



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Estrategias de intensificación de sistemas lecheros pastoriles: dimensiones productivas y balance de nutrientes

Lucía Gil Zibil

Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Producción Animal

Noviembre, 2024

**Estrategias de intensificación en
sistemas lecheros de base pastoril:
dimensiones productivas y balance de
nutrientes**

Lucía Gil Zibil

Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Producción Animal

Noviembre, 2024

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Agr. PhD. Santiago Dogliotti, la Lic. Vet. PhD. Sofía Stirling y el Ing. Agr. PhD. Santiago Fariña el 28 de noviembre de 2024. Autora: Ing. Agr. Lucía Gil. Director: PhD. Pablo Chilibroste.

Agradecimientos

Quiero agradecer al equipo de trabajo del Centro Regional Sur por el soporte logístico y operativo, en especial a “Chefa” Dieste y Pablo Cracco, así como a los funcionarios del tambo.

A la Facultad de Agronomía por brindarme la oportunidad de formación y a la ANII por su apoyo a través de la beca.

Al grupo de seguimiento que reunió gente de FAgro, FVet, INIA, INALE, Conaprole, PGG Wrightson seeds, COLAVECO y técnicos, por su valiosa contribución al debate y al intercambio de ideas que enriqueció este proyecto.

Al equipo de trabajo Diego Custodio, Pía Briñón, Cecilia Loza y Gastón Ortega que no solo me brindaron su ayuda, sino que también enriquecieron la discusión con una mirada crítica e hicieron los días de trabajo más llevaderos.

A los miembros

Agradezco especialmente a mi tutor Pablo Chilibróste por el continuo apoyo, orientación y por abrirme tantas puertas durante estos años.

Finalmente, a mi familia: a mis padres, Sandra y Jujo, por su apoyo incondicional y por inculcarme desde siempre la curiosidad y el esfuerzo en todo lo que hago; a mi hermana Elisa por el apoyo de siempre; y a Martín por acompañarme a lo largo de este camino.

Tabla de contenido

Página de aprobación.....	III
Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	VII
Summary.....	VIII
1. <u>Introducción</u>	9
1.1. Sistemas lecheros de base pastoril en Uruguay	9
1.2. Balance de nutrientes y sustentabilidad ambiental	12
1.3. Hipótesis.....	14
1.4. Objetivos	15
1.4.1. <u>General</u>	15
1.4.2. <u>Específicos</u>	15
2. <u>Intensification strategies of pasture-based dairy systems: productive and environmental dimensions</u>.....	16
2.1. Resumen.....	16
2.2. Summary.....	18
2.3. Introduction.....	19
2.3.1. <u>Dairy farm systems in Uruguay.....</u>	16
2.3.2. <u>Farm-gate nutrient balances and environmental sustainability.....</u>	21
2.4. Materials and methods	24
2.4.1. <u>Treatments.....</u>	24
2.4.2. <u>Animals</u>	24
2.4.3. <u>Area, rotation and pasture management.....</u>	25
2.4.4. <u>Infrastructure</u>	25
2.4.5. <u>Grazing management</u>	25
2.4.6. <u>Animal determinations</u>	26
2.4.7. <u>Farm-gate nutrient balance.....</u>	26

2.4.8. <u>Statistical analysis</u>	28
2.5. Results	30
2.6. Discussion	36
2.6.1. <u>Forage annual production, diet and milk production per hectare</u>	36
2.6.2. <u>Farm-gate nutrient balance</u>	38
2.7. Future research	46
2.8. Conclusions	46
2.9. References	48
2.10. Supplementary material	55
3. <u>Discusión general</u>	56
3.1. Producción anual de forraje, dieta y producción de leche por hectárea	56
3.2. Balance de nutrientes	58
3.3. Investigación a futuro	67
4. <u>Conclusiones</u>	68
5. <u>Bibliografía</u>	69
6. <u>Anexos</u>	76

Resumen

El proceso de intensificación de los sistemas lecheros uruguayos ha determinado una mayor productividad mediante diferentes estrategias de ajuste de carga y alimentación basadas en el consumo de forraje y suplementos con diferentes impactos sobre el medioambiente. Se realizó un estudio de módulos experimentales donde se evaluaron variables productivas y el balance de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de dos estrategias de intensificación de sistemas lecheros pastoriles de Uruguay durante tres ejercicios agrícolas (julio 2021 a junio 2024). Los tratamientos fueron: alta productividad (AP), con una carga de 3,0 vacas en ordeño por ha de plataforma de pastoreo (VO ha⁻¹ PP) con reservas forrajeras y concentrado comprados; y bajo costo (BC), con 1,8 VO ha⁻¹ PP, autosuficiente en reservas forrajeras y compra de concentrados. La producción de forraje no presentó diferencias entre tratamientos (8.460 vs. 8.053 kg MS ha⁻¹ PP, AP y LC respectivamente), pero sí en cosecha directa y mecánica, productividad de leche (22.178 vs. 13.606 kg ha⁻¹ PP, AP y BC respectivamente) y sólidos por superficie (1.907 vs. 1.184 kg ha⁻¹ PP, AP y BC respectivamente). El sistema AP tuvo mayor excedente de nutrientes que BC. La mayor fuente de entradas de N fueron alimentos en AP y fertilizante en BC; para P y K, el alimento fue el mayor aporte para AP y BC. Los excedentes de N fueron de 310 y 205 kg ha⁻¹ PP, de P, 82 y 50 kg ha⁻¹ PP y de K, 128 y 44 kg ha⁻¹ PP, para AP y BC respectivamente. La eficiencia de uso (EU) del N fue del 30 % y 28 %, del P 22 % y 21 % y del K 20 % y 31 % para AP y BC, respectivamente. El tiempo en confinamiento fue 55 % para AP y 42 % para BC ($p < 0.05$), demostrando la relevancia de la infraestructura de apoyo al pastoreo en las estrategias de mayor intensificación. Adicionalmente, la planificación y reutilización de los efluentes se identificó como una oportunidad para disminuir los ingresos y mejorar la EU de nutrientes.

Palabras clave: sistemas lecheros, base pastoril, balance de nutrientes.

Summary

Intensification strategies of pasture-based dairy systems: productive and environmental dimensions

More intensified dairy systems have a higher use of external inputs and nutrients may be lost to the environment. In this study we assessed productive variables and farm-gate nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) balance of two intensification strategies. The research was carried out for three fiscal years (Jul-21 to Jun-24). The treatments compared were: high productivity (HP) with a stocking rate (SR) of 3.0 milking cows ha⁻¹ of milking platform (MP; total area of the farm potentially grazable by the milking herd), bought-in forage reserves and concentrate; and low cost (LC), with 1.7 cows ha⁻¹ MP, self-sufficient in forage reserves and bought-in concentrates. Forage production did not differ between treatments (8,460 vs. 8,053 kg of dry matter [DM] ha⁻¹ MP); however, direct and mechanical harvest, milk (22,178 vs. 13,606 kg ha⁻¹ MP, HP and LC respectively) and solids (1,907 vs. 1,184 kg ha⁻¹ MP, HP and LC respectively) productivity showed differences between treatments. More intensified system (HP) had higher farm-gate balance than LC. The greater N input was feeds for HP and fertiliser for LC; for P and K, feed was the greatest input for both treatments. N surplus resulted in 310 and 205 kg ha⁻¹ of MP, for P 82 and 50 kg ha⁻¹ MP and for K 128 and 44 kg ha⁻¹ MP, for HP and LC, respectively. The N use efficiency (UE) was 30% vs. 28%, P UE was of 22% vs. 21% and K UE was of 20% vs. 31% for HP and LC, respectively. Time spent in confinement was higher for HP than LC, 55% vs. 42%, respectively, highlighting the importance of infrastructure for intensified dairy systems and the possibility of effluent management in confinement paddocks. Moreover, planning and re-utilization of effluents was identified as an opportunity to improve nutrients use efficiency.

Key words: dairy systems, pastoral basis, nutrient balance, intensification

1. Introducción

1.1. Sistemas lecheros de base pastoril en Uruguay

Uruguay exporta el 70 % de la leche producida ocupando el séptimo lugar como país exportador en el mundo ubicando a la producción de leche como cuarta mayor actividad exportadora en Uruguay. En un contexto donde la demanda global de alimentos en cantidad y calidad es creciente (Deloitte, 2017), los consumidores se posicionan como «controladores globales», con preocupación por la responsabilidad y costo ambiental de los productos consumidos (OPP, 2020). Por lo tanto, Uruguay tiene el desafío de producir leche de forma competitiva y sustentable para posicionarse en el mercado global.

Para acompañar la demanda mundial, los sistemas lecheros de Uruguay han transitado un proceso de intensificación en las últimas cuatro décadas, con un incremento de la producción lechera a una tasa de crecimiento anual de 3,7 % junto a una disminución de aproximadamente 35 % del área (DIEA, 2023; Chilibróste et al., 2024). Dentro de este período, se han incrementado las principales variables que afectan la productividad: carga, producción individual de leche y resultados reproductivos (Chilibróste et al., 2024).

Actualmente, en Uruguay la producción media de leche es de 8.831 L por ha y 624 kg de sólidos (grasa + proteína), con una carga animal promedio de 1,15 vacas por hectárea plataforma pastoreo (PP). La producción de los sistemas lecheros se ha sustentado a través de la combinación de cosecha directa y mecánica de forraje, con 5,3 toneladas de materia seca por hectárea por año ($t\ MS\ ha^{-1}\ año^{-1}$) de forraje de producción propia, más 1,8 toneladas por hectárea por año de MS de concentrado (Fariña y Chilibróste, 2019).

La investigación nacional se ha diseñado para orientar el proceso de intensificación, proporcionando información para potenciar la eficiencia productiva a través de una mejor comprensión de las variables productivas. Dentro de esta trayectoria, se han realizado distintos estudios. En el Centro Regional Sur (CRS) en

2015, Ortega et al. (2024) comparó cargas animales de 1,5 y 2,0 vacas en ordeño (VO) ha^{-1} PP en combinación con diferentes alturas remanentes de forraje, con el objetivo de lograr alta cosecha de forraje y reducir costos. Este experimento consiguió 980 a 1.353 kg ha^{-1} de sólidos en leche y entre 6.430 a $7.463 \text{ kg MS ha}^{-1}$ de forraje cosechado. De forma similar, otro experimento realizado en INIA La Estanzuela, evaluó dos estrategias de alimentación (Manda dieta y Manda pasto) y genotipos (NZHF y NAHF; Stirling et al., 2021). Los resultados determinaron valores de 1.460 kg ha^{-1} de sólidos en leche y hasta $9.742 \text{ kg MS ha}^{-1}$ de cosecha de forraje (Manda Pasto + NZHF). Otro experimento conducido en la EEMAC desde el año 2018 al 2020, combinó pastoreo con diferentes opciones de confinamiento logró valores de productividad de 1.825 kg ha^{-1} de sólidos en leche. Por último, en un estudio reciente donde se combinó la información experimental y datos de tambos comerciales, identificó que los diversos caminos de intensificación que sostienen de manera eficiente una alta carga animal y mayor productividad, mientras se mantienen competitivos, requieren alta producción y consumo de forraje (Chilibroste et al., 2024).

La estacionalidad de las pasturas, eventos climáticos como sequías y fuertes lluvias que causan barro y las olas de calor en Uruguay, en conjunto con el incremento de la carga, resulta en la necesidad de dejar tiempo de descanso a las pasturas, restringir el pastoreo y/o proveer suplementos fuera de las mismas, y por lo tanto incurrir al uso de infraestructura para confinamiento de los animales (Chilibroste y Fariña, 2019). En los sistemas lecheros de base pastoril de Uruguay, los animales pasan alrededor del 40 al 60% del tiempo en confinamiento, remarcando la importancia de infraestructura apropiada (Stirling et al., 2021; Ortega et al., 2024). De hecho, la infraestructura es un factor limitante en los sistemas lecheros uruguayos (Aguerre et al., 2018). Información proveniente de la encuesta lechera realizada por el Instituto Nacional de la Leche (INALE, 2019) reportó que solo 27% de los tambos contaban con confinamiento, de los que el 30% tenían plaza de alimentación, y que a su vez el 43% no tenían piso de cemento y 29% sin comederos de cemento.

Una realidad que surge del aumento de la intensificación de los sistemas lecheros es el incremento de la necesidad de mano de obra (INALE, 2019), sumado a la alta carga laboral que implican los sistemas lecheros. Un estudio que exploró la percepción

en la calidad de vida de productores lecheros de Suiza encontró que el tiempo fue el criterio más importante considerado por los productores (Conzten y Haberli, 2021). Por lo tanto, la adopción de tecnologías como el ordeño automático surgen como una opción y han demostrado que mejoran la calidad de vida de los trabajadores (Tse et al., 2017). Sin embargo, este tipo de tecnologías requieren inversiones iniciales elevadas y no aseguran el éxito económico (Shortall et al., 2016). Por otro lado, tambos con mayor tamaño de rodeo tienen mayor predisposición de incorporar nuevas tecnologías de precisión en comparación con tambos más pequeños, probablemente por altos costos, poca información y riesgo de implementación (Gargiulo et al., 2018). No obstante, es posible tener impacto positivo en la calidad de vida de los productores solamente adoptando medidas en la estrategia de manejo que disminuyan el tiempo de trabajo

En este sentido, considerando la trayectoria de los estudios a nivel nacional que han explorado diferentes productividades, sumado a la necesidad de desarrollar sistemas más simples que respondan a la demanda de los productores, se presenta este trabajo donde se evaluaron dos sistemas. El primero, con el objetivo de reducir costos de producción y simplicidad operativa, toda la fibra consumida se produce dentro de la PP (cosecha directa y reservas como henilaje), con productividad media-alta y una carga animal de 1,8 VO ha⁻¹ PP. El otro sistema se encuentra en el extremo de productividad de los sistemas experimentales previamente evaluados en Uruguay (1.850 kg ha⁻¹ de sólidos en leche), con una carga de 3,0 VO ha⁻¹ PP, con mayor infraestructura, mano de obra y requirió un área de apoyo para proveer las reservas forrajeras (ensilaje). Sin embargo, más allá de la necesidad de buscar eficiencia productiva, aún hay escasa información sobre como las diferentes estrategias de intensificación afectan la sustentabilidad ambiental, particularmente el balance de nutrientes.

1.2. Balance de nutrientes y sustentabilidad ambiental:

Aumentar la eficiencia productiva por unidad de superficie implica un mayor uso de recursos externos y posibles implicancias negativas para el medioambiente por exceso de nutrientes (Oenema y Oenema, 2021). La contaminación en el punto de origen debido a las actividades agrícolas ha sido un reto común en los sistemas lecheros pastoriles en Europa (Tamminga, 2003) y Nueva Zelanda (De Klein et al., 2017) y Uruguay no es la excepción (Chalar et al., 2017; Arocena et al., 2018). La cuenca del río Santa Lucía provee de agua dulce al 60 % de la población del país, pero también concentra el 40 % de la ganadería lechera (Barreto et al., 2017); allí se han encontrado valores por encima de los niveles aceptados en agua potable para contenidos de nitratos y fosfatos, lo que ha incrementado la preocupación por las actividades agropecuarias en la región.

