, animal performance such as average daily gain (ADG) and live weight gain per ha (LWG), and the grain yield of soybeans were evaluated. Continuous grazing was implemented using Holstein heifers of 242 ± 19.7 kg of initial BW. 2) Importance of plant-animal interface in estimated short-term animal productivity: Based on the previous design, for 2 years, the ingestive behavior and dry matter intake achieved by the heifers at each grazing intensity were studied. For this, the acoustic telemetry was used. 3) Verification of the acoustic method for use in young animals (Methodological adjustment): The acoustic telemetry was evaluated and adapted for use in heifers based on a comparative trial with cows. The total productivity increased in treatments with moderate grazing intensity (10 - 15 cm) by 6.70% in terms of energy (Mj/ha) and 8.00% as human digestible protein (kg/ha). The total herbage production of annual ryegrass was higher at moderate to light intensities (15 – 20 cm). The LWG exhibited a quadratic response to grazing intensity across all years. The maximum predicted value occurred at an average height of 13.4 cm, with an interannual range of 9.05 to 15.7 cm. The soybean grain yield was not significantly affected by CC grazing in any of the years, and had an average yield of 3989 ± 37.9 kgDM/ha. Regarding ADG, daily intake was the main determinant. This was mainly explained by the average intake rate (IR), which maximum occurred at heights greater than 15 cm. It was feasible to use the acoustic telemetry to evaluate the intake of heifers in a daily scale. However, it was required to adjust the existing model developed in adult cows due to differences in the relationship between chewing sound energy and each unit of intake (gDM). In conclusion, the results support the grazing of CC to diversify the agricultural systems of southern Santa Fe. At intermediate intensities (15 cm) it is possible to achieve high levels of animal production without affect agricultural performance. The implementation of the acoustic telemetry allowed to understand the ingestive behavior and the resulting productive response.

Keywords: grazing intensity - soybean yield - animal response - ingestive behavior - acoustic telemetry

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Introducción

En la Argentina se produjo un proceso de sojización durante las últimas décadas, reflejado en un incremento de 27 veces la superficie sembrada entre la década del 70 y la última década (SAGyP, 2024), que ocasionó un desplazamiento y reducción de la superficie ganadera (Rearte, 2011; Lombardo *et al.*, 2014). Este proceso llevó a un rápido deterioro de los recursos naturales como el suelo, poniendo en riesgo la sustentabilidad futura de estos sistemas. En este contexto, los cultivos de servicio, definidos como aquellos que se siembran con el objetivo de proporcionar servicios ecosistémicos, se incorporan como estrategia para mitigar los efectos negativos de la agricultura especializada sobre el medio ambiente. La integración de los planteos de soja pura con ganadería, a través del pastoreo de cultivos de servicio anuales de invierno, surge como una opción de mayor sustentabilidad con relativa sencillez y quizás, como paso previo a rotaciones más complejas y de mayor plazo (Scheneiter *et al.*, 2024).

El pastoreo es considerado un proceso fundamental que afecta fuertemente la dinámica y el funcionamiento de los agro-ecosistemas (Carvalho *et al.*, 2018a). Sus componentes incluyen la forma de búsqueda del alimento por parte de los animales, cómo lo ingieren y procesan, en diferentes escalas temporo-espaciales (Ungar, 1996). En este proceso están comprendidos los efectos del animal sobre el sistema suelo-planta-ambiente a través de la defoliación, el reciclaje de nutrientes, el pisoteo y la generación de gases efecto invernadero (Carvalho *et al.*, 2018a; Lemaire *et al.*, 2023).

En sus inicios, la investigación sobre el pastoreo se centró en la maximización de la productividad animal y de las pasturas (Carvalho, 2013). A partir de los 60's, se destacó el énfasis en modelar de forma simple la relación entre la carga animal y la respuesta animal individual y por unidad de superficie (Aiken, 2016), con trabajos distintivos como los de Mott (1960) y Jones y Sandland (1974). También se establecieron numerosos estudios comparativos entre los métodos de pastoreo continuo y rotativo (Briske *et al.*, 2008). Un avance en el entendimiento de los resultados, ocurrió con la incorporación de conceptos de ecología del pastoreo como el de escalas temporo-espacial desarrollados por Bailey *et al.* (1996). Provenza *et al.* (2013) señalan que los comportamientos en pastoreo actuales son normalmente consecuencia del aprendizaje sobre experiencias pasadas que pueden perdurar en el tiempo y el espacio. Estos conceptos resultaron determinantes en el entendimiento de la utilización de los recursos forrajeros a nivel de paisaje por parte de los animales (Carvalho, 2013), así como su aplicación en la toma de decisiones a distintas escalas de los sistemas de producción (sistema, predio, lote y manchón).

Actualmente, los sistemas pastoriles están siendo rediseñados para articular la producción de alimentos y el cuidado del medio ambiente con el objetivo de aprovechar los efectos positivos del pastoreo en los sistemas de producción (Lemaire *et al.*, 2005, 2023). Este enfoque se desarrolla en el contexto de revalorización de los Sistemas Integrados, cuyo estudio resurge a partir de la necesidad de rever a los sistemas con el objetivo de cubrir la demanda creciente de alimentos, a través de la intensificación, pero de manera amigable con el ambiente (Franzluebbers y Martin, 2022). En este contexto, los servicios ecosistémicos aportados por un adecuado manejo del pastoreo se presentan como una herramienta determinante para cumplir este objetivo (Carvalho *et al.*, 2018b).

En esta tesis se estudia un sistema integrado agrícola-ganadero de rotación anual de raigrás anual (*Lolium multiflorum*) bajo pastoreo de vaquillonas holando argentino y soja (*Glycine max*) en el sur de la provincia de Santa Fe. Se analiza la productividad global del sistema y de sus 3 subsistemas: 1) producción de raigrás anual, 2) producción animal y 3) producción del cultivo de soja sucesor (Figura 1). El estudio se focaliza en la interacción planta-animal, a través del análisis de los mecanismos involucrados en el proceso de pastoreo y sus efectos en los distintos subsistemas. Para la medición de las variables del comportamiento ingestivo diario en pastoreo se ajusta y utiliza un método novedoso de la Ganadería de Precisión, basado en la biotelemedría acústica (Galli *et al.*, 2018; Lorenzón, 2022).

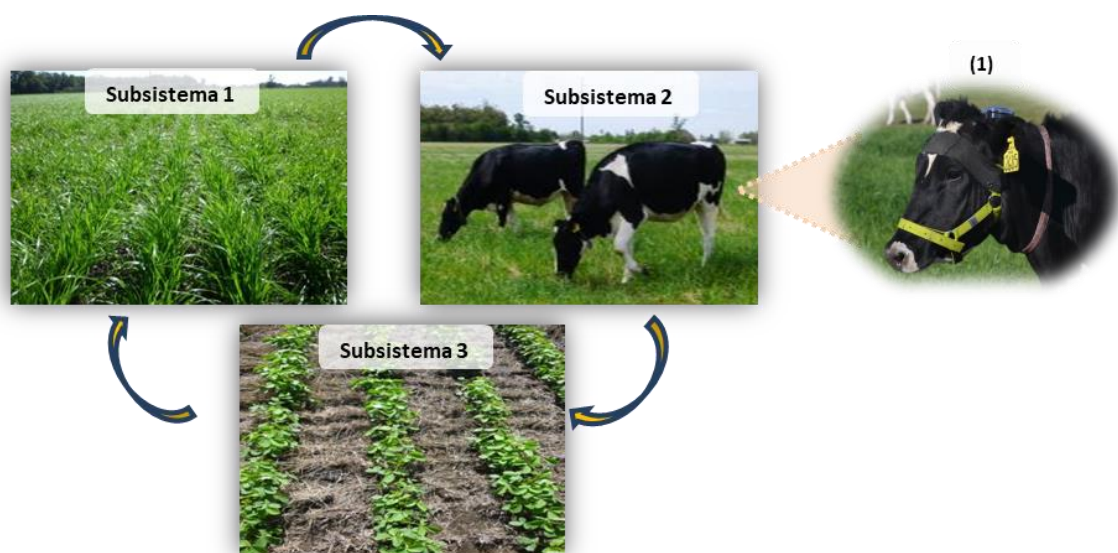


Figura 1: Sistema integrado agrícola-ganadero de rotación anual de raigrás anual bajo pastoreo y soja sucesora. Subsistema 1: Producción de raigrás anual; Subsistema 2: Producción animal; Subsistema 3: Producción de soja sucesora. (1): Vaquillona con equipo de biotelemedría acústica.

Hipótesis general

Los procesos involucrados en el pastoreo directo benefician la productividad de los sistemas integrados en el corto y mediano plazo.

Objetivo general

Evaluar en el corto y mediano plazo el efecto de distintos niveles de intensidad de pastoreo sobre la productividad global de un sistema integrado agrícola ganadero del sur de la provincia de Santa Fe (rotación raigrás anual – soja) y en sus subsistemas de producción de raigrás anual (cultivo de servicio), producción animal individual y por unidad de superficie de vaquillonas holando argentino y de la soja sucesora.

Organización de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente forma:

- En este Capítulo se introduce y realiza una revisión bibliográfica de los principales aspectos relacionados al tema de estudio.
- En el Capítulo 2 se presenta el Experimento 1, donde se analiza el efecto de la intensidad de pastoreo sobre la productividad de un sistema integrado agrícola ganadero establecido entre 2012 y 2021.
- El Capítulo 3 describe el Experimento 2. Basado en el dispositivo experimental anterior, se analiza el comportamiento ingestivo de los animales con la finalidad de explicar su respuesta productiva. Se emplea la biotelemetría acústica en la fase ganadera del sistema integrado durante 2 años.
- El Capítulo 4 presenta el Experimento 3 de ajuste metodológico. Se verifica el empleo de la biotelemetría acústica en animales jóvenes para el estudio del comportamiento ingestivo y el consumo de materia seca diario.
- Por último, en el Capítulo 5 se realiza una discusión general sobre los resultados obtenidos.

Revisión bibliográfica

Se reconoce la dificultad de dividir con límites precisos un área del conocimiento tan complejo e interrelacionado como el abordado en esta tesis. Para presentar una síntesis del estado del arte, la revisión bibliográfica se organizó subjetivamente a través de los siguientes aspectos:

- Sustentabilidad y sistemas integrados agrícola ganaderos
- Crecimiento de las pasturas, intensidad de defoliación y manejo del pastoreo
- Producción animal y proceso de pastoreo
- Consumo en pastoreo
- Estimación del consumo y la biotelemedría acústica

Sustentabilidad y sistemas integrados agrícola ganaderos

Durante la última mitad de siglo XX y principios del XXI, la producción agrícola a nivel mundial se incrementó masivamente a través del aumento de los rendimientos de los cultivos y de la extensión de la superficie agrícola cultivada, en diferente proporción según la región (Andrade, 2020). En Argentina, entre la década del 70 y la última década, el cultivo de soja tuvo el principal protagonismo, con un incremento de la superficie sembrada de 27 veces (SAGyP, 2024). En la provincia de Santa Fe, dicho incremento fue de 9 veces. Este proceso ocasionó un desplazamiento y reducción de la superficie ganadera (Rearte, 2011; Lombardo *et al.*, 2014). La consolidación en la producción soja también se caracterizó por el excesivo uso de recursos no renovables, así como por la elevada especialización y simplificación de los sistemas a escala de lote, campo, paisaje y región (Russelle *et al.*, 2007; Lemaire *et al.*, 2014).

Esta combinación de intensificación y simplificación, con la separación espacial de los sistemas agrícolas y ganaderos, especialmente en los países industrializados, ha devenido en impactos negativos crecientes sobre la sustentabilidad de los sistemas de producción de alimento (Lemaire *et al.*, 2014). Esto incluye la pérdida de biodiversidad, calidad ligada a la producción, regulación interna, resiliencia, estabilidad y adaptación a los cambios ambientales de los agroecosistemas (Andrade, 2020). También se incluyen las emisiones crecientes de gases efecto invernadero derivado del excesivo uso de fertilizantes, combustibles fósiles y deforestación, la degradación de suelos con materia orgánica disminuida por excesivos laboreos, acumulación de sales y erosión, así como la contaminación de cursos de agua con agroquímicos y fertilizantes (Tilman *et al.*, 2002; Franzluebbers *et al.*, 2014; Andrade, 2020).

Un aspecto relevante en relación a las consecuencias mencionadas, refiere a los ciclos de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Carbono (C). Estos elementos se encuentran fuertemente acoplados en ecosistemas de pasturas perennes o bosques, debido a la permanente interacción suelo-planta. Por medio de la fotosíntesis, el C, N y P mineral son transformados

en tejidos vegetales, luego a través de la descomposición en el suelo estos nutrientes se mineralizan (Lemaire; 2023) quedando disponibles para la vegetación. El tiempo de residencia del C en el suelo depende en parte de la concentración de N y lignina de la materia orgánica incorporada. Es así, que el tiempo de residencia del C en pasturas es alto debido a la alta relación C (y lignina): N de las hojas y las raíces senescentes que se incorporan como materia orgánica. Además, la elevada actividad biológica estimulada por los exudados radiculares y lombrices, promueve la formación de microagregados en el suelo con un alto grado de protección física convirtiendo a los ecosistemas de pasturas en sumideros de CO₂ (Lemaire *et al.*, 2014). Este acoplamiento de N y C evita la acumulación de N reactivo, principalmente nitratos (NO₃), como normalmente ocurre en los suelos agrícolas. Como consecuencia, las pérdidas de N por lixiviación (NO₃) o desnitrificación (óxido nitroso, N₂O) son generalmente bajos en suelos con pasturas perennes no disturbadas (Lemaire *et al.*, 2014, 2015). En los cultivos agrícolas se produce un desacoplamiento de los ciclos de N y P debido a la ausencia de vegetación e ingresos de C durante los períodos de barbecho, resultando en la acumulación de N reactivo susceptible de ser perdido por lixiviación o desnitrificación. Este riesgo aumenta con la incorporación de fertilizantes de origen mineral.

La agricultura enfrenta dos desafíos simultáneos: incrementar su producción para cubrir la demanda de alimentos de una población mundial creciente, y realizarlo de forma sustentable (FAO, 2018). Se plantea entonces la necesidad de un cambio de paradigma, para transformar una producción simplificada y protocolizada que optimiza la producción por unidad de trabajo humano, a una producción basada en la diversificación en todas las escalas (lote, sistema productivo, paisaje, región), que se proponga optimizar la productividad por unidad de recurso natural (Lemaire *et al.*, 2014).

Diversas prácticas se han incorporado para mitigar y disminuir los efectos negativos de la agricultura especializada, por ejemplo la minimización del laboreo, la siembra directa y la incorporación de cultivos de servicio (CS) en rotaciones agrícolas (Andrade, 2020). En una siguiente instancia, y a partir de la revalorización de los sistemas ganaderos como opción superadora, se ha propuesto su integración con la agricultura a través de la utilización de pasturas con pastoreo directo (Franzluebbbers y Martin, 2022). Esta integración temporo espacial a escala de predio, puede ser difícil de concretar sin los estímulos políticos-económicos necesarios (Scheneiter *et al.*, 2024). Por lo tanto, los planteos intermedios de integración, como la incorporación de CS y su pastoreo, aparecen como una opción más viable de intensificación sustentable en el corto plazo (Sekaran *et al.*, 2021; Franzluebbbers y Martin, 2022; Lemaire *et al.*, 2023).

Los sistemas integrados agrícola-ganaderos, proveen oportunidades para diversificar a través de la rotación de cultivos, mejorando el reciclado de los nutrientes y permitiendo una alta eficiencia en el uso de la energía, si bien se adjudica a la ganadería el perjuicio de la

producción de gases de efecto invernadero (Lemaire *et al.*, 2023). La incorporación de especies forrajeras, anuales o perennes, a la rotación puede proveer de servicios ecosistémicos para el sistema productivo general. Entre estos servicios se mencionan: mejoras en la fertilidad y biodiversidad de los suelos, menor incidencia de adversidades (malezas y plagas) y ahorro de energía debido a un menor laboreo y uso de fertilizantes (Carvalho *et al.*, 2018a y b, Schuster *et al.*, 2019; Franco *et al.*; 2021).

El consumo de la biomasa aérea de las pasturas por parte de los animales implica un desacople parcial entre el C, el N y el P. Aproximadamente el 70 % del C ingerido en el pastoreo es devuelto a la atmósfera como CO₂ vía respiración o CH₄ vía la fermentación ruminal. Por el contrario, el 70-80% del N ingerido es excretado como orina, y 20-30% continúa acoplado al C en las heces, cuya relación C:N es mucho menor al material senescente de las pasturas, acelerando los procesos de mineralización-inmovilización de los nutrientes (Parsons *et al.*, 2011). Se alcanza un nuevo equilibrio en la dinámica de estos nutrientes, con un reciclaje más rápido. La emisión de CH₄ aparece así como el precio ecosistémico a pagar, con la finalidad de obtener el servicio ecosistémico de mejora de la fertilidad edáfica (Lemaire *et al.*, 2023).

Sin embargo, a medida que aumenta la intensificación a través del aumento de la carga animal, el desacople del C-N por parte de los animales también aumenta progresivamente pudiendo generar efectos contraproducentes (Lemaire *et al.*, 2014). La concentración de excretas aumentará el riesgo de pérdidas de NO₃ por lixiviación y de emisión de N₂O (Lemaire *et al.*, 2015), reducirá el crecimiento de las pasturas afectando la fase de acople C-N mencionada, y por lo tanto la posibilidad de mejorar las cualidades edáficas.

Para llegar a un equilibrio entre la intensificación y los servicios ecosistémicos de las pasturas es necesario determinar la *Capacidad de Carga Animal Ambiental*, que se define como la carga animal (número de animales por unidad de superficie) donde se alcanza un equilibrio entre la capacidad de acople C-N de la vegetación y la capacidad de desacople C-N de la digestión animal (Lemaire *et al.*, 2015). La determinación de la Capacidad de Carga Animal Ambiental, requiere lograr 3 equilibrios entre los factores que aparecen contrapuestos (Soussana y Lemaire, 2014):

- Maximización del C cosechado (eficiencia de cosecha) *versus* maximización del retorno de C al suelo vía la broza (mantillo) que se degrada.
- Maximización de la digestibilidad del forraje para lograr una mayor respuesta animal *versus* la minimización de la digestibilidad de la broza para aumentar el tiempo de residencia de C en el suelo.
- Maximización de la carga animal *versus* la minimización de las emisiones de CH₄ y N₂O urinario y lixiviación de NO₃.

El desafío consiste en determinar la Capacidad de Carga Animal Ambiental de cada ambiente productivo que permita intensificar la producción de manera sustentable. Se requiere un enfoque sistémico moderno para no volver a los antiguos sistemas productivos de diversificación elevada y baja productividad, o para no limitar la discusión sobre la incorporación de la ganadería debida a su producción de metano, sin considerar el balance general de nutrientes y los múltiples servicios agroecosistémicos aportados por dicha actividad (Lemaire *et al.*, 2023).

Un gran número de estudios demuestran que los sistemas integrados tienden a ser más sustentables que los sistemas agrícolas o ganaderos especializados (Carvalho *et al.*, 2018b; Sekaran *et al.*, 2021). Los mejores resultados en términos de producción se alcanzan con intensidades de pastoreo intermedias a bajas (Kunrath *et al.*, 2014; de Souza Filho *et al.*, 2019; Planisich *et al.*, 2021), en coincidencia con los escenarios donde se alcanzan los mejores desempeños ambientales (Carvalho, 2013). Sin embargo, los resultados productivos varían en función de las condiciones ambientales y de manejo. Así, resulta importante conocer este tipo de respuesta en ambientes a nivel local, tanto en el corto (2-3 años) como en el mediano plazo (6-7 años) para evaluar los manejos en un amplio rango de condiciones climáticas y el efecto acumulado en el sistema.

Crecimiento de las pasturas, intensidad de defoliación y manejo del pastoreo

En pasturas en estado vegetativo, la biomasa foliar o el Índice de Área Foliar (IAF) determinan la proporción de radiación solar incidente que es capaz de interceptar y con ello su capacidad de crecimiento. Es decir, la capacidad de acople de C, N y P del sistema. En las pasturas de gramíneas el IAF se define a partir de los caracteres estructurales: longitud de hojas, densidad de macollos y hojas vivas por macollo (Figura 2). Éstos a su vez son definidos por los caracteres morfogénéticos, que también son afectados por el ambiente (temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes). Tal es así que, la longitud de las hojas depende de la relación entre las tasas de elongación y aparición ya que, para cada genotipo, el período de elongación es una fracción constante del intervalo de aparición de hojas. La densidad de macollos es potencialmente mayor en especies que tienen mayor tasa de aparición de hojas y viceversa. Así especies con mayor velocidad de aparición de hojas se caracterizan por presentar mayor densidad de macollos los cuales son de menor tamaño si se los compara con otras especies con menor densidad de macollos. Por último, el número de hojas vivas por

macollo es el producto de la vida media foliar de una hoja y la tasa de aparición foliar (Figura 2, Lemaire y Chapman, 1996).

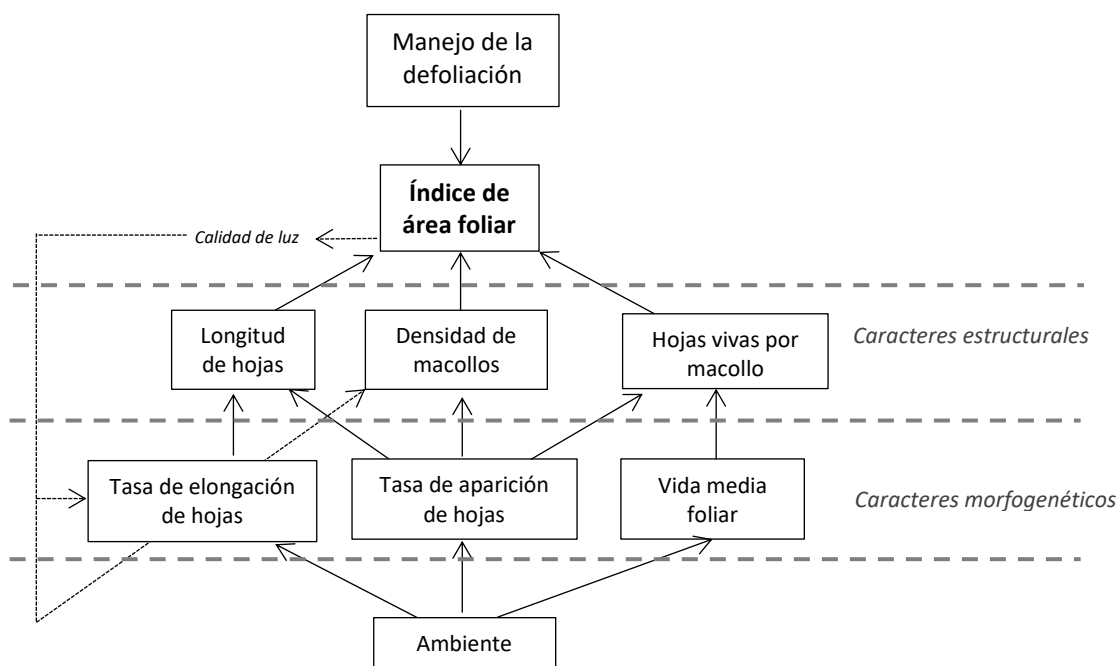


Figura 2: Características estructurales y morfológicas que determinan el índice de área foliar y su relación con el ambiente y manejo de la defoliación (Lemaire y Chapman, 1996).

La capacidad de interceptar radiación de las pasturas se encuentra fuertemente ligada al manejo de la defoliación a través de la frecuencia e intensidad con que los animales realicen el pastoreo. Luego de una defoliación, la prioridad fisiológica de las plantas es reconstituir los órganos fotosintéticos (Fulkerson y Donaghy, 2001). La acumulación neta (AN) de materia seca o carbono resulta del balance entre la tasa de fotosíntesis neta (fotosíntesis bruta menos respiración de la planta y crecimiento radicular) y la tasa de senescencia. Durante un ciclo de rebrote, la AN describe una función sigmoidea (Figura 3, Parsons *et al.*, 1988) en la que se identifican 3 fases. La fase inicial denominada fase lag o retardada se caracteriza por un crecimiento muy lento. Posteriormente, durante la fase exponencial, la tasa de crecimiento instantánea (TCI), es decir, el aumento de biomasa aérea en cada momento, aumenta y llega a su máximo como consecuencia de la interceptación casi total de la radiación solar incidente (95%). En este punto el sombreado y la respiración de las hojas inferiores producen una disminución en la TCI, por lo cual, en la fase final se alcanza el techo de AN cuando la pérdida por senescencia y respiración iguala a la ganancia por fotosíntesis y la TCI disminuye hasta cero.

El manejo adecuado del pastoreo contempla, desde el punto de vista productivo, lograr un balance entre el máximo nivel de interceptación lumínica posible y la cosecha del forraje antes de que inicie la senescencia de dicho crecimiento. Parsons *et al.* (1988) estudiaron el

crecimiento de raigrás perenne con distintas intensidades de defoliación y llegaron a la conclusión de que para cumplir con el objetivo antes mencionado y maximizar la biomasa cosechable, se debía defoliar cuando finaliza la fase exponencial de la AN (Figura 3a), lo cual coincide con la máxima tasa de crecimiento promedio¹ (TCP). En este estado la pastura crece a tasas máximas, lo que implica que utiliza los recursos de manera eficiente sin pérdidas por senescencia. Si el rebrote se inicia con elevada biomasa remanente, el momento óptimo de pastoreo se adelantará, al igual que el inicio de la senescencia (Figura 3b). Cabe señalar, que al mencionar a las pérdidas por senescencia, refiere a parte de la biomasa que de forma planificada se espera cosechar. Por el contrario, la biomasa remanente determinada a través de la intensidad de pastoreo, se considera una “pérdida programada”, con un importante rol en el reciclado de nutrientes a partir de su incorporación al sistema como broza (Parsons *et al.*, 2011).

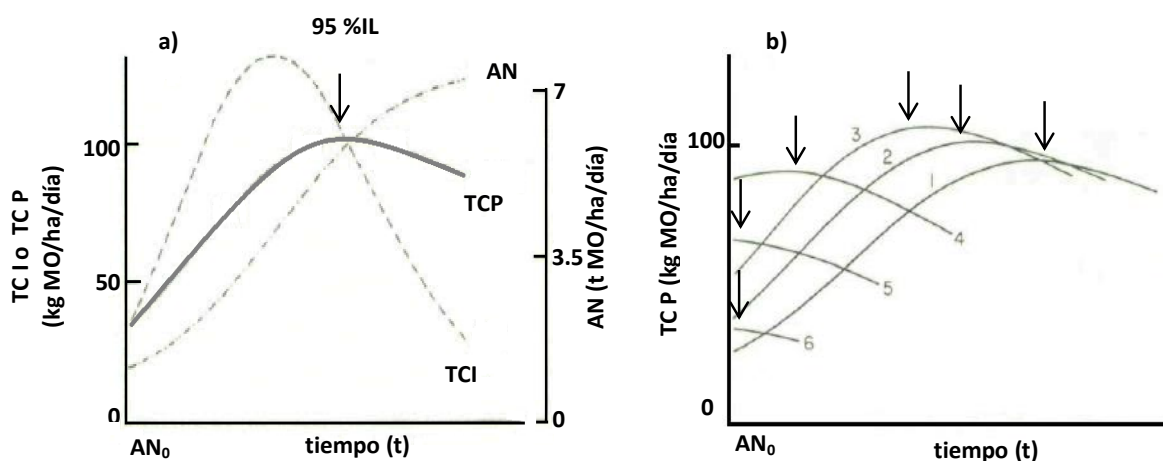


Figura 3: a) Acumulación neta de biomasa (AN) en raigrás perenne, tasa de crecimiento promedio (TCP) y tasa de crecimiento instantánea (TCI), porcentaje de intercepción lumínica (%IL) en un ciclo de rebrote. b) TCP en rebrotes de Índices de Área Foliar inicial: 0,5; 0,8; 1,1; 3,4; 5,3 y 6,8 numerados del 1 al 6 respectivamente. Las flechas indican el momento óptimo de pastoreo en cada caso. (Adaptado de Parsons *et al.* (1988)).

¹ La tasa de crecimiento (TC) promedio surge del cociente entre la biomasa acumulada en un período t y el período t. Se debe distinguir de la TC instantánea que es la pendiente en cada punto de una curva de acumulación de biomasa.

Con un método de pastoreo rotativo, la AN dependerá principalmente de la dinámica de expansión de las hojas y el tiempo que tarde en alcanzar el IAF óptimo. Con un pastoreo continuo, estará determinado principalmente por el IAF al cual la pastura es mantenida en equilibrio siendo mayor la tasa de crecimiento si dicho estado corresponde al 95% de radiación incidente. Como demuestran Parsons *et al.* (1988), bajo una misma base de comparación como el IAF promedio, ambos manejos forman parte del mismo modelo de respuesta (Figura 4), donde además, la TCP resulta en los valores más altos para niveles de IAF promedio intermedio.

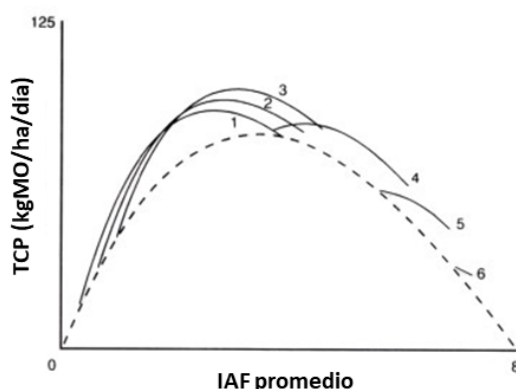


Figura 4: Relación entre la tasa de crecimiento promedio (TCP) y el Índice de Área Foliar (IAF) promedio de pasturas defoliadas intermitentemente rebrotando desde IAF de 0,5; 0,8; 1,1; 3,4; 5,3 y 6,8 (líneas sólidas, enumeradas de 1 a 6 respectivamente) y con pastoreo continuo (línea de guiones). (Adaptado de Parsons *et al.* (1988)).

De lo expuesto se deduce que la AN está determinada por un equilibrio dinámico entre los flujos de crecimiento, senescencia y el consumo de forraje. El IAF que define el porcentaje de intercepción lumínica dependerá directamente del equilibrio entre dichos flujos y determinará la cantidad de C que entra al sistema (Lemaire y Chapman, 1996). Para un amplio rango de especies y de manejos de defoliación, la relación entre el IAF y la altura de la pastura (Bircham y Hodgson, 1983) permite utilizar esta última como medida de fácil medición para las decisiones de manejo.

Como fue mencionado, se ha propuesto que un manejo adecuado de las pasturas contempla maximizar la AN basando las decisiones en la TCP. Diferentes opciones de manejo definidas en relación al método de defoliación y la carga animal se han planteado para maximizar la eficiencia de utilización, considerando además caracteres morfogenéticos, principalmente la vida media foliar (Lemaire y Agnusdei, 2000; Lemaire *et al.*, 2009). También se han sumado consideraciones desde el punto de vista animal para definir como óptimos, aquellos manejos que optimizan el consumo animal, contemplando las variaciones en el comportamiento ingestivo (Carvalho, 2013). La incorporación del pastoreo en los sistemas integrados, pretende articular además nuevas consideraciones para aprovechar los distintos

servicios ecosistémicos que ofrece la implantación y pastoreo de las pasturas (Carvalho *et al.*, 2018b; Lemaire *et al.*, 2023).

Producción animal y proceso de pastoreo

La producción animal está fuertemente regulada por la interfase planta-animal y la forma en que se afecta esta interfase a partir del manejo del pastoreo aplicado. El manejo del pastoreo puede definirse como el conjunto de acciones realizadas para manipular el comportamiento de los animales con el fin de cumplir uno o varios objetivos (Allen *et al.*, 2011). Entre los objetivos se incluye la optimización de la producción, de la eficiencia de utilización y de la persistencia de las pasturas, así como la maximización de la producción animal medida a través de la ganancia de peso vivo (GPV) o la producción por unidad de superficie, además de aprovechar los servicios ecosistémicos emergentes del pastoreo (Lemaire y Chapman, 1996; Carvalho *et al.*, 2018b; Sollenberger *et al.*, 2020a). Básicamente, el manejo del pastoreo implica tomar decisiones sobre el momento, el método y la intensidad de pastoreo (Sollenberger *et al.*, 2020a).

Elegir el momento implica decidir cuándo ocurre el pastoreo en relación a la estación del año y el estado de crecimiento del recurso forrajero. En cuanto al método, se refiere a elegir por alguna de las distintas variables que se agrupan entre pastoreo continuo o rotativo (Sollenberger *et al.*, 2020a), cuya principal diferencia se encuentra en la distribución temporo-espacial de los animales sobre la pastura (Carvalho *et al.*, 2018b). Si bien la comparación de resultados productivos entre ambos métodos ha sido objeto de debate por muchos años, la bibliografía no muestra acuerdo sobre una clara ventaja de uno respecto al otro (Briske *et al.*, 2008; Sollenberger *et al.*, 2012). Únicamente Sollenberger *et al.* (2012), en su revisión, mencionan una ventaja del método rotativo sobre la productividad del forraje del 30% promedio, pero con una considerable variación (del 9 al 68%). Dicha revisión se basó en 23 estudios, donde solo 16 de ellos eran lo suficientemente detallados como para estimar la magnitud de la diferencia informada.

Finalmente, la intensidad se define como la severidad del pastoreo y por lo tanto está ligada a la carga animal. Puede expresarse en unidades relacionadas a los animales como cabezas o kg de peso vivo por unidad de superficie, en unidades relacionadas a la pastura como cantidad o altura de dicho forraje, ó partir de una combinación de ambas como la asignación (cantidad de forraje por kg de peso vivo animal) o presión de pastoreo (relación entre el peso vivo de los animales y la cantidad de forraje ofrecido) (Sollenberger *et al.*, 2020a). La bibliografía coincide en reconocer a la intensidad de pastoreo, y por ende a la carga animal, como el principal factor de manejo (Sollenberger *et al.*, 2012; Rouquette, 2015; Aiken, 2016; Carvahlo *et al.*, 2018b) ya que impacta sobre la calidad y productividad forrajera, así como sobre el consumo voluntario y la respuesta animal.

La relación entre la intensidad, o la carga animal, con la respuesta animal individual y por unidad de superficie ha sido extensamente estudiada (Aiken, 2016). Aunque no es posible describir un único modelo matemático de respuesta, se puede establecer que en general con bajas intensidades de pastoreo, lo que equivale a baja carga animal, la producción individual aumenta pero se afecta la producción por unidad de superficie. Con altas intensidades se afecta la respuesta individual lo cual disminuirá la producción por unidad de superficie a partir del momento en que los aumentos de carga animal no compensen la disminución en la respuesta individual (Sollenberger *et al.*, 2020b). El nivel de intensidad en el que se maximizan dichas respuestas es distinto, y generalmente la intensidad donde se maximiza la producción por unidad de superficie es mayor a la cual se maximiza la producción individual (Sollenberger *et al.*, 2020a). Por lo tanto, conocer cómo varía la productividad en función de variaciones en la intensidad de pastoreo en condiciones locales, resulta relevante para estimar bajo qué situación se obtiene la mayor productividad del sistema.

El consumo diario es uno de los factores más importantes que definen el nivel productivo como la ganancia de peso vivo (Sollenberger y Wallau, 2020). Su estudio es complejo ya que resulta de numerosas interacciones entre las características inherentes al forraje, al animal, al manejo y al ambiente (Allison, 1985).

Entre algunos de los factores que modifican el consumo, figuran la calidad del alimento, cuyo efecto tradicionalmente se explicó a través del modelo de control bifásico del apetito (Allison, 1985). Sin embargo, el mismo resulta incompleto o erróneo para entender el consumo en pastoreo ya que en estas situaciones el consumo también se encuentra condicionado por factores “no nutricionales” de la pastura (Poppi *et al.*, 1987), principalmente la oferta de biomasa aérea y sus características estructurales (altura, densidad, cobertura, relación hoja/tallo, etc.). Para un mejor entendimiento de la interfase planta-animal y el consumo resultante, se plantea un modelo temporo-espacial como el propuesto por Bailey *et al.* (1996), y el modelo de comportamiento ingestivo (Allden y Whittaker, 1970).

Bailey *et al.* (1996) sugiere interpretar el proceso de pastoreo a través de niveles jerárquicos de tiempo y espacio. Allí, el comportamiento animal responde a distintas características de las pasturas según el nivel, y a su vez, los niveles superiores se describen como la integración de los inferiores (Sollenberger y Wallau, 2020). Brevemente, se identifican 6 jerarquías espaciales crecientes: el bocado, la estación de alimentación, el manchón o parche, el sitio de alimentación, el campo o pastura y el hábitat. A los fines de esta tesis, se revisarán los incluidos entre bocado y el de pastura (Figura 5).

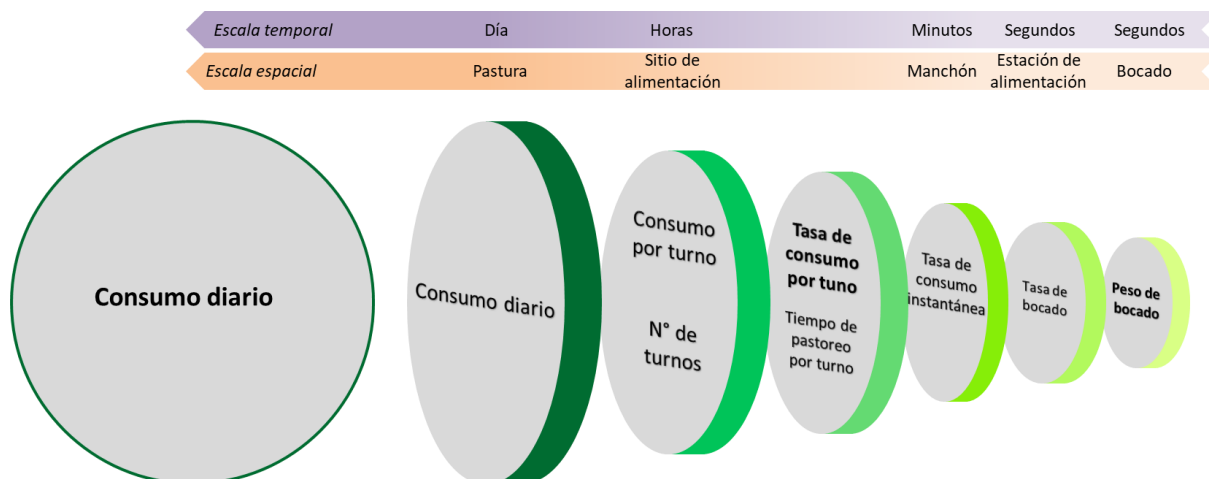


Figura 5: Escalas temporo-espaciales del proceso de pastoreo, comportamiento ingestivo y su relación con las principales características de las pasturas (Adaptado de Bailey *et al.*, 1996 y Sollenberger y Wallau, 2020).

El consumo diario se puede entender como la integración de todas las comidas (turnos) que realiza el animal en el día, obteniéndose un tiempo total de pastoreo (sumatoria de los turnos por la duración) y una tasa promedio diaria de consumo (Figura 5). En general el pastoreo se concentra en horas diurnas, y gran parte de la rumia ocurre a la noche, aunque este patrón de comportamiento está fuertemente afectado por la condición fisiológica de los animales, la calidad nutritiva de la pastura y las condiciones climáticas (Gregorini, 2012).

El modelo mecanicista de comportamiento ingestivo (Allden y Whittaker, 1970) asume el consumo diario como la integración del peso promedio de bocado, la tasa de bocado y el tiempo efectivo de pastoreo a lo largo del día (Figura 5). A su vez, la tasa de consumo es el resultado del peso por la tasa de los bocados. Finalmente, el peso está determinado por el volumen del bocado (área x profundidad) y la densidad del forraje comprendido en ese volumen (Burlinson *et al.*, 1991; Ungar, 1996).

El bocado es la unidad básica del proceso de pastoreo (Bailey *et al.*, 1996) y además, es el componente más importante en la determinación de la tasa de consumo (Laca *et al.*, 1992a; Cangiano *et al.*, 2002). Una disminución del peso de bocado tiende a ser compensado por una mayor tasa de bocados y así mantener la tasa de consumo. En general esa compensación es insuficiente, por lo tanto la tasa de consumo disminuye (Hodgson, 1981) y el animal aumenta el tiempo de pastoreo. Este último mecanismo de compensación en general también resulta insuficiente y, el consumo diario disminuye (Hodgson, 1985; Penning *et al.*, 1991).

En consecuencia, el peso del bocado resulta determinante en la variación de la tasa de consumo y el consumo diario. Se ha estudiado ampliamente su respuesta en relación a las características de las pasturas (Laca *et al.*, 1992a; Ungar, 1996; Boval y Sauvant, 2019). Se

destaca que, en las pasturas en estado vegetativo de gramíneas, el peso del bocado es principalmente determinado por la altura y la densidad volumétrica del forraje (Hodgson, 1981; Laca *et al.*, 1992a; Cangiano *et al.*, 2002). En cambio, en pasturas en estado reproductivo el peso del bocado y el consumo diario se ven fuertemente afectados por la acción de los tallos elongados. Estos tallos se convierten en una barrera vertical (limitan la profundidad del bocado) u horizontal (su dureza reduce el área del bocado) restringiendo el consumo de los animales (Benvenuti *et al.*, 2006; Mezzalira *et al.*, 2017).

Para profundizar la comprensión de los procesos involucrados en la tasa de consumo, el modelo mecanicista propuesto por Ungar, (1996; Figura 6), plantea que la tasa de consumo está inversamente relacionada con el tiempo de búsqueda y manipulación (aprehender y masticar) de cada bocado. Inicialmente se asumió que la aprehensión y masticación eran acciones mutuamente excluyentes (Ungar y Nony-Meir, 1988; Gross *et al.*, 1993; Baumont *et al.*, 2004), entonces el tiempo por bocado era la suma de los tiempos de aprehensión y masticación. Sin embargo, algunos trabajos con rumiantes en el corto plazo y a través del registro del sonido de las masticaciones encontraron que los vacunos (Laca *et al.*, 1994, Laca y Wallis deVries, 2000, Ungar *et al.*, 2006, Galli *et al.*, 2018) y los ovinos (Galli *et al.*, 2011) pueden masticar y arrancar el forraje en el mismo movimiento mandibular (movimiento compuesto de masticación y arranque), lo cual tiene una importante implicancia en los requerimientos de masticación de los forrajes.