Los balances de nutrientes a nivel de sistema se utilizan para evaluar indicadores de rendimiento, desarrollar umbrales de referencia para producción comercial y estimar el potencial riesgo de pérdidas medioambientales. Diferentes estudios han demostrado que, a medida que aumenta la intensificación (aumento de la carga animal, producción de leche, eficiencia alimentaria) en los sistemas lecheros, también incrementan los excedentes de nutrientes (Gourley, 2012; Ros et al., 2023; Stirling, et al., 2024a). En Uruguay, Stirling et al. (2024a) encontraron que existe una relación positiva entre las variables de intensificación y el excedente de N, y a mayor intensificación podría incrementar el riesgo de polución. El excedente nacional de N varió de 71 kg N ha⁻¹ para el tambo promedio de Uruguay, a 122 - 299 kg N ha⁻¹ en fincas experimentales (Stirling et al., 2024a), mientras que los valores internacionales oscilan entre 47 y 601 kg N ha⁻¹ (Gourley, 2012; De Klein et al., 2017; Luo y Ledgard, 2021).

Se ha determinado para los sistemas lecheros que existe una relación positiva entre las entradas y el excedente de N, mientras que para las entradas y la eficiencia de uso del N las relaciones varían, desde una correlación baja y negativa (De Klein et al., 2010) a relaciones más complejas y variables (De Klein et al., 2017; Quemada et al., 2020; Stirling, et al., 2024a), indicando que la eficiencia de uso de los nutrientes

a nivel de sistema depende de factores de manejo, condición climática y tipo de suelo, además de la productividad. Existe un amplio rango de resultados y comportamientos para los valores internacionales de eficiencia de utilización de N para explotaciones comerciales y experimentales de entre 14 % y 50 % en Australia (Gourley, 2012), 8 % y 64 % en Estados Unidos (Powell et al., 2010), 29 % y 42 % en los Países Bajos (Oenema et al., 2012) y de 22 % a 62 % en Uruguay (La Manna y Durán, 2008; Stirling, et al., 2024a).

En el caso del P y el K, los balances negativos pueden ser deseables cuando los niveles iniciales del suelo están por encima del umbral óptimo (Oenema et al., 2003). Para P, en un trabajo en Irlanda se encontró una relación positiva entre el balance de P del sistema y valores de P en suelo, lo que reafirma su uso como una herramienta para el ajuste de la fertilización fosfatada a nivel de potrero (Ruane et al., 2014). En cuanto a la relación entre las entradas y excedentes de P, múltiples trabajos encontraron una fuerte relación positiva al igual que con el N (Gourley, 2012; Ros et al., 2023; Wivstad et al., 2023). Se han reportado valores de excedentes de P entre -7 y 133 kg ha⁻¹ en Australia (Gourley, 2012) y entre -7 y 51 kg ha⁻¹ en Estados Unidos (Cela et al., 2014); para el K, los valores van entre 13 y 452 kg ha⁻¹ en Australia y - 46 y 158 kg ha⁻¹ en Estados Unidos (Cela et al., 2014).

Los nutrientes no se distribuyen de forma homogénea en el sistema, ya que el tiempo de permanencia de los animales en una zona determinada está positivamente relacionado con la cantidad de nutrientes excretados (White et al., 2001). Los sistemas lecheros de base pastoril combinan pastoreo y confinamiento, donde en algunos casos no hay manejo de efluentes (Aarons et al., 2017). En Uruguay, los sistemas más intensificados pasan al menos la mitad del tiempo en confinamiento (Ortega et al., 2024), lo que ha sido identificado como el punto crítico de pérdidas potenciales de N (lixiviación y volatilización de amoníaco; Stirling, et al., 2024b). Por lo tanto, la ubicación de los animales es clave para comprender los flujos de nutrientes y determina a la infraestructura disponible para la gestión y distribución de los nutrientes excretados, como una herramienta clave para evitar las pérdidas de nutrientes (Gutiérrez et al., 2009; De Klein et al., 2010).

Dado que las decisiones de manejo en cuanto a la carga y la productividad afectan las estrategias de alimentación y, en consecuencia, el balance y la distribución de esos nutrientes en el sistema, este estudio busca continuar con la generación de información nacional para identificar estrategias de intensificación y potenciales implicancias en la sostenibilidad ambiental en cuanto al balance de nutrientes.

En este estudio se propusieron dos vías de intensificación no exploradas previamente en estudios experimentales. La primera continúa la línea de investigación nacional y se posiciona en el extremo de productividad de los sistemas experimentales de Uruguay estudiados previamente, enfocado en aumentar la productividad mediante una mayor carga animal, mejoras en infraestructura y el uso de estrategias de alimentación de pastoreo y suplementación (Méndez et al., 2020; Stirling et al., 2021; Ortega et al., 2024). La segunda vía, propone un sistema alternativo, diseñado para ser autosuficiente en producción de forraje, con el objetivo de reducir costo y simplicidad operativa.

1.3. Hipótesis

Se plantea la hipótesis de investigación de que los sistemas más intensificados requieren un mayor uso de insumos externos, lo que genera incrementos en los excedentes de nutrientes por unidad de superficie. Una mayor intensificación modifica la distribución espacial de los nutrientes debido a una menor oportunidad de pastoreo y mayor tiempo de confinamiento que sistemas menos intensificados. En términos productivos, se espera que los sistemas más intensificados presenten mayor productividad de leche y sólidos, e igual producción de forraje, pero con diferencias en la cosecha del mismo, explicado por la carga y diferencias en el uso de los recursos.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Estudiar mediante módulos experimentales dos estrategias de intensificación de sistemas lecheros en Uruguay, para evaluar su impacto en los resultados productivos y la sostenibilidad ambiental en términos de manejo de nutrientes.

1.4.2. Específicos

Evaluar a escala experimental (estudio de sistemas experimentales) y de sistema completo:

1. El desempeño productivo de las estrategias de intensificación, mediante el análisis de las siguientes variables:
 - Producción de leche y sólidos por animal y por unidad de superficie.
 - Producción total y cosecha efectiva de forraje por unidad de superficie.
 - Consumo de alimentos (forraje, reservas y concentrados) por animal y por unidad de superficie.
2. Evaluar el potencial impacto ambiental de las estrategias de intensificación, a través de la determinación de:
 - Los balances de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y su eficiencia de uso.
 - La distribución espaciotemporal de los nutrientes dentro del sistema.

2. Intensification strategies of pasture-based dairy systems: productive and environmental dimensions

2.1. Resumen

El proceso de intensificación de los sistemas lecheros uruguayos ha determinado una mayor productividad mediante diferentes estrategias de ajuste de carga y alimentación basadas en el consumo de forraje y suplementos con diferentes impactos sobre el medioambiente. Se realizó un estudio de módulos experimentales donde se evaluaron variables productivas y el balance de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de dos estrategias de intensificación de sistemas lecheros pastoriles de Uruguay durante tres ejercicios agrícolas (julio 2021 a junio 2024). Los tratamientos fueron: alta productividad (AP), con una carga de tres vacas en ordeño por ha de plataforma de pastoreo ($\text{VO ha}^{-1} \text{PP}$) con uso de reservas forrajeras y concentrado compradas; y bajo costo (BC), con $1,8 \text{ VO ha}^{-1} \text{PP}$, autosuficiente en reservas forrajeras y concentrados comprados. La producción de forraje no presentó diferencias entre tratamientos (8.460 vs. $8.053 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{PP}$, AP y BC respectivamente), pero sí en cosecha directa y mecánica, productividad de leche (22.178 vs. $13.606 \text{ kg ha}^{-1} \text{PP}$, AP y BC respectivamente) y sólidos por superficie (1.907 vs. $1.184 \text{ kg ha}^{-1} \text{PP}$, AP y BC respectivamente). El sistema AP tuvo mayor excedente de nutrientes que BC. La mayor fuente de entradas de N fueron alimentos en AP y fertilizante en BC; para P y K, el alimento fue el mayor aporte para AP y BC. Los excedentes de N fueron de 310 y $205 \text{ kg ha}^{-1} \text{PP}$, de P, 82 y $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{PP}$ y de K, 128 y $44 \text{ kg ha}^{-1} \text{PP}$, para AP y BC respectivamente. La eficiencia de uso (EU) del N fue del 30% y 28% , del P 22% y 21% y del K 20% y 31% para AP y BC, respectivamente. El tiempo en confinamiento fue 55% para AP y 42% para BC ($p < 0.05$), demostrando la relevancia de la infraestructura de apoyo al pastoreo en las estrategias de mayor intensificación. Adicionalmente, la planificación y reutilización de los efluentes se identificó como una oportunidad para disminuir los ingresos y mejorar la EU de nutrientes.

Palabras clave: sistemas lecheros, base pastoril, balance de nutrientes.

2.2. Summary

More intensified dairy systems have a higher use of external inputs and nutrients may be lost to the environment. In this study we assessed productive variables and farm-gate nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) balance of two intensification strategies. The research was carried out for three fiscal years (Jul-21 to Jun-24). The treatments compared were: high productivity (HP) with a stocking rate (SR) of 3 milking cows ha⁻¹ of milking platform (MP; total area of the farm potentially grazable by the milking herd), bought-in forage reserves and concentrate; and low cost (LC), with 1.7 cows ha⁻¹ MP, self-sufficient in forage reserves and bought-in concentrates. Forage production did not differ between treatments (8,460 vs. 8,053 kg dry matter [DM] ha⁻¹ MP); however, direct and mechanical harvest, milk (22,178 vs. 13,606 kg ha⁻¹ MP, HP and LC respectively) and solids (1,907 vs. 1,184 kg ha⁻¹ MP, HP and LC respectively) productivity showed differences between treatments. More intensified system (HP) had higher farm-gate balance than LC. The greater N input was feeds for HP and fertiliser for LC; for P and K, feed was the greatest input for both treatments. N surplus resulted in 310 and 205 kg ha⁻¹ of MP, for P 82 and 50 kg ha⁻¹ MP and for K 128 and 44 kg ha⁻¹ MP, for HP and LC, respectively. The N use efficiency (UE) was 30% vs. 28%, P UE was of 22% vs. 21% and K UE was of 20% vs. 31% for HP and LC, respectively. Time spent in confinement was higher for HP than LC, 55% vs. 42%, respectively, highlighting the importance of infrastructure for intensified dairy systems and the possibility of effluent management in confinement paddocks. Moreover, planning and re-utilization of effluents was identified as an opportunity to improve nutrients use efficiency.

Key words: dairy systems, pastoral basis, nutrient balance, intensification

2.3. Introduction

2.3.1. Dairy farm systems in Uruguay:

Uruguayan dairy industry exports 70% of the milk produced, being the 4th largest export activity and ranking as the 7th exporting country in the world. In a context where global food demand in quantity and quality is increasing (Deloitte, 2017), consumers are positioned as ‘global controllers’, concerned about the responsibility and environmental cost of the products consumed (OPP, 2020). Therefore, Uruguay has the challenge of producing milk competitively in a sustainable way to position itself in the global market.

To keep on with the global demand, Uruguayan dairy systems have transitioned an intensification process in the last four decades, increasing dairy production at 3.7% annual growth rate alongside a decrease on the area purposed for dairy of approximately 35% (DIEA, 2023; Chilibraste et al., 2024). Within this timeline, the main variables that affect productivity like stocking rate, individual milk production and reproduction have increased (Chilibraste et al., 2024).

In Uruguay, mean productivity was 8,831 L per ha and 624 kg of milk solids (fat + crude protein), with a stocking rate of 1.15 cows per hectare of milking platform (MP; total area of the farm potentially grazable by the milking herd). This was supported with a combination of grazing and mechanical harvest of 5.3 tons of dry matter (DM) per hectare per year of home-grown forage, plus 1.8 tons per hectare per year of DM of concentrate feed (Fariña and Chilibraste, 2019).

National research has been designed to guide the direction of the intensification process providing information to enhance farm efficiency through a better understanding of the productive variables. Therefore, several farmlet studies have been carried out. In Centro Regional Sur (CRS) in 2015, Ortega et al. (2024) compared different SR (1.5 and 2.0 cows ha⁻¹) and residual pasture heights, aiming high forage harvest to reduce costs. This trial achieved from 980 to 1,353 kg ha⁻¹ of solids and 6,430 to 7,463 kg DM ha⁻¹ of homegrown forage harvest. Similarly, another

experiment conducted in 2017 in INIA La Estanzuela, tested two feeding strategies (GrassFixed and GrassMax) and genotypes (NZHF and NAHF; Stirling et al., 2021). The results determined values of 1,460 kg ha⁻¹ of solids showed values up to 9,472 kg DM ha⁻¹ of homegrown forage harvest (GrassFix + NZHF). Another experiment was conducted in EEMAC from 2018 to 2020, combined grazing with various confinement options reaching productivity of 1,825 kg ha⁻¹ of solids. A recent study that evaluated national experimental and commercial data identified that the diverse intensification pathways that efficiently sustain higher SR and productivity, while remaining competitive, require high home-grown forage consumption (Chilibroste et al., 2024).

Pasture growth rate seasonality, climate events such as drought and heavy rainfalls that cause mud in pasture and heat stress in Uruguay, along with the increased SR, results in the need for pasture recovery, restrict grazing and/or provide supplements outside the pasture, hence, in confinement facilities (Chilibroste and Fariña, 2019). Animals spend in confinement 40 – 60% of the time, highlighting the importance of appropriate infrastructure (Stirling et al., 2021; Ortega et al., 2024). In fact, infrastructure has been identified as a limiting factor in Uruguayan dairy farms (Aguerre et al., 2018). Data from a national survey reported that only 27% of dairy farms had confinement facilities, from which 30% counted with feeding parlour, 43% does not have concrete floor and 29% no concrete feeders (INALE, 2019).

A reality that emerges from dairy farms intensification is the increased labour needed (INALE, 2019) that is added to the workload of farmers. A study that explored dairy farmers' quality of life perceptions in Switzerland found that time was considered the most important criteria for farmers (Conzten and Haberli, 2021). Therefore, the adoption of new technologies such as automatic milking systems have demonstrated to improve livelihood of farmers (Tse et al., 2017). However, some technologies need high initial investments and does not assure profit success (Shortall et al., 2016). Moreover, larger herd size farms are prone to adopt more precision farming technologies compared with smaller farms, probably due to costs, poor information and risk of implementation (Gargiulo et al., 2018). However, it is possible to have positive impacts on quality of life of farmers only by adopting time-saving management strategies.

In this sense, from the trajectory of national studies that explored different productivity, added to the necessity of developing simpler systems that align with farmers desire for a better quality of life, we present this work. Two systems were evaluated: one aimed to reduce costs of production and with operational simplicity, utilizing all-fibre produced in the MP (grazed and haylage), that targeted medium-high productivity and a SR of 1.8 cows ha⁻¹. The other is located at the top of this trajectory in terms of productivity (1,850 kg ha⁻¹ of solids) and with a SR of 3.0 cows ha⁻¹, with higher use of infrastructure, manpower and a support area to provide bought-in feed (silage). However, beyond seeking productive efficiency, it remains unclear how different intensification pathways affect environmental sustainability, particularly farm-gate nutrient balances.

2.3.2. Farm-gate nutrient balances and environmental sustainability:

Increasing the production efficiency per unit area implies a greater use of natural and imported resources and possible implications for the environment (Oenema and Oenema, 2021). Source point contamination due to agricultural activities has been a common challenge in pasture-based dairy systems across Europe (Tamminga, 2003) and New Zealand (De Klein et al., 2017) and Uruguay is not an exception (Chalar et al., 2017; Arocena et al., 2018). The Santa Lucia River basin provides fresh water to the 60% of the country population and is also home of 40% of dairy farming (Barreto et al., 2017); there it has been found values above accepted levels in drinking water for nutrient and solid contents, rising concerns about agricultural activities in the region.

Farm-gate nutrient balances are used to assess performance indicators, develop benchmarks for commercial production efficiency and minimize potential environmental losses. Several studies have demonstrated that as intensification strategies develop, such as higher stocking rate, milk production, feed efficiency and operating profit, nutrient surpluses also increases (Gourley, 2012; Ros et al., 2023; Stirling et al., 2024a). In Uruguay, Stirling et al. (2024a) found positive, but nonlinear relationships between intensification variables and N-surplus, suggesting risk of

environmental problems due to intensification. National N-surplus ranged from 71 kg N ha⁻¹ for the average national modal dairy farm to 122-299 kg N ha⁻¹ in experimental farms (Stirling et al., 2024a), while international values range from 47 to 601 kg N ha⁻¹ (De Klein et al., 2017; Gourley, 2012; Luo and Ledgard, 2021).

It has been determined for dairy systems that there is a positive relationship between N inputs and surplus, while for N use efficiency there is a negative and lower correlation (De Klein et al., 2010) or, in some cases, more complex relations (De Klein et al., 2017; Quemada et al., 2020; Stirling et al., 2024a). There is a wide range of results and behaviours for international N use efficiency values for commercial and experimental farms ranging between 14 to 50% in Australia (Gourley, 2012), 8 and 64% in United States (Powell et al., 2010), 29 and 42% in the Netherlands (Oenema et al., 2012) and for national data ranges between 22% and 62% (La Manna and Durán, 2008; Stirling, et al., 2024a).

For P and K, negative farm-gate balances can be desirable when initial soil levels are above optimal threshold (Oenema et al., 2003). Specifically for P, an experiment in Ireland found a positive relationship between the farm-gate P balance and soil P values, which supports this indicator as a tool for adjusting phosphate fertilisation at paddock scales (Ruane et al., 2014). Regarding the relationship between P inputs and surplus, multiple studies had found a positive relationship as with N (Gourley, 2012; Ros et al., 2023; Wivstad et al., 2023). Surplus values for P range between -7 to 133 kg P ha⁻¹ in Australia (Gourley, 2012), -7 to 51 in United States (Cela et al., 2014); for K, values range from 13 to 452 kg K ha⁻¹ in Australia, -46 to 158 in United States (Cela et al., 2014).

Nutrient surplus is not homogenously distributed in the system and is affected by the spatial distribution and length of time spent in a particular area by the animals (White et al., 2001). Pasture-based dairy systems combine grazing and confinement (sacrifice paddocks and feed parlour), where in some cases there is no excreta collection (Aarons et al., 2017). In Uruguay, more intensified systems spend at least half of the time in confined areas (Stirling et al., 2021; Ortega et al., 2024) and it has been identified as the critical hotspot of potential N losses to the environment (leaching and ammonia volatilization; Stirling et al., 2024b). Therefore, animal placement is key

to understand nutrients flows, and place the infrastructure and efficient management and distribution of excreted nutrients as an essential tool to avoid nutrient losses (Gutiérrez et al., 2009; De Klein et al., 2010).

Given that management decisions regarding SR and productivity affect feeding strategies and, consequently, the farm-gate balance and distribution of those nutrients, this study seeks to continue contributing of national information for possible pathways of intensification strategies and potential sustainability implications. Therefore, the aim of this study was to assess productive variables and farm-gate N, P and K balance of two intensified Uruguayan pasture-based dairy systems to better understand the effect of possible pathways of intensification over production results and nutrient balance.

The hypothesis of this study is that more intensified systems will determine greater nutrient inputs and surplus per area with differences in nutrient spatial distribution, explained by lower grazing opportunity and higher confinement than lower intensification systems.

2.4. Materials and methods

The experiment was conducted at Centro Regional Sur dairy farm, Agronomy Faculty, UdelaR (34°36.810 S, 56°13.088 W), from July 1st 2021, to June 31st 2024, evaluated in three fiscal years 2021-2022 (year 1), 2022-2023 (year 2) and 2023-2024 (year 3). Rain and temperature records were taken by a Davies weather station in Centro Regional Sur every month as well as for historical average.

2.4.1. Treatments

The experiment evaluated two pasture-based systems with contrasting production strategies based on different stocking rates, feeding strategies, infrastructure and management simplicity.

Treatments were defined as follows: 1) High Productivity (HP): this treatment had an average annual SR of 3.0 milking cows per ha of MP; grazing management was made by half daily strips; forage reserves (maize silage) were brought from a support area, and concentrate feed was bought-in from the market; 2) Low Cost (LC): this treatment had an annual average SR of 1.8 milking cows per ha MP; the grazing management was three to four days strip occupation. Forage reserves (haylage) came from the MP and concentrate was bought-in from the market, as in HP.

2.4.2. Animals

Animals were paired according to live weight, body condition score assessed 20 days before calving, calving date, parity and previous milk production at 305 days. The proportion of primiparous cows was 20% for each year. Lactating cows grazed in the MP and 60 days before calving they were dried and left in another paddocks or plots out of the MP until 25 days before calving when they went into a common pre-partum treatment.

2.4.3. Area, rotation and pasture management

The treatments had 20.7 ha of MP with 6 paddocks each. The study had a 6-year rotation, combining perennial and biennial pastures. The grasses used in the perennial pasture were either *Dactylis* (*D. glomerata*) or tall fescue (*Lolium arundinaceum*) combined with legumes such as white clover (*Trifolium repens*) and lucerne (*M. sativa*), and for the biennial component it was used ryegrass (*L. multiflorum*) chicory (*C. intiyus*) combined with red clover (*T. pratense*). Both systems had the same area of every forage component. Fertilization was made before sowing, with 7-40-40-0+5S considering P-Bray soil analysis. Re-fertilization was made with urea (0.46 N) after every grazing cycle from 35 to 46 kg of N ha⁻¹ if climatic conditions allowed.

2.4.4. Infrastructure

The infrastructure for HP consisted of a feed-pad, a resting paddock (RP) with shade and water with an area of 0.5 ha, and a dry outdoor bedding of 0.06 ha used in rainy conditions. The dry outdoor bedding allowed effluent collection. For LC, there was a RP with shade, water and feeders to provide supplement (haylage; see appendix 1).

2.4.5. Grazing management

Grazing management decisions were based on weekly rounds measures that contemplate the MP forage stock and growth rate with C-Dax® pasture meter, calibrated for Uruguayan pasture conditions (Ortega et al., 2023). The target forage average herbage mass was established at 2100 kg ha⁻¹ MP. When the forage stock was above target and forage production exceeded animals' intake capacity, reserves were made. Otherwise, if the forage stock fell below target, grazing was reduced, first by

cutting back from two grazing sessions to one and second by moving to full confinement if required. As a result, the feeding strategy was defined by forage allowance, which led to the possibility of two, one or zero grazing turns. Subsequently, based on the estimated DM forage intake per cow, concentrate and forage supplementation was decided with the use of *Lecheras* Excel data set (CONAPROLE, n.d.). A target combination of each feed was taken as a reference to achieve an average of $21.2 \pm 3.0 \text{ L cow}^{-1} \text{ day}^{-1}$ for both treatments. The outcome of the feeding strategy was the time that animals spent grazing and in confinement, along with the supplementation to complete forage intake.

2.4.6. Animal determinations

The individual milk production was recorded daily with DairyPlan software (GEA) and a milk sample per cow was taken on a fixed day per month during the morning and afternoon milking for milk solids content (protein and fat).

2.4.7. Farm-gate nutrient balance

Farm-gate balance and nutrient use efficiency were determined for N, P and K for both treatments using the farm-gate methodology developed by the EU Expert Panel (Oenema et al., 2015) for the MP for each fiscal year and treatment. Calculations for farm-gate balance were as follows: inputs - outputs = surplus ($\text{kg ha MP}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and use efficiency (%) = outputs / inputs.

The area unit considered in this study was the MP, the area for milking cows.

2.4.7.1. Nutrient inputs

Inputs registered were concentrates, forage reserves (silage for HP and haylage if negative stock for LC), fertilizers, N fixation, bedding materials for HP, atmospheric deposition, animals and forage reserves surplus.

Forage reserves surplus of haylage was accounted when the difference between forage reserves produced and consumed was positive. Taking into account that HP was not designed to be fed with haylage produced in the MP, if haylage was made, it was accounted as a negative input, as recommended by De Klein et al. (2010).

Feed samples were taken monthly for nutrient content (P, K and crude protein) and DM. The feed N content was estimated through crude protein and divided by 6.25.

For N fixation, legume proportion in the pastures was registered for each year in study: 2021 had 53% of the area with legumes, where paddocks had a proportion of 5% to 15% legumes in the mixture; in year 2022, there was 62% of the area and paddocks with the same proportion of legumes in the mixture than 2021, and 2023 had all the area with legumes, with paddock proportion varying from 5% to 35%. N fixation, depending on the species, ranged from 22 to 28 kg t⁻¹ of DM of legume (Lussich, 2020).

2.4.7.2. Nutrient exports

The outputs accounted for were milk and live weight production. For N in milk, the annual milk production and crude protein (CP) concentration was divided by 6.38 (Agricultural Research Council, 1994). A value of 0.1% and 0.15% was used for P and K milk concentration (La Manna, 2002). Exports were also calculated from the live weight difference of reposition heifers and culled cows, with 2.53%, 0.72% and 0.19% for N, P and K, respectively, of empty body weight (LaManna, 2002).

2.4.8. Statistical analysis

The response variables per area unit such as annual forage production, direct and indirect harvest, supplementation allowance (concentrate and forage reserves), milk and solids production were statistically analysed for a completely randomized block design like Ortega et al., (2024). The six paddocks were considered as the repetitions in space and the fiscal years were considered as a fixed effect. The model for system performance variables is represented in equation 1.

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \text{year}_j + \text{block}_k + e_{ijk} \quad (1)$$

μ = mean of the variable;

T = fixed effect of the treatment (i = HP or LC);

year = fixed effect of fiscal year (j = year 1, 2 and 3);

block = fixed effect of the blocks (k = paddocks, six per treatment);

e_{ijk} = residual error.

For individual animal observations, the cow was considered as the experimental unit. The model included the treatments and fiscal years as the fixed effects. Cows were nested in the fiscal year as the random effect. The data was fitted with linear mixed models (lmer) using the CAR library on RStudio (see equation 2).

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \text{year}_j + 1/\text{cow}(\text{year}_j) + 1/\text{group}_k + e_{ijk} \quad (2)$$

μ = mean of the variable;

T = fixed effect of the treatment (i = HP or LC);

year = fixed effect of fiscal year (j = year 1, 2 and 3);

cow = ID cow nested in the year;

group = cows grouped for productivity, calving date, number of lactations, BW and BCS at calving;

e_{ijk} = residual error.

The model for the time spent in two, one or zero grazing turns was fitted using a logistic regression with binomial distribution in SAS software (GENMOD procedure). The model included fixed effects for treatment and fiscal year as well as their interaction. The days were considered as the repetition in time (see equation 3).

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \text{year}_j + (T_i \times \text{year}_j) + e_{ij} \quad (3)$$

For farm-gate balances, a general linear model was applied. It considered the cows + land + treatment as the experimental unit and the fiscal years as the repetition (see equation 4).

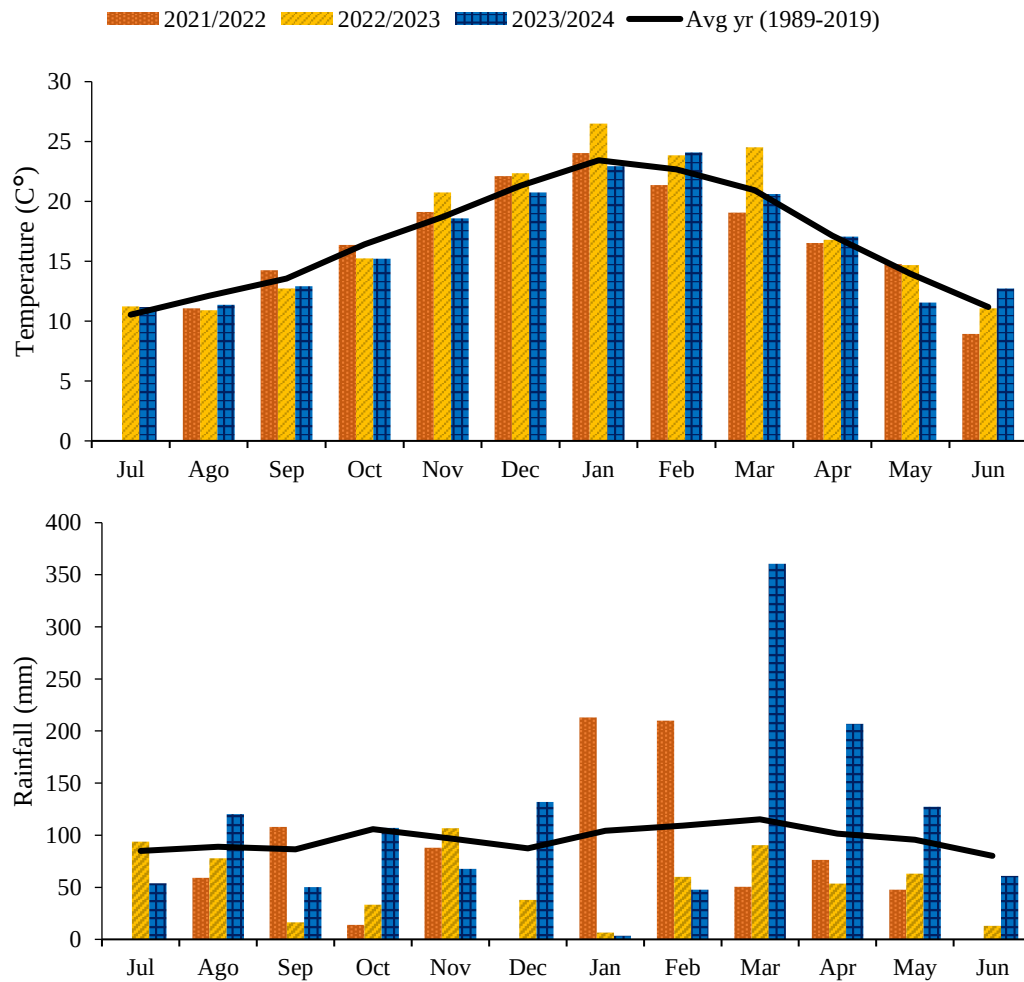
$$Y_{ijk} = \mu + T_i + e_{ijk} \quad (4)$$

Effects were declared statistically significant at $p \leq 0.05$ and discussed as trends for $0.05 < P \leq 0.10$ based on Tukey test.