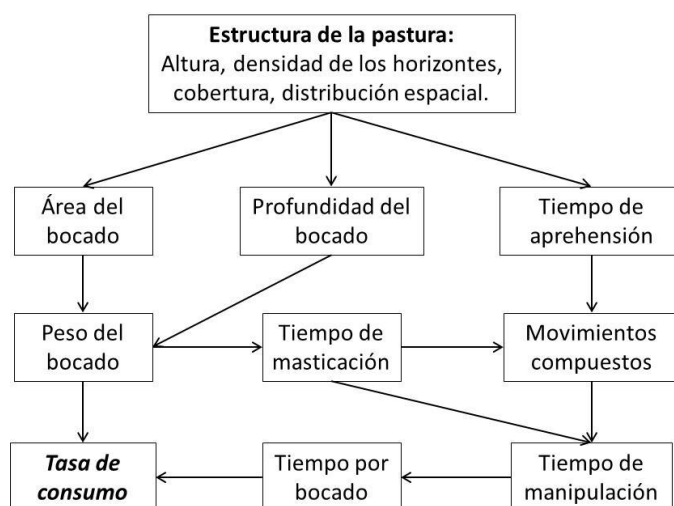


Figura 6: Relación entre la estructura de la pastura y la tasa de consumo en rumiantes (Adaptado de Ungar, 1996).

Los rumiantes pueden ajustar la tasa de bocados modificando la asignación de los movimientos mandibulares (por ejemplo, reduciendo las masticaciones por bocado o aumentando los movimientos compuestos), variando la tasa de movimientos mandibulares o ambas acciones simultáneamente. Esta capacidad es fundamental para explicar las variaciones en las tasas de consumo y en consecuencia en el consumo diario de materia seca

frente a cambios en las intensidades de defoliación (Galli *et al.*, 2018). Estas estrategias han sido ampliamente estudiadas en bovinos adultos, como los trabajos precedentes lo describen. Es importante mencionar que los animales más jóvenes muestran una menor eficiencia de masticación (Bae *et al.*, 1983; Baumont *et al.*, 2006), por lo tanto, resulta interesante investigar con mayor detalle cómo realizan la asignación de movimientos mandibulares en comparación con los animales adultos.

Estimación de consumo y biotelemetría acústica

Es fundamental realizar una estimación precisa del consumo de materia seca durante el pastoreo para cuantificar la ingesta de nutrientes por parte de los animales y su respuesta productiva resultante. Para su cuantificación se emplean diversas técnicas basadas en mediciones realizadas sobre la pastura o sobre los animales (Meijs, 1981; Akdağ y Ocak, 2019).

En esta revisión, no se pretende realizar una descripción exhaustiva de cada uno de los métodos conocidos, pero a grandes rasgos se pueden mencionar dos enfoques principales, uno basado en mediciones sobre las pasturas, donde el consumo se calcula como la diferencia entre la biomasa al inicio y al final del pastoreo (Meijs, 1981); y los métodos basados en los animales que incluyen la recolección de heces, el uso de marcadores y la digestibilidad (Mayes y Dove, 2000), así como cálculos a partir de índices fecales (Meijs, 1981) o de los requerimientos nutricionales de mantenimiento y producción en relación a la densidad energética de las pasturas, entre otros. Cada método presenta ventajas y desventajas, y la elección dependerá de los objetivos específicos y las circunstancias bajo las cuales se realizan las mediciones, incluyendo la escala temporal, grado de heterogeneidad, cantidad de animales, logística y disponibilidad de animales (Gordon, 1995). Sin embargo, el objetivo común es lograr estimaciones precisas con el menor costo, dificultad y tiempo de trabajo posibles. En este contexto, se ha propuesto la biotelemetría acústica como una opción superadora (Galli *et al.*, 2006a, 2011, 2018, Clamphan *et al.*, 2011), que permite obtener información valiosa y precisa del comportamiento en pastoreo, tanto para su caracterización en sí como para estimar el consumo en diferentes escalas temporales, sin afectar el comportamiento animal. Actualmente, esta metodología se utiliza a nivel experimental, con el potencial de aplicabilidad a escala comercial, por lo que actualmente se enmarca en el enfoque de ganadería de precisión (Andriamandroso *et al.*, 2016; Chelotti *et al.*, 2024).

La ganadería de precisión puede definirse como el conjunto de tecnologías aplicadas para el monitoreo en tiempo real de los animales, con el objetivo de gestionar la variabilidad temporal de la unidad básica de producción, el animal (Halachmi y Guarino, 2016). Bajo esta perspectiva, se reconoce una transición hacia el manejo individual (cada animal), en lugar de una producción basada en el manejo del rodeo, a partir del monitoreo de distintos parámetros

fisiológicos y de comportamiento. Su desarrollo en las últimas décadas responde a la necesidad de cubrir una demanda creciente de alimentos de forma sustentable y preocupada por el bienestar animal, con un uso más eficiente de los recursos (da Silva Santos *et al.*, 2023). Los componentes usualmente descritos incluyen: sensores para identificar comportamientos o estados en los animales, modelos predictivos que describen la respuesta de los animales a los estímulos ambientales y la comparación entre los modelos predictivos y los resultados obtenidos de los sensores (Andriamandroso *et al.*, 2016; Norton *et al.*; 2019). El desarrollo de tecnologías orientadas al comportamiento en pastoreo, se ha focalizado en la ubicación dentro de la parcela o campo del animal (GPS por ejemplo), la postura y, el movimiento de los animales, principalmente a través del uso de acelerómetros y más específicamente, movimientos mandibulares (Andriamandroso *et al.*, 2016). Entre otras cosas, se pretende identificar y cuantificar las principales actividades alimentarias como pastoreo y rumia, y en una menor escala, identificar los distintos movimientos mandibulares durante el pastoreo: arranque, masticación y movimientos compuestos de arranque-masticación (Chelotti *et al.*, 2024). En ese contexto la biotelemedición acústica del pastoreo, proveería información muy valiosa para analizar el comportamiento, y permitiría además, estimar tasas instantáneas de consumo durante el pastoreo (Galli *et al.*, 2018).

La precisión en la estimación del consumo diario (CV= 16-18%) a través del sonido se basa en la relación lineal que existe entre la energía contenida en el sonido de las masticaciones y la cantidad de materia seca ingerida (Galli *et al.*, 2006a, 2011, 2018). La precisión en la identificación de los eventos masticatorios (bocados, masticaciones de pastoreo y rumia y movimientos compuestos) se basa en la energía acústica y en otras características del sonido en distintas bandas de frecuencia (Laca y WalliesDeVries, 2000; Milone *et al.*, 2012; Galli *et al.*, 2018).

Esta metodología ha sido utilizada con éxito en vacas (Galli *et al.*, 2018) y en ovejas (Galli *et al.*, 2011) en períodos de tiempo relativamente cortos con pocos números de bocados. Recientemente, Lorenzón (2022) verificó la escalabilidad de las estimaciones realizadas en períodos de un turno de pastoreo a períodos de 24 h para estimar el consumo diario. Sin embargo, resulta necesario verificar y adaptar su uso en animales más jóvenes (vaquillonas de cría).

CAPÍTULO 2:

EXPERIMENTO 1: EFECTO DEL PASTOREO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS ESTIMADO A MEDIANO PLAZO

INTRODUCCIÓN

En esta sección se presenta un trabajo realizado sobre un sistema ganadero (recría pastoril de vaquillonas) y agrícola (producción de soja) para demostrar que la integración de estas actividades no perjudica la producción del cultivo agrícola sino, por el contrario, aumenta la productividad total del sistema. Se plantea y estudia la intensidad de pastoreo del recurso forrajero (raigrás anual, *Lolium multiflorum*) como principal herramienta de manejo y su impacto en la productividad.

Se implementó un experimento a partir del año 2012 y se extendió hasta el año 2021, donde los 2 primeros años (pre-experimentales) se ajustaron los protocolos de medición y manejo de los animales. El registro de información comenzó parcialmente en 2013 y se completó una base de datos robusta de al menos 6 años para medir el efecto en el corto (cada año) y mediano plazo (todos los años) de la incorporación de cultivos de servicios agroecosistémicos (raigrás anual) y su pastoreo con distintas intensidades sobre la producción animal y vegetal (raigrás anual y soja).

Las hipótesis específicas planteadas fueron:

1. El manejo de la intensidad del pastoreo, en el contexto de los sistemas integrados, aumenta la productividad total del sistema y la de sus subsistemas: 1) producción de raigrás anual, 2) producción animal y 3) producción de la soja sucesora.
2. El pastoreo de los cultivos de servicio con intensidad moderada aumenta la producción de raigrás anual en el corto y mediano plazo y en consecuencia la capacidad de carga y producción animal.
3. La producción de carne (kg/ha) presenta una respuesta cuadrática frente a distintas intensidades de pastoreo como producto entre la producción individual (kg/día) y la carga animal (cab/ha) resultante, alcanzando un máximo con intensidades moderadas de pastoreo.
4. El pastoreo de los cultivos de servicio con intensidad moderada resulta en un aumento de la producción del cultivo de soja sucesor en el mediano plazo, sin afectarla en el corto plazo.

Los objetivos específicos fueron:

1. Evaluar la producción de biomasa total (kgMS/ha) y la tasa de crecimiento (kgMS/ha/día) de raigrás anual (cultivo de servicio) con distintos niveles de intensidad de pastoreo, en el corto y mediano plazo.
2. Estimar y modelar la producción de carne (kg/ha) de vaquillonas holando argentino y la carga animal alcanzadas con distintos niveles de intensidad de pastoreo sobre el raigrás anual (cultivo de servicio) en el corto y mediano plazo.

3. Estimar el rendimiento del cultivo de soja sucesor para evaluar cómo es afectado por el pastoreo de raigrás anual (cultivo de servicio) en el corto y mediano plazo.
4. Estimar la productividad total del sistema para evaluar cómo es afectado por el pastoreo de raigrás anual (cultivo de servicio) en el corto y mediano plazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de trabajo

Se trabajó en un lote de 12 ha, perteneciente al Sistema Integrado Agrícola Lechero de la Facultad Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (FCA-UNR), ubicado en la localidad de Zavalla, Provincia de Santa Fe, Argentina (latitud 33° 1' 0" Sur, longitud 60° 52' 60" Oeste). Previamente, desde el año 2004 al 2011, el lote fue manejado en siembra directa, con una secuencia de raigrás anual (*Lolium multiflorum*) o avena (*Avena sativa*) en otoño-invierno y maíz (*Zea mays*) para silaje de planta entera o soja (*Glicine max*) para grano en primavera-verano.

En el lote experimental predomina el suelo Argiudol vértico, con un horizonte superficial franco limoso de 20 cm de profundidad. La posición que ocupa es de media loma alta, vinculada a pendientes compuestas, de escaso gradiente (menor a 0,2 %). El escurrimiento es lento, y la permeabilidad moderadamente lenta a moderada. El exceso hídrico temporario de estos suelos está vinculado a su reducida permeabilidad y no a oscilaciones de la capa freática, que fluctúa entre los 3 a 8 m de la superficie. Análisis de suelo de los primeros 5 cm, realizados durante el experimento presentaron valores promedios de 2,51 % de carbono, pH de 5,54, 33,6 ppm de N-NO₃ y 67 ppm de P soluble.

El clima regional es subhúmedo - húmedo mesotermal, con escaso a nulo déficit hídrico. Las temperaturas medias promedian en 17°C y oscilan entre 10 y 25 °C en invierno y verano, respectivamente. El período medio de heladas comprende de principios de junio a principios de septiembre con un desvío de 20 días. Las precipitaciones presentan un régimen pluviométrico semimonzónico cuya secuencia de mayor a menor lluvia es verano-primavera-otoño-invierno (Sacchi *et al.*, 2002; Coronel *et al.*, 2012). Según los registros históricos (1973-2020), promedió 966 mm anuales variando entre 511 y 1378 mm (Anibalini *et al.*, 2022). En la estación meteorológica adyacente al lote experimental, se registraron los datos de temperatura y precipitaciones mensuales de los años que abarcó el estudio (Tabla 1). En promedio, las temperaturas medias diarias fueron similares entre los distintos años, y promediaron 17,6 ± 0,10 °C. Las precipitaciones anuales acumularon en promedio 842 ± 78,5 mm, en el rango regular de precipitaciones, pero se destacan los mínimos registrados en 2013 y 2020 (542 y 551 mm, respectivamente) y el máximo en 2012 de 1378 mm. Las precipitaciones registradas en 2012, 2013 y 2020 se señalan como fenómenos anómalos (Anibalini *et al.*, 2020). Además, se distingue la cantidad de precipitaciones acumuladas en abril de 2016, que generaron el mayor retraso en la siembra de raigrás anual de todos los ciclos analizados.

Tabla 1: Precipitaciones y temperaturas (T°) mensuales entre los años 2012 y 2021.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total/ promedio
Período pre-experimental													
2012													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	74,2	217	120	9,20	86,7	8,5	0,00	120	93,8	307	98,3	244	1378
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	31,6	29,2	27,1	23,7	21,1	17,2	16,0	18	20,1	22,7	27,5	29,2	23,6
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	17,1	17,8	14,6	11,4	10,6	5,41	1,45	7,54	9,08	12,7	15,3	16,9	11,7
<i>T° medias promedio (°C)</i>	24,4	23,5	20,8	17,6	15,9	11,3	8,72	12,7	14,6	17,7	21,4	23,0	17,6
2013													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	31,3	73,7	36,2	36,0	49,1	10,2	19,5	0,00	18,1	90,3	106	72,3	542
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	30,8	27,9	25,5	25,3	20,4	18,0	16,7	18,6	21,6	25,9	27,3	33,0	24,2
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	16,5	15,7	12,9	11,0	8,50	5,48	5,38	3,06	8,30	12,2	15,4	18,9	11,1
<i>T° medias promedio (°C)</i>	23,7	21,8	19,2	18,1	14,4	11,7	11,0	10,8	14,9	19	21,3	25,9	17,7
Período experimental													
2014													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	123	266	150	77,6	29,3	17	32,4	0,00	75,4	78,9	147	96,7	1092
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	32,4	26,6	25,3	23,3	18,9	17,2	17,3	21,1	21,4	25,9	27,5	28,4	23,8
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	19,2	17,6	12,3	12,2	9,3	4,39	6,41	6,89	9,11	13,6	13,9	16,4	11,8
<i>T° medias promedio (°C)</i>	25,8	22,1	18,8	17,7	14,1	10,8	11,9	14,0	15,2	19,8	20,7	22,4	17,8
2015													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	99,6	49,7	126	41,8	126	20,6	47,5	138	11,5	87,9	107	56,8	913
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	28,9	28,1	27,6	27,2	21,8	19,5	17,9	18,8	19,7	21,3	25,7	30,2	23,9
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	17,5	16,7	15,5	13,3	10,8	6,5	4,83	8,84	7,59	10,7	14,3	20,2	12,2
<i>T° medias promedio (°C)</i>	23,2	22,4	21,5	20,3	16,3	13,0	11,4	13,8	13,6	16,0	20,0	25,2	18,1
2016													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	111	236	48,5	239	6,60	46,6	33,8	16,5	17,1	86,5	0,00	0,00	841
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	30,8	30,2	26,3	21,3	17,1	15,5	14,4	19,8	20,2	23	27,7	31	23,1
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	18,2	17,4	14,0	13	7,91	3,79	5,31	4,85	6,03	11,4	11,6	14,1	10,6
<i>T° medias promedio (°C)</i>	24,5	23,8	20,1	17,2	12,5	9,67	9,83	12,3	13,1	17,2	19,6	22,6	16,9
2017													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	81,7	29,5	149	10,6	33,3	24,5	25,8	41,9	162	44,4	35,4	163	800
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	30,3	29,1	27,3	24,1	19,9	18,8	17,6	19,5	20,5	23,9	27,9	30,9	24,2
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	17,5	17,9	14,9	11,6	9,67	6,12	7,82	6,06	6,27	9,2	12,4	15,7	11,3
<i>T° medias promedio (°C)</i>	23,9	23,5	21,1	17,9	14,8	12,5	12,7	12,8	13,4	16,6	20,2	23,3	17,7
2018													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	21,5	32,0	18,0	173	132	0,2	5,6	14,7	9,5	111	178	116	811
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	30,8	31,3	29,1	26,6	19,9	16,5	14,2	18,3	24,3	23,5	27,0	28,3	24,1
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	16,8	15,2	11,4	16,3	11	2,94	4,51	2,99	9,78	10,2	14,7	15,7	11,0
<i>T° medias promedio (°C)</i>	23,8	23,3	20,3	21,5	15,4	9,72	9,34	10,7	17,0	16,8	20,8	22,0	17,6
2019													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	162	69,5	136	61,2	67	30	9,7	3,00	23,8	65,9	73,6	75,1	777
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	28,7	29,0	25,6	24,6	20,4	17,7	16,5	18,1	21,8	23,4	28,8	30,2	23,7
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	17,0	15,9	12,9	11,7	9,50	8,14	3,35	5,35	5,61	11,4	15,7	15,5	11,0
<i>T° medias promedio (°C)</i>	22,9	22,5	19,2	18,2	15,0	12,9	9,94	11,7	13,7	17,4	22,2	22,9	17,4
2020													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	47,2	57,0	47,3	80,5	23,5	0,00	6,25	8,50	40,3	115	63,0	62,3	551
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	30,2	30,5	30,9	25,6	22,2	18,5	16,8	22,2	23,3	26,1	30,8	31,2	25,7
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	15,5	14,3	16,5	9,86	6,58	4,16	3,13	5,11	5,29	9,63	13,7	13,9	9,80
<i>T° medias promedio (°C)</i>	22,8	22,4	23,7	17,7	14,4	11,3	9,98	13,6	14,3	17,9	22,3	22,5	17,7
2021													
<i>Precipitaciones (mm)</i>	176	0,40	121	89,1	45,0	0,6	51,3	4	36,1	36,7	125	26,4	712
<i>T° máximas promedio (°C)</i>	31,8	30,9	28,5	26,6	21,0	17,4	17,7	20,7	20,7	26,2	28,4	32,5	25,2
<i>T° mínimas promedio (°C)</i>	17,5	14,6	14,8	11,2	6,11	4,24	3,51	4,16	10,2	10,5	14,3	16,7	10,7
<i>T° medias promedio (°C)</i>	24,7	22,8	21,7	18,9	13,5	10,8	10,6	12,4	15,5	18,4	21,3	24,6	17,9

En rojo, las precipitaciones anómalas de 2012, 2013, 2020 y abril de 2016.

Procedimiento experimental

Este experimento se inició en 2012, cuando se establecieron los tratamientos de rotación y pastoreo. El diseño experimental se repitió hasta el otoño de 2021, manteniendo constante la localización de los distintos tratamientos y, se completó una base de datos robusta de 6 años, iniciada en parte en 2013.

Cada año experimental abarcó una campaña ganadera/agrícola. De aquí en adelante, se nombrarán las prácticas y resultados mediante el año de inicio de la campaña, es decir, el año en que se siembra primero el raigrás anual y luego la soja sucesora.

Se aplicaron los siguientes 6 tratamientos de rotación anual, en un diseño de bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones, (Figura 7):

- 1) Soja pura sin cultivo de servicio (Sj-Sj)
- 2) Raigrás anual (cultivo de servicio) sin pastoreo/soja (CS-Sj)
- 3) Raigrás anual pastoreado con intensidad alta/soja (IA-Sj)
- 4) Raigrás anual pastoreado con intensidad media alta/soja (IMA-Sj)
- 5) Raigrás anual pastoreado con intensidad media baja/soja (IMB-Sj)
- 6) Raigrás anual pastoreado con intensidad baja/soja (IB-Sj)

Los tratamientos sin pastoreo (Sj-Sj y CS-Sj), se realizaron en parcelas fijas de 0,45 ha (Figura 7). En el caso de Sj-Sj, se mantuvo una rotación soja sobre soja, es decir, sin la siembra del cultivo de servicio. En CS-Sj, se rotó el cultivo de soja con cultivo de servicio raigrás anual (CS).

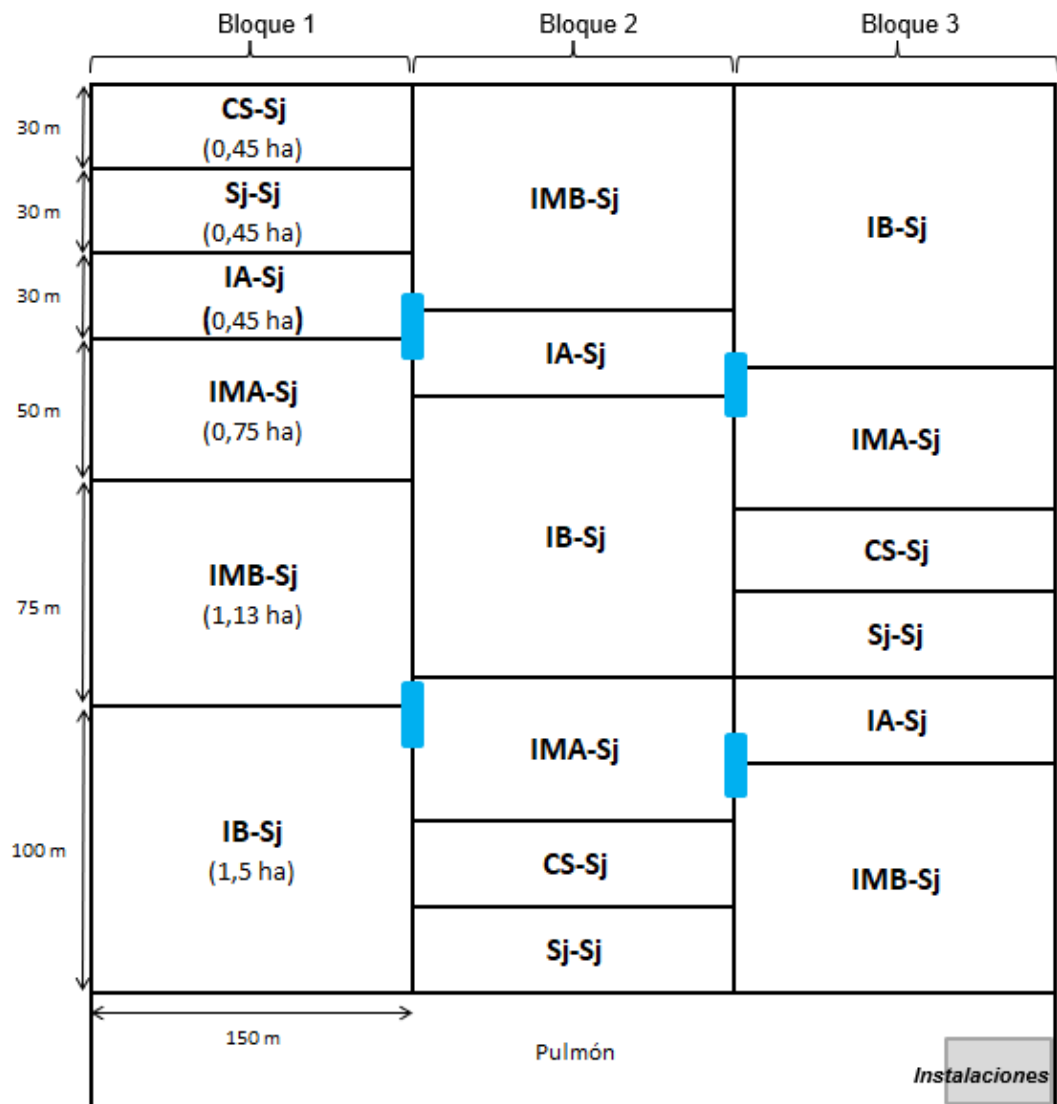


Figura 7: Diseño de campo. Sj-Sj: Soja pura sin cultivo de servicio; CS-Sj: Raigrás anual (cultivo de servicio) sin pastoreo/soja; IA-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad alta/soja; IMA-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad media alta/soja; IMB-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad media baja/soja; IB-Sj: Raigrás anual pastoreado con intensidad baja/soja. Los rectángulos celestes indican la ubicación de los bebederos compartidos. "Instalaciones" indica la ubicación de la balanza y los corrales para el manejo de animales.

En adelante, se mencionarán los tratamientos con raigrás anual directamente a través de la intensidad de pastoreo: IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta, IMB-Sj: Intensidad media baja, IB-Sj: Intensidad baja, CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo.

En los tratamientos con pastoreo del cultivo de servicio, se utilizaron parcelas fijas cuya superficie varió entre 0,45; 0,75; 1,13 y 1,5 ha para IA-Sj, IMA-Sj, IMB-Sj e IB-Sj, respectivamente (Figura 7). Al igual que en las parcelas de CS-Sj, el raigrás anual se sembró en directa con una densidad de 24 - 27 kg/ha, generalmente en el mes de abril a excepción del año 2016, donde las abundantes precipitaciones otoñales retrasaron la siembra. Se fertilizó a la siembra y en macollaje con N (Tabla 2). Todos los años se sembró un cultivar wester- tetraploide a excepción del 2014 que, por falta de disponibilidad de semilla, se debió

utilizar un cultivar wester-diploide. Ambos cultivares presentan una precocidad intermedia y ventanas de crecimiento entre emergencia y floración similares.

Tabla 2: Manejo general del raigrás anual en cada año.

Año	Fecha siembra	Densidad siembra (kg/ha)	Fertilización (kg N/ha)		Período de pastoreo	Biomasa Inicial (kgMS/ha)	Días de pastoreo	Inicio estado reprod. CS-Sj
			Siembra	Macollaje				
Período pre-experimental								
1- 2012	30 mar	24	6,05	56	25 jun – 06 oct	2502	103	03 sep
2- 2013	13 abr	25	6,05	56	08 jul – 10 oct	2711	94	10 sep
Período experimental								
1- 2014	14 abr	25	6,05	56	30 jun – 14 oct	3362	106	29 ago
2- 2015	16 abr	27	6,05	56	18 jun – 27 oct	3012	131	17 sep
3- 2016	12 may	27	6,05	74,1	11 ago – 11 oct	2090	61	08 sep
4- 2017	19 abr	24	6,05	65,8	03 jul – 04 oct	2187	93¥	06 sep
5- 2018	16 abr	26	7,70	72,2	11 jul – 05 oct	2512	86	12 sep
6- 2019	22 abr	25	6,05	72,2	28 jun – 10 oct	1861	104¥	11 sep
7- 2020	03 abr	25	7,70	69,0	06 jul – 29 sep	3058	85¥	25 ago

¥: Se definió un menor período de pastoreo para el tratamiento IA-Sj, debido al muy bajo crecimiento del raigrás anual respecto a los otros tratamientos. En consecuencia, los períodos de pastoreo para IA-Sj se acortaron 10, 60 y 40 días, en 2017, 2019 y 2020, respetivamente.

En todos los tratamientos, el raigrás anual se suprimió químicamente durante las primeras etapas reproductivas. Esta es una práctica habitual en los cultivos de servicios agroecosistémicos y tiene como objetivo reducir el consumo de agua asociado con las etapas fenológicas avanzadas de los cultivos (Bertolotto y Marzetti, 2017). En las parcelas de CS-Sj se identificó el inicio de esta etapa entre fines de agosto y principios de septiembre (Tabla 2), aunque la supresión química se realizó entre 7 y 15 días después, cuando las condiciones climáticas (viento y humedad) permitieron efectuar las aplicaciones. En las parcelas con pastoreo del CS, se retrasó el inicio de las etapas reproductivas y se suprimieron más tarde en el mes de octubre.

El pastoreo de los CS con los animales se realizó de forma continua desde junio-julio de cada año (Tabla 2), a partir de que el CS acumuló en promedio 2588 ± 496 kgMS/ha con un estado de cuarta hoja totalmente expandida, y se extendió hasta septiembre-octubre de cada año manteniendo la intensidad de pastoreo prevista para cada tratamiento. Se emplearon vaquillonas holando argentino de la recria del Sistema Integrado Agrícola-Lechero de la FCA (tres animales focales por unidad experimental). El peso vivo inicial fue de $242 \pm 19,7$ kg y $11,9 \pm 1,72$ meses de edad.

Los niveles de intensidad de pastoreo se establecieron variando la superficie de las parcelas y agregando o quitando animales “volantes” cuando fue necesario. Se mantuvieron constantes las alturas objetivo del raigrás anual de 5, 10, 15 y 20 cm para IA-Sj, IMA-Sj, IMB-Sj e IB-Sj, respectivamente (Figura 8). Los ajustes de carga se hicieron luego de medir la altura con el método del bastón graduado (Barthram, 1986), las cuales se realizaron inicialmente una vez al mes (año 2012 y 2013) y luego de forma semanal (de 2014 a 2020).



Figura 8: Vaquillonas holando argentino en las 4 intensidades de pastoreo y su altura objetivo. IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta, IMB-Sj: Intensidad media baja IB-Sj: Intensidad baja.

Además, se dispuso con una superficie “pulmón” de 1,8 ha sembrada con raigrás anual y anexa al lote experimental. Esta superficie, se utilizó previo al inicio de cada ciclo de pastoreo para el acostumbramiento de los animales al recurso forrajero (7 a 10 días) y, para sostener a los animales en períodos de altas precipitaciones (mayor a 40 mm por evento) como las ocurridas en 2015 (Tabla 2).

En el cultivo de soja se utilizaron cultivares de grupo de maduración III largo (DM 3810) o IV corto indeterminados (Tabla 3). Se desarrolló entre noviembre y abril, sembrado en directa con una densidad de 20 a 24 semillas/m² y una fertilización fosforada a la siembra (Tabla 3).

Tabla 3: Manejo general del cultivo de soja en cada año.

Año	Fecha siembra	Densidad siembra (s/m ²)	Fertilización (kg P/ha)	Ciclo (días)	Cultivar
			Siembra		
Período pre-experimental					
1- 2012	19 nov	25	6,98	140	DM 4210
2- 2013	20 nov	23	4,10	126	DM 3810
Período experimental					
1- 2014	15 nov	24	6,10	146	Syco 4x99
2- 2015	20 nov	23	6,10	131	FN 4,35 STS
3- 2016	04 nov	24	12,2	165	FN 4,35 STS
4- 2017	10 nov	25	12,2	146	FN 4505 STS
5- 2018	04 nov	25	12,2	128	DM 40r16 STS
6- 2019	01 nov	26	16,0	144	DM 40r16 STS
7- 2020	04 nov	20	16,0	147	DM 40r16 STS

Se evaluó la producción de biomasa del raigrás anual, la producción animal, el rendimiento del cultivo de soja y la productividad anual del sistema. Algunas determinaciones se incorporaron y ajustaron gradualmente al manejo general del experimento. En 2012 y 2013, años pre-experimentales, se instalaron las alturas de pastoreo objetivos crecientes, que resultaron mayores a las previstas. Durante este período pre-experimental, se ajustaron los protocolos de manejo de animales y las mediciones. Entonces, la evaluación de la producción del raigrás anual se consideró a partir de 2013 y las restantes mediciones a partir de 2014. Únicamente en otoño-invierno de 2020, a raíz de las restricciones por la pandemia de COVID-19, no fue posible realizar las determinaciones de rendimiento del cultivo de soja (cosecha 2020) y las referidas a la producción de raigrás anual. Cabe señalar que, en ese invierno (2020), la restricción hídrica fue muy alta acortando marcadamente el período de pastoreo de IA-Sj (Tabla 2), agregando otra dificultad a la estimación y comparación de variables de producción animal entre tratamientos. Para superar estas limitaciones y completar una base de datos de 6 años, se decidió instalar los tratamientos de pastoreo en el invierno 2020 y medir el rendimiento de la soja sucesora en la cosecha 2021.

Evaluación de la producción de raigrás anual

La producción de biomasa total del raigrás anual (kgMS/ha) en CS-Sj (tratamiento sin pastoreo) se estimó por corte directo en los estadios iniciales de elongación del tallo reproductivo, dejando una altura remanente de 1 - 2 cm. En 2013 a 2015 se utilizaron marcos de 30 x 40 cm con 3 cortes por parcela, y para 2016 a 2019 marcos de 60 x 40 cm con 5 cortes por parcela.

En los tratamientos con pastoreo, se estimó utilizando jaulas de exclusión de 60 x 40 x 60 cm distribuidas al azar dentro de cada parcela. Se emplearon 3 por parcela entre 2013 y 2015, y se agregó una más en los años posteriores. En estas se realizaron cortes a la altura objetivo correspondiente a cada tratamiento con una frecuencia de 28 días. A partir de 2016, se ajustó una mayor frecuencia en las intensidades más altas siendo cada 14 días en IA-Sj e IMA-Sj y cada 28 días en IMB-Sj e IB-Sj. Al final del período de pastoreo se cortó la biomasa debajo de las alturas objetivos o biomasa residual de cada jaula a 1 - 2 cm del suelo. A partir de la biomasa muestreada se calculó la producción de biomasa total (kgMS/ha) como la suma de todos los cortes por encima de la altura objetivo y la biomasa residual debajo de la altura objetivo, y el remanente (kgMS/ha) a partir de la biomasa residual al final del período de pastoreo. En todos los tratamientos, la tasa de crecimiento (TC, kgMS/ha/día) se calculó como el cociente entre la producción de biomasa total y los días de crecimiento (período comprendido entre 7 días posteriores a la siembra y el final de ciclo del cultivo).

Las muestras de raigrás anual se secaron en estufa a 60°C hasta peso constante para estimar el contenido de materia seca. Posteriormente, con las muestras de los tratamientos pastoreados de los años 2014 a 2019, se armaron 2 pooles con las pertenecientes a la primera y la segunda mitad del período de pastoreo. Estos pooles se enviaron al laboratorio para determinar digestibilidad *in vitro* de la materia seca (% DIVMS, Tilley y Terry, 1963). Entre 2017 y 2019 también se determinó el contenido de proteína bruta (% PrB, método de Kjeldahl, AOAC, 1998, N°976.05).

Evaluación de la producción animal

La producción de carne se expresó como los kilos de peso vivo producidos por unidad de superficie (kg/ha) durante el período de pastoreo. En cada año, se calculó como el producto entre la ganancia de peso vivo (GPV), la carga animal (CA) y la duración del período de pastoreo.

La estimación de la GPV (kg/día) promedio por parcela, se realizó a través de la regresión lineal de la evolución del peso vivo y el tiempo (días) de 3 animales focales. Estos se pesaron con una balanza individual (1500 ± 0,5 kg) cada 21 días y con 12 horas de desbaste. Los intervalos entre pesadas se modificaron en 1 o 3 días cuando las condiciones climáticas no fueron las adecuadas (lluvias o días muy ventosos).

La CA (cab/ha) se calculó al finalizar el período de pastoreo. Se relacionó el número promedio de animales (focales más volantes) y la superficie de cada parcela en cada año.

Evaluación de la producción del cultivo de soja

La estimación de la producción de granos de la soja sucesora (kgMS/ha) se obtuvo a partir del muestreo en 3 sitios al azar de 2 m² por parcela, en las cuales se cortaron las plantas

y luego se desgranaron con una trilladora experimental estática. Los granos se secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante para la estimación del rendimiento por unidad de superficie. Las determinaciones se realizaron previo a la cosecha mecánica del lote completo. Únicamente en el cultivo implantado en 2017, no fue posible muestrear uno de los tres bloques.

Sobre los resultados de rendimiento se estimaron parámetros para analizar la variabilidad de la producción de los tratamientos. Para cada parcela muestreada en los 6 años, se estimó el rango como la diferencia entre el máximo y mínimo valor obtenido, el desvío estándar (DE) y el coeficiente de variación (% CV).

Evaluación del sistema integrado

Para comparar la productividad de los sistemas agrícolas e integrados se utilizaron variables con unidades en común, que permitieran adicionar la producción de carne a la producción de soja. Se calcularon sobre los años cuya producción se midió en ambas actividades (2014, 2015, 2016, 2017 y 2018). En primer lugar se utilizó la energía exportada del programa Agroecoindex (Vigglizo *et al.*, 2006), que considera una concentración energética de 25,5 Mj/kg para el grano de soja y 13,4 Mj/kg para la producción ganadera. En la estimación de energía del cultivo de soja, se corrigió a base seca tomando un 13% de humedad promedio. Luego se expresaron los resultados en GJ/ha.

En segundo lugar, se calculó la proteína digerible humana de cada sistema (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2021). Para la producción de soja se tomó el contenido de proteína de 33,9 % en base seca (USDA, 2019), y para la producción de carne se estimó el contenido de proteína al final del pastoreo como el 18,6 % del peso vivo promedio de 320 kg, basado en las ecuaciones del NRC (2016). Luego se afectó el contenido de proteína por la digestibilidad de cada producción (van Zanten *et al.*, 2016).

Análisis estadístico

Debido a los diferentes protocolos de muestreo utilizados, la producción de biomasa total del raigrás anual, su tasa de crecimiento y remanente se dividió en 2 conjuntos de datos que se analizaron en forma independiente. Por un lado, se tomaron los datos del primer período de 2013 a 2015, y por otro los del segundo período de 2016 a 2019. Todas estas variables y las de respuesta animal (producción de carne, GPV, carga animal), altura promedio, rendimiento de grano de soja, parámetros de variabilidad (rango, DE y %CV) y productividad del sistema integrado se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \tau_j + \Omega_k + (\tau\Omega)_{jk} + e_{ijk}$$

Biomosas raigrás de 2013 a 2015: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 5 \quad k = 1,2,3$
 Biomosas raigrás de 2016 a 2019: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 5 \quad k = 1 \dots 4$
 Variables de respuesta animal y altura: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 4 \quad k = 1 \dots 6$
 Rendimiento de soja: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 6 \quad k = 1 \dots 6$
 Parámetros de variabilidad: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 6 \quad k = 1 \dots 6$
 Productividad del sistema integrado: $i = 1,2,3 \quad j = 1, \dots, 6 \quad k = 1 \dots 5$

Los parámetros del análisis químico del forraje (% DIVMS y % PrB) se compararon entre los tratamientos de pastoreo mediante el modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_j + \Omega_k + (\tau\Omega)_{jk} + e_{ijk}$$

% DIVMS: $j = 1, \dots, 4 \quad k = 1 \dots 6$
 % PrB: $j = 1, \dots, 4 \quad k = 1 \dots 3$

Donde Y_{ijk} es el valor de la ijk -ésima observación, μ es la media general, β_i es el efecto del i -ésimo bloque, τ_j es el efecto del j -ésimo tratamiento, Ω_k es el efecto del k -ésimo año de medición, $(\tau\Omega)_{jk}$ es el efecto de la interacción entre el j -ésimo tratamiento y el k -ésimo año de medición y e_{ijk} es el error aleatorio de la ijk -ésima observación. Para el análisis del rendimiento de grano de soja, se consideró al rendimiento de soja 2011-12 como covariable continua.

Cuando el efecto de tratamiento fue significativo, las diferencias entre las medias se compararon por Tukey-Kramer HSD ($p < 0,05$). En las variables de productividad del sistema integrado, además se plantearon los siguientes contrastes ortogonales: CP vs. SP, para comparar la media de los tratamientos con pastoreo (CP: IA-Sj, IMA-Sj, IMB-Sj y IB-Sj) con la media de los tratamientos sin pastorero (SP: CS-Sj y Sj-Sj), e IMA-Sj+IMB-Sj vs SP. En todos los casos, se presentan las medias ajustadas y sus respectivos errores estándares.

Se utilizó el siguiente modelo de regresión lineal simple para estimar la relación entre carga animal y la altura del raigrás anual:

$$Y_i = \beta_0 + \Omega_k + \beta_1 * X_1 + (\Omega_k * \beta_1) * X_1 + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta, β_0 es la ordenada al origen, Ω_k es el efecto del k -ésimo año de medición, β_1 es el coeficiente (pendiente) de X_1 , X_1 es la altura promedio como regresor, $(\Omega_k * \beta_1)$ es la interacción de año con la altura, y e_i es el error aleatorio de la i -ésima observación.

La GPV y la producción de carne (kg/ha) también se analizaron en función de la altura de pastoreo a través del modelo de regresión cuadrático:

$$Y_i = \beta_0 + \Omega_k + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * (X_1)^2 + (\Omega_k * \beta_1) * X_1 + (\Omega_k * \beta_2) * (X_1)^2 + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta, β_0 es la ordenada al origen, Ω_k es el efecto del k -ésimo año de medición, β_1 es el componente lineal de X_1 , β_2 es el coeficiente cuadrático, X_1 es la altura promedio como regresor, $(\Omega_k * \beta_1)$ y $(\Omega_k * \beta_2)$ es la interacción de año con los componentes lineal y cuadrático, y e_i es el error aleatorio de la i -ésima observación.

Para evaluar el efecto acumulado del pastoreo sobre la producción de raigrás anual y el rendimiento de soja en el mediano plazo, se utilizó un modelo de regresión múltiple. Se analizó la pendiente de año como regresor y su interacción con el tratamiento. El modelo utilizado fue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i + \tau_j + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_4 * X_4 + \beta_5 * X_5 + (\tau_j * \beta_1) + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta, β_0 es la ordenada al origen, β_i es el efecto del i -ésimo bloque, τ_j es el efecto del j -ésimo tratamiento, β_1 es el coeficiente (pendiente) de X_1 , X_1 es año como regresor, β_2 a β_5 son los coeficientes de las variables X_2 a X_5 , X_2 es el período de crecimiento (días), X_3 es las precipitaciones ocurridas en dicho ciclo, X_4 es la T° media promedio en el ciclo, X_5 es la cantidad de fertilizante empleado (N ó P), $(\tau_j * \beta_1)$ es la interacción de año como regresor con tratamiento, y e_i es el error aleatorio de la i -ésima observación. En el caso de la producción de raigrás anual se consideraron sólo los tratamientos IMB-Sj, IB-Sj y CS-Sj, cuya frecuencia de corte fue homogénea a través de los años.

En todos los modelos, se verificaron los residuos por cumplimiento de normalidad y homocedasticidad a través de gráficos y de las pruebas de Shapiro-Wilk y Leneve. Cuando fue necesario se modeló la heterogenidad de varianzas a través de modelos lineales extendidos con la función `weights = varIdent` ó `weights=varPower` del paquete `nlme` (Pinheiro y Bates, 2000). Todos los análisis se realizaron con el software R 4.2.0 (R Core Team, 2022).

RESULTADOS

Producción de raigrás anual

La producción de biomasa total (kgMS/ha) del raigrás anual varió significativamente entre tratamientos en todos los años analizados (Figura 9). En el primer período (2013 a 2015), hubo un efecto significativo del año ($p < 0,01$) sin interacción con el tratamiento ($p > 0,05$), donde la producción media de 2013 de 4618 ± 214 kgMS/ha fue significativamente menor a 2014 y 2015 (8341 ± 214 y 8074 ± 386 kgMS/ha, respectivamente). En promedio, CS-Sj tuvo una producción 39 % menor a los tratamientos con pastoreo ($p < 0,05$). La mayor producción se registró en IB-Sj la cual fue un 27 % mayor a IA-Sj, y no se diferenció de las intensidades intermedias (IMB-Sj y IMA-Sj, Figura 9).

Así mismo, la producción de biomasa correspondiente al segundo período (2016 a 2019), también presentó un efecto significativo de año ($p < 0,01$) con una producción promedio de 5892, 6265, 6472 y 6152 \pm 205 kgMS/ha para 2016, 2017, 2018 y 2019 respectivamente. El efecto año no presentó una interacción significativa con los tratamientos ($p > 0,05$). Sin embargo, las diferencias entre tratamientos se acentuaron con respecto al período previo (Figura 9). La producción de biomasa disminuyó con el aumento de la intensidad de pastoreo, en tanto que CS-Sj alcanzó un nivel intermedio entre IA-Sj e IMA-Sj. Los tratamientos IMB-Sj e IB-Sj presentaron en promedio una producción 42 % superior a IA-Sj y 15,5 % mayor a IMA-Sj.