2.5. Results

The monthly mean temperature and total rainfall for the three years evaluated compared to the historical records (average 30-year) are presented in Figure 1. The mean temperatures during the experimental years (16.7, 17.6 C° and 16.6 C°, year 1, 2 and 3, respectively) were similar to the historical temperatures (16.0 C°), but with higher temperatures than historical on summer, especially for 2022-2023. The average total rainfall was 960, 652 and 1337 mm for year 1, 2 and 3, respectively, with high variability within each year. Compared to the historical average (1.157 mm), annual rainfalls varied -7%, -44% and +13% for year 1, 2 and 3 respectively, with the most severe drought in the history of Uruguay in year 2. Conversely for year 3, although summer was dry, autumn was marked by high rainfalls (52% of annual rainfall).

Figure 1. Monthly mean temperature and total rainfall for the three fiscal years of the experiment compared with historical average.



Productivity variables of each treatment are presented in Table 2. The annual forage production was not different between treatments. Total forage harvest did not differ between treatments (p-value 0.76); however, there were differences in the harvest strategy (direct or mechanical), with higher direct harvest for HP (+32%) and a numerically higher mechanical harvest for LC (+57%). Moreover, feedstuff supplementation (forage reserves and concentrate) was affected by the treatment. Forage reserves and concentrates for HP were 46% and 50% higher than for LC, respectively.

Table 2. Description of forage production and harvest, feed offer and productivity variables for high productivity (HP) and low cost systems (LC).

(kg ha ⁻¹ MP year ⁻¹) ^a	HP	LC	SEM	p-value
				Treatment
Annual forage production	8,460	8,053	621	0.77
Direct harvest	7,073	4,782	318.2	<.0001
Mechanical harvest	473	1,862	-----	-----
Forage reserves offer	5,760	3,282	282.2	<.0001
Concentrate offer	7,002	3,813	79.0	<.0001
Milk production	22,178	13,606	332.9	<.0001
Solids production ^b	1,907	1,184	14.3	<.0001

p < 0.05 is considered statistically significant

^a MP, milking platform: total area of the farm potentially grazable by the milking herd.

^b milk fat and protein.

The intensification strategies of each treatment meant different SR (p < 0.05), which resulted in 2.8 for HP and 1.7 for LC, but no differences in individual milk production, protein and fat concentration (see Table 3). Therefore, the higher SR of HP resulted in statistical differences in milk and solids productivity per hectare.

Table 3. Individual milk and solids production for high productivity (HP) and low cost (LC) systems.

Production per cow	HP	LC	SEM	p-value
				Treatment
305 production (L cow ⁻¹ year ⁻¹)	7,602	7,526	176.2	0.41
Milk production (L cow ⁻¹ d ⁻¹)	20.9	20.4	0.45	0.19
Protein (kg cow ⁻¹ d ⁻¹)	0.78	0.79	0.04	0.61
Fat (kg cow ⁻¹ d ⁻¹)	0.92	0.95	0.03	0.41

p < 0.05 is considered statistically significant.

The outcome of the treatment feeding strategies in terms of grazing opportunities is shown in Table 4. Treatment LC had greater opportunities of one and two grazing events, while HP had mostly one grazing event and secondly zero grazing events.

Table 4. Proportion of days with one, two and zero grazing for high productivity (HP) and low cost (LC) systems.

	HP	LC	SEM	<i>p-value</i> <i>Treatment</i>
Proportion of days with no grazing	0.28	0.20	0.078	<.0001
Proportion of days with one grazing	0.54	0.44	0.080	<.0001
Proportion of days with two grazing	0.18	0.36	0.072	<.0001

p < 0.05 is considered statistically significant.

An overview of N, P and K inputs, outputs, farm-gate balance and efficiency metrics within the two experimental systems are presented in Table 5. Nutrients inputs for HP were 41%, 38%, and 64% higher than LC for N, P and K, respectively; nevertheless, significance between treatments was found for N and K but not for P. For outputs, there were significant differences between treatments for P and K. Although the N, P and K farm-gate balance of HP was numerically higher than LC with a 42%, 36% and 74% increment, respectively, statistically there were differences between treatments only for N, while not for P, and for K there was a tendency.

Table 5. Farm-gate nutrient balance and sources of N, P and K for high productivity (HP) and low cost (LC) systems.

Item (kg ha ⁻¹)	N					P					K				
	HP		LC		<i>p-value</i>	HP		LC		<i>p-value</i>	HP		LC		<i>p-value</i>
	Mean	SD	Mean	SD		Mean	SD	Mean	SD		Mean	SD	Mean	SD	
Inputs	435	17.7	285	24.5	0.012	104	23.2	63	19.7	0.290	161	25.5	65	7.3	0.034
Fertilisers	148	10.8	154	10.7	-	17	4.6	20	4.8	-	0.0	-	0.0	-	-
Concentrates	202	7.7	103	4.2	-	73	3.0	40	1.8	-	83	3.4	45	2.0	-
Forage reserves	80	3.9	20	1.7	-	14	0.5	4.0	0.3	-	95	3.5	19	1.6	-
N fixation	2.9	0.3	2.5	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage reserves surplus	-7.3	0.0	-	-	-	-3.3	0.0	-	-	-	-21.0	0.0	-	-	-
Animals	0.7	0.03	-	-	-	0.4	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Bedding materials	3.3	0.0	-	-	-	2.3	0.0	-	-	-	3.5	0.6	-	-	-
Atmospheric deposition	5.9	0.0	5.9	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Outputs	130	11.9	80	6.5	0.054	22	1.3	13	0.8	0.031	32	1.7	20	7.5	0.032
Milk	130.3	2.5	80.3	1.8	-	21.6	0.5	13.3	0.3	-	32.4	0.7	20.2	0.5	-
Animals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Surplus	305	33.0	205	32.2	0.046	82	29.6	50	24.4	0.363	128	30.4	44	6.5	0.062
Use efficiency (%)	30%	4%	28%	4%	-	22%	7%	21%	9%	-	20%	5%	31%	7%	-

p < 0.05 is considered statistically significant.

For HP, the average structure of N input sources was mainly attributed to feedstuff (46% and 21% for concentrates and forage reserves, respectively) and secondly, fertilizers (32%). On the other hand, for LC, fertilizer was the greatest N source input (53%), followed by feedstuff (37% and 7% for concentrates and forage reserves, respectively). A summary of the nutrient content of the bought-in feeds is provided in Table 6.

Table 6. Nutrient (N, P and K) feeds content for treatments high productivity (HP) and low cost (LC) systems.

Treatment	Feed	N	P	K
HP	Forage	11.2%	0.2%	1.5%
LC	reserves	14.7%	0.3%	1.7%
HP	Concentrates	16.5%	0.9%	1.1%
LC		17.7%	1.1%	1.3%

Regarding interannual variations, the 2022-2023 drought particularly modified sources proportions. Feed inputs increased for both treatments, representing 72% for HP (15% of forage reserves and 57% of concentrates), and 57% for LC (12% of forage reserves and 45% of concentrates), being the only year that feed outweighed fertilisers. Moreover, fertiliser also decreased for HP and LC due to the water deficit resulting in 26% for HP and 40% for LC.

Regarding P, concentrate was the main input (HP: 69%; LC: 62%), with a decrease in fertilizer proportion through the years, and no fertilization in year 3 for both treatments. For K, source entries were explained by feed for both treatments, HP averaged equally for concentrate and forage reserves (silage) with low variability between years, while LC averaged 30% and 70% for forage reserves and concentrate, respectively, with an increase in forage reserves proportion from 30% in year 1 to 44% in year 2, and a decrease to 12% for year 3.

Outputs were composed of milk production and animals; however, for the latter, the proportion was almost insignificant since SR was aimed to remain constant. It can be observed (see Table 5) that N and P use efficiency was similar between treatments, while, for K, a reduction on use efficiency for HP was observed.

2.6. Discussion

The present experiment contributes to the trajectory of national research done in pasture-based dairy systems that explored different productivities. This study integrates different combinations of management strategies over intensification alternatives that converges in dairy systems options applicable for farmers.

2.6.1. Forage annual production, diet and milk production per hectare

Annual forage production for both treatments of this study is comparable with results of an experiment conducted at the same place that ranges between 7,393 and 7,973 kg ha⁻¹, although there were differences in the evaluated rotations (a 4-year rotation of perennial and annual grasses; Ortega et al., 2024). The drought affected all three years' forage production from spring to summer, with different degree and moment depending on the year (Figure 1), resulting in lower production than projected (24%, 26% and 5% and 22%, 31% and 13% in year 1, 2 and 3 for HP and LC, respectively). Moreover, it impacted pasture persistence, requiring more area to be re-seeded than originally planned, that consequently, increased fallow area decreasing the MP during autumn, especially in the second year.

As it was predicted, there were no differences in the annual forage production for both treatments; however, the way that forage was harvested differed between HP and LC. Although HP harvested directly 32% more forage, the forage management allowed LC to harvest in total (direct and mechanical) the same levels as HP. Moreover, LC was above national commercial farms values of mechanical harvest (1,367 kg and 1,862 kg DM ha⁻¹ national farms and LC, respectively; Fariña and Chilibróste, 2019). Although HP was not designed to have mechanical harvest in the second fiscal year, forage reserves were made due to forage production exceeding animals' consumption capacity because of lower SR than planned during spring. Compared to Ortega et al. (2024), LC positioned between the amount harvested for SR of 1.5 and 2.0 (2,524 and 813 kg DM ha⁻¹, respectively) indicating that, despite the not

ideal weather conditions due to the drought in this experiment, LC achieved reasonable values of mechanical harvest due to the controlled forage management and planning.

As SR increase, forage allowance and intake per cow decrease, hence a strategic supplementation to maintain milk production per cow is necessary (Baudracco et al., 2010; Patton et al., 2016; Ortega et al., 2024). In the case of this study, HP had higher forage reserves and concentrate than LC, which represented lower proportion of days under one and two grazing turns and more time spent in the confined areas. The results obtained in this experiment agrees with Ortega et al. (2024), where the increase of SR from 1.5 to 2.0 raise the proportion of time with one grazing turns by 12%, and decreased the time under two grazing turns by 14%. In this experiment, to increase SR from 1.7 in LC to 2.8 in HP, incremented the time under one grazing by 10% and the time in two grazing turns dropped by 18%. These results demonstrate that enhancing intensification through SR, diminishes grazing opportunities, and therefore, animals must spend more time in confined areas, which makes infrastructure a key factor in system performance, both for environmental sustainability as well as animal welfare.

The fact that individual milk production was not affected by the treatments matches similar findings obtained in pasture-based farmlet studies with different levels of SR (Baudracco et al., 2011; Fariña et al., 2011; Ortega et al., 2024). However, other studies on pasture-based dairy systems have proven that individual milk production can be affected negatively by increases in SR due to a reduction of pasture individual DM intake (Macdonald et al., 2008). In the present study, feed management was set to keep a target milk production that required certain DMI; in that case, if forage production was not enough, supplementation was included.

Higher intensification did not affect annual forage production, regardless of the way of harvesting it. Moreover, it had an effect in the feeding strategy: HP depended more in bought-in feeds, while LC depended more on home-grown forage, hence although both treatments were affected by the drought, LC could not completely express its potential. Each treatments' SR determined the feeding strategy, and this was linked to the time spent in confinement areas or grazing opportunities, reflecting the importance of appropriate infrastructure for these levels of intensification.

2.6.2. Farm-gate nutrient balance

The intensification strategies determined distinctly higher N, P and K inputs and surplus for HP than for LC; this is consistent with the literature (Gourley, 2012; Stirling et al., 2024a). Both treatments had different main input sources: HP was feedstuff (concentrate and forage reserves as silage), while LC was fertilizers. Concentrates and forage reserves were the inputs that mostly explain the differences between treatments, reflecting the different feeding strategies for each treatment: HP is more dependent on bought-in feed, while LC's forage reserves consumption relies on the previous spring production inside the MP.

Regarding N biological fixation, the values in this experiment are considerably lower than those reported in studies from Uruguay, which range from 29 to 49 kg N ha⁻¹ with legume contents between 38% and 44% in mixed perennial pastures. In contrast, in this experiment, legume proportion averaged 15%, with an important number of paddocks that had reduced or lost the legume component. The low proportion of legumes could be explained by several factors, including grazing management focused on grasses rather than legumes, intensified by the effects of prolonged droughts.

There are differences in the unit area used in the bibliography of farm-gate balances. Some studies based their results on the MP, excluding the support area and dry cows, as in this study (De Klein et al., 2017; Gourley, 2012), while other studies carried out their calculations based on the dairy area (DA; area for the milking cows plus area for the dry stock plus support area). In this experiment, HP's forage reserves (silage) were produced in a support area and inputs accounted were the nutrients content of the feed. If DA is considered instead of the MP as the unit area, input values inevitably vary, especially for HP, where most inputs come from feedstuff. The results made inputs decrease by 20%, 9% and 25% for N, P and K, respectively, for HP, while LC had minor changes for N and P, and increased 10% for K. The decrease of nutrient imports for HP when changing from MP to DA is explained by the increase in the unit area due to its support area (4 ha). Moreover, forage reserves' nutrients are replaced by the fertilizer used to produce it, decreasing the highest input. Nevertheless, in the

first two years, forage reserves surplus was negative due to the drought that affected forage production, while, in the last year, the opposite occurred due to better productions explained by greater summer precipitations; however, it was necessary to use bought-in feed for the 3 years in study. Including the dry cows and support area concentrate inputs decrease in 20% for N, P and K, and forage reserves decreased 48%, 32% and 31% for P, K and N, respectively.

Farm-gate national data have evaluated farmlet studies with different options of intensification strategies (Ortega et al., 2024; Stirling et al., 2021) and the average dairy systems (INALE, 2022; Stirling et al., 2024a). The national data is based on DA, therefore, DA will be used for comparisons in this case. The results positions LC between these studies with a SR of 1.74, 1.70, 2.29 1.79 and N surplus: 133, 179, 202, 299, 245 and 250 kg ha⁻¹ for CRS 2.0, LC, GFix-NAHF, GFix-NZHF, HP and GMax-NAHF, respectively. Moreover, compared with commercial dairy farms' surplus, LC and HP surpasses those values by 64% and 70%, respectively (Stirling et al., 2024a).