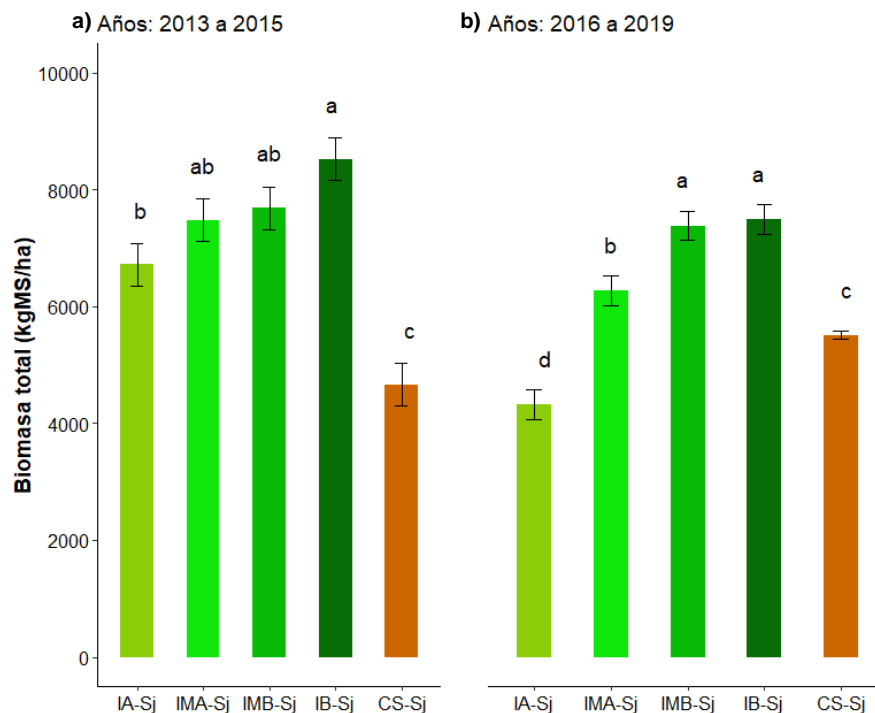


Figura 9: Biomasa total (kgMS/ha) de raigrás anual promedio a) de 2013 a 2015 y b) de 2016 a 2019. IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta, IMB-Sj: Intensidad media baja, IB-Sj: Intensidad

baja, CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo. Letras distintas dentro de cada conjunto de años indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El período de crecimiento del raigrás anual abarcó un rango de 106 a 187 días para los tratamientos con pastoreo, y de 112 a 147 días para el tratamiento sin pastoreo (CS-Sj). En promedio, en CS-Sj fue $31,4 \pm 3,84$ días más corto respecto a los tratamientos pastoreados, los cuales tuvieron la misma cantidad de días de crecimiento en cada año a excepción de IA-Sj de 2019, que se redujo 57 días (Tabla 4), debido a la restricción hídrica que afectó marcadamente el crecimiento del raigrás anual impidiendo mantener el pastoreo.

La tasa de crecimiento promedio (Tabla 4) en ambos períodos presentó una variación significativa debida al tratamiento ($p < 0,05$). El efecto del año de medición sólo fue significativo en el primer periodo ($p < 0,05$) en tanto que la interacción tratamiento por año no fue significativa en ninguno de los dos períodos. En los primeros años, la tasa de crecimiento promedió en $27,4 \pm 1,25$; $50,1 \pm 1,24$ y $44,5 \pm 2,19$ kgMS/ha/día para 2013, 2014 y 2015 respectivamente, siendo 2013 significativamente menor a los dos años posteriores. En los tratamientos con pastoreo, no se encontraron diferencias significativas a excepción de IB-Sj cuya TC fue 21,4 % mayor a la de IA-Sj. La menor TC correspondió a CS-Sj sin diferenciarse de IA-Sj e IMA-Sj (Tabla 4).

En el segundo período, con un promedio de $42,5$; $40,7$; $39,4$ y $41,4 \pm 1,33$ kgMS/ha/día, para 2016, 2017, 2018 y 2019 respectivamente, las diferencias entre tratamientos fueron más acentuadas (Tabla 4). Las tasas de crecimiento aumentaron conforme aumentó la altura de pastoreo, sin diferenciarse entre los manejos más laxos (IMB-Sj e IB-Sj) y CS-Sj ($p > 0,05$).

Tabla 4: Tasa de crecimiento (TC, kgMS/ha/día) y Días de crecimiento (n°) de raigrás anual.

Año	Variable	Tratamiento					EE (TC)
		IA-Sj	IMA-Sj	IMB-Sj	IB-Sj	CS-Sj	
2013	TC	24,1	25,9	28,0	38,7	20,3	1,25
	Días	173	173	173	173	143	
2014	TC	45,7	48,7	49,6	55,2	51,1	1,25
	Días	176	176	176	176	130	
2015	TC	42,4	50,1	50,7	48,9	30,2	2,19
	Días	187	187	187	187	147	
EE (TC)		2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	
Media (TC)		37,4 bc	41,6 abc	42,8 ab	47,6 a	33,9 c	
2016	TC	29,2	35,5	52,4	54,2	41,3	1,33
	Días	145	145	145	145	112	
2017	TC	30,4	37,3	45,2	46,6	43,9	1,33
	Días	162	162	162	162	133	
2018	TC	30,1	41,1	43,5	41,5	41,0	1,33
	Días	170	170	170	170	142	
2019	TC	31,7	42,6	44,3	45,8	42,6	1,33
	Días	106	163	163	163	135	
EE (TC)		1,64	1,64	1,64	1,64	0,56	
Media (TC)		30,3 c	39,1 b	46,3 a	47,0 a	42,2 ab	

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja; CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo. EE(TC): error estándar de la TC. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

La biomasa remanente, medida al final del período de crecimiento, presentó una variación significativa debida al tratamiento, al año y la interacción de ambos ($p < 0,05$; Figura 10). En los tratamientos pastoreados aumentó con la altura de pastoreo. Las intensidades de pastoreo más bajas (IMB-Sj e IB-Sj) presentaron una biomasa remanente similar a la acumulada en todo el ciclo de crecimiento por CS-Sj en la mayoría de los años evaluados, a excepción del año 2017 donde la biomasa de CS-Sj fue un 32 % superior al remanente acumulado al final del crecimiento de los pastoreos menos intensos (Figura 10).

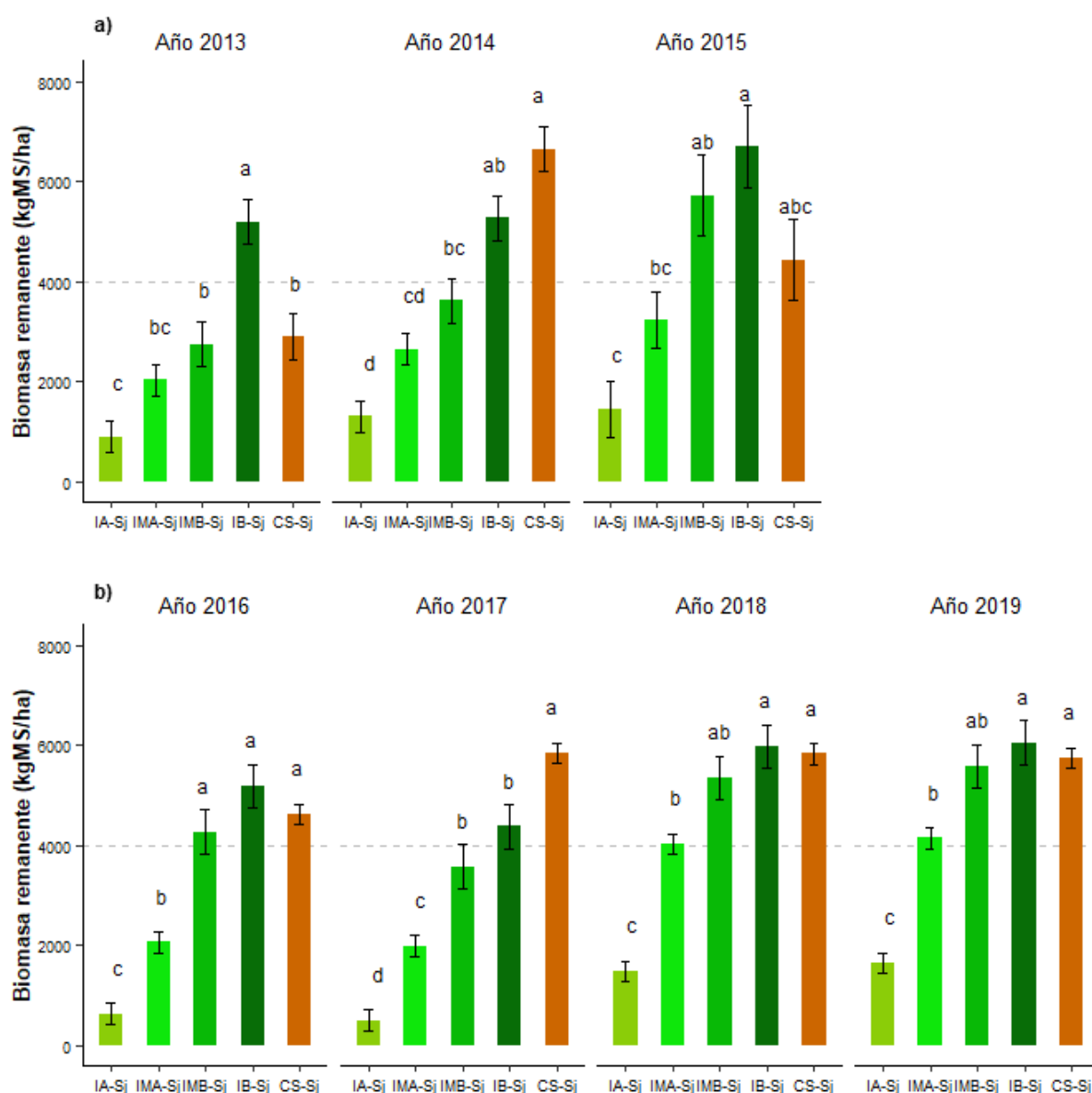


Figura 10: Biomasa remanente (kgMS/ha) de raigrás anual a) 2013 a 2015 y b) de 2016 a 2019. IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja; CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Línea punteada señala biomasa de 4000 kgMS/ha.

Efecto acumulado del pastoreo en la producción de biomasa total

La biomasa total de raigrás anual en IMB-Sj, IB-Sj y CS-Sj evaluada entre 2013 y 2019 no presentó una tendencia lineal en el tiempo, como lo indica la falta de significancia del año como regresor y su interacción con tratamiento (Tabla 5). La variación se explicó principalmente por el efecto de los tratamientos y las precipitaciones ocurridas en la fase ganadera de cada año ($R^2 = 0,63$; RCME = 1311).

Tabla 5: Análisis de la varianza del modelo para estimar la tendencia de la biomasa total de raigrás a través de los años (efecto acumulado) para los tratamientos con pastoreo de intensidad media baja (IMB-Sj) y baja (IB-Sj) y cultivo de servicio sin pastoreo (CS-Sj). Evaluado entre los años 2013 y 2019.

Fuente de variación	Cuadrado medio	Grados de Libertad	P-valor
Bloque	3,20 e+06	2	0,17
Tratamiento	4,73 e+07	2	7,78 e-09
Año (regresor)	1,27 e+06	1	0,40
Días de crecimiento	4,33 e+06	1	0,12
Precipitaciones	3,55 e+07	1	3,40 e-05
T °C media	1,78 e+06	1	0,31
N-Fertilización	2,56 e+06	1	0,23
Tratamiento*Año	2,90 e+06	2	0,19
Error	1,72 e+06	51	

Calidad nutricional del raigrás anual

La calidad nutricional del raigrás anual se evaluó en los tratamientos con pastoreo en términos de digestibilidad *in vitro* de la materia seca (%), DIVMS) y contenido de proteína bruta (%), PrB). La DIVMS se estimó entre 2014 y 2019 y la PrB entre 2017 y 2019. No se observó un efecto significativo ($p > 0,05$) de la intensidad de pastoreo ni su interacción con el año de medición en ninguna de las variables de calidad (Figura 11). En promedio, la DIVMS fue de $76,9 \pm 0,87$ y la PrB de $19,3 \pm 0,81$, con una variación interanual ($p < 0,05$) que abarcó valores entre 68,8 y 84,9 % para DIVMS, y entre 16,2 y 22,6 % para PrB.

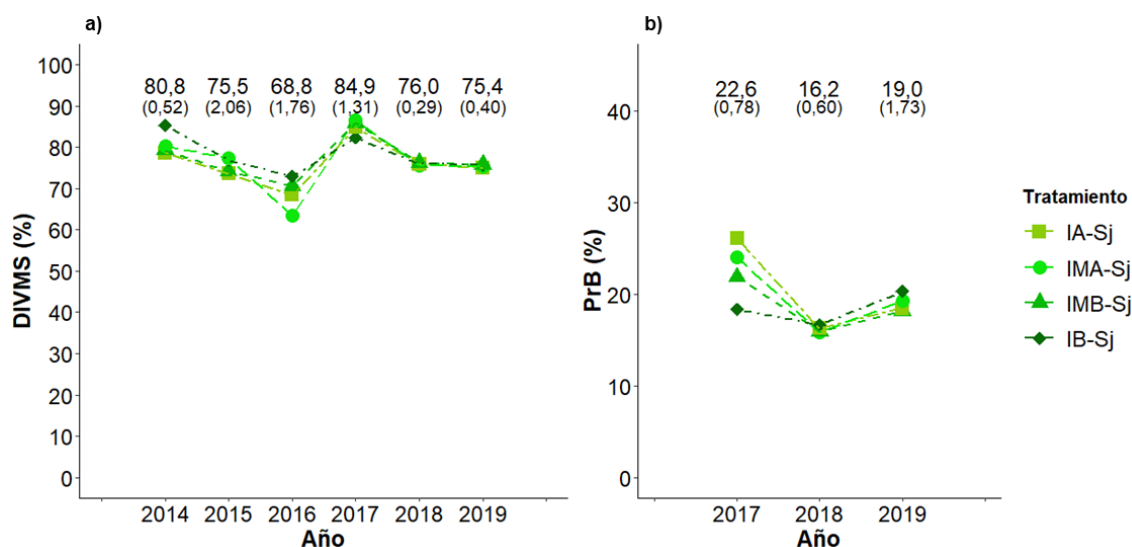


Figura 11: a) Digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS, %) evaluada entre 2014 y 2019, y b) contenido de proteína bruta (PrB, %) entre 2017 y 2019. IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Producción animal

El protocolo definido para el manejo del pastoreo permitió establecer las 4 intensidades de pastoreo crecientes en cada año evaluado. Las alturas remanentes promedio establecidas en cada tratamiento de pastoreo se diferenciaron significativamente entre sí ($p < 0,05$), y resultaron cercanas a las definidas como objetivo (5, 10, 15 y 20 cm para IA-Sj, IMA-Sj, IMB-Sj e IB-Sj, respectivamente, Tabla 6). Las alturas abarcaron un rango entre 4,71 y 22,4 cm, excepto el año 2016 donde, si bien se pudieron establecer las 4 situaciones contrastantes, en IMB-Sj e IB-Sj los valores promedios fueron mayores a los pretendidos (20,2 y 30,7 cm, respectivamente).

Tabla 6: Promedios de altura de pastoreo (cm), carga animal (CA, cab/ha), ganancia de peso vivo (GPV, kg/d) y producción de carne (kg/ha) en las distintas intensidades de pastoreo.

Año	Variable	IA-Sj	IMA-Sj	IMB-Sj	IB-Sj	EE	Máxima GPV	Máxima Prod. Car
2014	Altura (cm)	7,61 ^d	11,3 ^c	17,1 ^b	22,1 ^a	0,4 a 1,1 ²	20,6	15,1
	CA (cab/ha)	6,83 ^a	4,67 ^b	4,04 ^c	2,96 ^d	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,45 ^b	0,82 ^a	0,97 ^a	1,05 ^a	0,06	1,05 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	327 ^{ab}	408 ^{ab}	416 ^a	328 ^b	30,1 (17,8) ¹		429 ± 26,8
2015	Altura (cm)	7,16 ^d	11,4 ^c	18,0 ^b	22,4 ^a	0,4 a 1,1 ²	20,3	15,2
	CA (cab/ha)	7,49 ^a	4,52 ^b	3,28 ^c	2,35 ^d	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,29 ^c	0,81 ^b	1,06 ^a	1,09 ^a	0,06	1,11 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	249 ^b	388 ^a	375 ^a	278 ^b	30,1 (17,8) ¹		396 ± 27,6
2016	Altura (cm)	6,68 ^d	12,5 ^c	20,2 ^b	30,7 ^a	0,4 a 1,4 ²	22,1	15,7
	CA (cab/ha)	8,69 ^a	5,73 ^b	5,31 ^b	3,41 ^c	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,76 ^b	1,25 ^a	1,45 ^a	1,26 ^a	0,1	1,50 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	402 ^a	437 ^a	470 ^a	260 ^b	30,1 (17,8) ¹		464 ± 25,5
2017	Altura (cm)	4,71 ^d	7,66 ^c	14,5 ^b	18,0 ^a	0,3 a 0,9 ²	16,1	13,9
	CA (cab/ha)	7,58 ^a	4,94 ^b	3,92 ^c	2,95 ^d	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,06 ^c	0,61 ^b	0,97 ^a	1,00 ^a	0,06	1,04 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	38,5 ^c	279 ^{ab}	355 ^a	275 ^b	30,1 (17,8) ¹		366 ± 24,3
2018	Altura (cm)	6,01 ^d	10,2 ^c	16,6 ^b	20,6 ^a	0,3 a 0,9 ²	16,8	9,05
	CA (cab/ha)	7,30 ^a	4,59 ^b	3,00 ^c	2,10 ^d	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,55 ^b	1,03 ^a	1,11 ^a	1,07 ^a	0,06	1,17 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	349 ^a	409 ^a	288 ^{ab}	193 ^b	39,9 (23,6) ¹		368 ± 21,1
2019	Altura (cm)	5,32 ^d	8,61 ^c	13,7 ^b	17,5 ^a	0,3 a 0,9 ²	14,8	11,3
	CA (cab/ha)	7,55 ^a	3,85 ^b	2,66 ^c	1,95 ^d	0,18 (0,07) ¹		
	GPV (kg/d)	0,65 ^b	0,97 ^a	1,11 ^a	1,15 ^a	0,06	1,16 ± 0,05	
	Prod.Car (kg/ha)	212 ^b	384 ^a	307 ^a	232 ^b	30,1 (17,8) ¹		374 ± 28,1

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja. 1. Entre paréntesis, el error estándar de la media correspondiente a IMB-Sj e IB-Sj. 2. Rango de valores del EE, ya que el modelo considera una varianza creciente del error con los valores ajustados. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Modelo de máxima GPV = Bloque + Año + Año * (Altura + Altura²) + error; $R^2 = 0,91$; $p < 0,001$; RCME = 0,12. Modelo de máxima Producción de carne = Bloque + Año + Año * (Altura + Altura²) + error; $R^2 = 0,79$; $p < 0,001$; RCME = 55,3

Las distintas situaciones de pastoreo continuo determinaron la carga animal promedio en un rango entre 1,95 y 7,61 cab/ha (Tabla 6). En el análisis de los años donde se hizo el

registro de carga animal (2014 a 2019), ajustó una relación lineal negativa con la altura de la pastura ($p < 0,001$; $R^2 = 0,86$; $RCME = 0,08$; Figura 12). Por cada cm de aumento en la altura del raigrás anual, la carga animal se redujo entre 0,19 (en 2016) y 0,41 (en 2019) cab/ha.

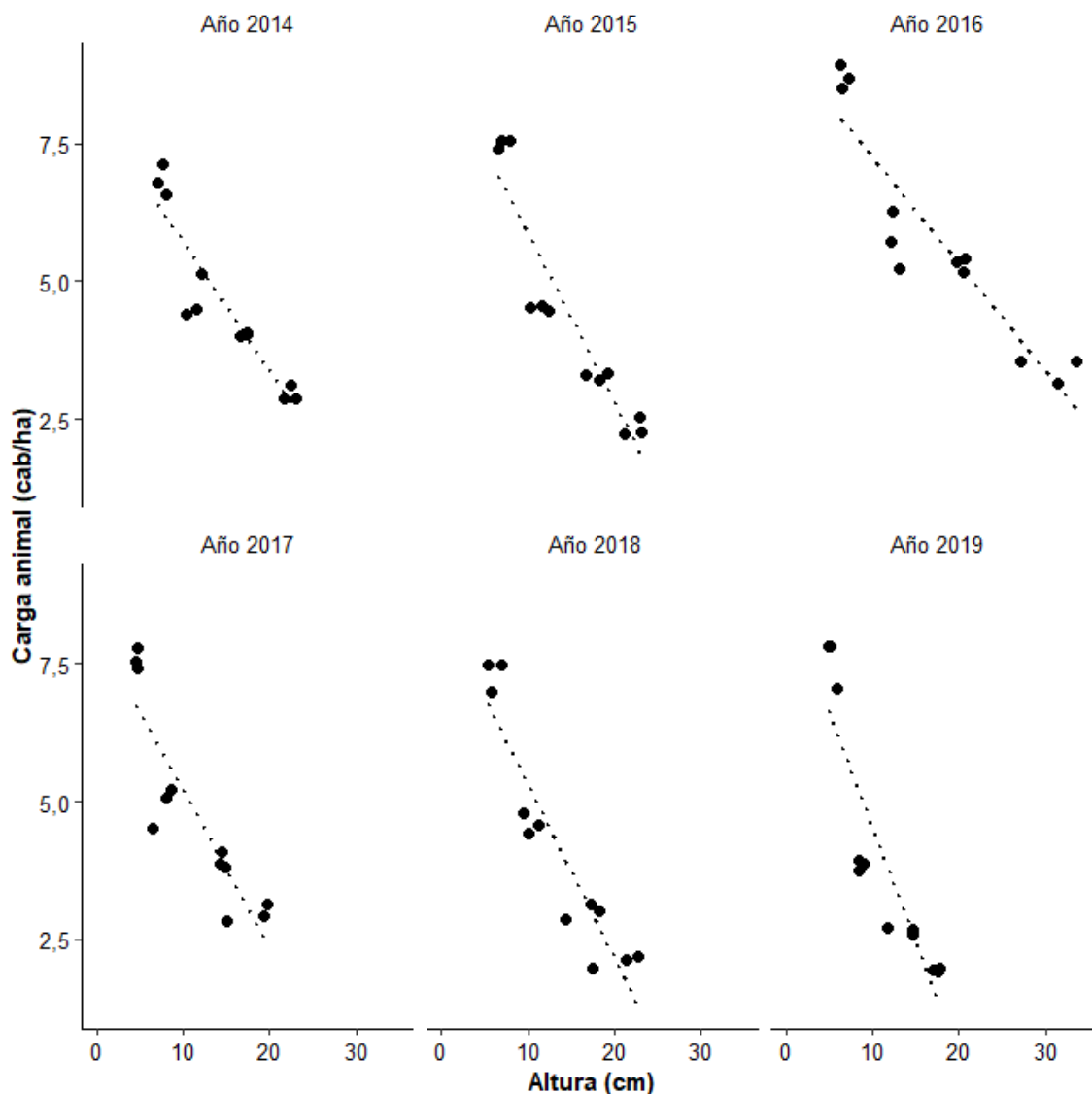


Figura 12: Relación lineal entre Carga animal (cab/ha) y la Altura de pastoreo (cm) promedios para los años de 2014 a 2019. $R^2 = 0,86$; $p < 0,001$; $RCME = 0,82$.

Las GPV y producción de carne promedios de los 6 años analizados, estuvieron en un rango de 0,06 a 1,45 kg/día y de 38,5 a 470 kg/ha, respectivamente (Tabla 6). Con una variación interanual significativa ($p < 0,05$), en términos generales, se puede señalar que las medias de las mayores GPV correspondieron a alturas superiores a los ~ 9 cm, en tanto que las medias de producción de carne más alta estuvo acotado al rango de ~ 9 a 18 cm. Ambas variables ajustaron a funciones cuadráticas ($p < 0,001$; Figura 13) en respuesta a las distintas alturas de pastoreo promedio. Los valores máximos de estas funciones estimaron entre 1,05

y 1,50 kg/día de GPV en un rango de alturas comprendido entre 14,8 y 22,1 cm, y entre 366 y 464 kg/ha de producción de carne para el rango de alturas de 9,05 a 15,7 cm (Tabla 6).

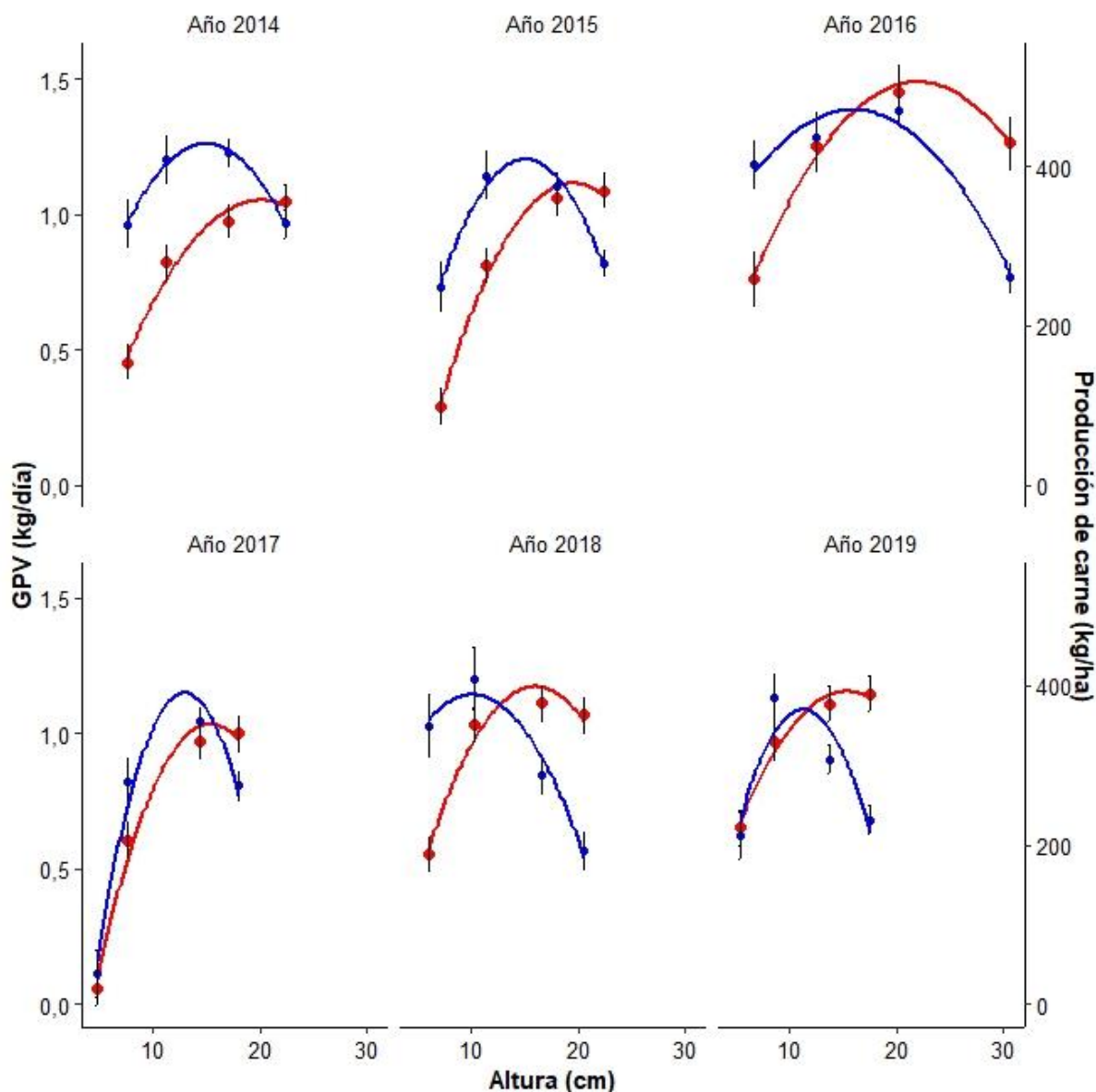


Figura 13: Relación cuadrática entre la GPV (kg/día, línea roja) y Producción de carne (kg/ha, línea azul) con la altura para los años 2014 a 2019. Las barras negras representan el error estándar de las medias de tratamiento promediados a partir de los valores de cada bloque en cada año. Modelo GPV = Bloque + Año + Año * (Altura+ Altura ²) + error; R² = 0,91; p < 0,001; RCME = 0,12. Modelo Producción de carne = Bloque + Año + Año * (Altura + Altura ²) + error; R² = 0,79; p < 0,001; RCME = 55,3.

Producción del cultivo de soja

En los años evaluados, el cultivo de soja sucesor presentó un rendimiento en grano promedio de 3989 ± 37,9 kgMS/ha. Las diferencias de rendimientos se explicaron por la variación interanual (p < 0,01) con un rango entre 3593 y 4585 kgMS/ha (Figura 14). No se

registró un efecto significativo debido a la incorporación de CS y su pastoreo ($p > 0,05$) ni su interacción con año ($p > 0,05$).

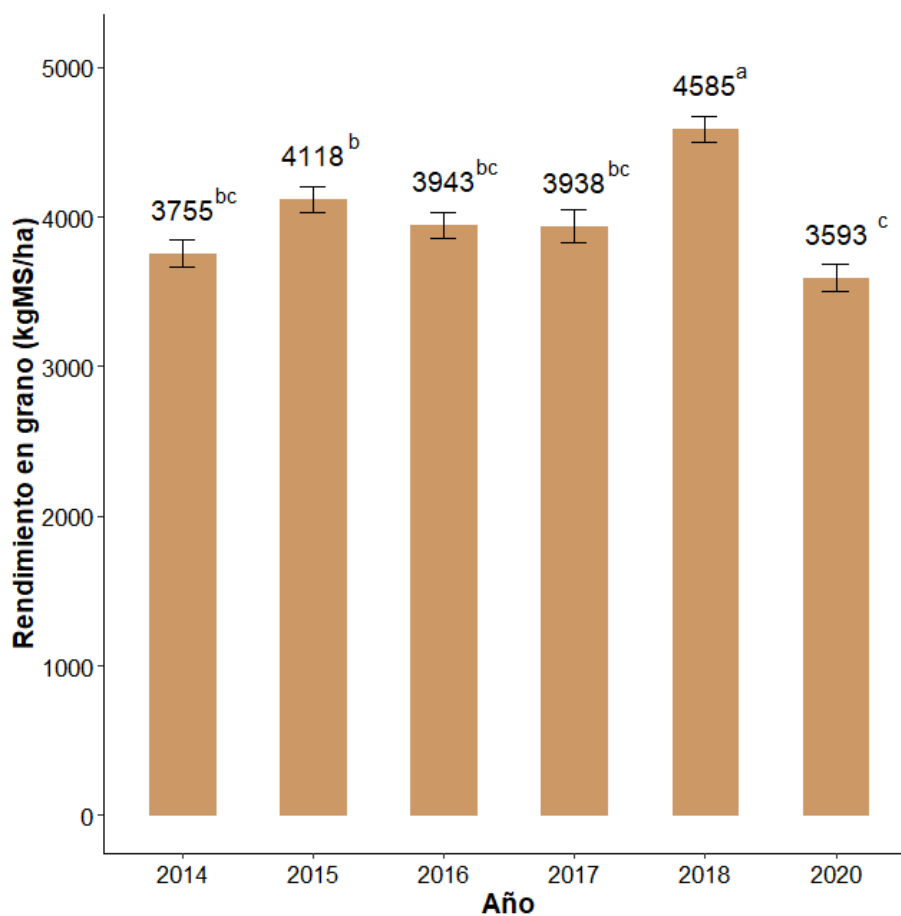


Figura 14: Rendimiento de grano promedio de cada año del cultivo de soja (kgMS/ha). Letras distintas indican diferencias significativas entre año ($p < 0,05$).

Los parámetros de variabilidad presentaron diferencias entre tratamientos (Tabla 7). El rango, CV y DE del rendimiento de las parcelas si bien aumentó numéricamente con la disminución de la intensidad del pastoreo, sólo IA-Sj se diferenció de IB-Sj ($p < 0,05$). Por su parte, los valores de variabilidad en CS-Sj y Sj-Sj fueron similares entre sí y a los tratamientos con intensidad de pastoreo moderada y baja, siendo Sj-Sj significativamente más variable que IA-Sj.

Tabla 7: Promedio de rendimiento de grano de soja (kgMS/ha), rango entre el valor máximo y mínimo, coeficiente de variación (CV,%) y desvío estándar (DE, kgMS/ha) de cada tratamiento entre 2014 y 2020.

Tratamiento	Media	Rango	CV (%)	DE
IA-Sj	3859	811 ^b	8,01 ^b	312 ^b
IMA-Sj	4103	1044 ^{ab}	10,7 ^{ab}	440 ^{ab}
IMB-Sj	4005	1270 ^{ab}	11,7 ^{ab}	465 ^{ab}
IB-Sj	3998	1403 ^a	14,2 ^a	561 ^a
CS-Sj	3963	1581 ^{ab}	12,0 ^{ab}	481 ^{ab}
Sj-Sj	4003	1243 ^a	14,4 ^a	576 ^a
EE	(*)	111	1,23	44,1

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja, CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo; Sj-Sj: soja pura. EE: error estándar. (*) El modelo de análisis contempla heterogeneidad de varianza donde los EE son: IA-Sj = 81,5; IMA-Sj = 74,2; IMB-Sj = 76,4; IB-Sj = 130; CS-Sj = 76,8; Sj-Sj = 121. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamiento ($p < 0,05$).

Efecto acumulado del pastoreo en el rendimiento en grano del cultivo de soja

La producción de granos evaluada entre 2014 y 2020 no presentó una tendencia lineal significativa sobre el tiempo (Tabla 8). La respuesta se explicó por la variación de las precipitaciones, la temperatura media y días de crecimiento registrados en el ciclo agrícola de cada año ($R^2 = 0,51$; RCME = 362).

Tabla 8: Análisis de la varianza del modelo para estimar la tendencia del rendimiento en grano de soja a través de los años (efecto acumulado) evaluado entre los años 2014 y 2020.

Fuente de variación	Cuadrado medio	Grados de Libertad	P-valor
Bloque	7,40 e+04	2	0,57
Tratamiento	6,43 e+04	5	0,78
Año (regresor)	7,09 e+03	1	0,82
Precipitaciones	3,12 e+06	1	4,92 e-06
T °C media	3,09 e+06	1	5,44 e-06
P-Fertilización	2,49 e+05	1	0,17
Días crecimiento	4,09 e+0,6	1	2,83 e-07
Tratamiento * Año	1,17 e+05	5	0,49
Error	1,31 e+05		

Producción del sistema integrado

La productividad total de los sistemas, tanto en términos de energía como de cantidad de proteína digestible humana, no mostró una interacción significativa ($p > 0,05$) entre los tratamientos y los años. La producción anual promedio de energía de los sistemas fue de 123

$\pm 1,47$ Gj/ha (Tabla 9), el cultivo de soja en promedio produjo $119 \pm 1,22$ Gj/ha, y la producción de carne $4,37 \pm 0,09$ Gj/ha. La comparación múltiple de los 6 tratamientos no mostró diferencias significativas pero sí se evidenció que en promedio los sistemas integrados con intensidad de pastoreo intermedia produjeron un 6,7 % más respecto a los sistemas sin pastoreo (CS-Sj y Sj-Sj).

La cantidad de proteína digestible humana rindió un promedio anual de $1198 \pm 12,0$ kg/ha. El cultivo de soja produjo $1159 \pm 11,8$ kg/ha y la producción de carne $57,2 \pm 1,19$ kg/ha. Los sistemas integrados produjeron un 5,3% y los sistemas con pastoreo intermedio un 8% más que CS-Sj y Sj-Sj, respectivamente ($p < 0,05$).

Tabla 9: Producción anual de los sistemas en términos de energía (Gj/ha) y proteína digestible humana (kg/ha).

Tratamiento	Energía (Gj/ha)			Proteína digestible humana (kg/ha)		
	Media	Contraste		Media	Contraste	
		CP vs SP	IMA-Sj+IMB-Sj vs SP		CP vs SP	IMA-Sj+IMB-Sj vs SP
IA-Sj	120			1179		
IMA-Sj	129			1269		
IMB-Sj	125	124 ^a	127 ^a	1232	1218 ^a	1251 ^a
IB-Sj	121			1193		
CS-Sj	119			1157		
Sj-Sj	119	119 ^a	119 ^b	1156	1157 ^b	1157 ^b
EE	2,98	2,57	2,97	29	25	29

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja; CS-Sj: cultivo de servicio sin pastoreo. Sj-Sj: soja-soja. CP: agrupa los tratamientos con pastoreo; SP: agrupa los tratamientos sin pastoreo. EE: error estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos o en los contrastes ortogonales CP vs. SP y IMA-Sj+IMB-Sj vs SP ($p < 0,05$).

DISCUSIÓN

Producción de biomasa total de raigrás anual

La producción de raigrás anual varió en respuesta al pastoreo cada año y a lo largo de los 7 años analizados. El efecto de la intensidad de pastoreo se evidenció en la acumulación total de forraje, la tasa de crecimiento diaria y la biomasa remanente al final del pastoreo.

La biomasa total producida de CS-Sj en todos los años fue menor respecto a los tratamientos con intensidad de pastoreo intermedio y bajo (Figura 9), lo cual se explica en parte, por el período de crecimiento que fue $31,4 \pm 3,84$ días más corto. En función del protocolo experimental, el crecimiento finalizó en los estadios iniciales de encañazón a fin de restringir el consumo de agua del perfil del suelo que pudiese afectar al cultivo sucesor. Sin embargo, este cambio fenológico se anticipó en CS-Sj a raíz de la acumulación de biomasa aérea no removida (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2019). En las gramíneas templadas, cuando el meristema apical comienza a desarrollar la inflorescencia, ya no produce primordios foliares y restringe el macollaje a causa del control hormonal y nutricional sobre las yemas axilares y macollos menos desarrollados (Clifford, 1977; Colvill y Marshall, 1984). Su eliminación mediante la defoliación como ocurre en los tratamientos con pastoreo, interrumpe dicha inhibición, reanuda el proceso de macollaje (Callow *et al.*, 2000; Matthew, 2002) y alarga su producción vegetativa.

Por otra parte, la tasa de crecimiento de CS-Sj fue menor en los años 2013 a 2015, (Tabla 4). Estos resultados son consistentes con los informados por Kunrath *et al.* (2014), que registraron menores tasas de crecimiento en una pastura mezcla de raigrás anual y avena negra (*Avena strigosa*) sin pastoreo (30 kgMS/ha) que en los tratamientos pastoreados (39,2 kgMS/ha) con distintas intensidades (10, 20, 30 y 40 cm). Sin pastoreo, la acumulación neta de biomasa se produce a tasas crecientes hasta alcanzar una intercepción lumínica del 90 - 95 %, y el balance entre crecimiento y senescencia. A partir de este punto, la tasa de crecimiento promedio disminuye debido al sombreado en el interior del canopeo producido, la acumulación de material senescente, la disminución de la eficiencia fotosintética de las hojas más viejas y la menor tasa de macollaje generados por las condiciones lumínicas desfavorables (Parsons *et al.* 1988; Chapman and Lemaire, 1993). Sin embargo, entre 2016 - 2019 no se evidenció una tasa significativamente menor de CS-Sj ($p > 0,05$). Es posible que en estos años, la supresión química del CS fuese más anticipada, acortando el tiempo en que el cultivo se mantuvo con los niveles de intercepción superiores al 90%, y en consecuencia, no se presentó un importante efecto negativo en la tasa de crecimiento al final del período.

En los tratamientos con pastoreo, la producción de biomasa aumentó con la altura del raigrás hasta alcanzar una meseta a los 15 - 20 cm (IMB-Sj e IB-Sj) (Figura 9). Esto se explica por la variación en las tasas de crecimiento, ya que la duración del período de crecimiento

dentro de cada año fue igual para los 4 tratamientos. Sólo en 2019, IA-Sj interrumpió su crecimiento ~ 60 días antes.

Las tasas de crecimiento de 2016 a 2019 fueron similares a las registradas por de Albuquerque Nunes *et al.* (2019), que con el mismo protocolo experimental de Kunrath *et al.* (2014), registraron una tasa diaria de ~ 50kg MS/ha en pastoreo continuo de 20 cm y de ~ 35 kgMS/ha en pastoreo de 10 cm. Esta respuesta se asocia a la capacidad fotosintética o índice de área foliar (IAF). En condiciones de pastoreo continuo, la misma varía en función de la frecuencia e intensidad de defoliación. Mayores intensidades y frecuencias de pastoreo (5 o 10 cm), determinan una mayor pérdida de la capacidad fotosintética y/o retraso en la restauración del ritmo de crecimiento (Parson *et al.*, 1988), respecto de situaciones de pastoreos leves o moderados superiores a los 15-20 cm.

En el período 2013 a 2015, la menor diferencia de tasas de crecimiento entre las intensidades más altas y las más leves, puede deberse a la metodología de medición empleada (Planisich *et al.*, 2021). Al respecto, Pontes *et al.* (2004), comparando distintos métodos, remarcan la posibilidad de sobreestimar el crecimiento en situaciones de pastoreo continuo a altas intensidades al utilizar jaulas de exclusión en vez de macollos marcados. El aislamiento de los macollos de la defoliación de los animales por un período de tiempo, en este caso (28 días) es sustancialmente mayor a la que ocurre bajo pastoreo continuo donde se mantiene un bajo nivel de interceptación lumínica. En este sentido, Pontes también indica que la tasa de crecimiento estimada por jaula fue más del doble a la obtenida por medio de macollos marcados en la intensidad de 5 cm. En tanto que la tasa de crecimiento medidas con ambas técnicas fueron muy similares a intensidades de pastoreo de 10 y 15 cm. Con los antecedentes presentados, no se descarta el uso de las jaulas de exclusión como técnica de medición bajo pastoreo continuo, sino que se plantea la necesidad de aumentar la frecuencia de corte para mejorar la estimación de la productividad en escenarios de altas intensidades de pastoreo. Con el objetivo de reducir esta posible sobreestimación y aumentar la precisión de las determinaciones, a partir de 2016 se ajustó la frecuencia de corte de IA-Sj e IMA-Sj a 14 días e implementó una jaula más por tratamiento.