Studies in pasture-based dairy systems highlighted the relation between intensification and surplus (Gourley, 2012; Stott and Gourley, 2016; De Klein et al., 2017; Quemada et al., 2020; Stirling et al., 2024a;). For instance, research analysing a 22-year period (1999-2012) of ongoing intensification in Australia revealed that, alongside an increase in SR from 1.4 to 1.6 cows per hectare of total productive area (PA; pasture and crop production, dry cows, raising of young stock, etc.), there was a 60% rise in purchased feeds and a 21% increase in N fertilizer, resulting in a substantial rise in N surplus from 54 to 158 kg N ha⁻¹ (Stott and Gourley, 2016). Similarly, a study conducted in New Zealand (Luo and Ledgard, 2021) found that an increase in SR (from 2.65 to 2.85 cows ha⁻¹) was accompanied by a 30% increase in N fertiliser use and twice the external feed sources. Although the area accounted for Australia and New Zealand studies (Stott and Gourley, 2016; Luo and Ledgard, 2021) differs with this work, making input variations not fully comparable due to differences in unit areas, the increase in SR from 1.7 to 2.8 represented an increase of 65% of purchased feeds. Moreover, there were no differences between LC and HP N fertiliser. However, when these treatments are analysed in terms of DA, HP requires higher fertilisation due to the support area that is needed to maintain the higher SR.

Although a greater surplus is not strictly correlated to an increase in nutrient loss to the environment, its calculation may be helpful for nutrient loss estimations (Luo et al., 2007; Powell et al., 2010; Dalgaard et al., 2012; Stirling et al., 2024b). In this term, a study of four dairy systems in Uruguay has been carried out with contrasting feeding strategies and cow genotypes (lesser vs. greater corn silage; New Zealand vs. North American Holstein–Friesian), where environmental losses from N surplus were estimated (Stirling et al., 2024a). Stirling et al. (2024b) found that leaching and volatilization were the main pathways of nutrient losses, in which feed/loafing pads were identified as critical hotspots (60% of N losses from 6% of the area), followed by fallow periods.

The nutrient surplus values in this experiment raise concerns about the possible losses to the environment. HP could represent a higher risk than LC due to its higher surplus and higher time spent in confinement areas (55% vs. 40%, Hp and LC respectively), where nutrients concentrate in small areas, higher use of feed and maize silage production, hence more fallow periods for possible nutrient losses. However, nutrient losses also depend on how the infrastructure is designed; in this case, HP had higher possibilities of managing and storing manure (dry outdoor bedding and feed pad) than LC, that only counts with a resting paddock area. As intensification of dairy systems develop, infrastructure should be taken into consideration when designing this type of systems, identified as one of the main restrictions for sustainable growth in Uruguayan dairy systems (Aguerre et al., 2018; Fariña and Chilibraste, 2019; Ortega et al., 2023).

The farm-gate P and K surplus values were higher in magnitude than what is registered as average in the literature, although within the ranges reported (Wivstad et al., 2023). For the three years' average, main P and K inputs were by bought-in feed for HP and LC. In intensified dairy systems from United States and Australia, feed also resulted as the highest P input and also was significantly correlated to P surplus, as in this experiment (Gourley, 2012; Pearce and Maguire, 2020). Many studies found negative balances due to reliance on soil delivery capacity and no P or K fertilization, which can be used as a tool when initial soil values are high (Oenema et al., 2003). In this case, soils were fertilised according to soil testing to minimize potential losses; in

fact, there was no fertilisation of K in the three years and for P for the last year, due to soil high levels for both nutrients. Considering that dairy cows can excrete up to 66% of the nutrients imported onto the farm and that its distribution depends on the time cows spent in an area (Aarons et al., 2017, 2023), it is expected for both treatments of this study to show nutrient saturation in specific areas due to the imbalances in P and K for both treatments. In this context, it is important for pasture-based dairy systems to integrate mitigation strategies to avoid nutrient transfer to streams and surface waters such as the maintenance of buffer areas, avoidance of fertilizer in years with heavy rainfall (Alfaro et al., 2008), long-term pastures to minimise erosion (Mcdowell et al., 2017) and rotations that include high P extracting crops such as leguminous (Sulieman et al., 2013).

A review of data from Europe, New Zealand and USA also found the trend of increased surplus with greater intensification, reflected on higher inputs, surplus and outputs (De Klein et al., 2017). However, a study from the Netherlands (Oenema and Oenema, 2021) found that surplus remained the same despite intensification, explained by a balance between the increments in inputs from feed and outputs from milk, animals and manure export. In this study, inputs and outputs were not balanced with more outputs from manure due to the lack of effluent management planning, hence, this arises as an appealing opportunity to control surplus when intensifying systems.

Differences in N use efficiency were minor between HP and LC treatments. In national studies (La Manna and Durán, 2008) it was found that N use efficiency of different Uruguayan dairy farm intensification strategies ranged from 22% to 66%, where farms with N use efficiency greater than 60% corresponded to less intensified systems and underwent nutrient mining. Quemada et al. (2020) reports N use efficiency values of 38%, ranking HP and LC in a favourable position, although with a great space for improvement. However, one resource that could improve the N use efficiency and it was not explored was the re-utilization and management of effluents that will reduce inputs in fertilizers. For example, studies found comparable results of forage production or crop yield, soil nutrient content and microorganisms' activity and low pathogen load when using effluents compared to urea fertilization (Lombardi, 2023; Illarze et al., 2024).

Results of De Klein et al. (2017) found that dairy systems that achieve N use efficiency near 40% had N inputs lower than 400 kg ha⁻¹; in this case, HP had higher input, while LC was under this benchmark and reached similar N use efficiency results. The relationship between N use efficiency and intensification is more complex: some authors claimed a negative trend (De Klein et al., 2017), while, for national data, it has been found a peak at values rounding 100 kg ha⁻¹ of N input and was not related to any input composition (Stirling et al., 2024a). The relation between input and N use efficiency for HP could be due to the higher input of concentrate than LC, that was converted with greater efficiency into milk. On the other side, LC had higher N through fertiliser, which firstly has an impact on the pasture and then it can be used with a certain harvest efficiency to finally be transformed into milk. In this sense, the higher efficiency recorded for both treatments (year 2), was coincident with a higher use of concentrates compared to the other years evaluated, which evidence the relevance of inputs composition.

Nutrient use efficiency depends on inputs and outputs, where a great part of the inputs comes from brought-in feed, and nutrient losses from these feeds are not accounted in farm-gate balances or nutrient use efficiency. In this sense, some authors claim that when accounting for externalisation of feed production and manure utilisation, N use efficiency decreases (De Klein et al., 2017; Quemada et al., 2020; Oenema and Oenema, 2022). In this way, Quemada et al. (2020) highlighted the importance of considering adjusting factors due to the effect on N indicators. In the case of this study, if the adjustment factor is applied, by calculating the 50% N use efficiency on the net income of N from feeds, N use efficiency of HP would decrease more than LC, due to the greater dependence on bought-in feed. N use efficiency would drop by 12% and 9% for HP and LC, respectively. These results demonstrate that, as intensification increases, there is higher dependence on external inputs, mostly bought-in feed, and accounting for externalization integrates losses that were not considering, moreover, goes a step further in to relate farm-gate balance with the nutrient losses.

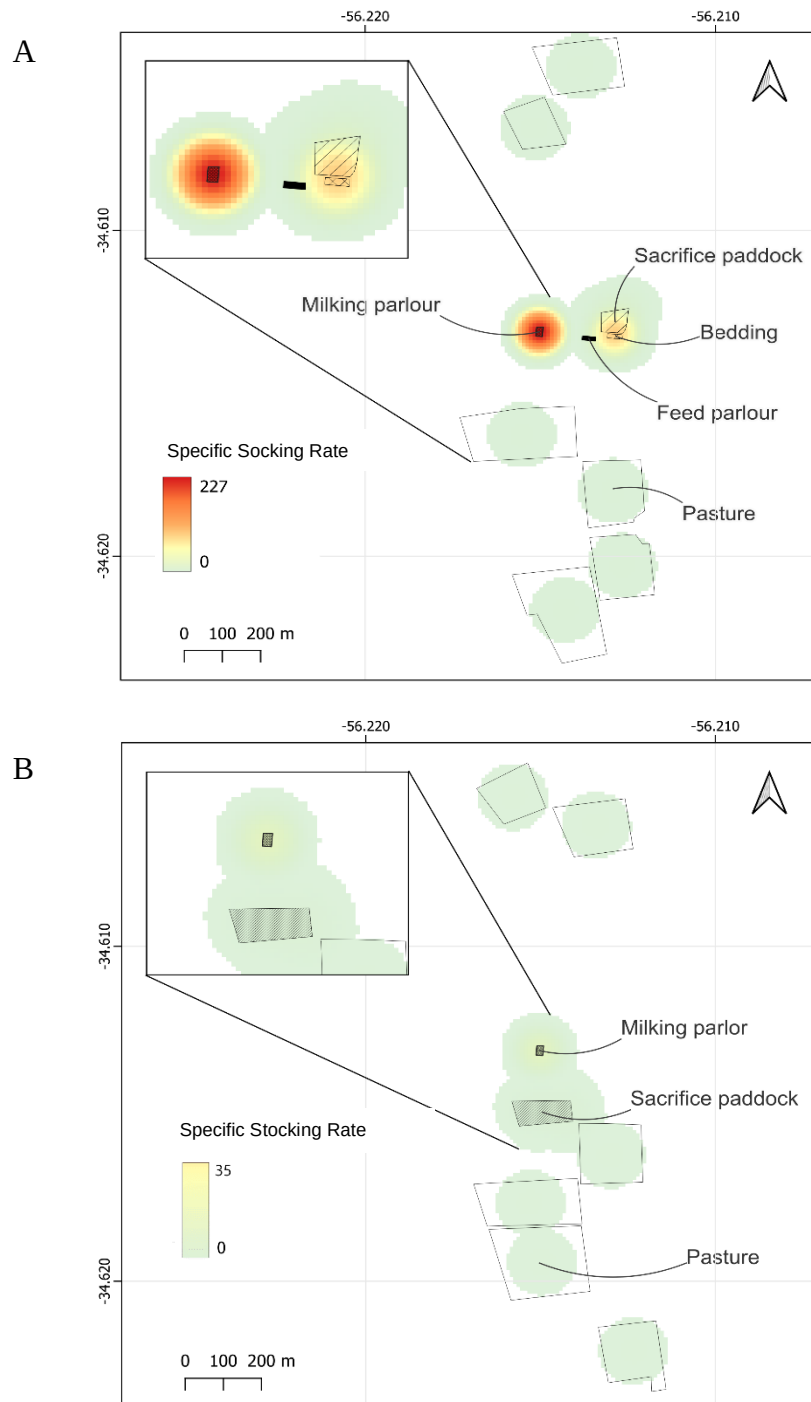
The relationship between farm-gate nutrient balance and environmental impact is not always clear (Öborn et al., 2003); however, it is certain that those nutrients are

not homogeneously distributed within the system (Gourley et al., 2015) and nutrient losses can be accentuated in areas where nutrients concentrate (Stirling et al., 2024b). Considering that time spent in an area is positively correlated to nutrients excreted (White et al., 2001), we estimated the time spent by the animals in a certain area for each treatment. For this estimation, an indicator was calculated as follows:

$$\text{Eq. 1 } \text{SSR} = N / A \times t$$

Where SSR refers to specific stocking rate, N represents number of animals, A is the area occupied by the animals (i.e. milking parlor, confinement areas such as resting paddocks and bedding and pasture) and t is the time spent in each area (Figure 2).

Figure 2. Heatmap for specific stocking rate for high productivity (A) and low cost (B).



For each treatment, nutrients concentrated especially in the milking parlor and secondly in the confinement areas, and for HP the bedding area was higher than the sacrifice area due to higher stocking rate and time spent in those places. For pasture paddocks, there was no difference between treatments, indicating that grazing time is limited by its production and, regardless of the SR, it is regulated by the same management decisions applied for both treatments. Therefore, although HP had higher SR than LC, the correction by time (45% vs. 63% of the time grazing for HP and LC, respectively) resulted in similar SSR in pasture paddocks (1.2 and 1.1 for HP and LC, respectively), which reinforces that the major differences are in the confinement areas. This results are consistent with data from commercial dairy farms from Australia that studied P, K and S soil distribution and found that higher nutrient levels were associated with night paddocks, calving paddocks, sacrifice paddocks and dairy effluent application areas (Gourley et al., 2015). Moreover, a nutrient characterization of sacrifice paddocks of commercial dairy farms in Uruguay determined nutrient concentration ranging from 7 to 176 N mg kg⁻¹ in the first 7.5 cm and 45 to 302 mg P kg⁻¹ (Ciganda and La Manna, 2009), well beyond the recommended limit for Uruguayan soils (31 ppm; Ministerio de Ambiente, 2020). As opposed to Uruguay, in New Zealand dairy systems, the main source of N leaching has been identified in the pasture due to urine patches (De Klein et al., 2010), while, in Uruguayan dairy systems, Stirling et al. (2024b) determined that 60% of the predicted N losses occurred in 6% of the area in feed/loafing pads, raceways and effluent stores, as in this study.

Knowing where nutrients are concentrated in each type of system is extremely important to understand where to put efforts in the development of adequate infrastructure that enhances nutrient reutilization and its distribution. In this context, both treatments can manage effluents in the milking parlour, and for HP there were also possibilities of effluent management in the feeding parlour and in the bedding area. The bedding area of HP was designed to be used in muddy conditions, hence, the first two years were of limited use, while for the last year its use increased. From the total time spent in confinement areas, HP cows spent 7%, 9% and 29% of the time in the bedding area, and the rest in the sacrifice paddock, that had no effluent management. As intensification increase, the time in confinement areas with no

effluent management raise, supporting the importance of infrastructure in dairy systems, whether to capture manure or to introduce mitigation strategies.

2.7. Future research

Future research should prioritize generating information to improve the accuracy and knowledge of the uncertainties of predictive models adapted to our region. Studies towards this goal should focus on nutrient balances across diverse dairy intensification strategies, with particular emphasis on P and K, given the limited national data available. Considering that the cows in national dairy systems spend a considerable time in confinement areas, it is necessary to produce data on direct measurements of nutrients losses under different mitigation strategies, along with infrastructure that enable to capture nutrients, such as the use of dry bed as a structural confinement space rather than conventional sacrifice paddocks. Additionally, evaluating the impact of effluent recirculation on nutrient balances, forage production and economic outcomes will provide valuable insight and guidance to sectoral policies for sustainable productivity

2.8. Conclusions

This study demonstrated that although intensification increases productivity, it also introduces significant challenges in nutrient management and potential environmental impact. The two intensification strategies evaluated did not affect annual forage growth or total harvested yield, but it did determine the harvest method (direct or mechanical) that led to different feeding strategies. The severe weather conditions drove adjustments in the feeding strategies and fertilizer decisions that impacted nutrient input throughout the years evaluated. The higher intensification was associated with greater reliance on external inputs and nutrient surplus, potentially increasing the risk of environmental losses, especially in confinement areas. Although

animals in HP treatment spent more time in confinement with brought-in feed compared to LC, nutrients in both systems were concentrated in areas with no effluent management, underscoring the need for infrastructure according to intensification level. A potential solution could be the bedding area, as part of the confinement infrastructure in pasture-based dairy systems with supplementation, which shows promising potential. Furthermore, the absence of an effluent management plan suggests an opportunity to reduce fertilizer inputs by improving nutrient recycling practices. In summary, integrating infrastructure and nutrient recycling strategies is essential to balance productivity with sustainability in intensified dairy systems.