En este experimento, la biomasa remanente de los tratamientos pastoreados y la acumulada en CS-Sj, fueron medidas para evaluar los servicios de cobertura. Esta biomasa, se considera una variable importante de los sistemas integrados ya que conecta el ciclo ganadero y agrícola (Kunrath *et al.*, 2020). La cobertura del suelo permite reducir la erosión hídrica (Franzluebbers *et al.*, 2012), aumentar la incorporación de materia orgánica (Assmann *et al.*, 2014) y reducir el efecto negativo del pisoteo animal (Flores *et al.*, 2007). Como efecto inmediato de la cobertura se menciona la mejora en el control de malezas (Schuster *et al.*, 2019), cuyo efecto será mayor cuanto mayor sea la biomasa acumulada (Osipitan *et al.*, 2019). Al respecto, se señala un umbral de biomasa de 4000 kgMS/ha para suprimir al menos un 70

% del desarrollo de malezas (Piñeiro *et al.*, 2019). La biomasa remanente se incrementó con la altura y en la mayoría de los años, los niveles en IMB-Sj e IB-Sj fueron similar a la biomasa acumulada por CS-Sj ($p > 0,05$; Figura 10) e incluso superior al umbral mencionado. Por lo tanto, el pastoreo entre 15 y 20 cm, no solo favoreció el crecimiento del raigrás anual, además generó la biomasa suficiente para sostener una elevada producción de carne sin afectar los servicios de cobertura al mantener una adecuada biomasa remanente.

La producción de biomasa evaluada a lo largo de los años, no presentó una tendencia significativa ($p > 0,05$; Tabla 5) y su variación fue explicada básicamente por las precipitaciones acumuladas en el período de crecimiento del raigrás anual. De Albuquerque Nunes *et al.* (2021) presentan una evaluación de mayor duración (16 años) donde analizan la evolución de la producción de pasturas mezcla de raigrás anual y avena negra en el sur de Brasil, con y sin pastoreo. En coincidencia con los resultados obtenidos, tampoco encontraron una tendencia significativa en el tiempo y muestran una respuesta interanual afectada con las condiciones ambientales. Si bien la literatura da cuenta de los beneficios del pastoreo en el reciclaje de nutrientes y condiciones edáficas (Carvalho *et al.*, 2018a; Cecagno *et al.*; 2018) que podrían traducirse en crecientes niveles de producción, es probable que la variación de las condiciones ambientales entre años y/o la cantidad de años evaluados no permitan verificar este tipo de respuesta. Posiblemente, para ser concluyente en este aspecto, sería necesario un mayor tiempo de evaluación.

Respuesta animal

De acuerdo a los objetivos, se establecieron las cuatro intensidades de pastoreo y los valores promedios de alturas de cada tratamiento fueron cercanas a las previstas, con diferencias significativas entre sí ($p < 0,05$; Tabla 6). Se evidenció una variación interanual dentro de los tratamientos, que respondió a las diferencias en las condiciones climáticas y experimentales de cada año (inicio del pastoreo, movimiento de animales, entre otros). Particularmente, en el 2016 se dificultó mantener en gran parte del período de pastoreo las alturas objetivo de 15 y 20 cm para IMB-Sj e IB-Sj. Ese año los ajustes de caga animal debieron realizarse en un período de pastoreo más corto (61 días) comparado con los otros años y no resultaron suficientes para compensar las tasas de crecimiento especialmente altas (Tabla 2), promediando valores superiores a los buscados. En 2019 se registró una situación inversa. Las alturas de las intensidades intermedias y baja, promediaron valores ligeramente más bajos a los objetivos. Si bien las tasas de crecimiento promedio no fueron significativamente distintas a las de los años precedentes (2016 a 2018), la disminución de las precipitaciones registradas en julio y agosto (Tabla 1), las afectaron en ese período, y el control de la carga animal no resultó suficientemente preciso para evitar estar por debajo de las alturas objetivos.

La altura de pastoreo, a través de su efecto sobre el crecimiento de las pasturas (Tabla 4), es una herramienta práctica y confiable para el manejo del pastoreo, aun con las variaciones interanuales mencionadas (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2019; Kunrath *et al.*, 2020). Establecer la intensidad de pastoreo en cada tratamiento, requirió ajustar el número de animales por unidad de superficie, determinando una relación lineal e inversa entre la carga animal y la altura de pastoreo (Figura 12). En el pastoreo continuo, las alturas se deberían estabilizar cuando aparece un equilibrio entre la tasa de crecimiento de las pasturas y el consumo de los animales. El nivel en el que se manifiesta ese equilibrio dependerá de la intensidad de pastoreo (o carga animal) establecida. En cada nivel, por un lado, la intensidad de defoliación modifica la estructura y área fotosintética de la pastura, y en consecuencia su tasa de crecimiento. Y por otro lado, la estructura y cantidad de biomasa producida afecta el comportamiento ingestivo y por lo tanto el consumo de los animales (Carvalho *et al.*, 2018b). Además, las tasas de crecimiento responden a las condiciones ambientales, modificando las respuestas en carga animal. Estas variaciones explicarían los cambios en la relación entre carga animal y altura de pastoreo de este trabajo.

Todos los años, sin excepción, la producción de carne (kg/ha) respondió a una función cuadrática con la altura de pastoreo (Figura 13). Los valores máximos (366 a 464 kg/ha) se alcanzaron con las alturas de pastoreo moderado, que varió entre los 9,05 y 15,7 cm (Tabla 6). Esto fue consecuencia de la relación que la GPV (cuadrática) y CA (lineal decreciente) tuvieron con la altura de pastoreo. La GPV, tuvo los valores más bajos en la intensidad más alta de pastoreo (IA-Sj), donde las máximas cargas no fueron suficientes para compensar la disminución de la productividad individual, y por lo tanto, la producción de carne disminuyó. La GPV aumentó con el incremento de la altura de pastoreo hasta estabilizarse con alturas superiores a los ~ 9 cm. En el rango de alturas que abarcaron las intensidades moderadas de 9 a 18 cm, la producción de carne se mantuvo elevada hasta que la disminución de la carga animal en IB-Sj no estuvo compensada por su alta respuesta individual y, la producción de carne disminuyó. La producción de carne fue máxima al combinar alta GPV y CA intermedia.

La relación entre la CA, determinada aquí a través de la altura de pastoreo, y la GPV y la producción por unidad de superficie, ha sido extensamente estudiada (Aiken, 2016). Existe consenso en que, a bajas cargas la GPV se mantiene alta y comienza a disminuir en cuanto los aumentos de carga restringen el consumo de los animales, y que la producción por unidad de superficie presenta un comportamiento cuadrático, con una máxima producción a niveles intermedios de carga animal (Mott, 1960). Independientemente de las características de las pasturas y de los animales, la carga animal que permite la mayor producción por individuo siempre es menor que la carga animal donde se obtiene la mayor producción por unidad de superficie (Jones y Sandland, 1974; Aiken, 2016). La magnitud de la diferencia entre estas CA, depende en gran medida de las características de las pasturas, de los animales y sus

interacciones. Las variables de producción animal ajustaron según los modelos descriptos (Figura 13), con las correspondientes variaciones interanuales debidas a cambios en las tasas de crecimiento. En promedio, la mayor GPV se produjo a los $18,5 \pm 1,09$ cm (rango 22,1 a 14,8), la cual fue un 38 % mayor a la altura promedio donde se produjo la mayor producción por unidad superficie que estuvo en los $13,4 \pm 0,99$ cm (rango 9,05 a 15,7).

Planisich *et al.* (2021) informan los resultados promedio de 2014 y 2015 de este experimento, y como aquí se observa, la restricción en la GPV fue con alturas inferiores a los 18,6 cm. Al evaluar la GPV en más años, se evidencia que la respuesta animal fue variable (Tabla 6), debido a cambios en las condiciones de crecimiento forrajero, diferencias entre los animales y en el manejo de la carga animal. Cuando se amplía la base de datos a 6 años, la conclusión anterior puede extenderse.

La GPV alcanzó su máximo en los 18,5 cm promedio, y se afectó significativamente cuando la altura de pastoreo fue inferior a los ~9 cm. Trabajos del sur de Brasil con pastoreo continuo de mezcla de raigrás anual y avena negra con intensidades de 10, 20, 30 y 40 cm reportaron diferentes resultados. Por ejemplo, Kunrath *et al.* (2020) señalan una disminución de la GPV por debajo de los 19 cm, Lopes *et al.* (2008) de los 25 cm, Aguinaga *et al.* (2006) y Kunrath *et al.* (2014) de los 30 cm. Las diferencias pueden explicarse por los protocolos experimentales, el comportamiento y tipo de animal, la composición de las pasturas y las condiciones ambientales. Es evidente la necesidad de evaluar el desempeño animal en condiciones locales y por período mayores a dos años para ser concluyentes.

Resulta interesante destacar la variabilidad encontrada dentro de este mismo experimento. La mayor respuesta de la GPV se amesetó en torno a un umbral, que algunos años fue más cercano a los 10 cm (como 2016, 2018 y 2019) y otros, entorno a los 15 - 18 cm (2014, 2015 y 2017). En el caso de producción de carne, la mayor producción estuvo entorno a los 15 cm entre 2014 y 2017, pero más próximo a los 10 cm en 2018 y 2019. Si bien se puede aseverar que elevadas respuestas en términos de GPV y producción de carne se aseguran aproximadamente a los 15 cm, es importante considerar esta variabilidad a la hora de realizar recomendaciones de manejo. Resulta evidente que las conclusiones diferirían si las estimaciones se hubiesen realizado sólo los años 2014 y 2015 respecto a si se hubiesen hecho sólo en 2018 y 2019, por ejemplo. Analizar estas variables en 6 años dio un panorama más completo sobre la respuesta animal, y aunque no se afirma que es el tiempo de evaluación mínimo, se puede indicar que obtener información en períodos menores podría llevar a conclusiones incompletas.

La respuesta animal individual (GPV) se define principalmente por el consumo (CMS) y el valor energético de la pastura (Sollenberger y Wallau, 2020). En este trabajo, el rol del consumo fue preponderante, ya que la calidad nutricional no varió significativamente con la intensidad de pastoreo, ni presentó valores restrictivos para el desempeño de los animales

(Figura 11). En todos los tratamientos se observaron niveles promedio de DIVMS de 76,9% y de PrB de 19,3%.

La relación positiva de la altura de pastoreo con el CMS y su consecuente desempeño animal será ampliada en el Capítulo 3 (Experimento 2). Sin embargo, cabe señalar la extensa referencia de la literatura a esta relación (Hodgson, 1981; Hodgson, 1985; Poppi *et al.*, 1987; Boval y Sauvant, 2021). En pasturas vegetativas existe una relación directa entre el peso de los bocados, principal componente del comportamiento ingestivo (Boval y Sauvant, 2021), y la altura de las pasturas, debido a la mayor profundidad de los bocados que los animales pueden generar cuando las pasturas son más altas (Laca *et al.*, 1992a; Cangiano *et al.*, 2002). A baja intensidad de pastoreo, la formación de bocados más pesados se traduce en tasas de consumo más elevadas. Sin restricción en el tiempo de pastoreo, determina un elevado CMS diario. Por el contrario, la defoliación a muy altas intensidades provoca una disminución en el peso de bocado, que no es compensado por mayores tasas de bocado, y por lo tanto la tasa de consumo disminuye. El aumento del tiempo diario de pastoreo es limitado y en consecuencia, bocados más livianos determinan un menor CMS (Cangiano *et al.*, 2002; Orr *et al.*, 2004).

De Sousa Filho *et al.* (2019), en gramíneas anuales, registraron una reducción del CMS del 20% en pastoreo a 10 cm respecto a los registrados entre los 20 y 40 cm en mezclas de raigrás anual y avena negra. En pasturas muy altas puede haber una reducción de peso de los bocados y de las tasas de consumo (Carvalho, 2013; Mezzalira *et al.*, 2017). En avena negra, con alturas superiores a los 30 cm y hasta 50 cm, se obtuvieron reducciones importantes en los pesos de bocado y tasas de consumo. Se atribuye a una restricción en la formación del bocado debida a una disminución del área y profundidad de los mismos. Posiblemente generada al evitar las estructuras de vainas y tallos más abundantes en estas estructuras más altas. Este mecanismo podría explicar la disminución en la GPV observada en 2016 con la menor intensidad de pastoreo, único año donde se registraron alturas cercanas a los 30 cm (Figura 13).

Rendimiento del cultivo de soja

La incorporación y pastoreo de los cultivos de servicio no generó un incremento en el rendimiento del cultivo de soja, ni en el corto ni en el mediano plazo. Sin embargo, la integración con la ganadería no perjudicó el rendimiento en grano del cultivo agrícola comparado con la implementación de CS sin pastoreo o el planteo de soja pura. Con rindes promedios superiores a los 3500 kgMS/ha en todos los años, los planteos integrados sumaron la producción de carne y diversificaron al sistema en su conjunto. Estos resultados concuerdan con los presentados por Peterson *et al.* (2020), que a través de una amplia revisión de trabajos de distintos sistemas integrados (pastoreo de cultivos de servicio, rotaciones con pasturas,

aprovechamiento de rastrojos) y abarcando ambientes edafoclimáticos muy diferentes (Australia, Brasil, Argentina, USA, Canadá), concluyeron que los rendimientos en los sistemas integrados con pastoreo fueron similares a aquellos sin pastoreo. La igualdad entre rendimientos, lo señalan como un aspecto positivo para lograr una intensificación agroecológica de la agricultura y una mejor eficiencia en el uso de la tierra.

La integración de la ganadería a través del pastoreo directo en esquemas agrícolas puros, genera preocupación por el riesgo de la compactación a través del pisoteo, disminución de la biomasa en el cultivo invernal o inadecuado balance de nutrientes (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2021). Sin embargo, la bibliografía muestra que, bajo un manejo de pastoreo con intensidades entre moderadas a leves, combinado con prácticas conservacionistas como la siembra directa, dichos riesgos no generan un impacto negativo concreto y/o duradero, tanto en las cualidades físico-químicas del suelo como en el rendimiento del cultivo agrícola (Bell *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2018b; Peterson *et al.*, 2020). En este sentido, el aumento de densidad aparente del suelo registrado en situaciones de pastoreo continuo de CS de raigrás anual y avena negra pastoreado entre 20 a 40 cm en el sur de Brasil, resultó temporal y sin ningún efecto negativo sobre el rendimiento del cultivo de soja sucesor (Kunrath *et al.*, 2015). Localmente, en este experimento, registros de resistencia a la penetrometría de los primeros 20 cm no presentados en esta tesis, mostraron un aumento entre el primer y séptimo año de rotación, de 29,5 y 11,5 % en las altas intensidades de pastoreo (IA-Sj e IMA-Sj) y los tratamientos sin pastoreo (CS-Sj y Sj-Sj), respectivamente. En los pastoreos más leves (IMB-Sj e IB-Sj) disminuyó un 11,5 % (Bonel *et al.*, 2022). Pese a estas variaciones, los rendimientos del cultivo de soja no acusaron diferencias entre los tratamientos.

Si bien en este trabajo, ninguna de las intensidades de pastoreo afectó el rendimiento del cultivo de soja, no se puede afirmar que la intensidad de pastoreo en cualquier situación será inocua para la actividad agrícola. De Moraes *et al.* (2014) muestran algunos resultados con un efecto positivo del pastoreo sobre la producción agrícola, y otros donde el efecto fue negativo. En este último, se debieron a condiciones de extrema humedad, o condiciones experimentales deficientes, como un inadecuado manejo de la carga animal (Peterson *et al.*, 2020; De Moraes *et al.*, 2014). Kunrath *et al.* (2015), detectaron un efecto negativo sobre el rendimiento de soja bajo un pastoreo continuo de 10 cm en una mezcla de avena negra y raigrás anual. Una mayor compactación del suelo estuvo asociado a una reducción de la cantidad de plantas de soja por unidad de superficie y su rendimiento. En los pastoreos relativamente más intensos, puede haber diferentes respuestas por las diferencias en el manejo de distintas especies de cultivos invernales, de distintos tipo y peso de animales, variaciones en los períodos de pastoreo y en las condiciones edafoclimáticas de cada sitio. Peterson *et al.* (2020) mencionan que los suelos con textura franca aparecen como los mejores candidatos para implementar el pastoreo en las rotaciones agrícolas. En suelos

francos, los manejos integrados rindieron un 5% más comparados con las situaciones sin pastoreo, y no encontraron diferencias en suelos arcillosos y arenosos. El mejor desempeño de los esquemas integrados en suelo francos, se atribuye a las propiedades físicas e hidrológicas de estos suelos, menos propensos a la compactación que los arcillosos, y más resistentes a la pérdida de carbono orgánico, a la erosión y a la pérdida de agua que los arenosos. Los resultados presentados contribuyen a la idea ampliamente aceptada de que pastoreos leves o moderados (superiores a los 10 cm), no perjudican la respuesta en el rendimiento del cultivo sucesor.

El efecto del pastoreo en el mediano plazo, se evaluó considerando la evolución del rendimiento de soja a lo largo de los años, para detectar un efecto acumulado (Tabla 8), y la variabilidad de los rendimientos (Tabla 7) analizando parámetros como % CV, rango y DE. En el análisis de regresión, la variación observada se relacionó con el ciclo del cultivo (días) y las condiciones ambientales, especialmente las precipitaciones (Tabla 8). La duración del cultivo varió cada año debido a factores como las condiciones de humedad y temperatura, así como el momento oportuno para realizar las labores agrícolas (Tabla 3). No se encontró un efecto acumulado del pastoreo de los CS en los rendimientos, en concordancia con estudios previos de Albuquerque Nunes *et al.* (2021) y Delandmeter *et al.* (2024). Estos autores tampoco detectaron diferencias significativas entre tratamientos luego de 16 y 18 años, respectivamente. Sin embargo, no se descarta que se pueda evidenciar este efecto en plazos de mayor duración.

Peterson *et al.* (2020) analizaron el tiempo de evaluación del efecto del pastoreo en los rendimientos agrícolas y concluyeron que, a diferencia de los esquemas de producción orgánica, estos sistemas no requieren de un período de transición. Bajo pautas de pastoreo moderado, siembra directa y manejo adecuado en condiciones de temporales muy húmedos, el pastoreo puede implementarse sin afectar los rendimientos agrícolas desde el inicio. Los resultados obtenidos respaldan esta afirmación, el pastoreo no tuvo un efecto adverso en el rendimiento del cultivo de soja, independientemente de las distintas condiciones anuales.

En general la variabilidad en el rendimiento de soja aumentó con la altura de pastoreo y fueron mayores en CS-Sj y Sj-Sj, aunque solo se diferenció el pastoreo más intenso comparado con el monocultivo de soja. Según De Albuquerque Nunes *et al.* (2021), estas variables son indicadores de estabilidad. Su análisis muestra que los pastoreos leves de 20 y 30 cm fueron los más estables. Los autores lo asociaron con un aumento en la biodiversidad microbiana y de nemátodos, y en la condición de los agregados del suelo, lo cual favorece el crecimiento del cultivo de soja. Aunque los resultados de este trabajo no son concluyentes y sería necesario evaluar durante más años para verificar la tendencia en las condiciones locales, se observa una mayor estabilidad en los rendimientos agrícolas cuando se integra el pastoreo de los CS.

Evaluación del sistema integrado

Al analizar los resultados de productividad de los sistemas en su totalidad, a través de la energía y la proteína digestible humana, se evidencia la ventaja de los sistemas integrados sobre los puramente agrícolas (Tabla 9). Aunque el rendimiento de soja fue similar en todos los casos, los tratamientos con pastoreo moderado mostraron una mayor producción animal, lo que amplía las diferencias en productividad total. Estos resultados coinciden con los presentado por de Albuquerque Nunes *et al.* (2021) y Delandmeter *et al.* (2024), quienes registraron mayor productividad en los sistemas integrados, y principalmente en aquellos con alta producción de carne, en comparación con los sistemas sin pastoreo.

La mayor productividad de los sistemas integrados no solo es una ventaja cuantitativa, sino que también ofrece una mayor capacidad para amortiguar las variaciones en productividad de los sistemas agrícolas puros, cuya productividad puede ser menos estable en años desfavorables. En estos casos, la producción de carne puede contribuir a compensar la disminución de la producción agrícola (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2021). Esta capacidad es especialmente importante para la seguridad alimentaria, ya que los sistemas integrados no solo producen más proteína digestible humana, sino que también aportan elementos indispensables para la nutrición humana como vitamina B12, aminoácidos esenciales y hierro, entre otros (van Zanten, 2016). La utilización de recursos no digestibles para los humanos, como los forrajes para producir proteína de alta calidad de origen animal, incrementa la eficiencia del uso de la tierra destinada a la producción de alimentos (van Zanten, 2016; Peyraud y Peeters, 2016).

CONCLUSIONES

- En el marco de los sistemas integrados, el pastoreo de raigrás anual (cultivo de servicio) con intensidades moderadas (10 - 15 cm) incrementó la productividad total del sistema en términos de energía (Mj/ha) y proteína digestible humana (kg/ha), en un 6,7 y 8 %, respectivamente.
- El pastoreo con intensidades moderadas a bajas (15 - 20 cm) incrementó la producción total de raigrás anual en comparación con intensidades más altas o la ausencia de pastoreo. Aunque no se evidenció un aumento de producción en ninguno de los tratamientos debido a un efecto acumulado de la intensidad de pastoreo, las intensidades moderadas a baja, permitieron sostener elevadas respuestas de GPV (kg/día) sin afectar la biomasa remanente comparada con un CS sin pastoreo.
- La producción de carne presentó una respuesta cuadrática frente a distintas intensidades de pastoreo. Alcanzó los valores máximos con alturas de pastoreo de 13,4 cm (rango entre 9,05 y 15,7 cm), como consecuencia de una elevada GPV (kg/día) y una carga animal intermedia (cab/ha).
- La producción del cultivo de soja sucesor no se vio afectada por el pastoreo de los cultivos de servicio ni a corto ni a mediano plazo. La integración del pastoreo con el cultivo agrícola no requirió de un período de transición, por el contrario, mostró un indicio de mayor estabilidad en los rendimientos agrícolas.

CAPÍTULO 3:

EXPERIMENTO 2: IMPORTANCIA DE LA INTERFASE PLANTA-ANIMAL EN LA PRODUCTIVIDAD ANIMAL ESTIMADA EN EL DE CORTO PLAZO

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta un trabajo realizado sobre la base del Experimento 1, enfocado en los períodos de pastoreo del raigrás anual de 2 años consecutivos (2018 y 2019). Con actividades específicas, y tomando la información previamente analizada, se profundiza en el análisis de la relación entre la intensidad de pastoreo y la producción animal.

En primer lugar, se analizan los mecanismos involucrados en la determinación de la respuesta animal por unidad de superficie bajo diferentes intensidades de pastoreo. Para ello, se analizó la relación con la carga animal y la producción individual (GPV * días de pastoreo), así como el efecto de la intensidad de pastoreo sobre estos factores.

En segundo lugar, se explica la GPV a través del consumo de materia seca digestible en respuesta a la intensidad de pastoreo. Se estimó la digestibilidad del raigrás anual y el nivel de consumo de materia seca alcanzado en cada situación. Además, se evaluó el efecto de la altura de la pastura sobre la tasa de consumo (gMS/h), el tiempo de pastoreo (h) y los componentes del comportamiento ingestivo (peso y tasa de los bocados, asignación de movimientos mandibulares, entre otros). Estos parámetros permiten interpretar y comparar los niveles de CMS alcanzados por las vaquillonas. Para estimar el CMS y las variables del comportamiento ingestivo, se utilizó el método acústico con el modelo de regresión ajustado en el experimento 3.

Las hipótesis específicas planteadas fueron:

1. La respuesta cuadrática de la producción de carne (kg/ha) ante la intensidad de pastoreo se explica tanto por la carga animal (cab/ha) como por la producción individual, ambos con igual relevancia en términos relativos.
2. La tasa de consumo (kgMS/h) es determinante del consumo diario (gMS) y de la respuesta en términos de GPV (kg/día).
3. La tasa de consumo de los animales aumenta con intensidades de pastoreo moderada como consecuencia de un mayor peso de bocados.

Los objetivos específicos fueron:

1. Cuantificar la contribución relativa de la carga animal (cab/ha) y la producción individual (kg/animal) en la determinación de la producción de carne (kg/ha) de vaquillonas holando argentino.
2. Determinar la relación entre el consumo diario (gMS), la tasa de consumo (gMS/h) y la GPV (kg/día) de vaquillonas holando argentino con distintos niveles de intensidad de pastoreo de raigrás anual (cultivo de servicio).

3. Medir la relación entre la intensidad de pastoreo de raigrás anual y la tasa de consumo (kgMS/h) de vaquillonas holando argentino a través de los componentes del comportamiento ingestivo (peso y tasa de bocado, tiempos de masticación y búsqueda, y otros).

MATERIALES Y MÉTODOS

Respuesta animal

Procedimiento experimental

Se modeló la ganancia de peso vivo (kg/día) en función de la altura. En particular, se estudió la respuesta obtenida en los años 2018 y 2019.

Se calculó la biomasa posible de ser pastoreada de cada tratamiento (biomasa ofrecida de aquí en adelante) en términos de kgMS/ha/día, a partir de la suma de las biomásas acumuladas por encima de las alturas objetivo y recolectadas en las jaulas de exclusión descritas en el Experimento 1. Específicamente, se consideró la biomasa acumulada desde la emergencia al primer corte de las jaulas (i.e. inicio de pastoreo), más los sucesivos cortes, excluyendo el remanente. Luego se ajustó su relación con la altura.

La carga animal se analizó en función de la biomasa ofrecida de raigrás anual, para lo cual se testeó la relación lineal entre ambas variables. Además, se calculó la producción de carne individual como el producto de la GPV y los días de pastoreo alcanzado en cada tratamiento y año (kg/animal). La producción de carne (kg/ha) se analizó en función de la respuesta individual y la carga animal, considerando la variación debido a la altura en ambas variables respuesta.

Comportamiento ingestivo y consumo de materia seca

Procedimiento experimental

Se realizó el monitoreo del comportamiento ingestivo y la estimación de consumo de materia seca diaria (CMS) en las distintas intensidades de pastoreo utilizando el método de biotelemedría acústica. Se registró el sonido de arranque y masticación de los animales durante los turnos o períodos de pastoreo que ocurren a lo largo de un día, y el tiempo de pastoreo y rumia de las vaquillonas holando argentino.

En dichos registros es posible distinguir de forma visual y acústica cada tipo de movimiento mandibular (Figura 15). Los arranques (A) se identifican por el chasquido que se produce durante la aprehensión y corte de las plantas entre los dientes incisivos y el rodete dentario. Las masticaciones puras (M) se distinguen por el crujido de los dientes molares y premolares cuando muelen el alimento antes de tragarlo, la cual se observa como una marca de menor amplitud e intensidad. Los movimientos compuestos (MC) ocurren cuando una masticación precede y se superpone parcialmente con un arranque en el mismo movimiento de cierre de la mandíbula. El sonido y la forma de los movimientos compuestos es más largo

y el forraje arrancado en un bocado anterior es masticado por los molares y premolares a la vez que un nuevo bocado es arrancado por los incisivos y el rodete dentario.

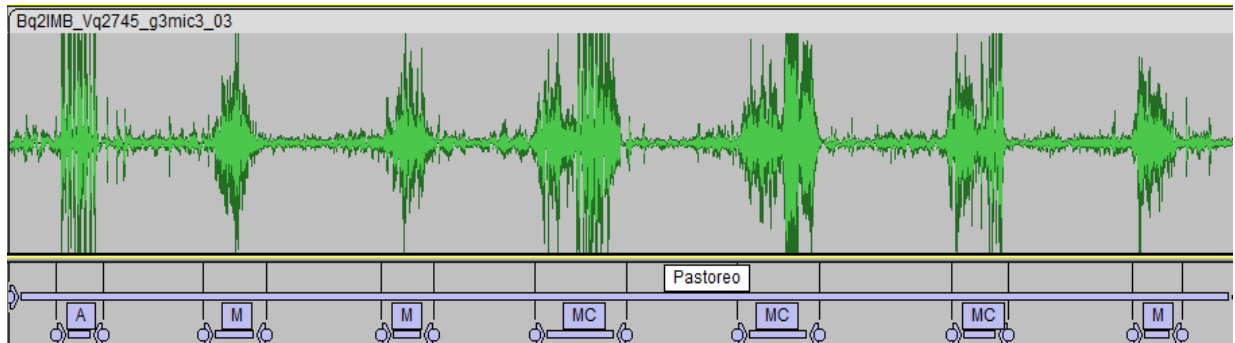


Figura 15: Fracción de una señal de sonido de un turno de pastoreo editada y procesada mediante el programa Audacity. Se muestra la identificación y segmentación de los movimientos mandibulares en arranque (A), masticación pura (M) o movimiento compuesto (MC).

Descripción de los equipos de registro acústico

Cada equipo de registro acústico incluyó un micrófono y un grabador, dispuestos sobre un bozal especialmente adaptado al tamaño de cabeza de las vaquillonas (Figura 16). El micrófono, protegido por una cápsula de goma, se ubicó contra la frente del animal, sostenido y aislado con una doble banda elástica y conectado al grabador por un cable. El grabador digital (SONY ICDPX312) se colocó dentro de una caja estanca sujeta al bozal y por detrás del cuello de las vaquillonas, para su protección y aislamiento.

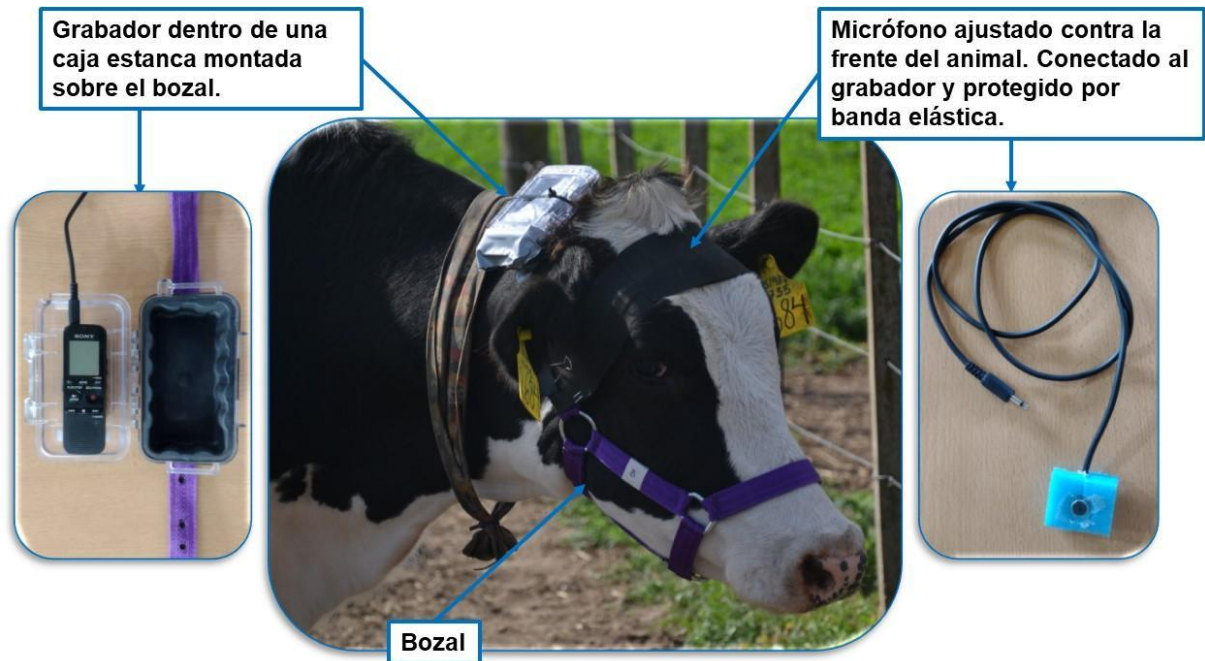


Figura 16: Dispositivo para el registro acústico.

Los registros acústicos se hicieron en formato MP3 a 128 kbps, con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz y una resolución de 16 bits, proporcionando un ancho de banda de grabación nominal de 22 kHz y un rango dinámico de 96 dB, y se almacenaron en la memoria externa del grabador (microSD de 32 GB). En el inicio de cada registro se grabó una señal estándar de 5 segundos, que luego se utilizó como patrón para corregir las diferencias en los sonidos mandibulares debido a los equipos. Inmediatamente después de retirar los bozales, archivos MP3 se descargaron y almacenaron para su posterior procesado, y los animales volvieron a su parcela para continuar el pastoreo.

Registros acústicos y animales experimentales

Sobre 48 animales dispuestos en los 3 bloques y 4 tratamientos del Experimento 1 en 2018 y 2019, se obtuvieron los registros acústicos de 24 h de duración. En el año 2018 se registró por única vez entre los días 14/09 y 26/09. En 2019 se obtuvieron 2 registros, el primero entre el 21/08 y el 05/09, y el segundo entre el 19/09 y el 03/10. En el último período no se registró en IA-Sj ya que se había interrumpido el pastoreo por falta de crecimiento del raigrás anual.

Se utilizaron 8 equipos de grabación de similares características, que fueron asignados al azar a 2 vaquillonas por parcela (tratamiento) dentro de un mismo bloque, por día de medición (Figura 17). En cada día de medición, los equipos se colocaron en las vaquillonas la tarde anterior y se retiraron a la mañana siguiente, para asegurar la grabación de 24 h. Este procedimiento se repitió hasta completar los 3 bloques en cada conjunto de registros. La colocación y retiro de los equipos se realizaron en las instalaciones que se encuentran en el mismo lote experimental. Durante la semana previa al período experimental, los animales fueron entrenados para la colocación y el uso de los equipos de registro acústico.



Figura 17: Vaquillonas del Experimento 1 con equipos de registro acústico durante la grabación de pastoreo en períodos de 24 h.

Las vaquillonas tuvieron un peso vivo promedio de $320 \pm 5,55$ kg. Los días que se realizaron los registros, las parcelas pastoreadas tenían una altura similar a la objetivo de cada tratamiento (Tabla 10).

Tabla 10: Peso vivo de las vaquillonas, altura del raigrás anual promedios y error estándar en las fechas de obtención de los registros acústico.

Variable	Año	Tratamiento			
		IA-Sj	IMA-Sj	IMB-Sj	IB-Sj
Peso vivo vaquillonas	2018	$304 \pm 15,3$	$343 \pm 16,7$	$311 \pm 26,5$	$317 \pm 15,3$
	2019	$302 \pm 11,3$	$328 \pm 11,3$	$332 \pm 11,3$	$332 \pm 11,8$
Altura raigrás anual	2018	$5,40 \pm 0,61$	$9,95 \pm 0,61$	$17,3 \pm 0,61$	$23,7 \pm 0,61$
	2019	$6,78 \pm 0,61$	$8,44 \pm 0,43$	$14,4 \pm 0,43$	$18,5 \pm 0,43$

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta, IMB-Sj: Intensidad media baja, IB-Sj: Intensidad baja.

Sobre el total de 66 registros acústicos obtenidos se debieron descartar 9 (5 del año 2018 y 4 del año 2019), que por diversos motivos (ie. desacomodamiento del micrófono o interferencias) no completaron las 24 h de grabación (Tabla 11).

Tabla 11: Registros acústicos para el registro del tiempo de pastoreo y rumia, determinación del comportamiento ingestivo y cálculo del consumo de materia seca de vaquillonas holando argentino.

Año	2018	2019	Total	
Periodo de registro	14/09 – 26/09	21/08 – 05/09	19/09 – 03/10	
Total de animales con equipos	24	24	18	66
Tiempo de pastoreo y rumia	19	22	16	57
Comportamiento ingestivo	16	13	-	29
Consumo de materia seca	16	-	-	16

Procesamiento de registros acústicos y variables analizadas

El análisis de registros acústicos se realizó con el Audacity® (Versión 3.3.1, 2023), para delimitar el período correspondiente a las 24 h de cada día asignado a cada registro acústico. Mediante observación visual y auditiva de los registros, se clasificaron y etiquetaron manualmente los bloques correspondientes a cada actividad como Pastoreo, Rumia u Otro (ninguna de las actividades anteriores, Figura 18). Los turnos de pastoreo se identificaron por el conjunto característico de sonidos de arranques, masticaciones puras y movimientos compuestos, en períodos mayores a 5 minutos. Visualmente, se identifica por el conjunto de arranques (mayor intensidad) que se producen de forma casi continua (Figura 15 y 18). Se incluyeron las interrupciones (ausencia de movimientos mandibulares) menores a 5 minutos siempre que no se detectara un cambio de actividad como beber agua. La rumia se diferenció por el sonido de sucesivas masticaciones puras (sin arranques) en ciclos de aproximadamente un minuto, donde cada ciclo es precedido por el sonido de regurgitación y seguido por el de

deglución del bolo y cuya menor intensidad se visualiza fácilmente (Figura 15 y 18). En este caso, cada turno de rumia se consideró cuando se prolongó por más de 5 minutos, incluyendo las interrupciones menores a 5 minutos. La duración (min) de todos los turnos de pastoreo y rumia se sumaron para calcular los tiempos totales de pastoreo y de rumia.

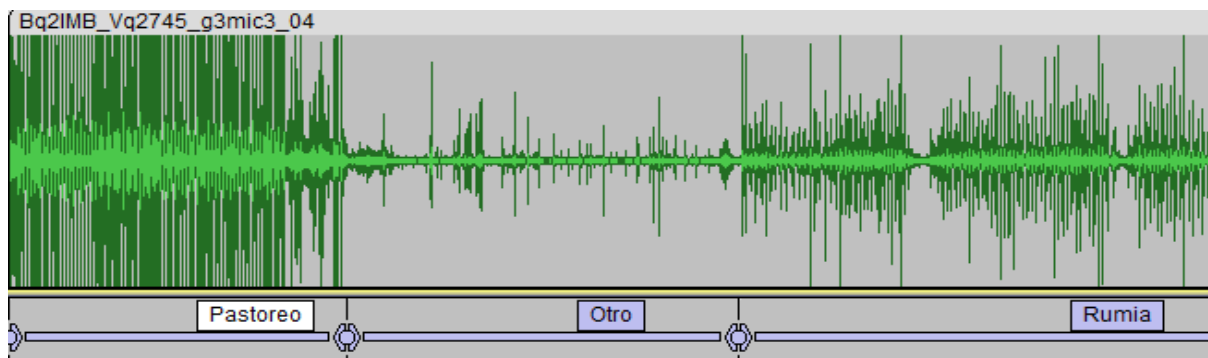


Figura 18: Fracción de una señal de sonido editada y procesada mediante el programa Audacity. Se muestra la identificación y segmentación de actividades de Pastoreo, Rumia y Otro.

Posteriormente, de los 57 registros procesados, se seleccionó un conjunto, 16 del año 2018 y 13 del primer registro del año 2019, que por su calidad acústica y visual permitían una rápida y precisa identificación y segmentación de cada uno de los movimientos mandibulares. Se excluyeron aquellas señales que presentaban interferencias en la grabación por mal funcionamiento del dispositivo. En cada señal (N=29, Tabla 11), se seleccionaron los 4 turnos de pastoreo de mayor duración y se identificaron, segmentaron y contaron los arranques, las masticaciones puras y los movimientos compuestos de forma manual en períodos de 2 minutos a intervalos de 10 minutos.

Con estos valores, se estimó la tasa de cada movimiento mandibular (min^{-1}) promedio de cada turno y total del pastoreo diario multiplicando por el tiempo de pastoreo diario. A partir de esta información se calcularon las siguientes variables de comportamiento ingestivo para analizar su respuesta a las distintas intensidades de pastoreo:

- número de arranques, A
- número de masticaciones puras, M
- números de movimientos compuestos, MC
- número de bocados, $B = A + MC$
- número de masticaciones totales, $M_{\text{tot}} = M + MC$
- número de movimientos mandibulares, $MM = A + M + MC$
- tiempo de pastoreo, T (min)
- tasa de bocados, $TB = B / T$ (B/min)
- tasa de arranque, $AT = A / T$ (A/min)
- tasa de masticaciones puras, $MT = M / T$ (M/min)

- tasa de movimientos compuestos, $MCT = MC / T$ (MC/min)
- tasa movimientos mandibulares, $MMT = MM / T$ (MM/min)
- proporción de arranques, $PA = A/MM$
- proporción de movimientos compuestos, $PMC = MC / MM$
- proporción de masticaciones puras, $PM = M / MM$
- proporción de masticaciones totales, $PM_{tot} = M_{tot} / MM$
- arranques por bocados, $AB = A / B$
- movimientos compuestos por bocado, $MCB = MC / B$
- masticaciones puras por bocado, $MB = M / B$
- masticaciones totales por bocado, $M_{tot}B = M_{tot} / B$
- movimientos mandibulares por bocado, $MMB = MM / B$

El CMS promedio diario en cada intensidad de pastoreo se estimó en un total de 16 animales, a partir de las señales registradas en el año 2018 (Tabla 11). Se utilizó el modelo obtenido en el Experimento 3 (ver en capítulo 4), definido como:

$$CMS = 1293 + (0,002 * EC) - (19,4 * MCT) - (14,0 * MT)$$

donde, EC es la energía de consumo calculada como la suma de la energía total de las masticaciones puras ($M * \text{energía de } M \text{ promedio}$) y la energía total de las masticaciones de los movimientos compuestos ($MC * \text{energía de las masticaciones de } MC \text{ promedio}$), MCT y MT son las tasas de los respectivos movimientos masticatorios.

La energía de las masticaciones puras (EM) y de las masticaciones de los MC (EMC) promedio por vaquillona, se calculó a partir de la intensidad (amplitud) promedio y la duración del sonido delimitado en cada movimiento mandibular. Dichos valores promedios se obtuvieron seleccionando 2 M y 2 MC de cada segmento de 2 minutos analizados en el procedimiento anterior, su energía se estimó sumando las amplitudes al cuadrado (función “norm(señal)^2”) del programa de cálculos GNU Octave, Version 5.2.0 (Eaton *et al.*, 2019). Ya que la energía del sonido está ligada a la cantidad de forraje cortado por el animal y progresivamente triturado mediante las masticaciones, la EC se consideró como la energía de cada evento masticatorio multiplicada por el número total de eventos. Además, se calcularon las siguientes variables relacionadas al CMS:

- tasa de consumo, $TCMS = CMS / T$ (gMS/h)
- peso de bocado, $PB = CMS / B$ (gMS)
- masticaciones totales por gMS, $M_{tot}.gMS = M_{tot} / CMS$

Análisis estadístico

Las relaciones de la biomasa ofrecida con la altura de pastoreo, y la carga animal con la biomasa ofrecida, se analizaron mediante regresión lineal simple. De igual forma se ajustó la relación de MtotB con la altura de pastoreo, de la TB con MMB y de MtotB con el PB. Excluyendo esta última relación, en todos los casos se evaluaron en conjunto los datos de los dos años habiendo verificado la significancia del efecto año previamente. Se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta, β_0 es la ordenada al origen, β_1 es el coeficiente (pendiente) de X_1 , X_1 es la variable independiente, y e_i es el error aleatorio.

La GPV, el CMS, y las variables referidas a comportamiento ingestivo y movimientos mandibulares se ajustaron por regresión lineal con la altura de pastoreo, según el modelo de línea quebrada:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + (\delta * X_1, \text{ si } X_1 \geq X_j, \text{ sino } 0) + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta, β_0 es la ordenada al origen del primer segmento, β_1 es la pendiente del primer segmento, X_1 es la variable independiente altura, δ es la diferencia de la pendiente del segundo segmento respecto a β_1 , X_j es el valor de X_1 donde se produce el quiebre o cambio de pendiente, y e_i es el error aleatorio. Para CMS y las variables de comportamiento ingestivo y movimientos mandibulares, se ajustó con la altura de pastoreo del día de medición.