2.9. References

- Aarons, S. R., Gourley, C. J. P., and Hannah, M. C. (2017). Measuring spatial and temporal variation in lactating dairy cow placement on diverse grazing system farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 248, 175-189. doi: 10.1016/j.agee.2017.07.010
- Aarons, S. R., Gourley, C. J. P., and Powell, J. M. (2023). Estimating Excreted Nutrients to Improve Nutrient Management for Grazing System Dairy Farms. *Animals*. 13(8), 1404. doi: 10.3390/ani13081404
- Agricultural Research Council. (1994). The nutrient requirements of ruminant livestock. Slough: CAB International.
- Aguerre, M., Mendez, N., Torterolo, S., and Chilibroste, P. (2018). Dimensionamiento y característica de la infraestructura en sistemas lecheros comerciales 1: Animales en lactancia, VI Congreso AUPA, Tacuarembó, Uruguay, 19 - 21 March. pp. 161. (In spanish).
- Alfaro, M., Salazar Sperberg, F., Iraira, S., Teuber, N., Villarroel, D., and Ramirez, L. (2008). Nitrogen, Phosphorus and Potassium Losses in a Grazing System with Different Stocking Rates in a Volcanic Soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(2), 68. doi: 10.4067/S0718-58392008000200004
- Arocena, R., Chalar, G., and Pacheco, J. P. (2018). Agriculture and elevation are the main factors for Pampasic stream habitat and water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 254. doi: 10.1007/s10661-018-6622-6
- Barreto, P., Dogliotti, S., and Perdomo, C. (2017). Surface Water Quality of Intensive Farming Areas Within the Santa Lucia River Basin of Uruguay. *Air, Soil and Water Research*, 10, 1-8. doi: 10.1177/1178622117715446
- Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Holmes, C., and Macdonald, K. (2010). Effects of stocking rate, supplementation, genotype and their interactions on grazing dairy systems: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(2), 109-133. doi: 10.1080/00288231003777665
- Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Romero, L.A., Scandolo, D., Maciel, M., Comeron, E.A., Holmes, C.W et al. (2011). Effects of stocking rate on pasture production, milk

- production and reproduction of supplemented crossbred Holstein–Jersey dairy cows grazing lucerne pasture. *Animal Feed Science and Technology*, 168(1-2), 131-143. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.03.017
- Cela, S., Ketterings, Q. M., and Czymmek, K. (2014). Characterization of nitrogen, phosphorus, and potassium mass balances of dairy farms in New York State. *Journal of Dairy Science*, 97(12), 7614-7632. doi: 10.3168/jds.2014-8467
- Chalar, G., Garcia-Pesenti, P., Silva-Pablo, M., Perdomo, C., Olivero, V., and Arocena, R. (2017). Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production. *Limnologica*, 65, 76-84. doi: 10.1016/j.limno.2017.06.002
- Chilibroste, P., Battagazzore, G., Fariña, S. (2024). Productivity versus area: The growth dilemma of the Uruguayan dairy sector. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), Article NE1. doi: 10.31285/AGRO.28.1236
- Ciganda, V., and La Manna, A. (2009). Acumulación y distribución de nutrientes en suelos de potreros sacrificio en predios lecheros de Uruguay. *Revista Argentina de Producción Animal*, 29(suppl. 1), 375-376. 32° Congreso AAPA. (In spanish).
- CONAPROLE. (n.d.). Lecheras [online]. Available at: <http://www.eleche.com.uy/files/planilla-lechera-w-2008?es> [Accessed: 22 august 2024]
- Dalgaard, T., Bienkowski, J., Bleeker, A., Drouet, J., Durand, P., Dragosits, U., Frumau, A., et al. (2012). Farm nitrogen balances in six European agricultural landscapes—A method for farming system assessment, emission hotspot identification, and mitigation measure evaluation. 9, 5303-5321. doi: 10.5194/bg-9-5303-2012
- De Klein, C., Monaghan, R., Ledgard, S., and Shepherd, M. (2010). A system's perspective on the effectiveness of measures to mitigate the environmental impacts of nitrogen losses from pastoral dairy farming. *Proceedings of the Australasian Dairy Science Symposium*, 4, 14-28.
- De Klein, C., Monaghan, R., Alfaro, M., Gourley, C., Oenema, O., and Powell, M. (2017). Nitrogen performance indicators for dairy production systems. *Soil Research*, 55, 479-488. doi: 10.1071/SR16349

- Deloitte. (2017). Global Dairy Sector: Trends and opportunities. Available at: <https://www.deloitte.com/ie/en/pages/consumer-industrial-products/articles/global-dairy-trends-2017.html> (Accessed October 28, 2024)
- Dirección de Estadística Agropecuaria (DIEA). (2023). Anuario Estadístico Agropecuario 2023. Available at: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2023>. (Accessed March 13, 2024)
- Fariña, S., and Chilibróste, P. (2019). Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay. *Agricultural Systems*, 176, 102631. doi: 10.1016/j.agsy.2019.05.001
- Fariña, S., García, S., Fulkerson, W., and Barchia, I. (2011). Pasture-based dairy farm systems increasing milk production through stocking rate or milk yield per cow: Pasture and animal responses. *Grass and Forage Science*, 66, 316-332. doi: 10.1111/j.1365-2494.2011.00795.x
- Gourley, C. (2012). Farm-scale nitrogen, phosphorus, potassium and sulphur balances and use efficiencies on Australian dairy farms. *Animal Production Science*, 52, 929-944.
- Gourley, C. P., Aarons, S. R., Hannah, M. C., Awty, I. M., Dougherty, W. J., and Burkitt, L. L. (2015). Soil phosphorus, potassium and sulphur excesses, regularities and heterogeneity in grazing-based dairy farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 201, 70-82. doi: 10.1016/j.agee.2014.12.010
- Gutiérrez, S., Cabrera, N., Benítez, A., and Melani, E. (2009). Reducing variability in estimating wastewater composition in dairy farms during milking operations. *Biosystems Engineering*, 103(4), 497-503. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.004
- Contzen, S., and Häberli, I. (2021). Exploring dairy farmers' quality of life perceptions – A Swiss case study. *Journal of Rural Studies*, 88, 227-238. doi: 10.1016/j.jrurstud.2021.11.007
- Illarze, G., Del Pino, A., Azzíz, G., and Irisarri, P. (2024). Effect of untreated and stabilized dairy effluent applications on soil fertility and associated health risks. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), p. e1184. doi: 10.31285/AGRO.28.1184.

- Instituto Nacional de la Leche (INALE). (2019). Encuesta Lechera 2019: Resultados preliminares. Available at: <https://www.inale.org/estadisticas/encuesta-lechera-2019-resultados-preliminares/>. (Accessed July 23, 2024)
- Instituto Nacional de la Leche (INALE). (2022). Sistemas de producción de leche de Uruguay. Available at: <https://www.inale.org/informes/sistemas-de-produccion-de-leche-de-uruguay/>. (Accessed March 11, 2024)
- La Manna, A., and Durán, H. (2008). Balance de nutrientes en tambos, una primera aproximación al proceso de intensificación y su potencial impacto en el ambiente, XXXVI Jornadas Uruguayas de Buiatría, Paysandú, Uruguay, 12-14 June. Paysandú: CMV, 12-17. (In spanish)
- LaManna, A. (2002). Feeding strategies and nutrient management of grazing cattle in Uruguay [PhD]. [Oklahoma (OK)]: Oklahoma State University
- Luo, J., and Ledgard, S. (2021). New Zealand dairy farm systems and key environmental effects. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 148-158. doi: 10.15302/J-FASE-2020372
- Lombardi, B., Orden, L., Varela, P., Garay, M., Iocoli, G.A., Montenegro, A., Sáez-Tovar, J., Bustamante, M., Juliarena, M., and Moral, R. (2022). Is dairy effluent an alternative for maize crop fertigation in semiarid regions? An approach to agronomic and environmental effects. *Animals*, 12(16), 2025. doi: 10.3390/ani12162025.
- Luo, J., Ledgard, S., De Klein, C., Lindsey, S., and Kear, M. (2007). Effects of dairy farming intensification on nitrous oxide emissions. *Plant and Soil*, 309, 227-237. doi: 10.1007/s11104-007-9444-9
- Lussich, F. (2020). Variabilidad de la fijación biológica de nitrógeno de leguminosas forrajeras en Uruguay: Posibles causas y consecuencias nutricionales. [master's tesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República.
- Macdonald, K. A., Penno, J. W., Lancaster, J. A. S., and Roche, J. R. (2008). Effect of Stocking Rate on Pasture Production, Milk Production, and Reproduction of Dairy Cows in Pasture-Based Systems. *Journal of Dairy Science*, 91(5), 2151-2163. doi: 10.3168/jds.2007-0630
- Mcdowell, R., Monaghan, R., Dougherty, W., Gourley, C., Vibart, R., and Shepherd, M. (2017). Balancing water-quality threats from nutrients and production in Australian

- and New Zealand dairy farms under low profit margins. *Animal Production Science*, 57. doi: 10.1071/AN16646
- Méndez, M. N., Chilbroste, P., and Aguerre, M. (2020). Pasture dry matter intake per cow in intensive dairy production systems: Effects of grazing and feeding management. *Animal*, 14(4), 846-853. doi: 10.1017/S1751731119002349
- Ministerio de Ambiente. (2020). Manual para la gestión ambiental de tambos. Ministerio de Ambiente. Available at: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-para-gestion-ambiental-tambos>. (Accessed April 20, 2024)
- NRC (Ed.). (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev. ed). National Academy Press.
- Öborn, I., Edwards, A. C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P. J. A., et al. (2003). Element balances as a tool for sustainable nutrient management: A critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*, 20(1-2), 211-225. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00080-7
- Oenema, J., and Oenema, O. (2021). Intensification Of Grassland-Based Dairy Production and its Impacts on Land, Nitrogen and Phosphorus Use Efficiencies. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8, 130. doi: 10.15302/J-FASE-2020376
- Oenema, J., and Oenema, O. (2022). Unraveling feed and nutrient use efficiencies in grassland-based dairy farms. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. doi: 10.3389/fsufs.2022.846561
- Oenema, J., van Ittersum, M., and van Keulen, H. (2012). Improving nitrogen management on grassland on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 162, 116-126. doi: 10.1016/j.agee.2012.08.012
- Oenema, O., Kros, H., and De Vries, W. (2003). Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 20(1-2), 3-16. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00067-4
- Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la República (OPP). (2020). Una prospectiva estratégica del sector Agroalimentario uruguayo. Available at: <https://www.opp.gub.uy/es/node/3817>. (Accessed March 10, 2024)

- Ortega, G., Chilibroste, P., Garrido, J. M., Waller, A., Fariña, S. R., and Lattanzi, F. A. (2023). Monitoring herbage mass and pasture growth rate of large grazing areas: A comparison of the correspondence, cost and reliability of indirect methods. *The Journal of Agricultural Science*, 161(4), 502-511. doi: 10.1017/S0021859623000333
- Ortega, G., Berberian, N., and Chilibroste, P. (2024). The effects of stocking rate, residual sward height, and forage supplementation on forage production, feeding strategies, and productivity of milking dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, 5, 1319150. doi: 10.3389/fanim.2024.1319150
- Patton, D., Pierce, K. M., and Horan, B. (2016). Effect of stocking rate on milk and pasture productivity and supplementary feed use for spring calving pasture fed dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5904-5915. doi: 10.3168/jds.2015-10305
- Pearce, A., and Maguire, R. (2020). The state of phosphorus balance on 58 Virginia dairy farms. *Journal of Environmental Quality*, 49(2), 324-334. doi: 10.1002/jeq2.20054
- Powell, J. M., Gourley, C. J. P., Rotz, C. A., and Weaver, D. M. (2010). Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science and Policy*, 13(3), 217-228. doi: 10.1016/j.envsci.2010.03.007
- Quemada, M., Lassaletta, L., Jensen, L. S., Godinot, O., Brentrup, F., Buckley, C., Foray, S., et al. (2020). Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies. *Agricultural Systems*, 177, 102689. doi: 10.1016/j.agry.2019.102689
- Ros, M. B. H., Godber, O. F., Olivo, A. J., Reed, K. F., and Ketterings, Q. M. (2023). Key nitrogen and phosphorus performance indicators derived from farm-gate mass balances on dairies. *Journal of Dairy Science*, 106(5), 3268-3286. doi: 10.3168/jds.2022-22297
- Ruane, E. M., Treacy, M., McNamara, K., and Humphreys, J. (2014). Farm-gate phosphorus balances and soil phosphorus concentrations on intensive dairy farms in the south-west of Ireland. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 53(2), 105-119.
- Shortall, J., Shalloo, L., Foley, C., Sleator, R.D., and O'Brien, B., 2016. Investment appraisal of automatic milking and conventional milking technologies in a pasture-based dairy system. *Journal of Dairy Science*. 99, 7700–7713. doi: 10.3168/jds.2016-11256.

- Stirling, S., Delaby, L., Mendoza, A., and Fariña, S. (2021). Intensification strategies for temperate hot-summer grazing dairy systems in South America: Effects of feeding strategy and cow genotype. *Journal of Dairy Science*, 104(12), 12647-12663. doi: 10.3168/jds.2021-20507
- Stirling, S., Lussich, F., Ortega, G., Manna, A., Pedemonte, A., Artagaveytia, J., Guidice, G., et al. (2024a). Balancing nitrogen at the farm gate: Economic-environmental sustainability trade-off in pastoral dairy systems of Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), p. e1243. doi: 10.31285/AGRO.28.1243
- Stirling, S., Lattanzi, F. A., Fariña, S., and Vibart, R. (2024b). Nitrogen loss partitioning and emissions in intensive subtropical hybrid dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. doi: 10.1007/s10705-024-10359-4
- Stott, K. J., and Gourley, C. J. P. (2016). Intensification, nitrogen use and recovery in grazing-based dairy systems. *Agricultural Systems*, 144, 101-112. doi: 10.1016/j.agsy.2016.01.003
- Sulieman, S., Ha, C. V., Schulze, J., and Tran, L. S. P. (2013). Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability. *Journal of Experimental Botany*, 64(10), 2701-2712. doi: 10.1093/jxb/ert122
- Tamminga, S. (2003). Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production. *Livestock Production Science*, 84(2), 101-111. doi: 10.1016/j.livprodsci.2003.09.008
- Tse, C., Barkema, H.W., DeVries, T.J., Rushen, J., Pajor, E.A., 2017. Effect of transitioning to automatic milking systems on producers' perceptions of farm management and cow health in the Canadian dairy industry. *Journal of Dairy Science*. 100, 2404–2414. doi: 10.3168/jds.2016-11521.
- White, S. L., Sheffield, R. E., Washburn, S. P., King, L. D., and Green Jr., J. T. (2001). Spatial and Time Distribution of Dairy Cattle Excreta in an Intensive Pasture System. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 2180-2187. doi: 10.2134/jeq2001.2180
- Wivstad, M., Salomon, E., and Spångberg, J. (2023). Survey of farm-gate N and P balances on arable and dairy organic and conventional farms in Sweden: Basis for improved management. *Organic Agriculture*, 13(3), 411-430. doi: 10.1007/s13165-023-00436-3

2.10. Supplementary material

Appendix 1. Confinement areas for high productivity (A, B and C) and low cost (D and E).