El tiempo de pastoreo y de rumia se analizaron según el modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \tau_j + \Omega_k + (\tau\Omega)_{jk} + e_{ijk} \quad i=1,2,3 \quad j=1,\dots,4 \quad k=1,2$$

Donde Y_{ijk} es el valor de la ijk -ésima observación, μ es la media general, β_i es el efecto del i -ésimo bloque, τ_j es el efecto del j -ésimo tratamiento, Ω_k es el efecto del k -ésimo año de medición, $(\tau\Omega)_{jk}$ es el efecto de la interacción entre el j -ésimo tratamiento y el k -ésimo año de medición y e_{ijk} es el error aleatorio de la ijk -ésima observación.

La Mtot.gMS, según el modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + e_{ij} \quad i=1,2,3 \quad j=1,\dots,4$$

Donde Y_{ij} es el valor de la ij -ésima observación, μ es la media general, β_i es el efecto del i -ésimo bloque, τ_j es el efecto del j -ésimo tratamiento, y e_{ij} es el error aleatorio de la ij -ésima observación. Las diferencias entre las medias se compararon por Tukey-Kramer HSD ($p <$

0,05). En todos los casos, se presentan las medias ajustadas y sus respectivos errores estándares.

Para evaluar los efectos de la altura de pastoreo sobre la carga animal y la producción de carne individual, y finalmente en la producción de carne por unidad de superficie se hizo un análisis por paso (Li, 1975). Para este análisis se consideraron los efectos de la altura indicados por flechas unidireccionales (efectos directos) y la relación entre las distintas variables predictoras por flechas bidireccionales (Figura 19). Los efectos directos fueron calculados como coeficientes estandarizados de las regresiones lineales simples, en tanto que la relación entre variables predictoras fue evaluada a través de los parámetros de correlación por par de variables. El efecto indirecto entre dos variables se calcula como la multiplicación de los coeficientes estandarizados y de correlación intermedios. El efecto total de una variable sobre otra se estima como la suma de su efecto directo más su efecto indirecto. Como resultado, se presentan aquellos efectos y correlaciones cuyos valores fueron significativos ($p < 0,05$).

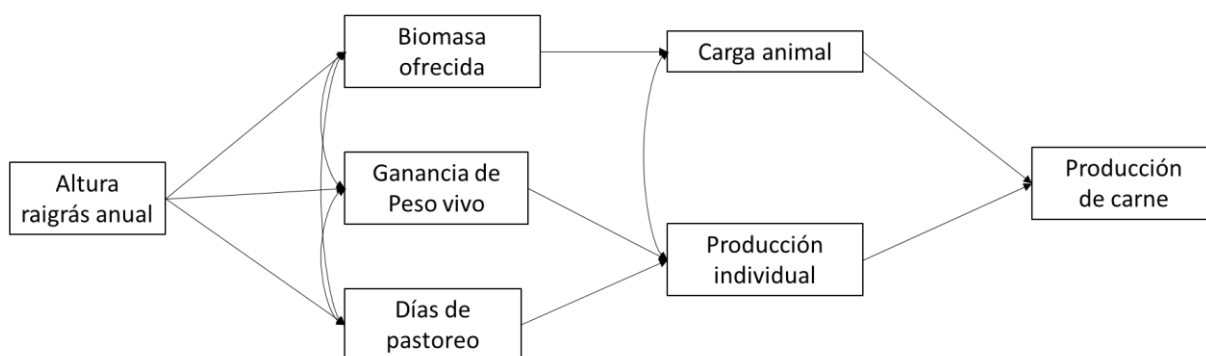


Figura 19: Modelo de análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan la producción de carne (kg/ha) y el efecto de la altura de pastoreo (cm), para los años 2018 y 2019 (N=24).

Para explicar el efecto de la intensidad de pastoreo sobre el CMS también se utilizó el análisis por paso (Li, 1975). Se evaluaron los efectos directos e indirectos de las distintas alturas de pastoreo sobre los componentes del comportamiento ingestivo. Se propuso un modelo en función de los objetivos este experimento (Figura 20). El CMS se analizó como resultado de la tasa de consumo (TCMS) y el tiempo de pastoreo. La TCMS resulta de dos componentes, peso de bocado y tiempo por bocado. A su vez, tiempo por bocado se define por la proporción de movimientos compuestos por bocado, la tasa de movimientos mandibulares y la cantidad de masticaciones por bocado. Como resultado, se presentan aquellos efectos cuyos valores fueron significativos ($p < 0,05$). Este análisis se formuló a partir de los cálculos de CMS y registros acústicos obtenidos en 2018 (N=16, Tabla 11).

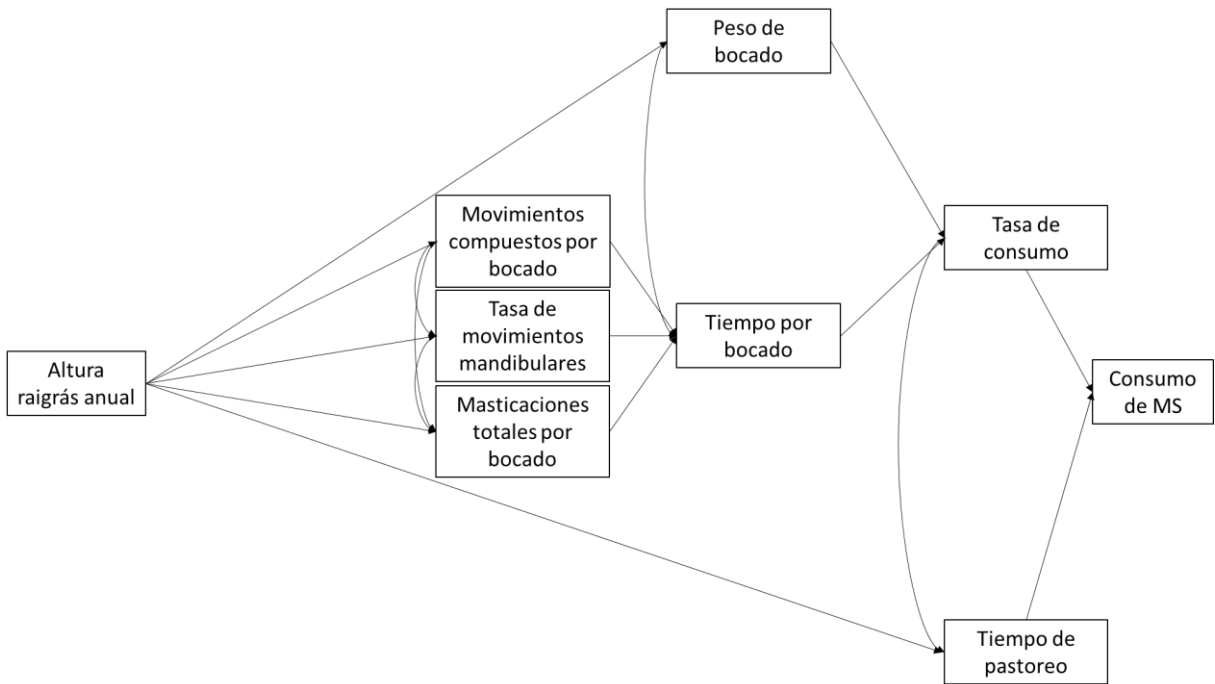


Figura 20: Modelo de análisis por paso de las variables que determinan el consumo de materia seca utilizando los datos obtenidos en 2018 (N=16).

El tiempo por bocado se estudió en particular. Se realizó un análisis por paso (Li, 1975) sobre los efectos de la altura en las variables determinantes del tiempo por bocado (Figura 21), a partir de una base de información ampliada con los datos calculados en el año 2019 (N= 29, Tabla 11).

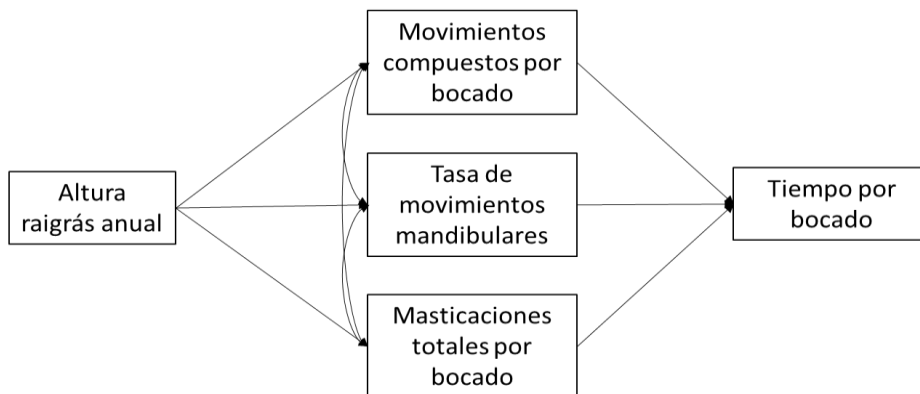


Figura 21: Modelo de análisis por paso de las variables que determinan el tiempo por bocado utilizando los datos obtenidos en 2018 y 2019 (N=29).

Todos los análisis se realizaron con el software R 4.2.0 (R Core Team, 2022). Los análisis por paso se realizaron a través del paquete Lavaan (Rosseel, 2012) del software R (R Core Team, 2022).

RESULTADOS

Respuesta animal

La GPV ajustó una respuesta de tipo línea quebrada (Figura 22). La altura explicó el 79% de la variación, con una respuesta inicial (primer segmento) positiva y significativa ($0,12 \pm 0,02$ kg/día/cm; $p < 0,01$) y un segundo segmento o meseta a partir de los 9,42 cm cuya pendiente no fue significativa ($p > 0,05$). El efecto año no fue significativo ($p > 0,05$).

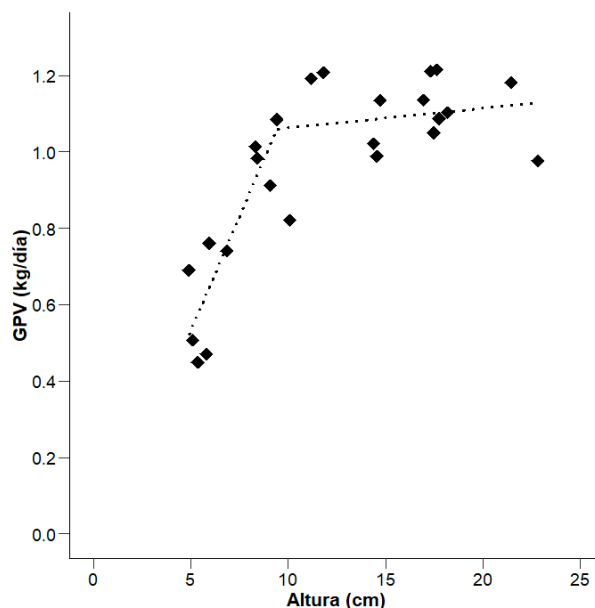


Figura 22: Ganancia de peso vivo (GPV; $R^2 = 0,79$; RCME = 0,11) de los años 2018 y 2019.

La carga animal (cab/ha) resultante de las distintas intensidades de pastoreo, presentó una respuesta lineal con la altura en 2018 y 2019 (Figura 12). De forma similar, la biomasa ofrecida diaria presentó una relación lineal con la altura de pastoreo, sin interacción con año significativa, ($R^2 = 0,66$; RCME = 7,22; $p < 0,001$), disminuyendo $1,78 \pm 0,27$ kgMS/ha/día por cada cm de incremento de la altura de pastoreo. La relación entre la carga animal y la biomasa ofrecida fue positiva ($R^2 = 0,81$; RCME = 0,94; $p < 0,001$; Figura 23) aumentando a razón de $0,16 \pm 0,02$ cab/ha por kgMS/ha/día.

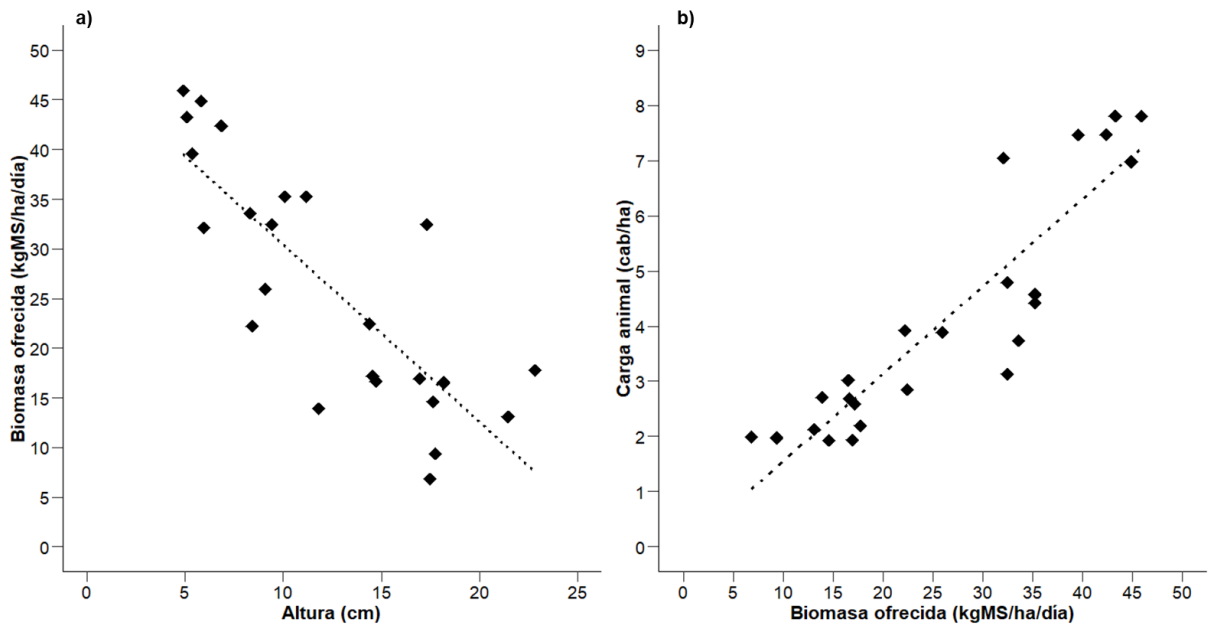


Figura 23: a) Biomasa ofrecida en función de la altura de pastoreo ($R^2 = 0,66$; RCME = 7,22; $p < 0,001$). b) Carga animal en función de la biomasa ofrecida ($R^2 = 0,81$; RCME = 0,94; $p < 0,001$), promedio de los años 2018 y 2019.

Al desagregar los componentes de la producción de carne y analizar los efectos de la altura sobre éstos, se observó que fueron significativos en todos los casos ($p < 0,05$; Figura 24). La carga animal y la producción individual tuvieron una importancia similar sobre la producción por unidad de superficie ($R^2 = 0,72$; $p < 0,01$) y se correlacionaron de forma negativa (-0,89). La altura determinó la variación en la carga animal y la producción individual a través su efecto en las variables intermedias.

La altura del raigrás anual tuvo un efecto indirecto negativo ($-0,81 = -0,9 * 0,9$) sobre la carga animal a través de la biomasa ofrecida ($R^2 = 0,81$; $p < 0,001$). La producción individual, determinada principalmente por la GPV ($R^2 = 0,98$; $p < 0,001$), fue afectada por la altura a través de la GPV ($0,74 = (0,73 * 0,65) + (0,56 * 0,47)$), los días de pastoreo ($0,57 = (0,44 * 0,47) + (0,56 * 0,65)$) y la correlación entre ambas.

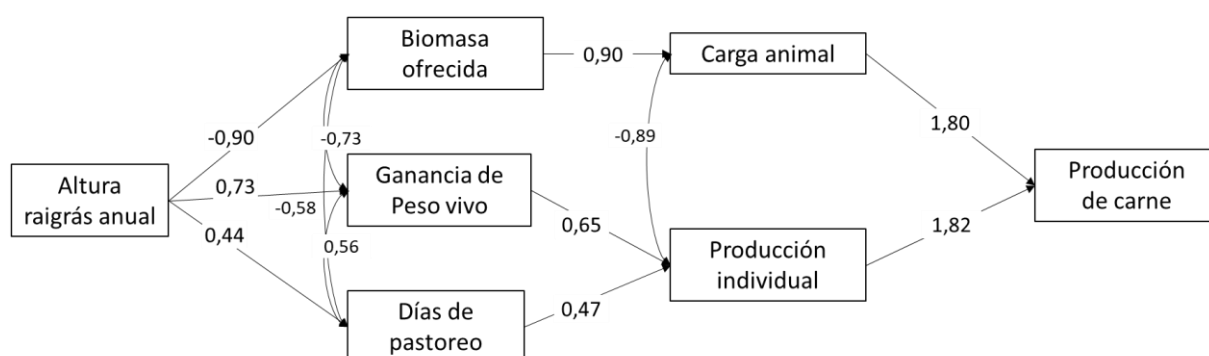


Figura 24: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan la producción de carne (kg/ha) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para los años 2018 y 2019 (N=24). Se muestran los pasos significativos ($p < 0,05$).

Comportamiento ingestivo y consumo de materia seca

Tiempos de pastoreo y rumia

En los registros acústicos de 24 h realizados en 2018 y 2019 se pudo distinguir con claridad las principales actividades de pastoreo y rumia. En promedio, por día las vaquillonas pastorearon $514 \pm 8,42$ min y rumiaron $382 \pm 6,53$ min. Tanto en el tiempo de pastoreo como de rumia, se observaron diferencias significativas entre las intensidades de pastoreo ($p < 0,05$) sin un efecto significativo del año de medición ni de la interacción año por tratamiento ($p > 0,05$; Tabla 12). Los tratamientos de IMB-Sj e IB-Sj pastorearon un 17,3 % menos de tiempo que IA-Sj e IMA-Sj ($466 \pm 11,8$ vs. $563 \pm 11,3$ min). Las intensidades intermedias y baja no se diferenciaron en el tiempo de rumia ($p > 0,05$) y fueron significativamente mayor a IA-Sj ($p < 0,05$). En IA-Sj el tiempo de rumia disminuyó en un 17,4 % respecto al promedio de las otras intensidades de pastoreo más bajas ($330 \pm 8,73$ vs. $400 \pm 9,04$ min).

Tabla 12: Efecto de la intensidad de pastoreo de raigrás anual sobre los tiempos diarios de pastoreo y rumia (min) de vaquillonas holando argentino.

Variables	Año	Tratamiento			
		IA-Sj	IMA-Sj	IMB-Sj	IB-Sj
Tiempo de pastoreo (min)	2018	$552 \pm 22,5$	$569 \pm 24,8$	$431 \pm 39,4$	$450 \pm 22,5$
	2019	$595 \pm 22,5$	$534 \pm 16,7$	$509 \pm 16,7$	$472 \pm 17,5$
	Media	$574 \pm 15,9^b$	$552 \pm 14,9^b$	$470 \pm 21,3^a$	$461 \pm 14,3^a$
Tiempo de rumia (min)	2018	$330 \pm 17,5$	$391 \pm 19,2$	$431 \pm 30,5$	$362 \pm 17,5$
	2019	$329 \pm 17,5$	$369 \pm 12,9$	$425 \pm 12,9$	$420 \pm 13,6$
	Media	$330 \pm 12,4^a$	$380 \pm 11,6^b$	$428 \pm 16,6^b$	$391 \pm 11,1^b$

IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Consumo de materia seca y comportamiento ingestivo

El CMS promedio diario estimado en las vaquillonas del año 2018 fue de 7798 ± 308 gMS y se observó una respuesta significativa a variaciones en la altura de pastoreo (Figura 25a). El CMS ajustó a una función de línea quebrada, CMS aumentó hasta los 9,34 cm, altura a partir de la cual se mantuvo estable en 8385 ± 584 gMS (CMS = $-76,3 + 906 * \text{Altura} + (-921 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 9,34, 0)$; $R^2 = 0,63$; $p < 0,01$; RCME = 1292). La TCMS registrada promedio fue de $919 \pm 44,5$ gMS/h. La TCMS también respondió a la altura de pastoreo según un modelo de línea quebrada (TCMS = $243 + 59,6 * \text{Altura} + (-97,0 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 16,5, 0)$; $R^2 = 0,60$; $p < 0,01$; RCME = 188; Figura 25b). TCMS aumentó hasta los 16,5 cm, y a partir de esa altura con 1227 ± 123 gMS/h se mantuvo estable con una pendiente no significativa ($p > 0,05$).

El peso de bocado promedio fue de $0,30 \pm 0,02$ gMS, ajustó a un modelo de línea quebrada (PB = $0,12 + 0,01 * \text{Altura} + (-0,01 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 16,7, 0)$; $R^2 = 0,63$; $p < 0,01$; RCME = 0,06; Figura 25c). El PB aumentó hasta los 16,7 cm con $0,34 \pm 0,04$ gMS y luego se mantuvo estable, con una pendiente no significativa ($p > 0,05$). El PB varió según las alturas de pastoreo, pero el número de masticaciones por gMS no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$; Figura 25 d).

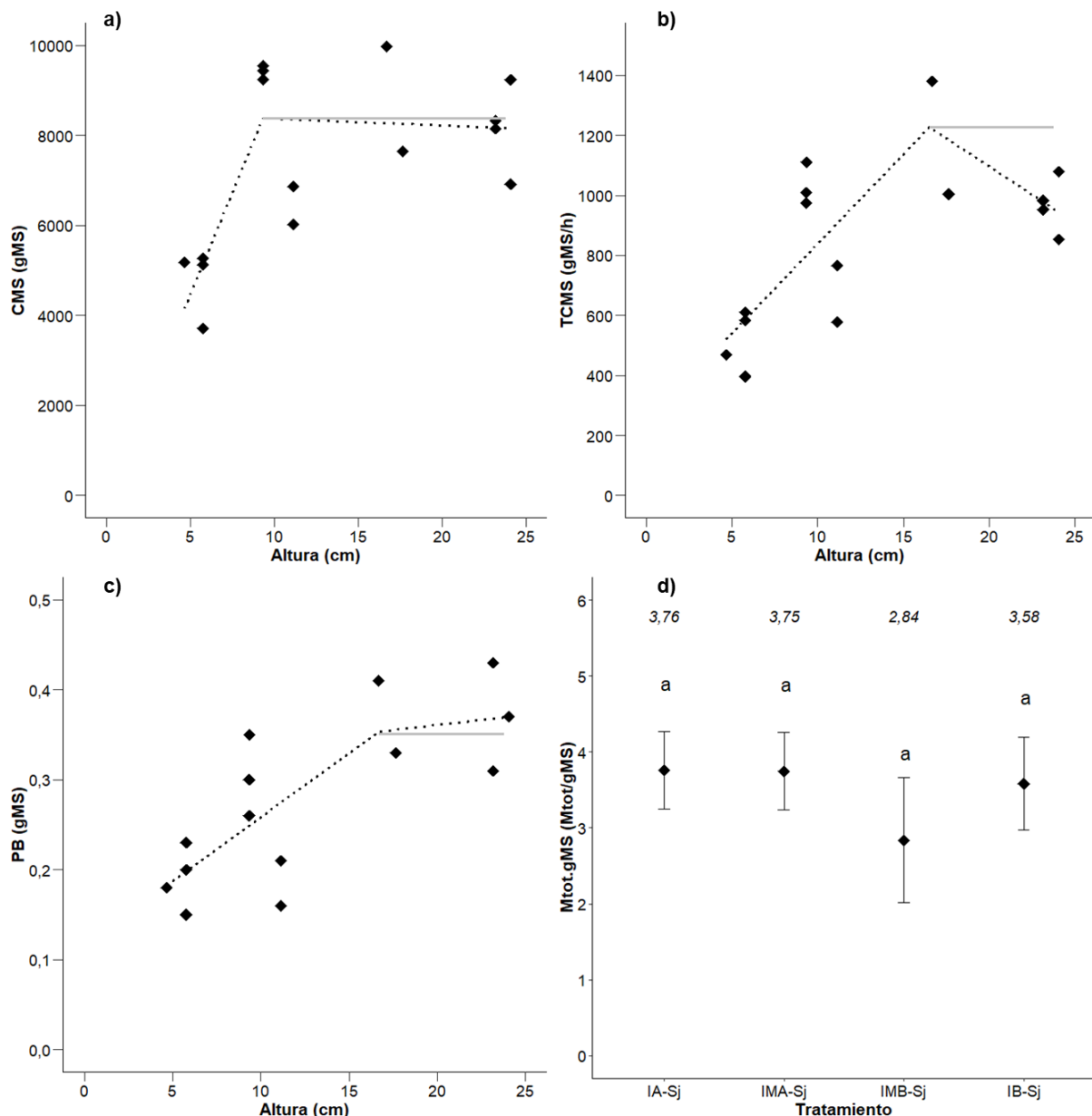


Figura 25: Respuesta del comportamiento ingestivo a la intensidad de pastoreo. a) Consumo de materia seca (gMS), $CMS = -76,3 + 906 * Altura + (-921 * Altura, \text{ si } Altura \geq 9,34, 0)$; $R^2 = 0,63$; $p < 0,01$; RCME = 1292. b) Tasa de consumo de materia seca (gMS/h), $TCMS = 243 + 59,6 * Altura + (-97,0 * Altura, \text{ si } Altura \geq 16,5, 0)$; $R^2 = 0,60$; $p < 0,01$; RCME = 188. c) Peso de bocado (gMS). $PB = 0,12 + 0,01 * Altura + (-0,01 * Altura, \text{ si } Altura \geq 16,7, 0)$; $R^2 = 0,63$; $p < 0,01$; RCME = 0,06. La línea punteada es el modelo ajustado. La línea gris es la pendiente no significativa del segundo segmento ($p > 0,05$). d) Masticaciones totales por gMS (Mtot.gMS). Tratamiento: IA-Sj: Intensidad alta, IMA-Sj: Intensidad media alta; IMB-Sj: Intensidad media baja; IB-Sj: Intensidad baja. No hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

Asignación de movimientos mandibulares y tasa de bocados

La tasa de movimientos mandibulares (MMT) aumentó con la altura de pastoreo (5,40 MM/min/cm) hasta los 8,06 cm. A partir de dicho punto, disminuyó con una pendiente significativa de -0,54 MM/min/cm (Figura 26a; $MMT = 36,7 + 5,40 * Altura + (-5,94 * Altura, \text{ si } Altura \geq 8,06, 0)$).

Altura $\geq 8,06$, 0); $R^2 = 0,44$; $p < 0,01$; RCME = 5,47). La asignación del tipo de MM también cambió con la altura de pastoreo. En primer lugar, la tasa de bocados (TB) se ajustó a un modelo de tipo línea quebrada, aumentando (5,32 B/min/cm) hasta los 8,52 cm y luego disminuyendo a razón de 0,86 B/min por cm de incremento de la altura (Figura 26b; $TB = 14,3 + 5,32 * \text{Altura} + (-6,18 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 8,52, 0)$; $R^2 = 0,53$; $p < 0,01$; RCME = 5,56). Tanto las pendientes del primer como del segundo segmento de ambas tasas no se diferenciaron estadísticamente ($p > 0,05$).

A su vez, la proporción de movimientos compuestos por MM (PMC) y por bocado (MCB) mostró una respuesta significativa de línea quebrada en función de la altura, con un punto de quiebre similar (Figura 27a y b). La PMC aumentó con la altura de pastoreo y las pendientes de ambos segmentos fueron significativas ($PMC = -0,41 + 0,09 * \text{Altura} + (-0,08 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 8,52, 0)$; $R^2 = 0,67$; $p < 0,01$; RCME = 0,11). De forma similar, la cantidad de bocados provenientes de MC (MCB) aumentó con la altura de pastoreo ($MCB = -0,50 + 0,12 * \text{Altura} + (-0,10 * \text{Altura}, \text{ si } \text{Altura} \geq 8,37, 0)$; $R^2 = 0,77$; $p < 0,01$; RCME = 0,13). En ambas variables, la pendiente del segundo segmento, si bien fue positiva, fue significativamente menor a la pendiente del primer segmento ($p < 0,05$).

La proporción de masticaciones puras (PM) no presentó una relación significativa con la altura ($p > 0,05$) con un promedio de $0,31 \pm 0,01$ M/MM. Sin embargo, su contribución determinó que las masticaciones totales por bocado (MtotB) aumentaran de forma lineal ($MtotB = 0,49 + 0,04 * \text{Altura}$, $R^2 = 0,71$; $p < 0,01$; RCME = 0,16) a medida que se incrementaba la altura de pastoreo (Figura 28a). La cantidad de movimientos mandibulares empleados en la manipulación de cada bocado (MMB) generó una disminución lineal de la TB (Figura 28b, $TB = 107 - 37,7 * \text{MMB}$; $R^2 = 0,58$; $p < 0,001$; RCME = 5,11). Sobre los datos estimados en 2018, se evidencia el aumento lineal en las masticaciones totales requeridas en cada bocado, a medida que el PB se incrementa (Figura 29, $MtotB = 0,17 + 2,98 * \text{PB}$; $R^2 = 0,59$; $p < 0,001$; RCME = 0,25).

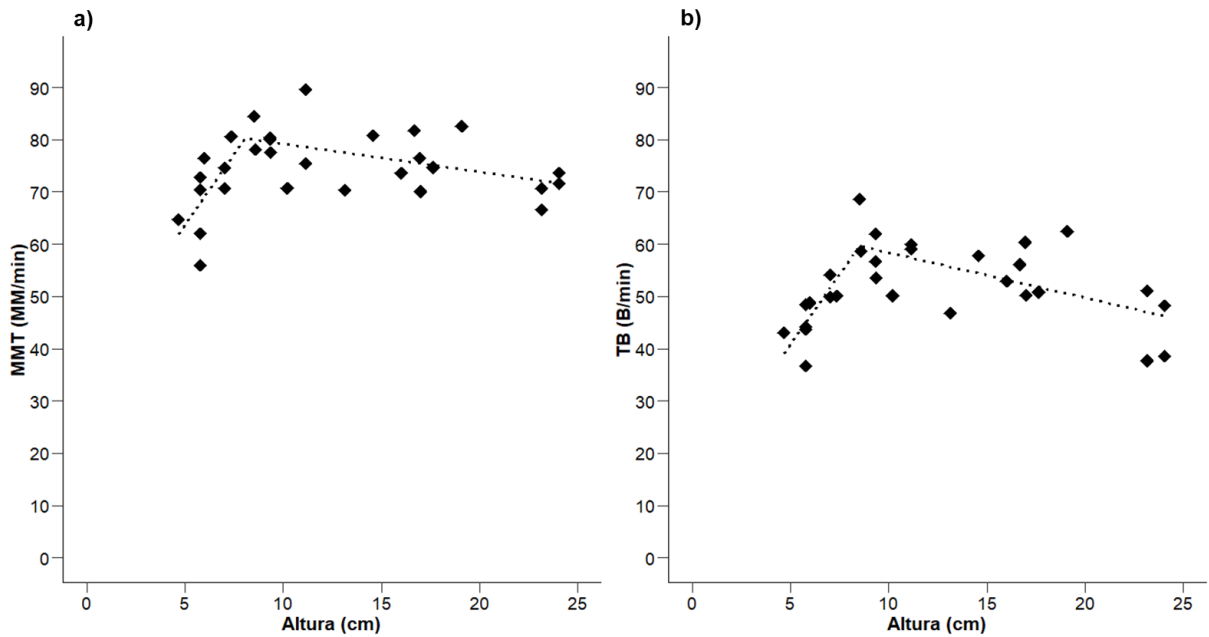


Figura 26: Respuesta de los movimientos mandibulares a la intensidad de pastoreo. a) Tasa de movimientos mandibulares (MM / min), $MMT = 36,7 + 5,40 * Altura + (-5,94 * Altura, \text{ si } Altura \geq 8,06, 0)$; $R^2 = 0,44$; $p < 0,01$; RCME = 5,47. b) Tasa de bocados (B/min), $TB = 14,3 + 5,32 * Altura + (-6,18 * Altura, \text{ si } Altura \geq 8,52, 0)$; $R^2 = 0,53$; $p < 0,01$; RCME = 5,56.

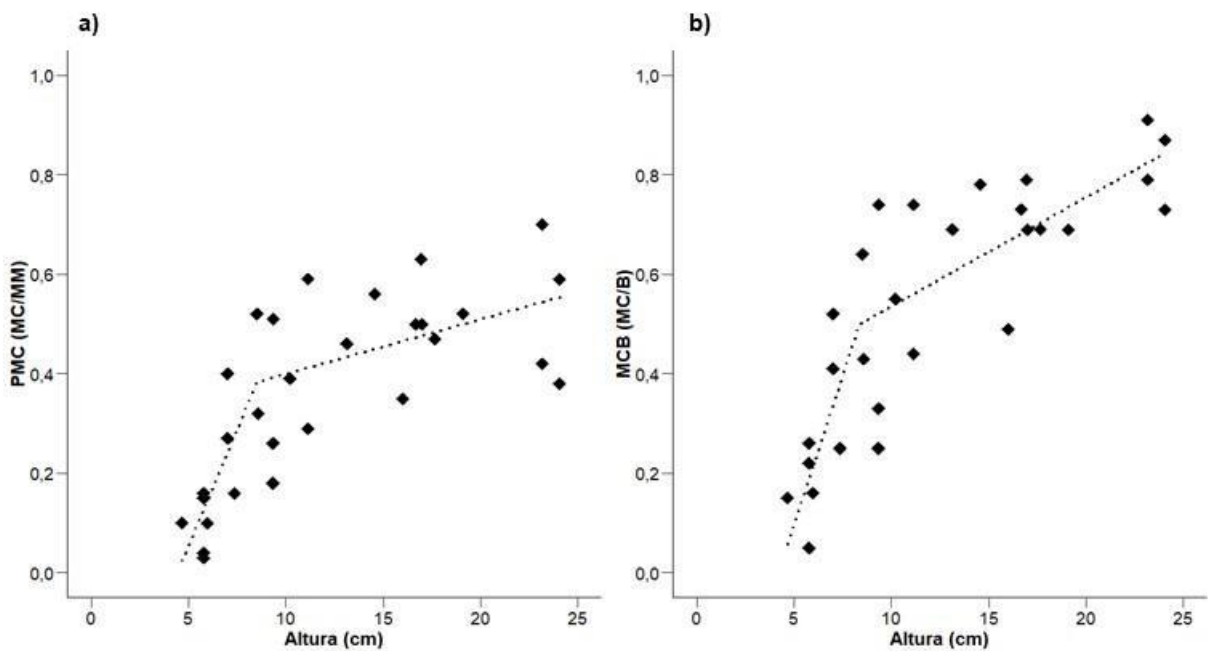


Figura 27: Respuesta de los movimientos compuestos a la intensidad de pastoreo. a) Proporción de movimientos compuestos (MC/MM), $PMC = -0,41 + 0,09 * Altura + (-0,08 * Altura, \text{ si } Altura \geq 8,52, 0)$; $R^2 = 0,67$; $p < 0,01$; RCME = 0,11. b) Movimientos compuestos por bocado (MC/B), $MCB = -0,50 + 0,12 * Altura + (-0,10 * Altura, \text{ si } Altura \geq 8,37, 0)$; $R^2 = 0,77$; $p < 0,01$; RCME = 0,13.

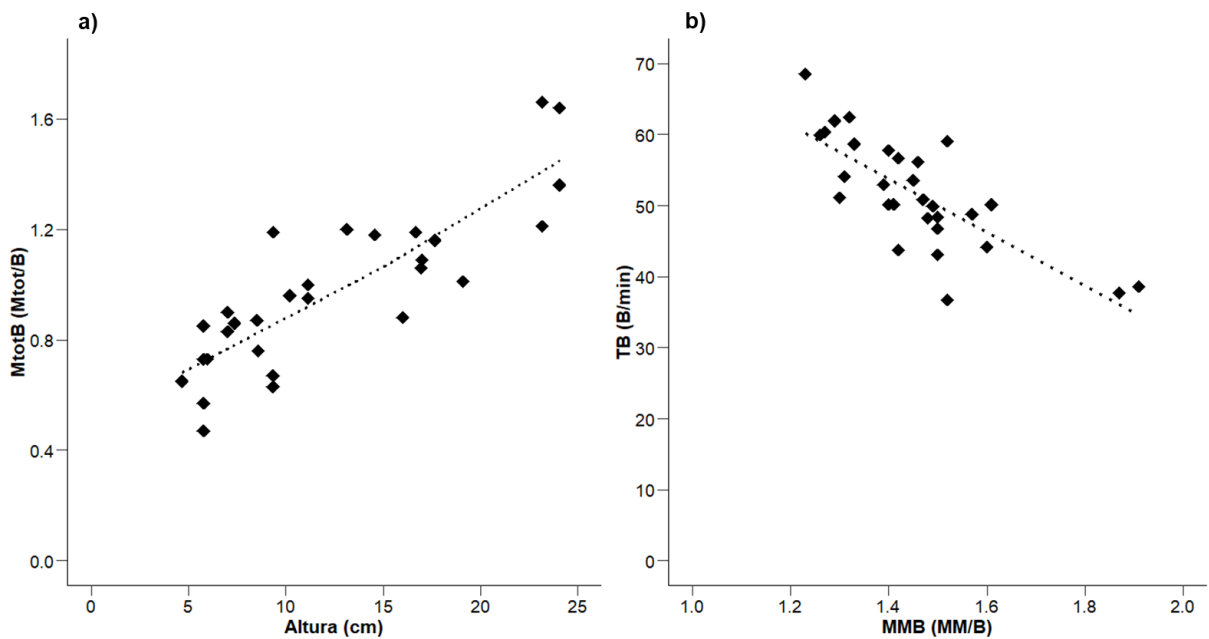


Figura 28: Respuesta de las masticaciones a la intensidad de pastoreo y de la tasa de bocados a los movimientos mandibulares por bocado. a) Masticaciones total por bocado (Mtot/B), $MtotB = 0,49 + 0,04 * \text{Altura}$, $R^2 = 0,71$; $p < 0,01$; RCME = 0,16. b) Tasa de bocados (B/min), $TB = 107 - 37,7 * \text{MMB}$; $R^2 = 0,58$; $p < 0,001$; RCME = 5,11.

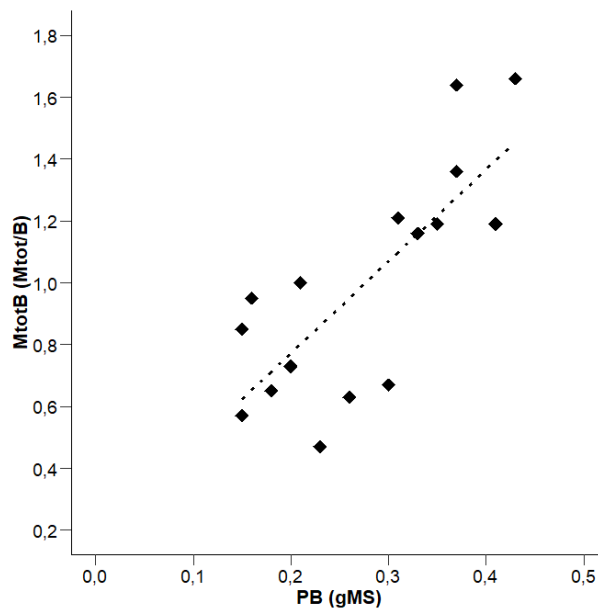


Figura 29: Respuesta de las masticaciones por bocado al peso de bocado. Masticaciones totales por bocado (Mtot/B), $MtotB = 0,17 + 2,98 * \text{PB}$; $R^2 = 0,59$; $p < 0,001$; RCME = 0,25. Calculado en el año 2018.

El CMS registrado en las vaquillonas en el año 2018 se analizó a través de sus componentes y cómo estos fueron afectados por la altura de pastoreo del raigrás anual. Se

observó que la mayoría de los efectos fueron significativos ($p < 0,05$; Figura 30) y se determinó la importancia relativa de cada uno a través de sus efectos directos e indirectos.

Ambos componentes, tasa de consumo y tiempo de pastoreo, tuvieron un efecto significativo sobre el CMS ($R^2 = 0,98$; $p < 0,001$). El efecto directo de la velocidad de consumo fue 4 veces mayor al tiempo (1,20 vs. 0,39). En términos de efecto total, el coeficiente de la TCMS fue 0,94 ($1,20 + (-0,67 * 0,39)$), explicado por la correlación negativa con el tiempo de pastoreo ($p < 0,01$). Por su parte, el efecto total del tiempo de pastoreo fue sólo de -0,41 ($0,39 + (-0,67 * 1,20)$).

La altura del raigrás anual afectó de forma directa y negativa el tiempo de pastoreo ($R^2 = 0,30$; $p < 0,05$) y, modificó la tasa de consumo a través de sus componentes ($R^2 = 0,98$; $p < 0,0001$). El peso de bocado tuvo un efecto directo sobre la TCMS con un coeficiente que duplicó al del tiempo por bocado (0,98 vs. -0,50).

La altura del raigrás anual afectó directamente el peso de bocado (0,77) y al tiempo por bocado, entendido como la inversa de la tasa de bocados, a través de sus variables determinantes. La altura aumentó con magnitudes similares (0,82 vs. 0,88; $p < 0,001$) los movimientos compuestos por bocado (MCB) y las masticaciones totales por bocado (MtotB). A partir de la correlación positiva entre ambas ($p < 0,0001$), las MtotB definieron un mayor efecto directo (1,52 vs. -1,25) y total (0,40 vs. 0,05) sobre el tiempo por bocado que los MCB.

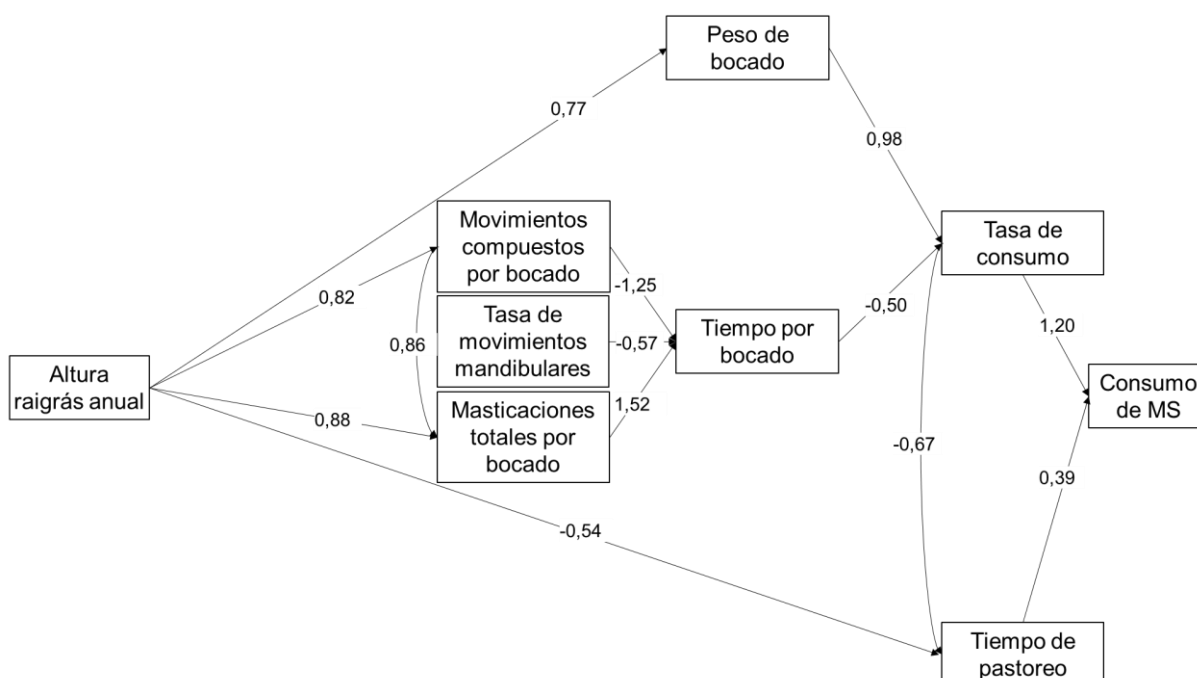


Figura 30: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan el consumo (gMS/día) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para la campaña 2018-19 (N=16). Se muestran los pasos significativos ($p < 0,05$).

A partir de los registros acústicos y cálculos realizados en ambos años (2018 y 2019), se analizó el efecto de la altura de pastoreo sobre el tiempo por bocado y sus componentes. Se presentan los efectos significativos ($p < 0,05$). Se verificó que, al ampliar la base de datos con la información de las dos campañas, se mantuvieron los efectos directos e indirectos de la altura sobre las distintas variables con coeficientes similares (Figura 31).

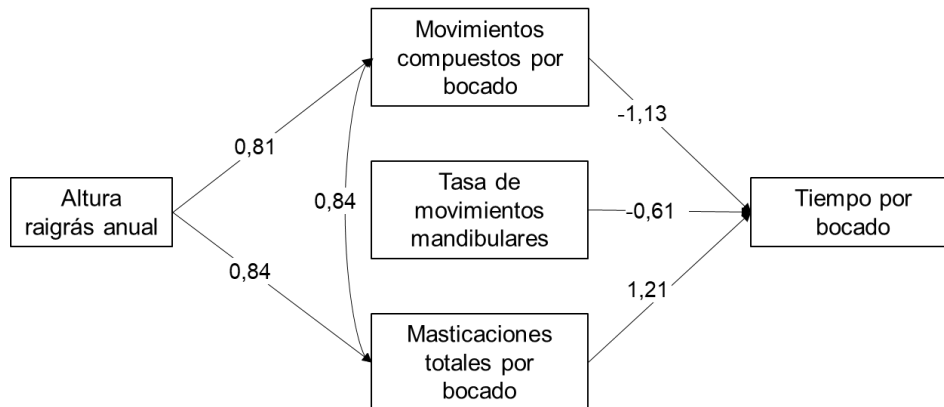


Figura 31: Diagrama del análisis por paso que presenta la relación entre las variables que determinan el tiempo por bocado (s/B) y el efecto de la altura de pastoreo (cm) para las campañas 2018-19 y 2019-20 ($N = 29$). Se muestran los pasos significativos ($p < 0,05$).

DISCUSIÓN

La producción de carne por unidad de superficie (kg/ha), mostró una respuesta cuadrática frente a variaciones en las intensidades de pastoreo, alcanzando su máximo con intensidades moderadas. En 2018 y 2019, el máximo se obtuvo en torno a los 9 y 11 cm de altura, resultado de una elevada producción individual y una carga animal intermedia (Figura 24). En intensidades de pastoreo altas, el mayor número de animales por unidad de superficie no compensó la menor producción individual debido a la baja GPV (Figura 22). Además, la reducción en los días de pastoreo tuvo un efecto negativo (Figura 24) aunque menor. Por el contrario, en alturas superiores a los 9 - 11 cm, se alcanzaron las mayores GPV, pero la disminución progresiva de la carga animal redujo la productividad por unidad de superficie.

La respuesta se explica por los componentes que definen la producción de carne y su importancia relativa (Figura 24). Tanto la carga animal como la producción individual tuvieron importancias similares (1,80 vs. 1,82, respectivamente) y se correlacionaron de forma significativa (-0,89). Ambas variables afectan directamente la producción de carne, e indirectamente a través de su efecto negativo sobre la otra variable.

Para mantener una intensidad de pastoreo definida a través de alturas remanentes objetivo, fue necesario ajustar el número de animales por unidad de superficie, variando la superficie de la parcela y luego haciendo ajustes en el número de animales (volantes) en cada tratamiento. En las bajas intensidades de pastoreo, con mayor cantidad de remanente, la biomasa ofrecida fue menor. En consecuencia, el número de animales por unidad de superficie disminuyó (Figura 23a y b), aun cuando allí se registró la mayor producción de biomasa total (Figura 9).

La intensidad de pastoreo (altura) afectó tanto la producción total de biomasa del raigrás anual como la cantidad ofrecida, así como el período de pastoreo y la GPV (Figura 24). En algunos casos, las altas intensidades redujeron el crecimiento del cultivo al punto que fue necesaria la interrupción anticipada del período de pastoreo en comparación con los otros tratamientos (Tabla 2).

En 2018 y 2019, la GPV presentó valores más altos en las intensidades intermedias y bajas de pastoreo, con una pronunciada disminución en las intensidades más altas. Esta respuesta ajustó a una función cuadrática (Figura 13) así como a una función de línea quebrada (Figura 22). En ambos casos, la respuesta animal se interpreta de manera similar. Para analizar más detalladamente la relación entre la GPV y el CMS, se incluyó un análisis de la GPV utilizando un modelo de respuesta de línea quebrada.

La GPV mostró una significativa disminución con alturas de pastoreo por debajo de 9,42 cm, manteniéndose estable en valores más altos (Figura 22). Esta respuesta parece relacionarse con las variaciones en el CMS individual de las vaquillonas, ya que la calidad de la biomasa de raigrás anual ingerido (% DIVMS y PrB) no presentó diferencias significativas

entre los tratamientos (Figura 11). Por debajo de una altura similar (9,34 cm), se observó una disminución significativa de los CMS registrados en 2018 (Figura 25a; $p < 0,01$). Este efecto se reflejó también en un menor tiempo de rumia (Tabla 12) asociado directamente con el menor CMS registrado en las IA-Sj (Schirmann *et al.*, 2012; Paudyal, 2021). Aunque el CMS no se registró de forma continua durante varios días, los resultados señalan una importante relación entre el CMS y la GPV. La respuesta del CMS a la altura de pastoreo ha sido estudiada en diversas especies de rumiantes, destacándose la altura como principal factor que influye sobre el CMS (Boval y Sauvant, 2021). Los mecanismos involucrados varían según la intensidad de pastoreo. Para un análisis más detallado, se examinan los resultados obtenidos en 2018 bajo el esquema de comportamiento ingestivo (Figura 30), junto a los tiempos de pastoreo y asignación de movimientos mandibulares registrados en ambos años (2018 y 2019).

El CMS diario depende del tiempo que el animal permanece en pastoreo y de la velocidad promedio de consumo (TCMS) durante ese tiempo. El tiempo de pastoreo incluye 1) el tiempo destinado a la búsqueda de los potenciales bocados (búsqueda de sitios de alimentación y de bocados dentro de cada sitio de alimentación) y 2) la manipulación del forraje para arrancar, masticar y deglutir cada bocado. La búsqueda puede superponerse a la manipulación, como ocurre en forrajes de alta calidad y biomasa ofrecida, donde los animales encuentran nuevos bocados mientras aun mastican los últimos, sin generar un aumento en el tiempo total de pastoreo (Ungar, 1996). En este trabajo, a partir de los criterios de identificación de tiempo de pastoreo (se incluye períodos menores a 5 min sino se detecta otra actividad, y la no observación visual permanente), no es posible diferenciar el tiempo de búsqueda y el tiempo de manipulación. Por lo tanto, el cálculo de tiempo de pastoreo y tiempo por bocado, incluyen actividades de búsqueda e interrupciones que pueden deberse a distracciones temporales.

La TCMS promedio, se define por el peso de bocados (PB) y la tasa con que éstos se generan y procesan (TB). El PB es ampliamente reconocido como el principal responsable en la determinación de la TCMS instantánea para un turno de pastoreo y por ende, el CMS en el corto plazo (Laca *et al.*, 1992a, Boval y Sauvant, 2021). Bajo un limitado rango de situaciones una disminución en el PB puede generar un aumento en la TB a modo de compensación y así no afectar la TCMS.

El tiempo necesario por bocado, es la inversa de la TB, y está influenciado por la tasa de movimientos mandibulares, la proporción de movimientos compuestos por bocado y las masticaciones por gMS consumida (Laca *et al.*, 1994). En este estudio, se consideró el efecto de la cantidad de masticaciones totales por bocado (MtotB) en lugar de las masticaciones totales por gMS (Mtot.gMS), dado que esta última no mostró variaciones con la altura de pastoreo ($p > 0,05$; Figura 25d).

La TCMS (gMS/h) registrada en las vaquillonas fue determinante del CMS (1,20; Figura 30) y por lo tanto, de la GPV (kg/día). Aumentó principalmente, debido al incremento en el PB (0,98; Figura 30), y ambas variables aumentaron en las intensidades más bajas de pastoreo (Figura 25b y c).

La TCMS disminuyó linealmente al reducirse la altura de pastoreo ($p < 0,01$; $R^2 = 0,60$) a partir de los 16,5 cm (Figura 25b). Además, la altura del raigrás anual afectó el tiempo de pastoreo, de forma directa e indirecta a través de su correlación con la TCMS (Figura 30). En las intensidades de pastoreo más bajas (IMB-Sj e IB-Sj), las vaquillonas dedicaron menos tiempo a esta actividad. En IA-Sj e IMA-Sj se registró un aumento del 21% en los minutos dedicados al pastoreo, sin diferenciarse estadísticamente entre ellas ($p > 0,05$; Tabla 12). En las intensidades más bajas, mayores TCMS rindieron mayores CMS, sin extender el tiempo de pastoreo. Sin embargo, en el caso de los animales de IMA-Sj, los mayores tiempos de pastoreo compensaron la disminución de la TCMS, manteniendo los mismos niveles de CMS. En contraste, en IA-Sj, este mecanismo de compensación no fue suficiente, lo que resultó en un menor CMS (Figura 25a y b). Esto último podría explicar también la menor GPV en IMA-Sj de los años 2015 y 2017 respecto a las intensidades más bajas. Por lo tanto, sería recomendable mantener intensidades de pastoreo en torno a los 15 cm o superior para no limitar el PB y en consecuencia la TCMS.

El aumento en los tiempos de pastoreo cuando las condiciones de las pasturas disminuyen la TCMS, es descrito en grandes y pequeños rumiantes (Penning *et al.*, 1991; Gibb *et al.*, 1997; Hodgson *et al.*, 1994; Boval y Sauvant, 2021). Este comportamiento, se interpreta como un mecanismo para compensar la disminución en la TCMS, que como se observa en este experimento, no es suficientemente efectivo (Hodgson, 1985; Penning *et al.*, 1991), y en condiciones de pastoreo intensos el CMS disminuye significativamente.

El PB y tiempo por bocado son determinantes de la TCMS, y en línea con lo esperado (Carvalho, 2013; Boval y Sauvant, 2019) el efecto del PB fue el más importante (0,98 vs. -0,50; Figura 30). El PB acompañó a la TCMS en función de la altura de las pasturas y comenzaron a decrecer con alturas menores a 16,7 cm (Figura 25c).

Los valores de PB registrados, se encuentran dentro del rango de variación mencionado por trabajos anteriores para animales de peso similar (Rutter, 2002; Orr *et al.*, 2004). El efecto de la altura sobre el PB se explicaría por las diferencias en la profundidad del bocado, que disminuye significativamente con la altura de las plantas en las intensidades más altas respecto a las más bajas (Laca *et al.*, 1992a; Boval y Sauvant, 2019).

La TB estuvo afectada por la altura del raigrás anual, mostrando una respuesta a la variación de la tasa de movimientos mandibulares (MMT), la cantidad de movimientos compuestos por bocados (MCB) y el número de masticaciones totales por bocado (MtotB) con la altura (Figura 30). Tanto la cantidad de MCB como MtotB variaron significativamente con la

altura del raigrás anual ($p < 0,05$, Figura 30), siendo estas variables las de mayor efecto sobre la TB (-1,25 y 1,52, respectivamente). La relación encontrada entre estas variables, considerando el conjunto de datos empleados para calcular CMS en el año 2018, fue similar a la obtenida para ambos años (2018 y 2019, Figura 31). Estos resultados refuerzan la comprensión de las relaciones que determinan la TB y el efecto de la altura de pastoreo sobre el CMS analizado.

La velocidad y asignación de MM en relación a la altura de pastoreo presentó dos fases. Por debajo de los 8,5 cm la MMT y la TB disminuyeron a un ritmo similar (Figura 26a y b; $p > 0,05$). Posiblemente, en las alturas cercanas a los 5 cm la dificultad en encontrar y arrancar los bocados, restringen la velocidad de movimientos mandibulares y en consecuencia, la TB (Orr *et al.*; 2004). Con pasturas más altas, la mayor facilidad para encontrar y arrancar bocados aumenta la MMT y la TB. Simultáneamente, las vaquillonas incrementan la participación de MC (Figura 27a y b), que implica un ahorro de tiempo en la manipulación y masticación de los bocados de peso creciente, y en consecuencia permite el aumento de la TB (Ungar *et al.*, 2006).

A partir de los 8,5 cm de altura de pastoreo, el análisis de las variables revela la influencia de distintos procesos. A medida que tanto el PB como la altura continúan aumentando, la MMT y TB comienzan a decrecer, y la incorporación de MC ocurre a un ritmo más lento. Este comportamiento podría explicarse por la respuesta combinada de varios factores. Por un lado, el aumento en el peso de los bocados, generaría una mayor cantidad de masticaciones por bocados (Figura 30, Figura 28a y 29) superando el efecto compensador de los MC, que aumentan pero a ritmo decreciente (Figura 27a y b). Además, la relación negativa entre TB y MMB (Figura 28b) respalda la necesidad de aumentar los MMB para procesar el forraje contenido en cada bocado, que tiene un efecto negativo sobre la TB.

Por otro lado, la disminución en la MMT con el aumento de la altura del raigrás anual, también contribuye a la disminución de la TB. Algunos autores (Galli *et al.*, 2018; Lorenzón, 2022) señalan que la MMT se mantiene estable cuando aumenta la altura de pastoreo. En estos estudios, las mediciones de MMT y TB se realizaron sobre períodos cortos, correspondientes a minutos o a un turno de pastoreo, excluyendo cualquier tiempo sin MM, para enfocarse en el pastoreo efectivo. En este trabajo, al identificar los turnos de pastoreo e integrarlos al promedio diario, es posible que se incluyan períodos de búsqueda y/o distracción que afecten las tasas. Baumont *et al.* (2006) sugieren que a medida que se prolonga un turno de pastoreo, aumentan las interrupciones de MM.

La disminución de la TB a partir de los 8,5 cm fue consecuencia de la combinación de una menor MMT y una mayor cantidad de masticaciones para procesar cada bocado. A medida que aumenta la cantidad de movimientos para manipular y masticar el forraje

cosechado, la TB disminuye. Sin embargo, el efecto de la altura sobre el PB sobrecompensó esta menor TB, permitiendo altas TCMS en las intensidades más bajas.

En síntesis, la altura de pastoreo modificó la GPV al afectar el CMS, como lo seña la respuesta de línea quebrada similar de la GPV y CMS. El principal factor que explicó el CMS fue la TCMS, más alta en las intensidades de pastoreo más bajas y determinada principalmente por el PB, que alcanzó su máximo a los 16,7 cm. La TB tuvo una importancia relativa menor, pero también varió con la intensidad de pastoreo. Con intensidades de pastoreo muy altas, la TB se vio afectada por la disminución en la MMT, debido a la dificultad para encontrar y arrancar los bocados. Luego, en la medida que aumentó la altura de pastoreo, la TB aumentó hasta los 8,5 cm, gracias al aumento de los MC que ahorran tiempo al procesar y arrancar forraje en un solo movimiento. Sin embargo, con alturas superiores, la TB vuelve a disminuir debido al mayor requerimiento de masticación de los bocados más pesados y a la disminución de la MMT. Esta disminución en la TB fue sobrecompensada por los altos PB, generando las mayores TCMS en IMB-Sj e IB-sj.

CONCLUSIONES

- La respuesta cuadrática de la producción de carne (kg/ha) a la intensidad de pastoreo se explica tanto por la carga animal (cab/ha) como por la producción individual. Ambos componentes productivos son definidos por la altura pastoreo. La carga animal disminuye con la altura como consecuencia de una menor cantidad de biomasa ofrecida. La respuesta individual alcanza sus valores más altos con alturas intermedias y bajas, ya que se logran altos valores de GPV sin afectar el tiempo de pastoreo. En intensidades intermedias, se alcanza la mayor producción de carne, resultado de la combinación de una carga animal moderada y una elevada producción individual.
- El CMS diario de las vaquillonas explicó la GPV en las distintas intensidades de pastoreo. El CMS fue principalmente determinado por la TCMS y fue máxima en alturas superiores a los 15 cm (IMB-Sj, IB-Sj). El aumento del tiempo de pastoreo compensó parcialmente la disminución de la TCMS en las altas intensidades de pastoreo, permitiendo que en IMA-Sj las vaquillonas mantuvieran el CMS, aunque insuficiente en IA-Sj, resultando en una notable disminución del CMS en este caso.
- La TCMS de las vaquillonas se explicó principalmente por el PB, que alcanzó los valores más altos en alturas de pastoreo superiores a los 15 cm. En intensidades moderadas y bajas, la TB disminuyó a causa de menores MMT y de una mayor cantidad de masticaciones por bocado, pero fue sobrecompensado por el elevado peso de los bocados. En intensidades muy altas de pastoreo, la TB disminuyó debido a una baja MMT, que sumado a bocados muy livianos, determinó una baja TCMS.

CAPÍTULO 4:

EXPERIMENTO 3: VERIFICACIÓN DEL MÉTODO ACÚSTICO PARA SU USO EN ANIMALES JÓVENES (Ajuste metodológico)

INTRODUCCIÓN

La biotelemetría acústica, propuesta para su uso en el estudio del comportamiento ingestivo y medición del consumo de materia seca (CMS) en pastoreo, se destaca por ser una metodología precisa y no invasiva (Laca *et al.*, 1992b). Se ha probado en vacas adultas, donde recientemente Lorenzón (2022) propuso modelos de regresión lineal múltiple relativamente sencillos, para la estimación del CMS en un turno de pastoreo, escalables a 24 horas. Estos modelos consideran la energía del sonido de las masticaciones ingestivas totales como principal predictor. Fueron desarrollados con vacas adultas pastoreando parcelas de alfalfa (*Medicago sativa*) y raigrás anual, con diferentes biomásas y contenido de FDN. También se comprobó la potencialidad del método en el estudio detallado de distintos aspectos del comportamiento ingestivo. Es crucial verificar si el método es apropiado para utilizar con las vaquillonas jóvenes de raza holando argentino, con un peso vivo de 300-350 kg, como las empleadas en el Experimento 2.

Con este objetivo general, se formularon las siguientes hipótesis específicas:

1. El modelo de regresión desarrollado en vacas adultas a partir de la energía de las masticaciones para estimar el CMS en pastoreo, se puede utilizar en vaquillonas jóvenes sin necesidad de ajustes específicos a pesar de las diferencias anatómicas entre estas dos categorías.
2. El método acústico permite estudiar con precisión el comportamiento ingestivo en vaquillonas jóvenes al igual que en vacas adultas.

Los objetivos específicos fueron:

1. Verificar que el modelo regresión desarrollado en vacas adultas a partir de la energía de las masticaciones para estimar el CMS en pastoreo, se puede utilizar en vaquillonas jóvenes (300-350 kg de PV) sin necesidad de ajustes específicos, para luego ser utilizado en las vaquillonas del Experimento 2.
2. Verificar que el método acústico permite estudiar con precisión el comportamiento ingestivo en vaquillonas jóvenes (300 - 350 kg de PV) al igual que en vacas adultas, para luego poder analizarlo en las vaquillonas del Experimento 2.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento experimental

Se registró el comportamiento ingestivo y consumo de materia seca en vacas adultas y en vaquillonas jóvenes de raza holando argentino. Teniendo en cuenta que el objetivo no fue generar un modelo completamente nuevo, se diseñó un experimento basado en el trabajo de Lorenzón (2022) para verificar si es necesario realizar ajustes o calibraciones sobre el modelo de regresión lineal:

$$\text{CMS} = 114 + 0,0067 * \text{EC} \quad (R^2 = 0,84; \text{RCME} = 165 \text{ gMS}; \text{CV} = 16,0)$$

El experimento se realizó en una superficie (1 ha) adyacente al Experimento 1. Al igual que en el estudio de Lorenzón (2022), se emplearon 2 pasturas vegetativas puras con estructuras contrastantes de raigrás anual y alfalfa (*Medicago sativa*). El raigrás anual sembrado junto al resto del lote ese mismo año y la alfalfa en abril de 2017. Las determinaciones se hicieron desde el 21 al 23 de agosto, y desde el 2 al 4 de octubre de 2018, en raigrás anual y en alfalfa, respectivamente.

Se establecieron 36 sesiones de pastoreo en total, distribuidas en un diseño de bloques completos aleatorizados, de 2 tipos de pasturas (raigrás anual y alfalfa) por 2 categorías de animales (vaquillonas y vacas adultas) por 3 niveles (tiempos) de consumos (10, 25 y 40 minutos), repetidos en 3 animales de cada categoría (bloques). Los 3 animales de cada categoría (repeticiones) difirieron en edad, peso, dentición y tamaño de la cabeza (Tabla 13). Las vacas adultas estaban secas y vacías a excepción de una que cursaba el sexto mes de preñez, y eran similares a las utilizadas por Lorenzón (2022). Las vaquillonas eran similares a las utilizadas en los Experimentos 1 y 2 de esta tesis. Todos los animales experimentales pertenecían al rodeo del Sistema Integrado Agrícola Lechero de la Facultad Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (FCA-UNR).

Tabla 13: Edad, peso, dentición y tamaño de la cabeza de las vacas y vaquillonas.

Categoría	Edad (años)	Peso (kg)	Incisivos	Ancho de incisivos (cm)	Largo cabeza (cm)	Ancho cabeza (cm)
Vaca	7,17	731 ^a	+ Medio diente	9,00 ^a	56,2 ^a	114 ^a
Vaquillona	1,39	334 ^b	Leche	6,73 ^b	48,7 ^b	91,3 ^a
EE	0,95	16,4	-	0,13	1,67	7,49

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Las 18 sesiones correspondientes a cada tipo de pastura (2 categorías de animales x 3 tiempos de pastoreo x 3 repeticiones) se distribuyeron al azar en 3 días consecutivos de mediciones, con 2 turnos por día (6 sesiones diarias). El primer turno se iniciaba a las 11:30

h y el segundo a las 13.00 h. Las 3 sesiones individuales de cada turno se realizaron en forma independiente y simultánea, en parcelas contiguas de 3 x 6 m (18 m²) y delimitadas por hilo de boyero no electrificado. Entre la parcela central y una lateral se ubicó un pasillo 0,5 m de ancho para circular mientras se realizaban las determinaciones prepastoreo sin alterar el forraje en la parcela experimental (Figura 32). Además, se incluyó una parcela de descanso en el frente de 3 x 9,5 m, para mantener los animales cuyo turno de pastoreo terminaba antes y así evitar distraer a los que aún permanecían en pastoreo (Figura 32). El conjunto de parcelas utilizadas en cada día de medición, se armaron diariamente previo al inicio de las sesiones sobre zonas homogéneas y sin pastoreo, iniciando en la proximidad de las instalaciones (cepo y corrales) y avanzando para evitar desperdiciar zonas por pisoteo.



Instalaciones

Figura 32: Diseño de campo con la ubicación de las parcelas experimentales para las sesiones individuales de pastoreo de cada tipo de pastura. Vc_i = Vaca; Vq_i = Vaquilona; T_n = Tiempo de pastoreo.

Cada animal participó en una sesión de pastoreo por día. La asignación del animal a cada parcela y duración de la sesión se realizó de manera aleatoria, aunque se realizaron los ajustes necesarios para garantizar la presencia de al menos un animal de cada categoría en cada turno de medición (Figura 33). El ordenamiento de los tratamientos y parcelas sorteados para el pastoreo de raigrás anual, se repitió en la alfalfa (Figura 32). Las vacas adultas y vaquillonas, previamente amansadas y habituadas al protocolo experimental, fueron acostumbradas al recurso forrajero durante al menos 4 días previos del comienzo de las mediciones, y se ayunaron desde las 7.30 h (de 3 a 4 h) en los días de medición, para facilitar el pastoreo. También, en estos días y entre los turnos de sesiones de pastoreo, permanecieron en pasturas similares a las experimentales. Cada sesión fue cronometrada y supervisada por un observador, para asegurar que los animales permanecieran dentro de las parcelas asignadas y que no se produjera ningún evento que alterara su comportamiento. Se redujeron al mínimo las actividades de manejo que pudieran distraer a los animales experimentales, y se filmaron las sesiones para disponer de un respaldo visual.



Figura 33: Vaquillonas y vacas en los turnos de pastoreo de alfalfa (a) y raigrás anual (b).

Registros Acústicos

Para el registro acústico de comportamiento ingestivo y movimientos mandibulares, se utilizaron 3 equipos compuestos cada uno por un grabador y micrófono, montados sobre un bozal, similares a los utilizados en el Experimento 2. En las vacas adultas fue necesario utilizar bozales más grandes. Los 3 equipos se asignaron al azar a los animales en cada turno de pastoreo, aunque se hicieron los cambios necesarios para asegurar que los equipos no se repitieran en el mismo animal y tratamiento.

De manera similar a lo descrito anteriormente, las grabaciones se realizaron en formato MP3 a 128 kbps, con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz y una resolución de 16 bits, proporcionando un ancho de banda de grabación nominal de 22 kHz y un rango dinámico de 96 dB. Las grabaciones se almacenaron en la memoria externa del grabador (microSD de 32

GB). Al finalizar cada sesión, luego de retirar los bozales, las grabaciones se descargaron y verificaron. En una única ocasión, hubo que descartar la señal acústica de un turno de pastoreo de 40 minutos de una vaquillona en alfalfa debido al mal funcionamiento del equipo. Por lo tanto, en total se analizaron 35 registros acústicos efectivamente realizados.

Procesamiento de las señales y variables analizadas

Cada señal acústica se procesó con el programa de edición de archivos de sonido Audacity® (Versión 3.3.1, 2023). Primero se identificó y etiquetó el período efectivo de pastoreo para calcular la duración real de los turnos de pastoreo. Se tomaron en cuenta las indicaciones sonoras empleadas para señalar cuando el animal ingresaba y salía de la parcela. Mediante la observación visual y auditiva de las señales de sonido y en base a las características descritas en el Experimento 2, manualmente se identificaron, clasificaron y etiquetaron todos los eventos mandibulares en arranques (A), masticaciones puras (M) y movimientos compuestos (MC, Figura 18). Luego, a partir de las etiquetas, se calcularon las siguientes variables de comportamiento ingestivo:

- número de arranques, A
- número de masticaciones puras, M
- números de movimientos compuestos, MC
- número de bocados, $B = A + MC$
- número de masticaciones totales, $M_{tot} = M + MC$
- número de masticaciones totales por gMS consumido, $M_{tot.gMS} = M_{tot} / CMS$
- número de movimientos mandibulares, $MM = A + M + MC$
- tiempo de pastoreo, T (min)
- tasa de bocados, $TB = B / T$ (B/min)
- tasa de arranques, $AT = A / T$ (A/min)
- tasa de masticaciones puras, $MT = M / T$ (M/min)
- tasa de movimientos compuestos, $MCT = MC / T$ (MC/min)
- tasa de masticaciones totales, $M_{tot}T = M_{tot} / T$ (MT/min)
- tasa movimientos mandibulares, $MMT = MM / T$ (MM/min)
- proporción de arranques, $PA = A/MM$
- proporción de movimientos compuestos, $PMC = MC / MM$
- proporción de masticaciones puras, $PM = M / MM$
- proporción de masticaciones totales, $PM_{tot} = M_{tot} / MM$
- arranques por bocados, $AB = A / B$
- movimientos compuestos por bocado, $MCB = MC / B$
- masticaciones puras por bocado, $MB = M / B$

- masticaciones totales por bocado, $M_{totB} = M_{tot} / B$
- movimientos mandibulares por bocado, $MMB = MM / B$

Se calculó la energía promedio de las masticaciones puras (EM) y de las masticaciones de los movimientos compuestos (EMC) a partir de su intensidad (amplitud) y duración. Para esto, se seleccionaron y delimitaron 10 M y 10 masticaciones de MC, y se estimó la energía sumando las amplitudes al cuadrado (función “norm(señal)²”) con el programa de cálculos numéricos GNU Octave, Versión 5.2.0 (Eaton *et al.*, 2019) y promediando los valores en cada tipo de masticación. Considerando el total de los distintos MM se calcularon las siguientes variables:

- energía total de las masticaciones puras, EMt
- energía total de las masticaciones de MC, EMct
- energía de consumo, $EC = EMt + EMct$
- energía promedio por bocado, $EB = EC / B$
- energía por gMS, $EgMS = EC / CMS$

En el inicio de cada sesión, se grabó la misma señal patrón de 5 segundos utilizada en el Experimento 2 para equalizar el volumen de los registros. Se corrigieron las señales cuyo nivel de energía en el sonido patrón superara un $\pm 5\%$ del promedio de los sonidos patrón de todas las señales. Dada a la rigurosidad de este criterio, se debieron corregir 27 señales.

Consumo de materia seca

Para evaluar los ajustes debido a la categoría animal a partir del método acústico, el CMS se calculó por la diferencia entre la biomasa ofrecida y la biomasa remanente antes y después de cada sesión individual de pastoreo. La biomasa ofrecida en cada parcela se estimó con un método indirecto no destructivo de doble muestreo, utilizando un pasturómetro con base rectangular de 40 x 60 cm (adaptado de Spada y Cangiano, 1991). En los sectores cercanos y representativos de las parcelas se tomaron 9 muestras de biomasa con su respectiva altura del pasturómetro para generar la ecuación de calibración del método en cada tipo de pastura ($Biomasa = a + b * altura$). Dentro de las parcelas, se dividió transitoriamente en sitios de 1 m² mediante marcas laterales. En cada sitio, se midió la altura con el pasturómetro para luego estimar la biomasa mediante la ecuación, y se hizo una segunda medición con el mismo dispositivo pero sin aplastar a la altura de la primera hoja que este tocaba, para la descripción de la situación inicial.

Al finalizar los 2 turnos de pastoreo diarios, se volvieron a subdividir las parcelas en los sitios de 1 m² tensando hilos sobre la superficie del suelo (Figura 34). Cada sitio se clasificó como “pastoreado” o no “pastoreado”. Se consideró “pastoreado” al sitio donde se

identificaban plantas o partes de plantas (hojas y tallos en alfalfa, láminas y pseudotallos en raigrás anual) que habían sido cortadas por los animales al ingerirlas. La biomasa de estos sitios se cosechó en su totalidad, cortando manualmente al ras del suelo, y se pesaron en verde. A su vez, se clasificaron visualmente en bajos, medios o altos cuando la altura fue menor al 40, entre el 40 y 70 o mayor al 70% de la altura inicial, respectivamente. Se tomaron 12 submuestras de cada tipo de aproximadamente 300 g, se pesaron en verde y colocaron en estufa para estimar el contenido (%) de materia seca con el que, posteriormente se calculó la biomasa remanente de cada sitio. Finalmente, el CMS se obtuvo como la sumatoria de la diferencia de biomasa inicial y remanente de todos los sitios pastoreados por parcela.

Además, se tomaron 6 muestras de cada pastura en lugares aledaños a las parcelas. Fueron recolectadas a mano, imitando el pastoreo realizado por los animales (hand-plucking). Cada muestra incluyó una cantidad de forraje equivalente a 10 bocados. Se secaron en estufa a 60° C hasta peso constante para estimar su contenido (%) de materia seca y fibra insoluble en detergente neutro (FDN, Van Soest *et al.*, 1991).



Figura 34: Marcación de los sitios de 1 m² y corte de los remanentes en las parcelas de alfalfa (a) y raigrás anual (b).

Análisis estadístico

Para el análisis de las características de las pasturas se utilizó el modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \Omega_j + (\tau\Omega)_{ij} + e_{ij} \quad i=1,2 \quad j=1,2$$

Donde Y_{ij} es el valor de la ij -ésima observación, μ es la media general, τ_i es el efecto de la i -ésima pastura, Ω_j es el efecto del j -ésima categoría, $(\tau\Omega)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre la i -ésima pastura y el j -ésima categoría y e_{ij} es el error aleatorio de la ij -ésima observación.

Se analizó el efecto de la categoría y tipo de pasturas utilizadas en las variables de comportamiento ingestivo y acústicas derivadas de la energía de las masticaciones utilizando el modelo mixto:

$$Y_{ijk} = \mu + CMS_{ijk} + \tau_i + \Omega_j + (\tau\Omega)_{ij} + r_k + e_{ijk} \quad i=1,2 \quad j=1,2 \quad k=1\dots6$$

Donde Y_{ijk} es el valor de la ijk -ésima observación, μ es la media general, CMS_{ijk} se utiliza como covariable cuantitativa continua para minimizar la variabilidad no deseada producida por las diferencias en el consumo de materia seca, τ_i es el efecto del i -ésimo tipo de pastura, Ω_j es el efecto del j -ésima categoría animal, $(\tau\Omega)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre la i -ésima pastura y el j -ésima categoría, r_k es el efecto aleatorio del k -ésimo animal y e_{ijk} es el error aleatorio de la ijk -ésima observación.

A su vez, para el análisis de CMS, se ajustó por el tiempo real de pastoreo como covariable. Además, se tomó en cuenta el efecto ocasionado por los equipos de grabación al analizar las variables acústicas.

En todos los modelos, se verificaron los residuos por cumplimiento de normalidad y homocedasticidad a través de gráficos y de las pruebas de Shapiro-Wilk y Leneve. Cuando fue necesario se modeló la heterogeneidad de varianzas a través de modelos lineales extendidos con la función `weights = varIdent` del paquete `nlme` (Pinheiro y Bates, 2000). Cuando no fue posible ajustar modelos mixtos por la generación de matrices de varianza-covarianza negativas, se emplearon modelos lineales extendidos ajustados por la correlación de las observaciones pertenecientes al mismo animal a través de la función `correlation = corCompSymm` (Pinheiro y Bates, 2000).

Cuando los efectos de las pasturas y la categoría animal fueron significativos para el ANVA, las medias se compararon por Tukey-Kramer HSD ($p < 0,05$). En todos los casos, se presentan las medias ajustadas y sus respectivos errores estándares.

La relación general del CMS con el tiempo real y con la EC se analizó por regresión lineal simple:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + e_i$$

Donde Y_i es la variable respuesta CMS, β_0 es la ordenada al origen, β_1 es el coeficiente (pendiente) de X_1 , X_1 es el tiempo real o EC como regresor, e_i es el error aleatorio de la i -ésima observación.

La verificación de los ajustes del modelo para estimar CMS fue en tres etapas: 1) Se analizó la correlación entre el CMS, la EC y las variables continuas de la energía de los distintos tipos de masticaciones, la cantidad total y tasas de los diferentes movimientos mandibulares. Las variables que presentaron alta correlación fueron excluidas de ser

incorporadas en el modelo. 2) Las variables restantes se evaluaron de a una, hasta obtener los mejores modelos con un número creciente de predictores. Estos se evaluaron y seleccionaron a partir de diferentes criterios: R^2 aj: R^2 ajustado, AIC: criterio de información de Akaike, CV: coeficiente de variación, Cp: Cp de Mallow. 3) Por último, se evaluó la incorporación de los efectos de las variables cualitativas de las categorías y de las pasturas, sobre la ordenada al origen y distintos predictores (interacción), a través de: R^2 aj, AIC y CV.

Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico R 4.2.0 (R Core Team, 2022).

RESULTADOS

Pasturas y sesiones de pastoreo

Las pasturas resultaron uniformes, libres de malezas y permitieron realizar sesiones de pastoreo sin interrupciones. Al inicio del pastoreo, se observaron diferencias significativas en la altura y la biomasa ofrecida entre las 2 especies forrajeras ($p < 0,05$; Tabla 14). Sin embargo, no se encontraron diferencias entre las parcelas de la misma especie asignadas a las 2 categorías ($p > 0,05$). Las pasturas de alfalfa fueron un 69 % más altas que las de raigrás anual, con una biomasa ofrecida equivalente al 51 % de la de raigrás anual. El raigrás anual presentó mayor contenido de MS ($p < 0,05$) que alfalfa (25,1 vs. 22,3 %).

En la biomasa ingerida, evaluada a través de los muestreos manuales, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de MS ($p > 0,05$). Sin embargo, el raigrás anual presentó 70 % más de FDN que la alfalfa ($p < 0,05$, Tabla 14).

Tabla 14: Características de las pasturas utilizadas en las sesiones de pastoreo.

Variable	Categoría	Alfalfa	Raigrás anual	Promedio	Promedio total
<i>Biomasa ofrecida</i>					
Altura (sin aplastar, cm)	Vaca	40,7 ± 0,51	24,2 ± 0,51	32,4 ± 0,36 ^a	32,7 ± 0,26
	Vaquillona	41,4 ± 0,54	24,4 ± 0,51	32,9 ± 0,37 ^a	
	Promedio	41,0 ± 0,37 ^A	24,3 ± 0,36 ^B		
Biomasa (kgMS/ha)	Vaca	2076 ± 50,6	4128 ± 50,6	3102 ± 35,8 ^a	3109 ± 25,7
	Vaquillona	2103 ± 53,7	4130 ± 50,6	3116 ± 36,9 ^a	
	Promedio	2090 ± 36,9 ^B	4129 ± 35,8 ^A		
Contenido de MS (%)		22,3 ± 0,76 ^B	25,1 ± 0,72 ^A		23,7 ± 0,52
<i>Biomasa ingerida</i>					
Contenido de MS (%)	Promedio	24,1 ± 0,64 ^A	25,6 ± 0,56 ^A		24,9 ± 0,43
Contenido de FDN (%)	Promedio	21,5 ± 1,23 ^B	36,6 ± 1,23 ^A		29,0 ± 0,87

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$): minúsculas en la misma columna y mayúsculas en la misma fila.

Todas las sesiones de pastoreo se realizaron en tiempo y forma, según lo planeado y acorde a los objetivos establecidos (Tabla 15). En promedio, las sesiones de 10, 25 y 40 min tuvieron duraciones reales de 11,7; 25,9 y 40,7 ± 0,36 min, respectivamente.

Tabla 15: Tiempo real promedio (min) de las sesiones de pastoreo.

Categoría	Tiempo Objetivo	Tiempo real (min)	
		Alfalfa	Raigrás anual
Vaca	10	11,8	12,2
	25	26,1	26,0
	40	40,9	39,2
Vaquillona	10	11,3	11,4
	25	25,6	26,1
	40	41,1*	41,6

EE= 0,75. *EE = 0,92.

Consumo de materia seca y comportamiento ingestivo

Las dos pasturas, con alturas y biomásas contrastantes, permitieron un CMS promedio de los tres turnos de 1142 gMS sin mostrar diferencias significativas entre ellas ($p > 0,05$; Tabla 16). Las vacas consumieron un 27 % más que las vaquillonas (1277 vs. 1006 gMS; $p < 0,05$). De manera similar, la TCMS no presentó diferencias entre pasturas promediando en 2573 gMS/h, pero sí entre las categorías animales ($p < 0,05$), las vacas alcanzaron una tasa 23 % mayor que las vaquillonas (2835 vs. 2310 gMS/h).

El peso promedio de los bocados (PB) fue $0,97 \pm 0,04$ gMS (Tabla 16). Tanto vacas como vaquillonas obtuvieron PB similares en alfalfa, pero en raigrás anual las vaquillonas obtuvieron bocados 33 % más livianos que las vacas (1,17 vs. 0,78 gMS). Se observó una disminución de 21 % del PB de las vacas en alfalfa respecto a raigrás anual, en tanto que las vaquillonas lo aumentaron 16 %.

En general, las tasas de bocados (TB) promediaron 44,6 bocados/min (Tabla 16). En alfalfa las vacas tuvieron una TB 26 % mayor que las vaquillonas (46,4 vs. 36,8 B/min), pero en raigrás anual las vaquillonas mostraron una mayor tasa (14 %) que las vacas (44,4 vs. 50,7 B/min). Las vacas no presentaron diferencias en la TB entre pasturas ($p > 0,05$), en tanto que las vaquillonas incrementaron 38 % la TB en raigrás anual respecto a alfalfa.

Las masticaciones totales por gMS (Mtot.gMS) fueron similares para ambas pasturas ($p > 0,05$; Tabla 16) pero distintas entre categorías ($p < 0,05$). En promedio, las vaquillonas realizaron 46 % más de masticaciones por cada gMS ingerido en comparación con las vacas.

Tabla 16: Efecto de la categoría y la pastura sobre el consumo de materia seca y el comportamiento ingestivo.

Variable	Categoría	Alfalfa	Raigrás anual	Promedio	Promedio total
Consumo de materia seca, CMS (gMS)	Vaca	1119 ± 103	1435 ± 103	1277 ± 64,4 ^a	1142 ± 35,2
	Vaquillona	977 ± 46,6	1035 ± 43,5	1006 ± 28,4 ^b	
	Promedio	1048 ± 56,5 ^A	1235 ± 55,9 ^A		
Tasa de consumo de materia seca, TCMS (gMS/h)	Vaca	2595 ± 175	3076 ± 177	2835 ± 119 ^a	2573 ± 64,5
	Vaquillona	2264 ± 80,7	2356 ± 73,5	2310 ± 53,1 ^b	
	Promedio	2430 ± 96,4 ^A	2716 ± 95,4 ^A		
Peso de bocado, PB (gMS)	Vaca	0,93 ± 0,06 ^{aB}	1,17 ± 0,06 ^{aA}	1,05 ± 0,05	0,97 ± 0,04
	Vaquillona	1,02 ± 0,06 ^{aA}	0,78 ± 0,06 ^{bB}	0,90 ± 0,05	
	Promedio	0,97 ± 0,04	0,97 ± 0,04		
Tasa de bocados, TB (B/min)	Vaca	46,4 ± 1,28 ^{aA}	44,4 ± 1,33 ^{bA}	45,4 ± 0,78	44,6 ± 0,55
	Vaquillona	36,8 ± 1,40 ^{bB}	50,7 ± 1,29 ^{aA}	43,7 ± 0,82	
	Promedio	41,6 ± 0,95	47,5 ± 0,92		
Masticaciones totales por gMS, Mtot.gMS (Mtot/gMS)	Vaca	1,58 ± 0,09	1,47 ± 0,10	1,53 ± 0,07 ^b	1,88 ± 0,05
	Vaquillona	2,38 ± 0,10	2,08 ± 0,09	2,23 ± 0,07 ^a	
	Promedio	1,98 ± 0,07 ^A	1,78 ± 0,07 ^A		

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$): minúsculas en la misma columna y mayúsculas en la misma fila.