A, feeding parlour; B, sacrifice paddock with shade; C, bedding area; D, sacrifice paddock with shade; E, haylage feeders in sacrifice paddock.

3. Discusión

El presente estudio contribuye en la trayectoria de investigación nacional a nivel de sistemas lecheros de base pastoril que exploraron distintas productividades. Este trabajo integra diferentes combinaciones de estrategias de manejo sobre alternativas de intensificación que convergen en opciones de sistemas con posibilidad de aplicación para productores lecheros de Uruguay.

3.1. Producción anual de forraje, dieta y producción de leche por hectárea

La producción anual de forraje para ambos tratamientos es comparable a resultados experimentales obtenidos por Ortega (2024) en el mismo sitio y diferentes años, con un rango entre 7.393 y 7.973 kg MS ha⁻¹ (kg MS ha⁻¹). La sequía afectó a la producción de forraje de los tres años desde primavera a verano, con diferente grado y momento según el año (Figura 1), lo que resultó en una producción inferior a la prevista (24 %, 26 % y 5 % y 22 %, 31 % y 13 % en el año 1, 2 y 3 para AP y BC, respectivamente). Además, la seca afectó la persistencia de las pasturas e incrementó la superficie de resiembra, que resultó en mayor área en barbecho y menor superficie de plataforma pastoreo (PP) durante el otoño, especialmente en el segundo año.

En cuanto a la fijación biológica de N, los valores de este experimento están por debajo de los reportados en estudios de Uruguay, que oscilaron entre 29 y 49 kg N ha⁻¹, con 38% y 44% de leguminosas en pasturas perennes mixtas. En contraste, en este experimento, en muchos potreros disminuyó la proporción de leguminosas y en algunos se perdió en su totalidad debido al déficit hídrico, en promedio la proporción de leguminosas fue de 15%. La baja proporción de leguminosas podría explicarse por varios factores, entre ellos que la gestión del pastoreo estaba basada en las gramíneas sobre las leguminosas, intensificada por los efectos de las sequías prolongadas.

Como se preveía, no se encontraron diferencias en la producción anual de forraje para ambos tratamientos; sin embargo, la forma en que se cosechó el forraje difirió

entre AP y BC. A pesar de que AP cosechó directamente un 32 % más de forraje, el control del manejo del mismo permitió al tratamiento BC cosechar en total (directa y mecánicamente) la misma cantidad que HP. Además, BC estuvo por encima de los valores de cosecha mecánica de los predios comerciales nacionales (1367 kg y 1862 kg MS ha⁻¹ en predios nacionales y BC, respectivamente; Fariña y Chilbroste, 2019). Metodológicamente, AP no fue diseñada para tener cosecha mecánica, sin embargo, en el segundo ejercicio, se realizaron reservas de forraje debido a que la producción de forraje superó la capacidad de consumo de los animales como consecuencia de una menor carga a la programada durante la primavera. En comparación con Ortega et al. (2024), BC se posicionó entre la cantidad cosechada para cargas de 1,5 y 2,0 (2.524 y 813 kg MS ha⁻¹, respectivamente) lo que indica que a pesar de las condiciones climáticas adversas en este experimento, BC alcanzó valores de cosecha mecánica muy competitivos debido al control y planificación del manejo del forraje y su cosecha, ya sea directa o mecánica.

Una mayor carga se traduce en menor asignación de forraje por vaca y, por lo tanto, en una menor ingesta de forraje por animal, que requiere de suplementación estratégica para mantener la producción de leche individual (Baudracco et al., 2010; Patton et al., 2016; Ortega et al., 2024). En el caso de este estudio, y como se esperaba debido a la mayor carga, AP requirió mayor reserva de forraje y concentrado que BC, lo que representó menor cantidad de días con uno y dos turnos de pastoreo y mayor tiempo de permanencia en áreas de confinamiento. Los resultados obtenidos en este experimento coinciden con Ortega et al. (2024), donde el aumento de la carga de 1,5 a 2,0 incrementó 12% la proporción de tiempo con un turno de pastoreo y disminuyó 14% el tiempo con doble pastoreo. En este experimento, incrementar la carga de 1,7 en BC a 2,8 en AP, hizo que el tiempo bajo un turno de pastoreo aumente a 10% y a doble turno disminuya 18%. Estos resultados demuestran que inevitablemente, la intensificación a través del incremento en la carga disminuye la oportunidad de pastoreo, y, por lo tanto, los animales deberán pasar mayor tiempo en áreas de confinamiento. Esto hace que la infraestructura adquiera una relevancia clave en el desempeño del sistema, ya sea para la sostenibilidad ambiental, así como el bienestar animal.

La producción individual de leche no se vio afectada por el tratamiento. Estos resultados coinciden con hallazgos similares obtenidos en sistemas de base pastoril intensificados con diferentes cargas (Baudracco et al., 2011; Fariña et al., 2011; Ortega et al. 2024). Sin embargo, otros trabajos han comprobado que la producción individual de leche puede verse afectada negativamente por incrementos en la carga, debido a una reducción de la ingesta individual de MS del pasto (Macdonald et al., 2008). En el presente estudio, el manejo de la alimentación se estableció para mantener un objetivo de producción de leche por animal, que requería un determinado consumo de MS; en ese caso, si la producción de forraje no era suficiente, se incluía la suplementación para lograr los resultados previamente estipulados.

La mayor intensificación no afectó la producción anual de forraje, pero sí la forma de cosecharlo. Por otra parte, tuvo un efecto en la estrategia de alimentación, AP se basó en mayor medida del alimento comprado que BC, que dependió del forraje producido en el sistema; por lo tanto, por más de que ambos tratamientos se vieron afectados por la sequía, BC no pudo expresar completamente su potencial, ya que la reserva producida no fue suficiente, sobre todo los dos primeros años. La carga de cada tratamiento determinó la estrategia de alimentación y esta estuvo ligada al tiempo de permanencia en áreas de confinamiento o a las oportunidades de pastoreo, lo que refleja la importancia de una infraestructura apropiada para estas formas de intensificación.

3.2. Balance de nutrientes

Las estrategias de intensificación determinaron entradas y excedentes de N, P y K superiores para AP que para BC en concordancia con la bibliografía (Gourley, 2012; Stirling et al., 2024a). Ambos tratamientos tenían diferentes fuentes principales de insumos: para AP fueron los alimentos (concentrado y reservas forrajeras), mientras que para BC fueron los fertilizantes. Los concentrados y las reservas de forraje fueron los insumos que explican en mayor medida las diferencias entre tratamientos, lo que refleja las diferentes estrategias de alimentación de cada tratamiento: AP depende más

de los alimentos externos, mientras que BC basa el consumo de reservas forrajeras en la producción de la primavera anterior dentro de la PP.

Existen diferencias en cuanto a la unidad de superficie utilizada en la bibliografía de los balances de nutrientes. Algunos estudios basaron los cálculos en la PP, que excluye la superficie de apoyo y las vacas secas (Gourley, 2012; De Klein et al., 2017), mientras que otros estudios realizaron sus cálculos basándose en la superficie vaca masa (VM; superficie para las vacas de ordeño más superficie para el ganado seco más superficie de apoyo). En este experimento, las reservas forrajeras de AP (ensilado) se produjeron en un área de apoyo y los insumos contabilizados fueron el contenido de nutrientes de los alimentos comprados. Si se considera la VM en lugar de la PP como unidad de superficie, inevitablemente los valores de las entradas varían, sobre todo en el caso de AP, en que la mayoría de los insumos proceden de la alimentación. Los resultados hicieron que los insumos disminuyeran un 20 %, 9 % y 25 % para N, P y K, respectivamente, para AP, mientras que BC no tuvo mayores cambios para N y P, y aumentó un 10 % para K. La disminución de las importaciones de nutrientes para AP al cambiar de VM a PP se explica por el aumento de la superficie total debido a la superficie de apoyo (4 ha); además, los nutrientes de las reservas de forraje son sustituidos por el fertilizante utilizado para producirlo, lo que disminuye el insumo más alto. No obstante, en los dos primeros años, el excedente de reservas forrajeras fue negativo debido a la sequía que afectó la producción de forraje, mientras que, para el último año, ocurrió lo contrario debido a mejores producciones explicadas por mayores precipitaciones estivales; sin embargo, fue necesario utilizar alimento comprado para los tres años en estudio. La inclusión de las vacas secas y la superficie de apoyo de la superficie VM hizo disminuir las entradas por concentrado en un 20 % para N, P y K, y las reservas de forraje disminuyeron un 48 %, 32 % y 31 % para P, K y N, respectivamente.

Los datos nacionales de balance de nutrientes han evaluado estudios de sistemas experimentales con diferentes opciones de estrategias de intensificación (Ortega et al., 2024; Stirling et al., 2021a) y los sistemas comerciales promedios (Inale, 2022; Stirling et al., 2024a). Los datos nacionales se basan en VM; por lo tanto, se utilizará esta unidad para las comparaciones en este caso. Los resultados posicionan a BC entre los

sistemas CRS 2.0 y GFix-NAHF y AP entre GFix-NZHF y GMax-NAHF con cargas de 1,74, 1,70, 2,29 1,79 y excedentes de N de 133, 179, 202, 299, 245 y 250 kg ha⁻¹ para CRS 2.0, LC, GFix-NAHF, GFix-NZHF, AP y GMax-NAHF, respectivamente. Además, en comparación con los excedentes de los predios comerciales, BC y AP superan esos valores en un 64 % y 70 %, respectivamente (Stirling et al., 2024a).

Los estudios sobre sistemas lecheros de base pastoril establecen que hay una relación positiva entre intensificación y excedentes, como este estudio y los datos nacionales (De Klein et al., 2017; Gourley, 2012; Quemada et al., 2020; Stirling et al., 2024a; Stott y Gourley, 2016). Por ejemplo, una investigación en la que se analizó un período de 22 años (1999-2012) de constante intensificación en Australia reveló que, junto con un aumento de la carga de 1,4 a 1,6 vacas por hectárea de superficie productiva (producción de pastos y cultivos, vacas secas, cría de ganado joven, etc.), se produjo un incremento del 60 % de los alimentos comprados y del 21 % de los fertilizantes nitrogenados, lo que dio lugar a un aumento sustancial del excedente de N de 54 a 158 kg N ha⁻¹ (Stott y Gourley, 2016). Del mismo modo, un estudio realizado en Nueva Zelanda (Luo y Ledgard, 2021) descubrió que pasar de cargas de 2,65 a 2,85 vacas ha⁻¹ iba acompañado de un aumento del 30 % en el uso de fertilizantes de N y del doble de fuentes externas de alimentación. La superficie contabilizada en los estudios de Australia y Nueva Zelanda (Stott y Gourley, 2016; Luo y Ledgard, 2021) difiere de la de este trabajo, por lo que las variaciones de los insumos no son completamente comparables debido a las diferentes áreas unitarias. Igual así, de forma similar a los resultados de estos países, el incremento de carga en este estudio de 1,7 a 2,8 representó un aumento del 63 % en los alimentos comprados. Además, no hubo diferencias en el uso de fertilizante nitrogenado entre BC y AP. Sin embargo, cuando se analizan estos tratamientos en términos de VM, se observa una mayor fertilización para AP, debido a la superficie de apoyo necesaria para mantener la mayor carga.

Un mayor excedente se asocia a un aumento de la pérdida de nutrientes en el medioambiente (Luo et al., 2007; Powell et al., 2010; Dalgaard et al., 2012; Stirling et al., 2024a). En este término, se ha realizado un estudio de cuatro sistemas lecheros en Uruguay con estrategias de alimentación y genotipos contrastantes, donde se estimaron las pérdidas ambientales por excedente de N (Stirling et al., 2024a). Además, Stirling

et al. (2024b) descubrieron que la lixiviación y la volatilización eran las principales vías de pérdida de nutrientes, y determinaron que los comederos y las zonas de descanso, concentrando el 60 % de las pérdidas de nutrientes en tan solo el 6 % de la superficie, seguidos por los períodos de barbecho.

Los valores de excedentes de N en este experimento nos llevan a pensar en las posibles pérdidas al medioambiente: AP representa un mayor riesgo que BC debido a su mayor excedente por mayor tiempo de permanencia en áreas de confinamiento (55 % vs. 40 %), mayor uso de alimentos externos y producción de ensilado de maíz; por lo tanto, más períodos de barbecho por posibles pérdidas de N. Sin embargo, las pérdidas de nutrientes también dependen de cómo esté diseñada la infraestructura; en este caso, AP tenía mayores posibilidades de gestión y almacenamiento de estiércol (cama seca al aire libre y comedero) que LC, que solo cuenta con una zona de potrero de descanso. A medida que se desarrolla la intensificación de los sistemas lecheros, la infraestructura debe ser tenida en cuenta a la hora de diseñar este tipo de sistemas, identificada como una de las principales restricciones para el crecimiento sustentable en los sistemas lecheros uruguayos (Aguerre et al., 2018; Fariña y Chilbroste, 2019; Ortega et al., 2023).