Asignación de movimientos mandibulares

Las señales acústicas se grabaron de forma continua en las sesiones sin inconvenientes, a excepción de un turno de pastoreo de 40 minutos de una vaquillona en alfalfa que se debió descartar por mal funcionamiento del equipo. Las señales obtenidas fueron de muy buena calidad, lo que permitió clasificar y etiquetar de manera precisa cada uno de los eventos mandibulares para el posterior cálculo de variables.

En general, la asignación de movimientos mandibulares presentó diferencias significativas para la categoría (vaca vs. vaquillona; $p < 0,05$; Tabla 17). Las tasas de arranques (AT) y los movimientos compuestos por bocado (MCB) fueron similares ($p > 0,05$) en todos los casos.

La tasa de movimientos mandibulares (MMT) fue mayor en vaquillonas que en vacas en ambas pasturas (86,8 vs. 72,1 MM/min). Las vacas tuvieron similar MMT en ambas pasturas, y las vaquillonas tuvieron una tasa levemente mayor (5 %) en alfalfa comparado con raigrás anual ($p < 0,05$).

Cuando se consideran todas las masticaciones (puras y de los movimientos compuestos), las vaquillonas masticaron más veces por minuto (MtotT) que las vacas en ambas pasturas ($p < 0,05$). No obstante, la tasa de masticaciones puras (MT) de las

vaquillonas fue mayor a la de vacas en pastoreo de alfalfa ($p < 0,05$), pero no se diferenciaron significativamente al pastorear raigrás anual ($p > 0,05$). Además, las vacas disminuyeron su MT 14 % en alfalfa respecto a raigrás anual en tanto que, las vaquillonas lo incrementaron 53 %. Por otro lado, la tasa de movimientos compuestos (MCT) de vaquillonas fue menor en alfalfa y mayor en raigrás anual respecto a las vacas ($p < 0,05$). Las vaquillonas tuvieron una menor MCT en alfalfa comparado con raigrás anual ($p < 0,05$), en tanto que las vacas tuvieron similar MCT en ambas pasturas.

La proporción de MM asignados a MC (PMC) fue similar entre vacas y vaquillonas cuando pastorearon raigrás anual ($p > 0,05$), pero las vaquillonas redujeron esta proporción 35 % respecto a las vacas en alfalfa (0,57 vs. 0,37). Las vacas mantuvieron similar PMC en ambas pasturas, y las vaquillonas lo redujeron un 33 % en alfalfa respecto a raigrás anual (0,37 vs. 0,55).

Los movimientos mandibulares por bocado (MMB), las masticaciones puras por bocado (MB) y masticaciones totales por bocado (MtotB) presentaron una respuesta similar. No se diferenció entre vacas y vaquillonas sobre raigrás anual ($p > 0,05$), y en alfalfa las vaquillonas tuvieron valores significativamente mayores ($p < 0,05$) a las vacas. Las vaquillonas en alfalfa tuvieron valores significativamente mayores ($p < 0,05$) a los obtenidos en raigrás anual, en tanto que las vacas tuvieron similares de MMB y MB en ambas pasturas y, un leve incremento (10 %) de MtotB en raigrás anual respecto a alfalfa (1,42 vs. 1,57, $p < 0,05$).

Tabla 17: Efecto de la categoría y la pastura sobre la asignación de los movimientos mandibulares.

Variables	Categoría	Alfalfa	Raigrás anual	Promedio	Promedio total
Tasa de movimientos mandibulares, MMT (MM/min)	Vaca	71,2 ± 2,09 ^{bA}	73,1 ± 2,11 ^{bA}	72,1 ± 1,91	79,5 ± 1,35
	Vaquillona	88,9 ± 2,15 ^{aA}	84,6 ± 2,09 ^{aB}	86,8 ± 1,93	
	Promedio	80,0 ± 1,50	78,9 ± 1,48		
Proporción de movimientos compuestos, PMC (MC/MM)	Vaca	0,57 ± 0,02 ^{aA}	0,55 ± 0,02 ^{aA}	0,56 ± 0,02	0,51 ± 0,01
	Vaquillona	0,37 ± 0,03 ^{bB}	0,55 ± 0,02 ^{aA}	0,46 ± 0,02	
	Promedio	0,47 ± 0,02	0,55 ± 0,02		
Tasa de arranques, AT (A/min)	Vaca	5,89 ± 1,01	3,72 ± 1,02	4,80 ± 0,88 ^a	4,44 ± 0,62
	Vaquillona	3,87 ± 1,05	4,27 ± 1,01	4,07 ± 0,89 ^a	
	Promedio	4,88 ± 0,73 ^A	4,00 ± 0,71 ^A		
Tasa de masticaciones puras, MT (M/min)	Vaca	24,8 ± 2,35 ^{bB}	28,8 ± 2,37 ^{aA}	26,8 ± 2,18	34,9 ± 1,54
	Vaquillona	51,9 ± 2,41 ^{aA}	33,9 ± 2,35 ^{aB}	42,9 ± 2,19	
	Promedio	38,2 ± 1,68	31,4 ± 1,66		
Tasa de movimientos compuestos, MCT (MC/min)	Vaca	40,5 ± 1,53 ^{aA}	40,6 ± 1,59 ^{bA}	40,5 ± 0,67	40,0 ± 0,47
	Vaquillona	32,7 ± 1,66 ^{bB}	46,4 ± 1,53 ^{aA}	39,5 ± 0,73	
	Promedio	36,6 ± 1,13	43,5 ± 1,09		
Tasa masticaciones totales, MtotT (Mtot/min)	Vaca	65,3 ± 2,13 ^{bA}	69,4 ± 2,17 ^{bA}	67,2 ± 1,74	75,0 ± 1,24
	Vaquillona	85,1 ± 2,21 ^{aA}	80,4 ± 2,13 ^{aA}	82,9 ± 1,77	
	Promedio	75,2 ± 1,55	74,9 ± 1,51		
Movimientos mandibulares por bocado, MMB (MM/B)	Vaca	1,55 ± 0,07 ^{bA}	1,66 ± 0,07 ^{aA}	1,06 ± 0,06	1,83 ± 0,04
	Vaquillona	2,42 ± 0,07 ^{aA}	1,68 ± 0,07 ^{aB}	2,05 ± 0,06	
	Promedio	1,98 ± 0,05	1,67 ± 0,05		
Masticaciones puras por bocado, MB (M/B)	Vaca	0,55 ± 0,07 ^{aA}	0,66 ± 0,07 ^{aA}	0,60 ± 0,06	0,83 ± 0,04
	Vaquillona	1,42 ± 0,07 ^{bA}	0,68 ± 0,07 ^{aB}	1,05 ± 0,06	
	Promedio	0,98 ± 0,05	0,67 ± 0,05		
Movimientos compuestos por bocado, MCB (MC/B)	Vaca	0,87 ± 0,02	0,91 ± 0,02	0,89 ± 0,02 ^a	0,90 ± 0,01
	Vaquillona	0,90 ± 0,02	0,92 ± 0,02	0,90 ± 0,02 ^a	
	Promedio	0,88 ± 0,02 ^A	0,91 ± 0,02 ^A		
Masticaciones totales por bocado, MtotB (Mtot/B)	Vaca	1,42 ± 0,07 ^{bB}	1,57 ± 0,07 ^{aA}	1,49 ± 0,06	1,72 ± 0,04
	Vaquillona	2,31 ± 0,07 ^{aA}	1,59 ± 0,07 ^{aB}	1,95 ± 0,06	
	Promedio	1,86 ± 0,05	1,58 ± 0,05		

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$): minúsculas en la misma columna y mayúsculas en la misma fila.

Descripción de los sonidos

La energía por gMS (EgMS), no se diferenció entre especies de pasturas, pero sí entre categorías. Las vaquillonas tuvieron una energía por gMS más del doble a la registrada en vacas ($p < 0,05$; Tabla 18). Aunque se observó una interacción significativa ($p < 0,05$, Tabla

18) entre pastura y categoría en la energía promedio por bocado (EB), las vaquillonas mostraron una EB superior ($p < 0,05$) en ambos tipos de pasturas.

La energía promedio de la masticación pura (EM) y de la masticación de los movimientos compuestos (EMC), no presentaron diferencias entre pasturas ($p > 0,05$; Tabla 18). La EM no se diferenció estadísticamente ($p > 0,05$) entre categorías. En cambio, la EMC en las vaquillonas fue un 46 % mayor ($p < 0,05$) al de las vacas.

Tabla 18: Efecto de la categoría y la pastura sobre las variables acústicas.

VARIABLES	Categoría	Alfalfa	Raigrás	Promedio	Promedio total
Energía por gMS, EgMS	Vaca	296 ± 66,2	335 ± 77,2	316 ± 53,0 ^b	502 ± 39,0
	Vaquillona	664 ± 66,3	712 ± 77,2	688 ± 53,0 ^a	
	Promedio	480 ± 51,0 ^A	524 ± 66,6 ^A		
Energía promedio por bocado, EB	Vaca	274 ± 35,3 ^{bA}	328 ± 42,0 ^{bA}	301 ± 28,8	442 ± 31,0
	Vaquillona	660 ± 62,4 ^{aA}	505 ± 67,7 ^{aA}	581 ± 50,3	
	Promedio	467 ± 38,3	416 ± 47,5		
Energía promedio de la masticación pura, EM	Vaca	225 ± 33,2	263 ± 39,4	244 ± 25,6 ^a	283 ± 19,0
	Vaquillona	302 ± 33,3	341 ± 39,4	321 ± 25,6 ^a	
	Promedio	263 ± 25,9 ^A	302 ± 34,4 ^A		
Energía promedio de la masticación de movimiento compuesto, EMC	Vaca	193 ± 26,6	192 ± 32,5	193 ± 18,6 ^b	237 ± 13,8
	Vaquillona	255 ± 26,7	308 ± 32,5	282 ± 18,6 ^a	
	Promedio	224 ± 21,2 ^A	250 ± 29,2 ^A		

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$): minúsculas en la misma columna y mayúsculas en la misma fila.

Modelo para estimación de CMS en vaquillonas

Como se esperaba por el diseño experimental, se logró un aumento de CMS (gMS) en función del tiempo de las sesiones de pastoreo. Esta relación fue significativa ($R^2 = 0,79$; $p < 0,001$; RCME = 307 gMS; Figura 35a), sin importar la categoría o pastura analizada.

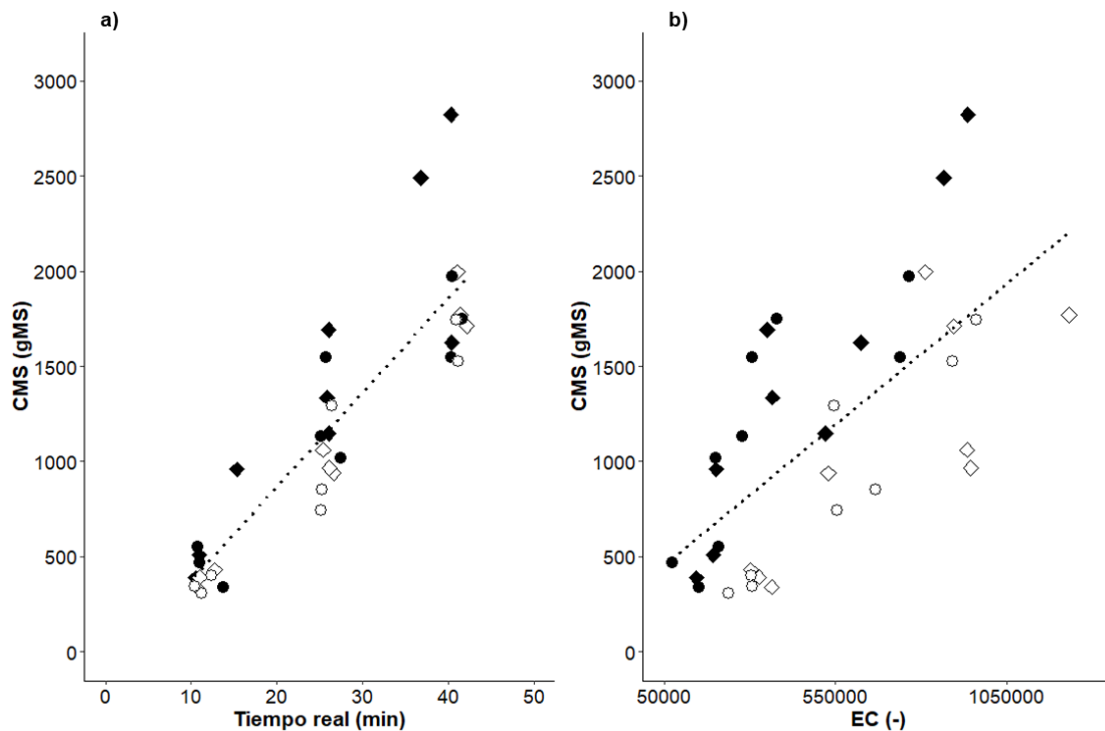


Figura 35: Relación del consumo de materia seca (CMS, gMS) con el tiempo real de pastoreo (min) y la energía de consumo (EC; (-) , adimensional). a) $CMS = -125 + 49,5 * \text{Tiempo real}$, $R^2 = 0,79$; $p < 0,001$; $RCME = 307$. b) $CMS = 379 + 0,001 * EC$, $R^2 = 0,47$; $p < 0,001$; $RCME = 492$). Símbolos rellenos: "Vacas"; símbolos vacíos: "Vaquillonas"; Rombos: Raigrás anual; Círculos: Alfalfa.

La energía de consumo (EC) explicó el 47 % de la variabilidad en el CMS, con una relación significativa e independiente de la categoría y de la pastura ($R^2 = 0,47$; $p < 0,001$; $RCME = 492$ gMS; Figura 35b). Después de un análisis de correlación, se incluyeron las tasas de los tres movimientos mandibulares (MCT, MT y AT) como variables para mejorar la predicción del modelo, debido a su baja correlación con EC ($r < 0,30$, subrayado en azul en Figura 36). Por otro lado, se excluyó la tasa de bocados (TB) debido a su alta correlación con MCT (0,94). También, se descartaron variables con alta correlación con EC ($r > 0,70$; recuadro rojo en Figura 36), como la cantidad total de los tipos de movimientos mandibulares y la energía total de los distintos tipos de masticaciones. Además, la cantidad de arranques, se excluyó por presentar una elevada correlación con AT ($r = 0,87$).

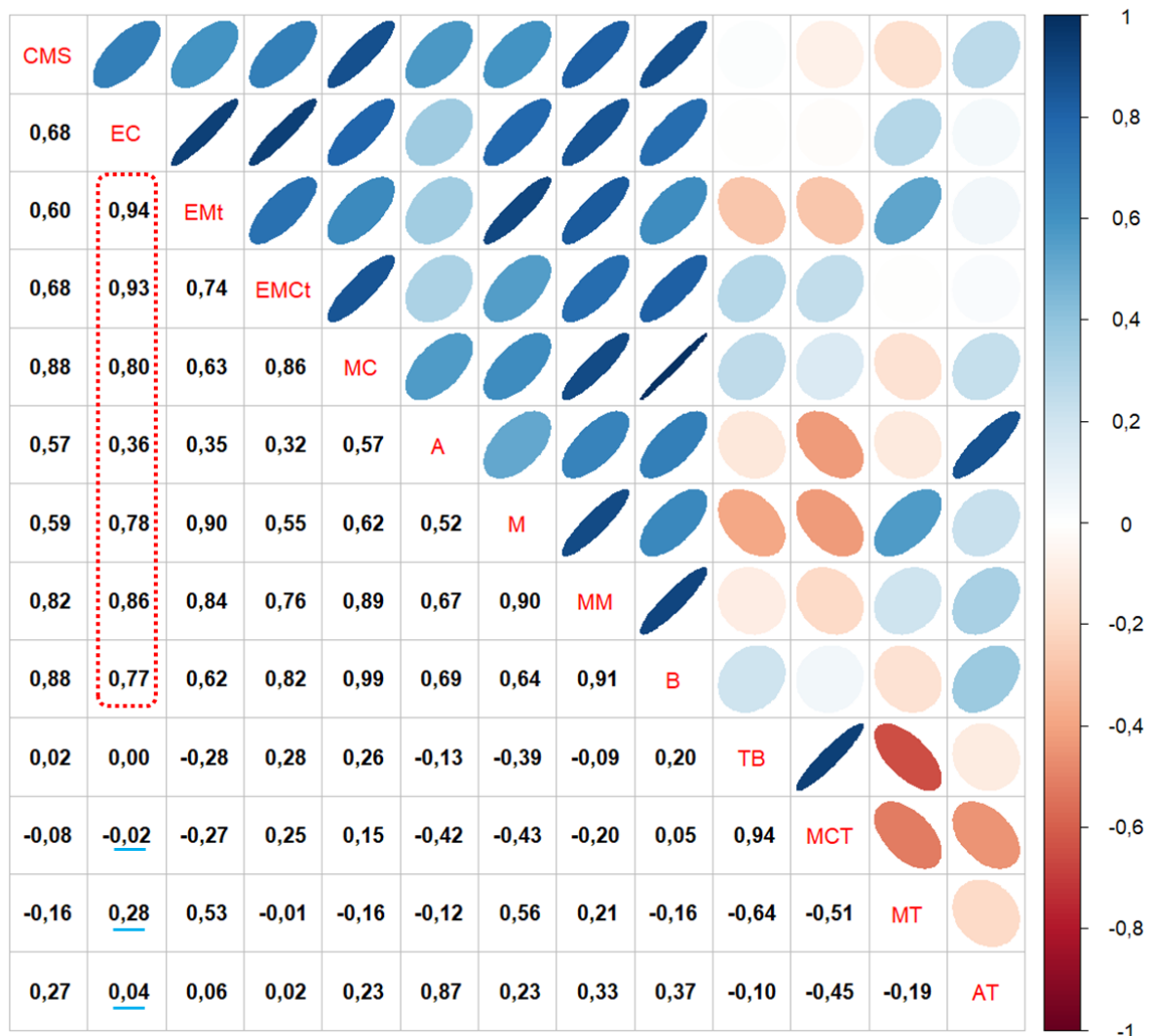


Figura 36: Correlación entre consumo de materia seca y variables acústicas y movimientos mandibulares totales (n) y tasas de los respectivos movimientos mandibulares (n/min). Recuadro punteado rojo: variables descartadas por su alta correlación con EC. Subrayado azul: variables incluidas por su baja correlación con EC.

Los mejores modelos fueron obtenidos a partir de las variables seleccionadas: EC, MCT, MT y AT, con un número creciente de predictores (Tabla 19). Los valores de R^2 ajustado aumentaron, mientras que los de AIC, CV y Cp disminuyeron a medida que se añadieron variables hasta alcanzar un total de 3 variables. La inclusión de AT no mejoró los criterios de selección, por lo que el modelo seleccionado fue con 3 predictores (EC, MCT y MT).

Tabla 19: Modelos de predicción del consumo de materia seca (CMS).

N° predictores	Predictores	R ² aj	AIC	CV	Cp
1	EC	0,45	537	43	23,1
2	EC + MT	0,58	529	36	11,2
3	EC + MCT + MT	0,67	521	33	3,42
4	EC + MCT + MT + AT	0,66	522	33	5,00

R² aj: R² ajustado por el número de variables, AIC: criterio de información de Akaike, CV: coeficiente de variación, Cp: Cp de Mallow. Modelo seleccionado en negrita.

La inclusión de la interacción con la categoría (vaca vs. vaquillona) resultó en una mejora de los parámetros de selección. Sin embargo, no se observó el mismo efecto al añadir la pastura (alfalfa vs. raigrás anual, Tabla 20).

Tabla 20: Modelos seleccionados para diferente número de variables considerando los efectos de la pastura (alfalfa vs. raigrás anual) y la categoría (vaca vs. vaquillona).

Modelos	N° predictores	Predictores	R ² aj	AIC	CV
Mod-1	2	Especie * EC	0,47	541	44
Mod-2	2	Animal * EC	0,75	511	29
Mod-3	4	Especie * (EC + MCT + MT)	0,68	523	33
Mod-4	4	Animal * (EC + MCT + MT)	0,73	517	30
Mod-5	5	Especie + Animal * (EC + MCT + MT)	0,72	519	31

Basado en estos resultados, se proponen los Mod-2 y Mod-4 para las estimaciones de CMS realizadas en el Experimento 2 con las de vaquillonas holando argentino pastoreando raigrás anual.

Finalmente, y después de considerar la información necesaria disponible, se optó por utilizar el Mod-4:

$$\text{CMS} = [667 + (626, \text{ si Animal} = \text{Vaquillona}, \text{ sino } 0)] + [0,002 - (0,0006, \text{ si Animal} = \text{Vaquillona}, 0)] * \text{EC} - [4,61 - (14,8, \text{ si Animal} = \text{Vaquillona}, 0)] * \text{MCT} - [4,97 - (9,08, \text{ si Animal} = \text{Vaquillona}, 0)] * \text{MT}.$$

El modelo Mod-4 parametrizado para el Experimento 2 se expresa:

$$\text{CMS}_{\text{vaquillona}} = 1293 + (0,002 * \text{EC}) - (19,4 * \text{MCT}) - (14,0 * \text{MT})$$

DISCUSIÓN

El método acústico demostró ser una herramienta precisa para evaluar el comportamiento ingestivo, la asignación de movimientos mandibulares y los parámetros acústicos del pastoreo en animales jóvenes y adultos de raza holando argentino. Sin embargo, el modelo desarrollado para animales adultos no es directamente aplicable en animales jóvenes. Por lo tanto, la estimación del CMS mediante este método, requiere ajustes según la edad (categoría) del animal. A partir del análisis de las diferencias de comportamiento entre ambas categorías de animales, se generó un modelo de regresión lineal para estimar el consumo en pastoreo en vaquillonas (animales jóvenes), y aplicarlo en el Experimento 2 durante un día entero.

El diseño experimental utilizado se basó en el de Lorenzón (2022) y tuvo como objetivo principal investigar la necesidad de ajustes al estimar el consumo en animales jóvenes. Se emplearon 2 tipos de pasturas (alfalfa y raigrás anual) con características contrastantes, para analizar el comportamiento de ambas categorías. Las pasturas ofrecidas difirieron en biomasa, altura y contenido de MS. La calidad del forraje ingerido no difirió en su contenido de MS, pero sí en el de fibra (FDN). Este aspecto es crucial para determinar la necesidad de calibrar los modelos según la energía de los sonidos de las masticaciones producida en cada condición.

Consumo y comportamiento ingestivo

El CMS varió entre vacas y vaquillonas debido a diferentes tasas de consumo (TCMS, $p < 0,05$; Tabla 16). En este experimento, el tiempo de pastoreo fue similar entre ambas categorías, sin interrupciones y mínima búsqueda durante el pastoreo. Tanto el CMS como la TCMS no difirieron significativamente entre pasturas, indicando que ninguna de las pasturas presentó limitaciones significativas en comparación con la otra para ninguna de las dos categorías. Sin embargo, se observaron distintos mecanismos entre vacas y vaquillonas, para alcanzar esas TCMS.

Como se explicó en el Capítulo 3, la TCMS es el producto del peso de bocado (PB) y la tasa de bocados (TB). Aunque el PB se considera como el factor determinante de las TCMS (Laca *et al.*, 1992a; Cangiano *et al.*, 2002), la interacción entre ambos influyó en las diferentes velocidades de consumo registradas (Tabla 16).

El PB es condicionado por múltiples características estructurales de las pasturas, entre los que destacan la altura y la densidad (Laca *et al.*, 1992a; Boval y Sauvant, 2019). La altura influye positivamente en el PB, debido principalmente a su efecto sobre la profundidad (aproximadamente 50 % de la altura), y en menor medida en el área del bocado. A medida que la altura aumenta se incrementa el volumen del bocado y por lo tanto, el PB (Cangiano *et al.*, 2002; Boval y Sauvant, 2019). Este aumento sigue una función positiva y curvilínea hasta

alcanzar una altura umbral, determinada por la densidad de la pastura, a partir de la cual no hay variaciones en el PB (Boval y Sauvant, 2019). Sin embargo, en alturas superiores a los 40 cm, puede registrarse una disminución en el PB debido a la presencia de tallos y estructuras reproductivas que pueden restringir la formación de los bocados (Mezzalana *et al.*, 2017).

La densidad de la pastura también tiene un efecto positivo sobre el PB, con una relación exponencial, aunque este efecto se reduce en las pasturas más altas (Boval y Sauvant, 2019). La interacción entre la altura y la densidad es clave para comprender la determinación del PB, aunque pocos trabajos han explorado este aspecto en profundidad (Boval y Sauvant, 2019).

En este experimento, a pesar de las diferencias esperadas en las características estructurales entre las pasturas de distintas especies, como la relación hoja/tallo, la distribución de biomasa por horizontes, la biomasa total y la altura, se observó un aumento de 26 % en el PB de las vacas en raigrás anual respecto a alfalfa. Aunque la altura del raigrás anual fue un poco mayor a la mitad de la altura de alfalfa, es posible que la disminución en la profundidad de los bocados haya sido sobrecompensada por su mayor densidad del forraje (0,51 vs. 1,70 kgMS/m³).

El peso vivo de los animales también es un determinante del PB debido a su influencia en el volumen potencial de los bocados. La bibliografía indica una relación alométrica entre el peso de los animales y el ancho de incisivos (Ilius y Gordon, 1987; Taylor *et al.*, 1987). A su vez, Ilius y Gordon (1987) proponen que el área de bocado puede ser estimada como 2,36 veces el área cuadrada calculada a partir del ancho de los incisivos, lo que sugiere que, en condiciones similares de las pasturas, los animales más jóvenes (más livianos) obtendrían bocados más livianos.

Las vaquillonas mostraron un PB menor que las vacas sólo en raigrás anual (Tabla 16), pero en alfalfa aumentaron el PB un 31 %, alcanzando un nivel similar al PB reducido de las vacas. Estos resultados indican que las vaquillonas interactúan de manera diferente a las vacas con las condiciones estructurales de las pasturas. Posiblemente, la alta densidad de la biomasa del raigrás anual significó una dificultad mayor para cosechar y manipular el forraje para las dimensiones del aparato bucal de las vaquillonas. Al analizar la información, se especula que en alfalfa, con tallos de mayor longitud y menor densidad, las condiciones permitieron a las vaquillonas tomar y manipular más fácilmente cada bocado, resultando en bocados más pesados. Sin embargo, se requieren estudios específicos sobre la interacción entre distintas estructuras de pasturas y la edad de los animales, para llegar a conclusiones definitivas en este aspecto.

Los animales también ajustaron la tasa de bocados (TB), posiblemente como mecanismo de compensación frente a las variaciones de los PB (Tabla 16; Hodgson, 1985; Hodgson *et al.*, 1994). En general, en ambas categorías, los PB más livianos se asociaron

con mayores TB. Sin embargo, en las vacas, las tasas no se diferenciaron estadísticamente entre los dos tipos de pastura (Tabla 16).

El tiempo necesario para la aprehensión, masticación y deglución de cada bocado (inversa de la TB) cuando el tiempo de búsqueda es mínimo, está influenciado por la velocidad de los movimientos mandibulares (MMT), la asignación a los distintos tipos de MM y las masticaciones requeridas por gMS (Ungar, 1996). La TB de las vacas en alfalfa fue mayor aunque no significativamente en comparación con el raigrás anual, y contribuyó a que no se diferencien las TCMS entre ambas pasturas. Esta mayor TB puede atribuirse a la asignación diferente de movimientos mandibulares que las vacas tuvieron en alfalfa (Tabla 17), donde, a pesar de una MMT similar (71,2 vs. 73,1 MM/min) disminuyeron la asignación de MM a masticaciones puras. Este comportamiento se refleja en la menor MT (24,8 vs 28,8 M/min) que, ante una necesidad de $M_{tot.gMS}$ similar (1,58 vs. 1,47 $M_{tot/gMS}$), se tradujo en una menor masticación por bocado (1,42 vs. 1,57 $M_{tot/B}$) y, por lo tanto, en una disminución consecuente del tiempo por bocado.

En vaquillonas, se observó una mayor TB en raigrás anual en comparación con alfalfa (36,8 vs 50,7 B/min) y esta diferencia fue mucho más pronunciada que la registrada en las vacas. En raigrás anual, las vaquillonas redujeron levemente la MMT (5 %, $p < 0,05$, Tabla 17), pero los cambios sustanciales se registraron en la asignación de los MM. El incremento en la proporción de MC (0,37 vs. 0,55 MC/MM) y la tasa de dichos MC (32,7 vs. 46,4 MC/min) en detrimento de las masticaciones puras (51,9 vs. 33,9 M/min), permitió que gran parte del forraje arrancado en cada bocado fuera procesado simultáneamente (Laca *et al.*, 1994). Dado que ambas pasturas presentaron una necesidad de masticación ($M_{tot.gMS}$) similar en las vaquillonas, era de esperar una reducción en el tiempo por bocado (Laca *et al.*, 1994; Ungar, 1996).

Además de las mencionadas anteriormente, se encontraron diferencias en el comportamiento ingestivo entre categorías en ambos tipos de pasturas. Las vaquillonas mostraron mayor tasa de MM (MMT, Tabla 17) y de masticaciones totales (M_{totT}), así como una mayor cantidad de masticaciones por gMS consumida ($M_{tot.gMS}$), registrando un 46 % más de masticaciones que las vacas (1,53 vs. 2,23; Tabla 16). Esto sugiere que los animales más jóvenes tuvieron una necesidad mayor de masticación o procesamiento del forraje, que se reflejó en una mayor velocidad de movimientos mandibulares y en una incorporación de eventos masticatorios (M o MC) que resultaron en una tasa de masticación más alta. Este patrón se observó en ambas pasturas y no parece estar relacionado con el contenido de FDN o el PB. No obstante, lo que sí se diferenció entre las pasturas, fue la asignación a M o MC, para satisfacer la mayor necesidad de masticación.

En alfalfa, cuando el PB fue similar para ambas categorías animal, las vaquillonas realizaron una cantidad significativamente mayor de M, que resultó en una mayor proporción

de MtotB y de MMB. En cambio, en raigrás anual, cuando el PB de las vaquillonas fue inferior al de las vacas, las M, MtotB y MMB fueron similares en ambas categorías (Tabla 17). Los mayores requerimientos de masticación del forraje fueron principalmente cubiertos por masticaciones de los MC, cuya tasa fue superior a la de las vacas (40,6 vs. 46,4 MC/min) y marcadamente superior a la que las mismas vaquillonas tuvieron en alfalfa (32,7 vs. 46,4 MC/min). Tanto a través de M o de los MC, los movimientos masticatorios representaron el 96 % (85,1 Mtot.min / 88,9 MM.min) de los MM en alfalfa y el 95 % en raigrás anual, mientras que en las vacas dicha proporción fue del 91 y 88 % para alfalfa y raigrás respectivamente.

Este comportamiento podría relacionarse a la menor eficiencia de masticación en los animales más jóvenes (Bae *et al.*, 1983; Baumont *et al.*, 2006). Durante el pastoreo, la masticación prepara el forraje ingerido, fractura parcialmente los tejidos y libera componentes celulares solubles, para reducir el tamaño de las partículas y facilitar la digestión por las bacterias ruminales. En la rumia, la masticación se centra en reducir el tamaño de las partículas del forraje (Demment y Greenwood, 1988; Baumont *et al.*, 2006). La eficiencia de masticación, numerosas veces medida como tiempo total de masticación por unidad de consumo, tiende a disminuir con el aumento del peso vivo de los animales. A medida que los animales crecen, o en las especies con mayor peso adulto, el tiempo destinado a la masticación disminuye (Bae *et al.*, 1983; Baumont *et al.*, 2006). Las diferencias en la eficiencia de masticación, se atribuyen a la efectividad de los dientes y al comportamiento masticatorio durante el pastoreo y la rumia, aunque los mecanismos involucrados aún no se han esclarecidos completamente (Pérez-Barbería y Gordon, 1998). El análisis acústico ha demostrado ser una herramienta muy útil y precisa para avanzar en la comprensión de estos procesos y los mecanismos involucrados.

Variables acústicas y modelo de predicción

Este experimento se realizó para verificar la aplicabilidad del método acústico en vaquillonas, tomando como base el estudio de Lorenzón (2022). Ese estudio comprobó la capacidad predictiva de la energía acústica de las masticaciones para estimar el CMS de vacas adultas de raza holando argentino a lo largo de turnos de pastoreo completos y durante un día. Abordó un amplio rango de situaciones de pastoreo, incluyendo diferentes especies forrajeras (alfalfa y raigrás anual), distintas biomásas iniciales (alta y rebrote) y diferentes niveles de contenido de FDN. A pesar de grandes variaciones en las tasas de consumo y los pesos de bocados obtenidos, el método demostró su robustez para su aplicación en vacas adultas.

Los resultados indican una correlación significativa entre el CMS en un turno de pastoreo de ambas especies forrajeras (alfalfa y raigrás anual) y la energía de las masticaciones o energía de consumo (EC, R^2 ajustado = 0,45; CV = 43; Figura 35). Sin embargo, para mejorar

la estimación de CMS, fue necesario ajustar según la categoría animal (vaca o vaquillona), que resultó en un aumento sustancial de la precisión (Mod-2: R^2 ajustado = 0,75; CV = 29; Mod-4: R^2 ajustado = 0,73; CV = 30).

En las primeras etapas del desarrollo de la metodología acústica, Laca y Wallis De Vries, (2000), demostraron que la energía del sonido de las masticaciones tenía un potencial predictivo del forraje consumido, notablemente más preciso que otras medidas como el número y energía de los bocados o el número de masticaciones. La mayor precisión se debe a que la cantidad de forraje procesado se refleja en las variaciones que se producen en la intensidad y duración de las masticaciones independientemente del PB. Aunque la cantidad de masticaciones por bocado está inversamente relacionada con el PB (Laca *et al.*;1994), el registro de la energía de las masticaciones es lo suficientemente sensible para captar las variaciones en el contenido de biomasa procesado en cada masticación. En bocados pequeños, aunque se registre un mayor número de masticaciones, el sonido de estas se reduce en duración e intensidad, determinando una menor energía y por lo tanto, no se sobreestima la cantidad de forraje consumido (Laca y Wallis De Vries, 2000; Galli *et al.*, 2006b y 2018).

Varios estudios respaldan estos resultados tanto en bovinos adultos (Laca y Wallis De Vries, 2000; Galli *et al.* 2006a y b; Galli *et al.* 2018) como en ovinos (Galli *et al.*; 2011), pero se realizaron en períodos limitados a pocos minutos o con un bajo número de bocados. Lorenzón (2022) demostró que es posible utilizar el método para estimar el consumo en los turnos de pastoreo y luego, integrando los distintos turnos estimar el consumo diario, al menos en vacas adultas de raza holando argentino. Sin embargo, como varios autores han mencionado (Laca y Wallis De Vries 2000; Galli *et al.* 2018; Lorenzón, 2022), el tamaño y la anatomía de la cabeza pueden afectar la relación entre los sonidos producidos en la masticación y el forraje ingerido. Esto se debe a que las ondas sonoras se producen como resultado de la vibración mecánica transmitida a través del aire y de las estructuras óseas de la cabeza del animal, hasta ser captadas por el micrófono ubicado contra la frente. Por lo tanto, variaciones en la estructura dental, que realiza la masticación y genera la energía registrada, o en la estructura de la cabeza, podrían generar diferencias en los sonidos para un mismo nivel de consumo. Por consiguiente, resulta necesario investigar la viabilidad del método en animales más jóvenes. Este estudio aborda de manera significativa esta cuestión, aportando información sustantiva y relevante.

La característica acústica más relevante que define la necesidad de un ajuste para adaptar el modelo de vacas adultas a vaquillonas, es la energía de las masticaciones por gMS (EgMS). En promedio, las masticaciones de las vaquillonas generaron 2,28 veces más de energía por gMS masticado (316 vs. 688; $p < 0,05$; Tabla 18), que en parte se refleja en la mayor energía de las masticaciones por cada bocado ingerido (EB, 301 vs. 581; Tabla 18).

Esta diferencia en la energía por unidad de consumo se atribuye, en términos de comportamiento ingestivo, a la necesidad de los animales jóvenes de masticar más veces el forraje (Mtot.gMS y MtotB). Desde una perspectiva acústica, se observó una diferencia significativa en la energía generada por masticación de MC, mientras que la energía de las masticaciones puras, aunque mostró una tendencia a ser mayor en las vaquillonas, no alcanzó significancia estadística (Tabla 18).

Con el ajuste correspondiente por categoría, la energía de las masticaciones se muestra como un buen estimador del CMS, ya que integra información del tiempo de pastoreo y de la velocidad de procesamiento del forraje en la boca de los animales. Independientemente de la duración de un turno de pastoreo, una mayor EC se traducirá en un mayor CMS y viceversa (Galli *et al.*, 2018). Los coeficientes de interacción relacionados con las tasas de masticaciones (MCT y MT) contribuyeron a corregir y ajustar la cantidad de energía estimada. Los signos negativos para la estimación en vaquillonas indican una corrección para evitar sobreestimar la ya elevada energía de las masticaciones. Aunque la incorporación de estos coeficientes no mejoró sustancialmente la precisión del modelo (Tabla 19) en un turno de pastoreo, se consideraron para la estimación de los CMS diario en el Experimento 2.

Por otra parte, la diferenciación entre las pasturas (alfalfa o raigrás anual), no añadió información adicional relevante al modelo (Mod-5, Tabla 20). Esto concuerda con Galli *et al.* (2018) y Lorenzón (2022), quienes indican que el método no detecta diferencias en la energía del sonido de las masticaciones por gMS entre forrajes frescos, sugiriendo que se puedan obtener estimaciones confiables a partir de modelos acústicos generales y en condiciones de pasturas con varias especies sin necesidad de calibración. Sin embargo, es necesario seguir investigando para llegar a conclusiones definitivas sobre las estimaciones con vaquillonas, y considerando las diferencias observadas entre las pasturas.

A partir de los resultados obtenidos y cumpliendo los objetivos de este experimento, a través de un modelo simple basado en la energía de las masticaciones, fue posible estimar el CMS de los turnos de pastoreo y escalar esta estimación a un día completo, como se detalla en los resultados del Experimento 2. El análisis acústico permitió distinguir comportamientos y CMS en las diferentes intensidades de pastoreo, aunque la precisión del modelo ajustado para vaquillonas (R^2 aj = 0,73; CV = 30 %) fue menor al modelo de base (R^2 aj = 0,83; CV = 16 %, Lorenzón, 2022). Esta precisión también fue menor a la de los modelos propuestos por Galli *et al.* (2018) que obtuvieron CV = 17% con vacas lecheras pastoreando alfalfa y festuca alta, y de Galli *et al.* (2011) en ovejas pastoreando alfalfa y pasto ovilla (*Dactylis glomerata*), cuyas estimaciones se basaron en un número limitado de bocados. Este experimento, diseñado específicamente para analizar y ajustar las diferencias entre las categorías de animales, se llevó a cabo con un menor número de condiciones de pasturas, ya que no se consideraron distintas alturas como en los estudios mencionados. Además, las diferencias

metodológicas en el dispositivo experimental y posterior análisis acústico posiblemente contribuyeron a la pérdida de precisión. Sin embargo, se destaca la potencialidad del método, ya que permitió estudiar las diferencias entre las vacas y vaquillonas, así como proporcionar mayor información sobre el comportamiento ingestivo de las vaquillonas frente a distintas intensidades de pastoreo.

CONCLUSIONES

- Es factible estimar el consumo de materia seca en vaquillonas jóvenes de raza holando argentino (300-350 kg de PV) utilizando modelos de regresión lineal múltiple basados en la energía acústica de las masticaciones. Sin embargo, es importante destacar que los modelos desarrollados para vacas adultas deben ser ajustados para su uso en vaquillonas, debido a las diferencias en la relación entre la energía de las masticaciones y cada unidad de consumo de materia seca (gMS).
- El uso del método acústico fue muy útil para el análisis detallado del comportamiento ingestivo de las vaquillonas. Ha contribuido a una comprensión más profunda y detallada de las diferencias en el comportamiento ingestivo entre categorías de animales.

CAPÍTULO 5:

DISCUSIÓN GENERAL

La productividad de los sistemas integrados aumentó al incorporar el pastoreo de los cultivos de servicio con intensidad moderada. Este aumento se manifestó en una mayor productividad física del sistema, sumando una producción promedio de carne cuyos valores máximos variaron entre 366 y 464 kg/ha, a la agrícola de 3989 kgMS/ha. Se incrementó la productividad en términos de energía y proteína digestible humana en un 6,7 y 8%, respectivamente. Los resultados respaldan la importancia de diseñar sistemas productivos que puedan satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos de manera sustentable (Sekaran *et al.*, 2021; Lemaire *et al.*, 2023). La estimación de la producción de energía y proteína digestible para humanos resulta ser una metodología muy práctica y adecuada para este objetivo.

El pastoreo en el contexto de los sistemas integrados puede analizarse desde distintas perspectivas o dimensiones (Figura 37). Desde la dimensión de los procesos implicados, se incluyen la defoliación, el pisoteo, el reciclaje de nutrientes y la emisión de gases de efecto invernadero (Carvalho *et al.*, 2018b; Lemaire *et al.*, 2023). Estos procesos definen condiciones que pueden (o no) transformarse en servicios agroecosistémicos. El factor clave que condiciona esa transformación es la intensidad del pastoreo (Carvalho *et al.*, 2018b). La intensidad de pastoreo afecta la tasa de crecimiento del CS y la biomasa ofrecida determinando la respuesta animal. También define la biomasa remanente, que directamente afecta la capacidad (o servicio) del control de malezas (Schuster *et al.*, 2019). En general, los tratamientos menos intensos (15 – 20 cm) dejaron una biomasa remanente en torno similar a la producción del CS-Sj e incluso superior a la mínima recomendada (4000 kgMS/ha) para un buen control de malezas en las etapas iniciales del cultivo agrícola (Piñeiro *et al.*, 2019). Por el contrario, las intensidades menores o iguales a 10 cm, tuvieron una biomasa sensiblemente menor (Schuster *et al.*, 2019). Sin dudas, la variabilidad anual y la situación particular de cada lote van ser cruciales. En lotes con malezas problemáticas, se podría optar por mantener pastoreos más altos, cercanos a los 20 cm, para generar mayor biomasa remanente, la cual en este experimento promedió los 5525 kgMS/ha con máximos de 6700 kgMS/ha (Figura 10). Esta práctica puede reducir la producción de carne, por lo que sería necesario tomar una decisión de compromiso, adaptando los objetivos productivos, según los modelos de respuesta y circunstancias particulares de cada situación.

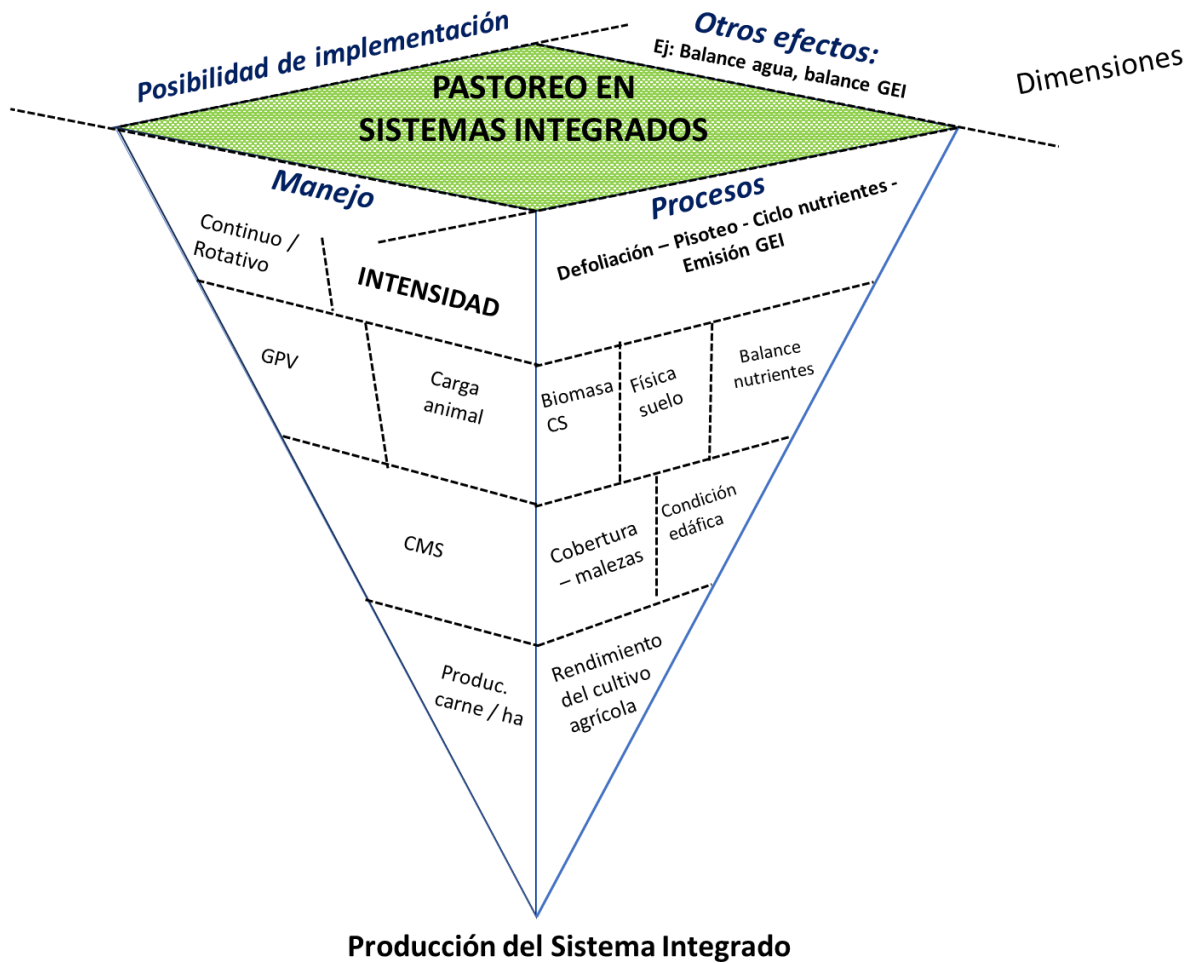


Figura 37: Análisis del pastoreo desde distintas dimensiones y su efecto sobre la productividad del sistema integrado.

La intensificación de los sistemas agrícolas de las últimas décadas debido a la especialización, derivó en una elevada dependencia de fertilizantes industriales, con los conocidos efectos de deterioro de los suelos y cursos de agua. La incorporación de cultivos de servicio en las rotaciones y su pastoreo moderado surgen como una oportunidad de reconciliar la agricultura con la ganadería de forma sustentable a escala predial (lote). De esta manera, es posible un manejo sustentable basado en el reciclaje de nutrientes esenciales como el N y el P, la mejora en la estructura de los suelos a través de la mayor incorporación de materia orgánica, y una menor dependencia de insumos externos (Lemaire, 2023).

En todos los años evaluados, el pastoreo de los CS no afectó el rendimiento del cultivo de soja. La variación interanual se relacionó con las condiciones ambientales como precipitaciones, temperaturas y días de crecimiento y los tratamientos con pastoreo mostraron indicio a ser más estables. Por lo tanto, y respaldando a Peterson *et al.* (2020), diversificar los sistemas agrícolas incorporando el pastoreo moderado de los CS, no implicaría rescindir rendimientos en los cultivos agrícolas ni la espera de una etapa de transición hasta estabilizar

el sistema. En Argentina, se han incorporado numerosas prácticas conservacionistas con el objetivo de aumentar la productividad agrícola de forma sustentable. Entre ellas, la incorporación de la siembra directa, la implementación de CS, la diversificación de las rotaciones y el manejo integrado de plagas. También es valorada la incorporación de pasturas plurianuales en la rotación para su aprovechamiento directo por los animales. Sin embargo, existen condicionantes que dificultan su adopción, como la capacidad de inversión, la escala productiva, las instalaciones disponibles, la complejidad del manejo, la disponibilidad de mano de obra capacitada e incluso en muchos casos, el abigeato (Scheneiter *et al.*, 2024). El pastoreo de los CS con intensidad moderada, se presenta como una opción de complejidad intermedia, aunque se requiere de políticas económicas y sociales que lo promuevan y contribuyan a reducir o sortear las dificultades en su adopción. Igualmente, resulta necesaria la comprensión y evaluación del manejo del pastoreo como el realizado en este trabajo, para adaptar los resultados esperados a cada situación particular.

Con respecto al manejo del pastoreo, los métodos se pueden sintetizar en dos categorías: continuo y rotativo (Briske *et al.*, 2008). Si bien existen variaciones dentro de cada uno, se diferencian principalmente por la distribución espacio-temporal de los animales y, por lo tanto, por el control del proceso de pastoreo (Carvalho *et al.*, 2018b). Espacialmente, en el rotativo, se induce un pastoreo más homogéneo forzando los animales a explorar toda la superficie, mientras que en el continuo se reduce el control sobre los animales permitiendo una mayor selectividad (Carvalho *et al.*, 2018b). Temporalmente, en el rotativo los tiempos de defoliación y de descanso serán determinados por quien defina los períodos de pastoreo, en tanto que en el continuo estos tiempos se definirán en función del balance establecido entre la tasa de crecimiento de la pastura y el consumo de los animales (Carvalho, 2013). Actualmente, no hay consenso respecto a la ventaja de un método sobre el otro en términos de producción animal individual y por unidad de superficie (Briske *et al.*, 2008; Solleberg *et al.* 2012). Aunque Solleberg *et al.* (2012) en su revisión de 23 estudios señala una ventaja del método rotativo en la producción de forraje, enfatiza que definir la intensidad de pastoreo es más relevante que las demás decisiones de manejo.

La intensidad de pastoreo se identifica como la herramienta de manejo más importante, por su efecto directo sobre la producción forrajera y animal. En el contexto de los sistemas integrados, es crucial para la productividad del cultivo agrícola sucesor a través de su efecto sobre el control de malezas, reciclado de nutrientes y la condición física de los suelos (Rouquette, 2015; Carvalho *et al.*, 2018b; Perteson *et al.*, 2020; Lemaire *et al.*, 2023).

Aparece claramente, que la intensidad de pastoreo es determinante de la producción de carne a través de la respuesta en la producción individual (GPV principalmente) y en la carga animal. La intensidad definida a través de la altura, es una herramienta muy útil, práctica y confiable en el manejo del pastoreo (de Albuquerque Nunes *et al.*, 2019; Kunrath *et al.*,

2020). Es posible controlar las alturas para maximizar el CMS y por lo tanto la GPV. Comprender que la carga animal debe ser consecuencia de la altura de pastoreo y no al contrario, permite hacer recomendaciones de manejo generales e independientes de las condiciones particulares de crecimiento de cada pastura.

El estudio de la GPV y el comportamiento ingestivo en relación al manejo del pastoreo requiere de un método preciso y el método acústico ha demostrado ser muy útil para este fin (Laca y Wallis DeVries, 2000; Galli *et al.*, 2018). Permite monitorear la actividad del pastoreo en la escala diaria, analizar el comportamiento ingestivo en detalle e incluso, encontrar y profundizar el conocimiento sobre diferencias entre animales adultos y jóvenes. Se obtuvieron estimaciones confiables del CMS diario en vaquillonas, cuando hasta el momento sólo se había hecho en períodos cortos de tiempo (Galli *et al.*, 2018) o en animales adultos (Lorenzón, 2022). Se pudieron analizar las diferencias en el comportamiento ingestivo con precisión. Fue posible desarrollar un modelo de regresión lineal relativamente simple para estimar el CMS y determinar las variables de comportamiento ingestivo que lo explican. En el futuro sería importante lograr el análisis de las señales de sonido y la predicción del CMS de forma automatizada, condición indispensable para ampliar la adopción del método tanto en el ámbito científico como comercial (Laca y Wallis DeVries, 2000). Estas herramientas informáticas se centran en la identificación de los eventos masticatorios (Clapham *et al.*, 2011; Milone *et al.*, 2012; Navon *et al.*, 2013; Chelotti *et al.*, 2016; Rau *et al.*, 2020) y delimitación temporal de turnos de pastoreo (Chelotti *et al.* 2020; Rau *et al.*, 2020). Generalmente incluyen un preprocesamiento de las señales a través de distintos filtros, para atenuar los disturbios ocasionados por ruidos ambientales y para ecualizar las variaciones de sonido producidas durante las grabaciones (Chelotti *et al.*, 2024). Luego, se aplican distintas herramientas para la identificación de los eventos masticatorios, que en su mayoría se agrupan en algoritmos de aprendizaje automático (machine learning), aprendizaje profundo (deep learning) y modelos heurísticos (Chelotti *et al.*, 2024). Si bien, aún se deben superar restricciones para su aplicación más extensiva, como la estandarización de módulos y características de grabación, suministro de energía (baterías) duraderos, entre otros, los avances tecnológicos de los últimos años resultan alentadores para la futura resolución e implementación de estas técnicas en el corto plazo.

Entre las ventajas del método acústico, se subraya que el nivel de detalle proporcionado en el análisis del comportamiento ingestivo permitió profundizar sobre las diferencias entre animales de distinta edad. Contrario a lo hipotetizado, estas diferencias demostraron la necesidad de realizar un ajuste según la categoría (vaca o vaquillona) para estimar el CMS. Principalmente, se encontró una diferencia en la relación entre la energía de las masticaciones y la unidad de consumo (gMS), donde las vaquillonas generaron 2,28 veces más de energía por gMS procesado. Esto se pudo atribuir a la mayor necesidad de los animales jóvenes de

masticar el forraje. Se observó que la energía de las masticaciones de los MC fue sensiblemente mayor en las vaquillonas respecto a las vacas, mostrando una vez más la importancia de identificar este tipo de movimiento mandibular, que hasta el momento es factible sólo a través del método acústico (Ungar y Rutter, 2006; Chelotti *et al.*, 2024).

CONCLUSIÓN FINAL

La evaluación de distintos niveles de intensidad del pastoreo en el corto y mediano plazo, ha demostrado ser clave en la productividad de un sistema integrado agrícola-ganadero en el sur de la provincia de Santa Fe. El pastoreo moderado (10 – 15 cm) produjo un incremento de la productividad total del sistema del 6,7 % de energía (Mj/ha) y del 8 % de proteína digestible humana (kg/ha).

Una intensidad de pastoreo moderada determina un manejo óptimo del pastoreo, ya que no solo maximiza la producción de raigrás anual como cultivo de servicio, sino que también incrementa tanto la producción individual como la producción por unidad de superficie en un sistema de cría de vaquillonas holando argentino. Adicionalmente, se incorpora diversidad, sin perjudicar la productividad del cultivo de soja sucesor, consolidando así la eficiencia y sustentabilidad del sistema integrado.

AGRADECIMIENTOS FINALES

Se agradece al semillero GAPP / PGG Wrightson Seeds, por el aporte de semillas de raigrás anual realizado a través de las prestaciones de servicios a terceros desarrolladas desde la FCA-UNR.

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Rosario, proyectos: AGR266 y 80020180300053UR (UNR).

BIBLIOGRAFÍA

- AGUINAGA, A. A. Q.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; SANTOS, D. T. D.; FREITAS, F. K. D.; LOPES, M. T. 2006. Produção de novilhos superprecoces em pastagem de aveia e azevém submetida a diferentes alturas de manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 35: 1765-1773.
- AIKEN, G. E. 2016. Invited Review: Grazing management options in meeting objectives of grazing experiments. *The Professional Animal Scientist*. 32(1): 1-9.
- AKDAĞ, A.; OCAK, N. 2019. Herbage intake determination methods of grazing animals. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*. 52(1): 1-1.
- ALLISON, C. D. 1985. Factors affecting forage intake by range ruminants: a review. *Journal Range Management*. 305-311.
- ALLDEN, W. G.; McD WHITTAKER, I. A. 1970. The determinants of herbage intake by grazing sheep: the interrelationship of factors influencing herbage intake and availability. *Australian Journal of Agricultural Research*. 21(5): 755-766.
- ALLEN, V. G.; BATELLO, C.; BERRETTA, E. J.; HODGSON, J.; KOTHMANN, M.; LI, X., MCLVOR, J.; MILNE, J.; PEETERS, A.; SANDERSON, M. 2011. An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*. 66(1): 2.
- ANDRADE, F. H. 2020. Los desafíos de la agricultura global. Ediciones INTA. Buenos Aires. 247 p. <https://repositorio.inta.gov.ar/handle/20.500.12123/9137>.
- ANDRIAMANDROSO, A.; BINDELLE, J.; MERCATORIS, B.; LEBEAU, F. 2016. A review on the use of sensors to monitor cattle jaw movements and behavior when grazing. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 20: 273-286.
- ANIBALINI, V.; VEGA, M. L.; GASTAUDO, J. 2020. <https://cei.unr.edu.ar/wp-content/uploads/2020/11/Caracterizacion-de-las-Precipitaciones-de-Zavalla-Santa-Fe.pdf>.
- ANIBALINI, V.; DICKIE, M. J.; GASTAUDO, J.; CORONEL, A. 2022. Variabilidad climática de la precipitación, temperatura y de sus eventos extremos en el sur de Santa Fe. *Revista Argentina de Agrometeorología RADA*. 13: 23-29.
- ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; DE ANDRADE, S. E. V. G.; CECAGNO, D.; CARLOS, F. S.; CARVALHO, P. C. D. F. 2014. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190: 52-59.
- AUDACITY® Versión 3.3.1. 2019. Audacity Team. <https://www.audacityteam.org/download/windows/>. It is free software distributed under the terms of the GNU General Public License.
- BAE, D. H.; WELCH, J. G.; GILMAN, B. E. 1983. Mastication and rumination in relation to body size of cattle. *Journal of Dairy Science*. 66(10): 2137-2141.
- BAILEY, D. W.; GROSS, J. E.; LACA, E. A.; RITTENHOUSE, L. R.; COUGHENOUR, M. B.; SWIFT, D. M.; SIMS, P. L. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management*. 49: 386-400.

- BARTHAM, G. T. 1986. Experimental techniques: the HFRO sward stick. Biennial Report Hill Farming Research Organization. 1984-85: 29-30.
- BAUMONT, R.; COHEN-SALMON, D.; PRACHE, S.; SAUVANT, D. 2004. A mechanistic model of intake and grazing behaviour in sheep integrating sward architecture and animal decisions. *Animal Feed Science and Technology*. 112(1-4): 5-28.
- BAUMONT, R.; DOREAU, M.; INGRAND, S.; VEISSIER, I. 2006. Feeding and mastication behaviour in ruminants. En: Bels, V. ed. *Feeding in domestic vertebrates: from structure to behaviour*. CAB International. p: 241-262.
- BELL, L. W.; KIRKEGAARD, J. A.; SWAN, A.; HUNT, J. R.; HUTH, N. I.; FETTELL, N. A. 2011. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil & Tillage Research*. 113: 19-29.
- BENVENUTTI, M. A.; GORDON, I. J.; POPPI, D. P. 2006. The effect of the density and physical properties of grass stems on the foraging behaviour and instantaneous intake rate by cattle grazing an artificial reproductive tropical sward. *Grass & Forage Science*. 61(3): 272-281.
- BERTOLOTTO, M.; MARZETTI, M. 2017. Cultivos de cobertura: Bases para su manejo en sistemas de producción. REM-AAPRESID, Rosario, Argentina. https://issuu.com/aapresid/docs/cultivosdecoberturarem_final_
- BIRCHAM, J. S.; HODGSON, J. 1983. The influence of sward condition on rates of herbage growth and senescence in mixed swards under continuous stocking management. *Grass & Forage Science*. 38(4): 323-331.
- BONEL B.; MONTICO S.; DI LEO N.; PLANISICH A.; GALLI J. 2022. ¿Es posible pastorear los cultivos de servicio sin perder beneficios en el suelo? *Agromensajes de la FCA-UNR*. 64: 3-6.
- BOVAL, M.; SAUVANT, D. 2019. Ingestive behaviour of grazing ruminants: meta-analysis of the components of bite mass. *Animal Feed Science and Technology*. 251: 96-111.
- BOVAL, M.; SAUVANT, D. 2021. Ingestive behaviour of grazing ruminants: Meta-analysis of the components linking bite mass to daily intake. *Animal Feed Science and Technology*. 278. 115014.
- BRISKE, D. D.; DERNER, J. D.; BROWN, J. R.; FUHLENDORF, S. D.; TEAGUE, W. R.; HAVSTAD, K. M.; GILLEN, R. L.; ASH, A. J.; WILLMS, W. D. 2008. Rotational grazing on rangelands: reconciliation of perception and experimental evidence. *Rangeland Ecology & Management*. 61(1): 3-17.
- BURLISON, A. J.; HODGSON, J.; ILLIUS, A. W. 1991. Sward canopy structure and the bite dimensions and bite weight of grazing sheep. *Grass and Forage Science*. 46(1): 29-38.
- CALLOW, M. N.; MICHELL, P.; BAKER, J. E.; HOUGH, G. M. 2000. The effect of defoliation practice in Western Australia on tiller development of annual ryegrass (*Lolium rigidum*) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) and its association with forage quality. *Grass and Forage Science*. 55(3): 232-241.

- CANGIANO, C. A.; GALLI, J. R.; PECE, M. A.; DICHIO, L.; ROZSYPALEK, S. H. 2002. Effect of liveweight and pasture height on cattle bite dimensions during progressive defoliation. *Australian Journal of Agricultural Research*. 53(5): 541-549.
- CARVALHO, P. C. D. F. 2013. Harry Stobbs Memorial Lecture: Can grazing behavior support innovations in grassland management? *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*. 1(2): 137-155.
- CARVALHO, P. C. D. F.; PETERSON, C. A.; NUNES, P. A. D. A.; MARTINS, A. P.; DE SOUZA FILHO, W.; BERTOLAZI, V. T.; KUNRATH, T.R.; DE MORAES, A.; ANGHINONI, I. 2018a. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *Journal of Animal Science*. 96(8): 3513-3525.
- CARVALHO, P. C. D. F.; BARRO, R. S.; NETO, A. B.; NUNES, P. A. D. A.; MORAES, A. D.; ANGHINONI, I.; ...; BORIN, J. B. M. 2018b. Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 47.
- CECAGNO, D.; GOMES, M. V.; GIGANTE DE ANDRADE COSTA, S. E. V.; POSSELT MARTINS, A.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; BAYER, C.; AGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F. 2018. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. 13(3).
- CHAPMAN, D. F.; LEMAIRE, G. 1993. Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. En: BAKER, M.J. ed. *Grasslands for Our World*. SIR Publishing, Wellington. pp. 55-64.
- CHELOTTI, J. O.; VANRELL, S. R.; MILONE, D. H.; UTSUMI, S. A.; GALLI, J. R.; RUFINER, H. L.; GIOVANINI, L. L. 2016. A real-time algorithm for acoustic monitoring of ingestive behavior of grazing cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 127: 64–75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016>.
- CHELOTTI, J. O.; VANRELL, S. R.; RAU, L. S. M.; GALLI, J. R.; PLANISICH, A. M.; UTSUMI, S. A.; MILONE, D. H.; GIOVANINI, L. L.; RUFINER, H. L. 2020. An online method for estimating grazing and rumination bouts using acoustic signals in grazing cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 173. 105443. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105443>.
- CHELOTTI, J.; MARTINEZ-RAU, L.; FERRERO, M.; VIGNOLO, L.; GALLI, J.; PLANISICH, A.; RUFINER, H. L.; GIOVANINI, L. 2024. Livestock feeding behaviour: A review on automated systems for ruminant monitoring. *Biosystems Engineering*. 246: 150-177.
- CLAPHAM, W. M.; FEDDERS, J. M.; BEEMAN, K.; NEEL, J. P. 2011. Acoustic monitoring system to quantify ingestive behavior of free-grazing cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 76: 96–104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.009>.
- CLIFFORD, P. E. 1977. Tiller bud suppression in reproductive plants of *Lolium multiflorum* Lam. cv. *Westerwoldicum*. *Annals of Botany*. 41(3): 605-615.
- COLVILL, K. E.; MARSHALL, C. 1984. Tiller dynamics and assimilate partitioning in *Lolium perenne* with particular reference to flowering. *Annals of Applied Biology*. 104(3): 543-557.
- CORONEL, A.; COSTANZO, M.; SACCHI, O. 2012. Variabilidad climática de los componentes del balance hídrico seriado en el sur de Santa Fe. *Ciencias Agronómicas XIX*. 7-11.

- DA SILVA SANTOS, A.; DE MEDEIROS, V. W. C.; GONÇALVES, G. E. 2023. Monitoring and classification of cattle behavior: A survey. *Smart Agricultural Technology*. 3. 100091.
- DE ALBUQUERQUE NUNES, P. A.; BREDEMEIER, C.; BREMM, C.; CAETANO, L. A. M.; DE ALMEIDA, G. M.; DE SOUZA FILHO, W.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F. 2019. Grazing intensity determines pasture spatial heterogeneity and productivity in an integrated crop-livestock system. *Grassland Science*. 65(1): 49-59.
- DE ALBUQUERQUE NUNES, P. A.; LACA, E. A.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; LI, M.; DE SOUZA FILHO, W.; ROBINSON KUNRATH, T.; MARTINS, A. P.; GAUDIN, A. 2021. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. *Scientific Reports*. 11(1): 1649.
- DELANDMETER, M.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; BREMM, C.; DOS SANTOS CARGNELUTTI, C.; BINDELLE, J.; DUMONT, B. 2024. Integrated crop and livestock systems increase both climate change adaptation and mitigation capacities. *Science of the Total Environment*. 912. 169061.
- DEMMENT, M. W.; GREENWOOD, G. B. 1988. Forage ingestion: effects of sward characteristics and body size. *Journal of Animal Science*. 66(9): 2380-2392.
- DE MORAES, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; DE ANDRADE, S. E. V. G.; KUNRATH, T. R. 2014. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. *European Journal of Agronomy*. 57: 4-9.
- DE SOUZA FILHO, W.; DE ALBUQUERQUE NUNES, P. A.; BARRO, R. S.; KUNRATH, T. R.; DE ALMEIDA, G. M.; GENRO, T. C. M.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. F. C. 2019. Mitigation of enteric methane emissions through pasture management in integrated crop-livestock systems: Trade-offs between animal performance and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*. 213: 968-975.
- EATON, J.; BATEMAN, W.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R. 2019. GNU Octave version 5.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations. URL <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v5.2.0>.
- FAO. 2018. Transformar la alimentación y la agricultura para alcanzar los ODS. 20 acciones interconectadas para guiar a los encargados de adoptar decisiones. Roma. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/65e7524f-9f38-4e3c-b98c-e25a45737800/content>.
- FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. D. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. 2007. Soil physical attributes and soybean yield in an integrated livestock-crop system with different pasture heights in no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 31: 771-780.
- FRANCO, J. G.; BERTI, M. T.; GRABBER, J. H.; HENDRICKSON, J. R.; NIEMAN, C. C.; PINTO, P.; VAN TASSEL, D.; PICASSO, V. D. 2021. Ecological intensification of food production by integrating forages. *Agronomy*. 11(12): 2580.
- FRANZLUEBBERS, A. J.; PAINE, L. K.; WINSTEN, J. R.; KROME, M.; SANDERSON, M. A.; OGLES, K.; THOMPSON, D. 2012. Well-managed grazing systems: A forgotten hero of conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 67(4): 100A-104A.

- FRANZLUEBBERS, A. J.; SAWCHIK, J.; TABOADA, M. A. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190: 18-26.
- FRANZLUEBBERS, A. J.; MARTIN, G. 2022. Farming with forages can reconnect crop and livestock operations to enhance circularity and foster ecosystem services. *Grass and Forage Science*. 77(4): 270-281.
- FULKERSON W. J.; DONAGHY D. J. 2001. Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence – key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 41: 261–275.
- GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; DEMMENT, M.; LACA, E. A. 2006a. Acoustic monitoring of chewing and intake of fresh and dry forages in steers. *Animal Feed Science and Technology*. 128 (1-2):14-30.
- GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; PECE, M. A.; LARRIPA, M. J.; LACA, E. A. 2006b. Uso del sonido en el análisis de la tasa de consumo de bovinos. *Revista Argentina de Producción Animal*. 26(1): 165-167.
- GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; MILONE, D. H.; LACA, E. A. 2011. Acoustic monitoring of short-term ingestive behavior and intake in grazing sheep. *Livestock Science*. 140(1): 32-41.
- GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; PECE, M. A.; LARRIPA, M. J.; MILONE, D. H.; UTSUMI, S. A.; LACA, E. A. 2018. Monitoring and assessment of ingestive chewing sounds for prediction of herbage intake rate in grazing cattle. *Animal*. 12(5): 973-982.
- GIBB, M. J.; HUCKLE, C. A.; NUTHALL, R.; ROOK, A. J. 1997. Effect of sward surface height on intake and grazing behaviour by lactating Holstein Friesian cows. *Grass and Forage Science*. 52(3): 309-321.
- GORDON, I.J. 1995. Animal-based techniques for grazing ecology research. *Small Ruminant Research*. 16: 203-214.
- GREGORINI, P. 2012. Diurnal grazing pattern: its physiological basis and strategic management. *Animal Production Science*. 52(7): 416-430.
- GROSS, J. E.; SHIPLEY, L. A.; HOBBS, N. T.; SPALINGER, D. E.; WUNDER, B. A. 1993. Functional response of herbivores in food-concentrated patches: tests of a mechanistic model. *Ecology*. 74(3): 778-791.
- HALACHMI, I.; GUARINO, M. 2016. Precision livestock farming: a 'per animal' approach using advanced monitoring technologies. *Animal*. 10(9): 1482-1483.
- HODGSON, J. 1981. Variations in the surface characteristics of the sward and the short-term rate of herbage intake by calves and lambs. *Grass and Forage Science*. 36(1): 49-57.
- HODGSON, J. 1985. The control of herbage intake in the grazing ruminant. *Proceedings of the Nutrition Society*. 44(02): 339-346.
- HODGSON, J.; CLARK, D. A.; MITCHELL, R. J. 1994. Foraging behavior in grazing animals and its impact on plant communities. En Fahey Jr, G.C. ed. *Forage quality, evaluation, and utilization*. ASA, CSSA y SSSA Books. 796-827.

- ILLIUS, A. W.; GORDON, I. J. 1987. The allometry of food intake in grazing ruminants. *The Journal of Animal Ecology*. 989-999.
- JONES, R. J.; SANDLAND, R. 1974. The relation between animal gain and stocking rate: derivation of the relation from the results of grazing trials. *Journal of Agricultural Science*. 83: 335-342.
- KUNRATH, T. R.; CADENAZZI, M.; BRAMBILLA, D. M.; ANGHINONI, I.; MORAES, A.; BARRO, R. S.; CARVALHO, P. C. D. F. 2014. Management targets for continuously stocked mixed oat × annual ryegrass pasture in a no-till integrated crop-livestock system. *European Journal of Agronomy*. 57: 71–76.
- KUNRATH, T. R.; CARVALHO, P. C. D. F.; CADENAZZI, M.; BREDEMEIER, C.; ANGHINONI, I. 2015. Grazing management in an integrated crop-livestock system: soybean development and grain yield. *Revista Ciência Agronômica*. 46: 645-653.
- KUNRATH, T. R.; DE ALBUQUERQUE NUNES, P. A.; DE SOUZA FILHO, W.; CADENAZZI, M.; BREMM, C.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. D. F. 2020. Sward height determines pasture production and animal performance in a long-term soybean-beef cattle integrated system. *Agricultural Systems*. 177. 102716.
- LACA, E. A.; WALLIS DEVRIES, M. F. 2000. Acoustic measurement of intake and grazing behaviour of cattle. *Grass and Forage Science*. 55(2): 97-104.
- LACA, E. A.; UNGAR, E. D.; SELIGMAN, N.; DEMMENT, M. W. 1992a. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. *Grass and Forage Science*. 47(1): 91-102.
- LACA, E. A.; UNGAR, E. D.; SELIGMAN, N. G.; RAMEY, M. R.; DEMMENT, M. W. 1992b. An integrated methodology for studying short-term grazing behaviour of cattle. *Grass and Forage Science*. 47(1): 81-90.
- LACA, E. A.; UNGAR, E. D.; DEMMENT, M. W. 1994. Mechanisms of handling time and intake rate of a large mammalian grazer. *Applied Animal Behaviour Science*. 39(1): 3-19.
- LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. 1996. Tissue flows in grazed plant communities. En: HODGSON, J.; ILLIUS, A.W. ed. *The ecology and management of grazing system*. CAB International. 3-36.
- LEMAIRE, G.; AGNUSDEI, M. 2000. Leaf tissue turnover and efficiency of herbage utilization. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. CAB International. 265-288.
- LEMAIRE, G.; WILKINS, R.; HODGSON, J. 2005. Challenge for grassland science: Managing research priorities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 108: 99-108.
- LEMAIRE, G.; DA SILVA, S. C.; AGNUSDEI, M. G.; WADE, M. H.; HODGSON, J. 2009. Interactions between leaf lifespan and defoliation frequency in temperate and tropical pastures: a review. *Grass and Forage Science*. 64: 341–353.
- LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; DEDIEU, B. 2014. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190: 4-8.

- LEMAIRE, G.; GASTAL, F.; FRANZLUEBBERS, A.; CHABBI, A. 2015. Grassland–cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. *Environmental Management*. 56(5): 1065-1077.
- LEMAIRE, G. 2023. Role of domestic herbivores in improving soil fertility for sustainable cropping systems. Conferencia plenaria presentada en el 46° Congreso Argentino de Producción Animal realizado en la ciudad de Pergamino (Buenos Aires) entre los días 13 y 15 de setiembre de 2023.
- LEMAIRE, G.; GARNIER, J.; DA SILVEIRA PONTES, L.; CARVALHO, P. C. D. F.; BILLEN, G.; SIMIONI ASSMANN, T. 2023. Domestic herbivores, the crucial trophic level for sustainable agriculture: avenues for reconnecting livestock to cropping systems. *Agronomy*. 13(4): 982.
- LI, C. C. 1975. *Path Analysis. A Primer*. Boxwood Press, Pacific Grove, CA, USA.
- LOMBARDO, P.; FERNÁNDEZ, P.; MOYA, M.; SAINATO, C.; BORODOWSKI, E.; MUSCHIETTI PIANA, M.; PESCIO, F.; ACOSTA, A.; URRICARIET, A. 2014. Agroecosistemas caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía. Ministerio de Agricultura. 477 pp.
- LOPES, M. L. T.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; SANTOS, D. T. D.; KUSS, F.; FREITAS, F. K. D.; FLORES, J. P. C. 2008. Sistema de integração lavoura-pecuária: desempenho e qualidade da carcaça de novilhos superprecoces terminados em pastagem de aveia e azevém manejada sob diferentes alturas. *Ciência Rural*. 38: 178-184.
- LORENZÓN, M. d. I. M. 2022. Predicción del consumo diario de vacas en pastoreo mediante análisis acústico. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Rosario. URL: <http://hdl.handle.net/2133/24093>.
- MATTHEW, C. 2002. Translocation from flowering to daughter tillers in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*. 53(1): 21-28.
- MAYES, R. W.; DOVE H. 2000. Measurement of dietary nutrient intake in free-ranging mammalian herbivores. *Nutrition Research Reviews*. 13: 107-138.
- MEIJS, J. A. C. 1981. Herbage intake by grazing dairy cows. Agricultural Research Report 909. Pudoc, Wageningen. 264 p.
- MEZZALIRA, J. C.; BONNET, O. J.; CARVALHO, P. C. D. F.; FONSECA, L.; BREMM, C.; MEZZALIRA, C. C.; LACA, E. A. 2017. Mechanisms and implications of a type IV functional response for short-term intake rate of dry matter in large mammalian herbivores. *Journal of Animal Ecology*. 86(5): 1159-1168.
- MILONE, D. H.; GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; RUFINER, H. L.; LACA, E. A. 2012. Automatic recognition of ingestive sounds of cattle based on hidden markov models. *Computers and electronics in agriculture*. 87: 51–55. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.05.004>.
- MOTT, G. O. 1960. Grazing pressure and the measurement of pasture production. In *Proceeding of 8th Grassland Congress 1960, Reading, UK*, pp 606-611.

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 2016. Growth and Body Reserves. In: Nutrient Requirements of Beef Cattle. 22–39.
- NAVON, S.; MIZRACH, A.; HETZRONI, A.; UNGAR, E. D. 2013. Automatic recognition of jaw movements in free-ranging cattle, goats and sheep, using acoustic monitoring. *Biosystems Engineering* 114: 474–483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.005>. special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture.
- NORTON, T.; CHEN, C.; LARSEN, M. L. V.; BERCKMANS, D. 2019. Precision livestock farming: Building ‘digital representations’ to bring the animals closer to the farmer. *Animal*. 13(12): 3009-3017.
- ORR, R. J.; RUTTER, S. M.; YARROW, N. H.; CHAMPION, R. A.; ROOK, A. J. 2004. Changes in ingestive behaviour of yearling dairy heifers due to changes in sward state during grazing down of rotationally stocked ryegrass or white clover pastures. *Applied Animal Behaviour Science*. 87(3-4): 205-222.
- OSIPITAN, O. A.; DILLE, J. A.; ASSEFA, Y.; RADICETTI, E.; AYENI, A.; KNEZEVIC, S. Z. 2019. Impact of cover crop management on level of weed suppression: a meta-analysis. *Crop Science*. 59(3): 833-842.
- PARSONS, A. J.; JOHNSON, I. R.; HARVEY, A. 1988. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. *Grass and Forage Science*. 43(1): 49-59.
- PARSONS, A. J.; ROWARTH, J.; THORNLEY, J.; NEWTON, J. 2011. Primary production of grass-lands, herbage accumulation and use and impacts of climate change. En: Lemaire, G., Hodgson, J., Chabbi Eds. *Grassland Productivity and Ecosystem Services*. CAB International, Wallingford, UK. 3–18.
- PAUDYAL, S. 2021. Using rumination time to manage health and reproduction in dairy cattle: A review. *Veterinary Quarterly*. 41(1): 292-300.
- PENNING, P. D.; PARSONS, A. J.; ORR, R. J.; TREACHER, T. T. 1991. Intake and behaviour responses by sheep to changes in sward characteristics under continuous stocking. 46(1): 15–28. doi:[10.1111/j.1365-2494.1991.tb02204.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1991.tb02204.x)
- PÉREZ-BARBERÍA, F. J.; GORDON, I. J. 1998. Factors affecting food comminution during chewing in ruminants: a review. *Biological Journal of the Linnean Society*. 63(2): 233-256.
- PETERSON, C. A.; DEISS, L.; GAUDIN, A. C. 2020. Commercial integrated crop-livestock systems achieve comparable crop yields to specialized production systems: A meta-analysis. *PLoS One*. 15(5). e0231840.
- PEYRAUD, J. L.; PEETERS, A. 2016. The role of grassland based production system in the protein security. In *The multiple roles of grassland in the European bioeconomy*. Proceedings of the 26th General Meeting of the European Grassland Federation, Trondheim, Norway, 4-8 September 2016 (pp. 29-43).

- PIÑEIRO, G.; PINTO, P.; DELLA CHIESA, T.; MADIAS, A. 2019. Informe Final de la Red de Cultivos de Servicios AAPRESID-BASF campaña 2018-2019. Red de Cultivos de Servicios AAPRESID-BASF, 28. https://issuu.com/aapresid/docs/revista_informe_final_rcs_18_19
- PINHEIRO J. C.; BATES D.M. 2000. *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer, New York. doi:10.1007/b98882. <https://doi.org/10.1007/b98882>.
- PLANISICH, A.; UTSUMI, S. A.; LARRIPA, M.; GALLI, J. R. 2021. Grazing of cover crops in integrated crop-livestock systems. *Animal*. 15(1). 100054.
- PONTES, L. D. S.; CARVALHO, P. C. D. F.; NABINGER, C.; SOARES, A. B. 2004. Biomass flows in Italian ryegrass pastures (*Lolium multiflorum* Lam.) managed under different sward heights. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 33: 529-537.
- POPPI, D. P.; HUGHES, T. P.; L'HUILLIER, P. J. 1987. Intake of pasture by grazing animals. En: *Livestock feeding on pasture*. Hamilton: New Zealand Society of Animal Production. 7: 55-64.
- PROVENZA, F.; PRINGLE, H.; REVELL, D.; BRAY, N.; HINES, C.; TEAGUE, R.; STEFFENS, T.; BARNES, M.; RITTENHOUSE, L. 2013. Complex creative systems: Principles, processes and practices of transformation. *Rangelands*. 35(5): 6–13.
- R CORE TEAM. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. R versión 4.2.0.
- RAU, L. M.; CHELOTTI, J. O.; VANRELL, S. R.; GIOVANINI, L. L. 2020. Developments on real-time monitoring of grazing cattle feeding behavior using sound. In *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*: pp. 771-776. IEEE.
- REARTE, D. 2011. Situación actual y prospectiva de la ganadería argentina, un enfoque regional. *Asociación Latinoamericana de Producción Animal*. 19 (3-4): 46-49.
- ROSSEEL, Y. 2012. Lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*. 48(2): 1-36. <https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02>
- ROUQUETTE Jr., F. M. 2015. Grazing systems research and impact of stocking strategies on pasture–animal production efficiencies. *Crop Science*. 55(6): 2513-2530.
- RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. 2007. Reconsidering integrated crop–livestock systems in North-America. *Agronomy Journal*. 99: 325–334
- RUTTER, S. M.; ORR, R. J.; PENNING, P. D.; YARROW, N. H.; CHAMPION, R. A. 2002. Ingestive behaviour of heifers grazing monocultures of ryegrass or white clover. *Applied Animal Behaviour Science*. 76(1): 1-9.
- SACCHI, O.; DALLA MARTA, N.; COSTANZO, M.; CORONEL, A. 2002. Caracterización de las precipitaciones en la localidad de Zavalla. *Revista de investigaciones de la FCA-UNR*. 2: 91-103.
- SCHENEITER, J.; LLOVET, J.; IRIZAR, A. 2024. El rol de los rumiantes en los sistemas agropecuarios de la Argentina. *Comentario*. 43 (2): 47–50. http://www.aapa.org.ar/rapa/43/2/07-RAPA_2023_Scheneiter.pdf

- SCHIRMANN, K.; CHAPINAL, N.; WEARY, D. M.; HEUWIESER, W.; VON KEYSERLINGK, M. A. 2012. Ruminant and its relationship to feeding and lying behavior in holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 95(6): 3212-3217.
- SCHUSTER, M. Z.; LUSTOSA, S. B. C.; PELISSARI, A.; HARRISON, S. K.; SULC, R. M.; DEISS, L.; LANG, C.R; CARVALHO, P. C. D. F.; GAZZIERO, D. L. P; DE MORAES, A. 2019. Optimizing forage allowance for productivity and weed management in integrated crop-livestock systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 39: 1-10.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA DE LA NACIÓN. 2024. Estimaciones agrícolas. Serie histórica. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Acceso mayo 2024.
- SEKARAN, U.; LAI, L.; USSIRI, D. A.; KUMAR, S.; CLAY, S. 2021. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security—A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 5. 100190.
- SOLLENBERGER, L. E.; WALLAU, M. O. 2020. Plant-Herbivore Interactions. En Moore, J.M.; Collins, M. C.; Nelson, J; Redfearn, D.D. Eds. *Forages: The science of grassland agriculture*. 2. John Wiley & Sons Ltd. p. 201-214.
- SOLLENBERGER, L. E.; AGOURIDIS, C. T.; VANZANT, E. S.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OWENS, L. B. 2012. En Nelson, J. C. Ed. *Prescribed grazing on pasturelands: Conservation Outcomes from Pastureland and Hayland Practices: Assessment, Recommendations and Knowledge Gaps*. p. 111-204.
- SOLLENBERGER, L. E.; AIKEN, G. E.; WALLAU, M. O. 2020a. Managing grazing in forage-livestock systems. En Rouquette, M.; Aiken, G.E. Eds. *Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures*. Academic Press. p. 77-100.
- SOLLENBERGER, L. E.; NEWMAN, Y. C.; MACOON, B. 2020b. Pasture design and grazing management. En Moore, J.M.; Collins, M. C.; Nelson, J; Redfearn, D.D. Eds. *Forages: The science of grassland agriculture*. 2. John Wiley & Sons Ltd. p. 803-814.
- SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 190: 9–17.
- SPADA, M.; CANGIANO, C. 1991. El uso del disco en la estimación de la fitomasa aérea: una comparación con otros métodos. *Revista Argentina de Producción Animal*. 11: 19-27.
- TAYLOR, S. C.; MURRAY, J. I.; ILLIUS, A. W. 1987. Relative growth of incisor arcade breadth and eating rate in cattle and sheep. *Animal Science*. 45(3): 453-458.
- TILLEY, J. M. A.; TERRY, R. A. 1963. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*. 18(2): 104-111.
- TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418. 671–677
- UNGAR, E. D. 1996. Ingestive behaviour. En Hodgson, J.; Illius, A.W. Eds. *Ecology and management of grazing systems*. 1CAB International.

- UNGAR, E. D.; NOY-MEIR, I. 1988. Herbage intake in relation to availability and sward structure: grazing processes and optimal foraging. *Journal of Applied Ecology*. 1045-1062.
- UNGAR, E. D.; RUTTER, S. M. 2006. Classifying cattle jaw movements: comparing IGER behaviour recorder and acoustic techniques. *Applied animal behaviour science*. 98(1-2): 11-27.
- UNGAR, E. D.; RAVID, N.; ZADA, T.; BEN-MOSHE, E.; YONATAN, R.; BARAM, H.; GENIZI, A. 2006. The implications of compound chew–bite jaw movements for bite rate in grazing cattle. *Applied Animal Behaviour Science*. 98(3-4): 183-195.
- USDA. Agricultural research service of the United States Department of Agriculture: FoodData Central. 2019. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/174270/nutrients>.
- VAN ZANTEN, H. H. E.; MOLLENHORST, H.; KLOOTWIJK, C. W.; VAN MIDDELAAR, C. E.; BOER, I. J. M. 2016. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21:747–758.
- VAN SOEST, P.J; ROBERTSON, J.; LEWIS, B. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*. 74: 3583-3597.
- VIGLIZZO, E.; FRANK, F.; BERNARDOS, J.; BUSCHIAZZO, D.; CABO, S. 2006. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*. 117: 109-134.