Los valores de excedentes de P y K en los sistemas en estudio fueron superiores en magnitud a la media de la bibliografía, aunque dentro de los rangos esperados (Wivstad et al., 2023). Para la media de los tres años, las principales entradas de P y K fueron alimentos comprados para AP y LC. En sistemas lecheros intensificados de Estados Unidos y Australia, los alimentos también resultaron ser la mayor entrada de P y se correlacionó significativamente con el excedentes de P, como en este experimento (Gourley, 2012; Pearce y Maguire, 2020). Muchos estudios encontraron balances negativos debido a la dependencia de la capacidad de entrega del suelo y a la no fertilización con P o K, lo que puede utilizarse como herramienta cuando los valores iniciales del suelo son altos (Oenema et al., 2003). En este caso, los suelos fueron fertilizados de acuerdo con los análisis de suelo para minimizar las pérdidas potenciales; de hecho, no hubo fertilización de K en los tres años y para el P en el último año, debido a los altos niveles en suelo para ambos nutrientes. Si se tiene en cuenta que las vacas lecheras pueden excretar hasta el 66 % de los nutrientes

importados al sistema y que su distribución depende del tiempo que las vacas pasan en un área en específico (Aarons et al., 2017, 2023), se espera para ambos tratamientos de este estudio una alta saturación de nutrientes en zonas concretas debido a los desequilibrios en P y K para ambos tratamientos. En este contexto, es importante que los sistemas lecheros de base pastoril integren estrategias de mitigación para evitar la pérdida de nutrientes a arroyos y aguas superficiales como el mantenimiento de áreas de amortiguación, evitar el uso de fertilizantes en años con fuertes precipitaciones (Alfaro et al., 2008), rotaciones de larga duración para minimizar la pérdida de suelo por erosión (Mcdowell et al., 2017) y que incluyan cultivos con alta extracción de P como las leguminosas (Sulieman et al., 2013).

Datos de predios lecheros de Europa, Nueva Zelanda y EE. UU. Confirman la tendencia de aumento del excedente con el incremento de la intensificación, reflejada en mayores insumos, excedentes y salidas (De Klein et al., 2017). Sin embargo, un estudio en Países Bajos (Oenema y Oenema, 2021), encontró que el excedente se mantuvo igual a pesar de la intensificación, lo que se explica por un equilibrio entre los incrementos de las entradas de alimentos y las salidas de leche, animales y exportación de estiércol. En este estudio, las entradas y salidas no se equilibraron con más salidas de estiércol debido a la ausencia de planificación en el manejo de efluentes, por lo que esto surge como una oportunidad interesante para controlar el excedente en sistemas más intensificados.

Las diferencias en la EU de N fueron menores entre los tratamientos AP y LC. En estudios nacionales (La Manna y Durán, 2008) encontraron que la eficiencia de utilización de N de diferentes estrategias de intensificación de predios lecheros de Uruguay varió entre 22 % y 66 %; predios con EU mayores a 60 % correspondieron a sistemas menos intensificados. Quemada et al. (2020) reporta valores de EU de N de 38 % como un desempeño bueno, que ubica a AP y BC en un lugar favorable, aunque con un gran espacio para mejorarlo. Sin embargo, un recurso que podría mejorar la EU y no fue explorado, fue la reutilización y manejo de efluentes que resultaría en un menor uso de fertilizantes. Por ejemplo, estudios encontraron resultados comparables de producción de forraje o rendimiento de cultivos agrícolas, contenido de nutrientes

del suelo, actividad microbiana y baja carga de patógenos cuando se utilizan efluentes en comparación con la fertilización con urea (Lombardi, 2023; Illarze et al., 2024).

Resultados de De Klein et al. (2017) encontraron que los sistemas lecheros que logran EU de N cercanas al 40 %, tuvieron entradas de N inferiores a 400 kg ha⁻¹; en este caso, AP tuvo mayores entradas, mientras que BC estuvo por debajo de este parámetro y alcanzó resultados de eficiencia de utilización de N similares. La relación entre eficiencia de utilización de N e intensificación es más compleja: algunos autores afirmaron una tendencia negativa (De Klein et al., 2017), mientras que para los datos nacionales se ha encontrado un pico en valores que rondan los 100 kg ha⁻¹ de entradas de N, que no estaba relacionado con ninguna composición específica de las mismas (Stirling et al., 2024a). La relación entre entradas y EU de N para AP podría deberse a la mayor entrada de concentrado que BC, que se convierte con mayor eficiencia en leche. Por otro lado, en BC ingresó más N a través del fertilizante, que primero tiene un impacto en el pasto y luego puede ser utilizado con cierta eficiencia de cosecha para finalmente ser transformado en leche.

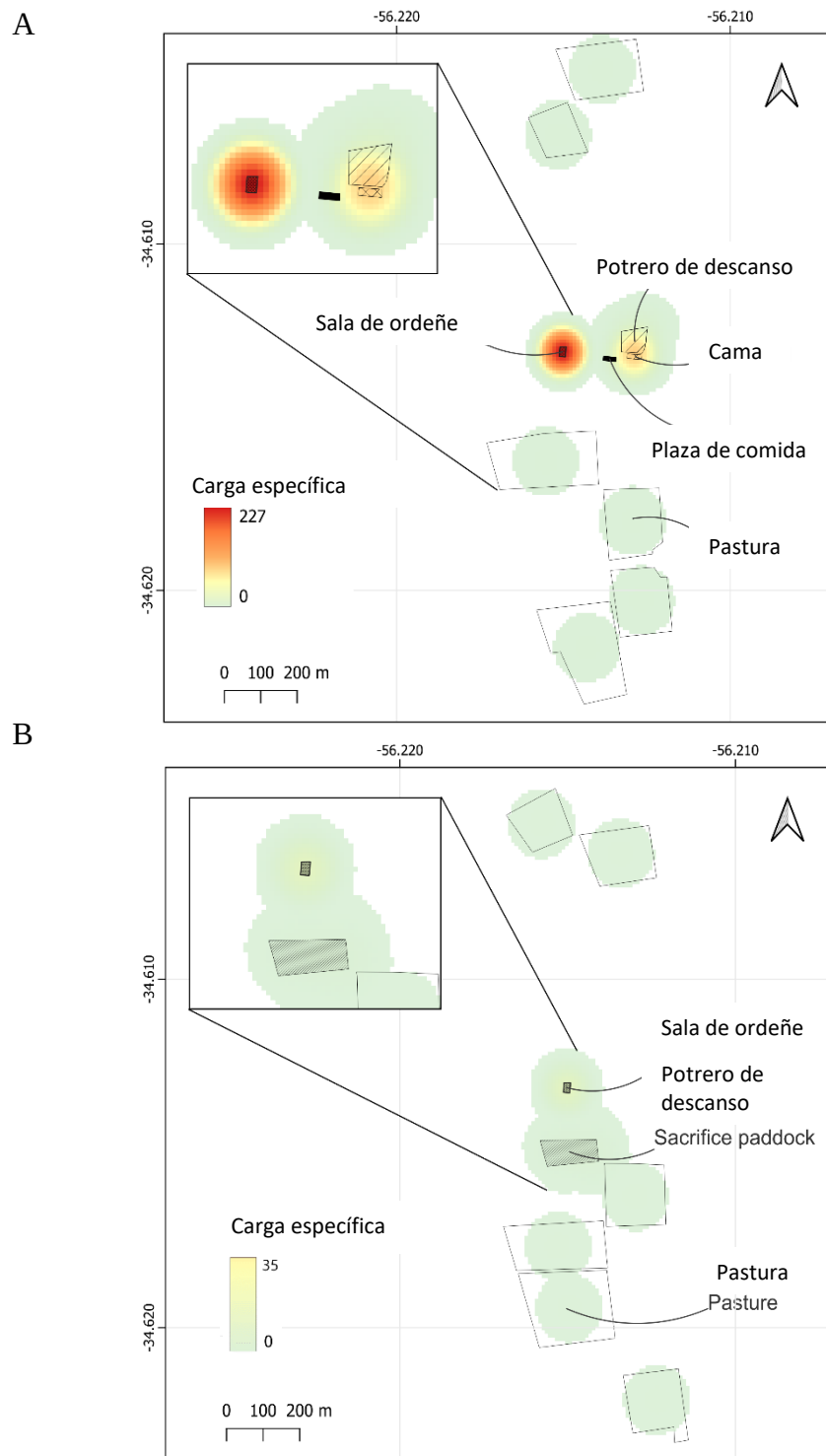
La EU de nutrientes depende de las entradas y salidas, donde una gran parte de las entradas procede de alimentos externos, y las pérdidas de nutrientes de estos alimentos no se tienen en cuenta en los balances de nutrientes ni en la EU de nutrientes. En este sentido, algunos autores afirman que, cuando se tiene en cuenta la externalización de la producción de alimento y la utilización de estiércol, la EU del N disminuye (De Klein et al., 2017; Oenema y Oenema, 2022; Quemada et al., 2020). En este sentido, Quemada et al. (2020) destacan la importancia de considerar factores de ajuste debido al efecto sobre los indicadores de N, y proponen factores de ajuste. En el caso de este estudio, si se aplica el factor de ajuste para calcular la EU de N de 50 % sobre el ingreso neto de N del alimento, la EU de N de AP disminuiría más que la de BC, debido a la mayor dependencia de alimento comprado. La EU de N disminuiría un 12 % y un 9 % para AP y BC, respectivamente. Estos resultados demuestran que, a medida que aumenta la intensificación, hay una mayor dependencia de insumos externos, sobre todo de los alimentos, y la contabilización de la externalización integra pérdidas que no se tenían en cuenta; además, va un paso más allá al relacionar el balance puerta con las pérdidas de nutrientes.

La relación entre el balance de nutrientes y el impacto ambiental no está clara (Öborn et al., 2003); sin embargo, sí se sabe que los nutrientes no están distribuidos de forma homogénea en el sistema (Gourley et al., 2015) y las pérdidas de nutrientes pueden acentuarse en las zonas calientes donde estos se concentran (Stirling et al., 2024b). Dado que el tiempo de permanencia en una zona está positivamente correlacionado con los nutrientes excretados (White et al., 2001), se estimó el tiempo de permanencia de los animales en un área determinada para cada tratamiento. Para esta estimación, se calculó un indicador presentado a continuación:

$$\text{Eq 1. Carga específica} = N / A \times t$$

Donde N representa el número de animales, A es la superficie ocupada por los animales (es decir, área de la sala de ordeño, zonas de confinamiento como los potreros de descanso y la cama a cielo abierto y los potreros de pastoreo) y t es el tiempo que los animales permanecieron en cada área (Figura 2).

Figura 2. Mapa térmico de la carga animal específica para alta productividad (A) y bajo costo (B).



Para cada tratamiento, los nutrientes se concentraron especialmente en la sala de ordeño y, en segundo lugar, en las áreas de confinamiento, y para AP el área de cama fue mayor que el área de sacrificio debido a la mayor carga y al tiempo pasado en esos lugares. Para los potreros de pastoreo, no hubo diferencia entre tratamientos, lo que indica que el tiempo de pastoreo está limitado por su producción e, independientemente de la carga, está regulado por las decisiones de manejo aplicadas para ambos tratamientos. Por lo tanto, a pesar de que AP tuvo mayor carga que LC, con la corrección por el tiempo (45 % vs. 63 % del tiempo de pastoreo para AP y LC, respectivamente) la carga específica de los potreros en pastoreo fue similar para ambos tratamientos (1,2 y 1,1 para AP y BC, respectivamente), que podría interpretarse que los nutrientes van a ser igualmente excretados en los potreros de pastoreo. Estos resultados son consistentes con los datos de predios lecheros comerciales de Australia que estudiaron la distribución de P, K y S en el suelo y encontraron que los valores más altos de nutrientes estaban asociados con los potreros nocturnos, parto, sacrificio y áreas de aplicación de efluentes (Gourley et al., 2015). Además, una caracterización de nutrientes de potreros de sacrificio de tambos comerciales en Uruguay determinó concentraciones de nutrientes que van de 7 a 176 mg N kg⁻¹ en los primeros 7,5 cm y de 45 a 302 mg P kg⁻¹, muy por encima del límite recomendado para suelos uruguayos (31 ppm; Ministerio de Ambiente, 2020). A diferencia de Uruguay, en los sistemas lecheros de Nueva Zelanda, la principal fuente de lixiviación de N se ha identificado en la pastura (De Klein et al., 2010), mientras que, en los sistemas lecheros uruguayos, Stirling et al. (2024b) determinaron que el 60 % de las pérdidas de N estimadas ocurrían en el 6 % de la superficie en los comederos, caminos y lugares de almacenaje de efluentes, como en este estudio.

Saber dónde se concentran los nutrientes en cada tipo de sistema es extremadamente importante para saber dónde poner los esfuerzos en el desarrollo de infraestructuras adecuadas que mejoren la reutilización de nutrientes y su distribución. En este contexto, ambos tratamientos pueden gestionar los efluentes en la sala de ordeño y, en el caso de AP, también existían posibilidades de gestión de efluentes en la sala de alimentación y en la cama a cielo abierto. La cama a cielo abierto de AP fue diseñada para ser utilizada en condiciones de barro; por lo tanto, los dos primeros años

tuvo poco uso, mientras que para el último año su uso aumentó. Del tiempo total en las áreas de confinamiento, las vacas AP pasaron el 7 %, 9 % y 29 % del tiempo en el área de cama y el resto en el potrero de sacrificio, donde no se hizo manejo de efluentes. Si bien los animales AP pasaron más tiempo en las zonas donde no hay gestión de efluentes, fue superior al de las vacas BC, con un tiempo medio en los tres años del 15 % y el 2 % para AP y BC, respectivamente. Esto demuestra la importancia de entender en dónde pasan el tiempo los animales, sobre todo el tiempo en confinamiento, que se acentúa en los sistemas lecheros intensificados, ya sea para capturar el estiércol o para introducir estrategias de mitigación.

3.3. Investigación a futuro

La investigación futura debería priorizar la generación de información para mejorar la precisión y el conocimiento de las incertidumbres de los modelos predictivos adaptados a nuestra región. Los estudios orientados a este objetivo deberían centrarse en estimaciones de balances de nutrientes a través de diversas estrategias de intensificación lechera, con especial énfasis en P y K, dada la limitada información nacionales disponible. Considerando que los sistemas lecheros nacionales pasan un tiempo considerable en áreas de confinamiento, es necesario producir datos sobre mediciones directas de pérdidas de nutrientes bajo diferentes estrategias de mitigación, junto con infraestructura que permita capturar nutrientes, como el uso de la cama a cielo abierto como espacio estructural de confinamiento en lugar de los convencionales potreros de sacrificio. Además, la evaluación del impacto de la recirculación de efluentes en los balances de nutrientes, la producción de forraje y los resultados económicos proporcionará información y orientación valiosa para políticas sectoriales de producción sostenible.

4. Conclusiones

Este estudio demostró que, a pesar de que el aumento de la intensificación se incrementa la productividad, también presenta importantes retos en la gestión de nutrientes y el impacto ambiental. Las dos estrategias de intensificación evaluadas no afectaron la producción ni cosecha total del forraje, pero sí difirieron en el método de cosecha (directa o mecánica) y determinaron las diferentes estrategias de alimentación para cada tratamiento. Las condiciones climáticas severas impulsaron ajustes en las estrategias de alimentación y en las decisiones de fertilización, lo que repercutió en el aporte de nutrientes en los ejercicios evaluados. La mayor intensificación se asoció a una alta dependencia de insumos externos y como consecuencia, también de excedentes de nutrientes, que potencialmente aumenta el riesgo de pérdidas al ambiente, especialmente en las zonas de confinamiento. Aunque los animales en el tratamiento AP permanecieron más tiempo en confinamiento con alimento importado en comparación con BC, los nutrientes en ambos sistemas se concentraron en zonas sin gestión de efluentes, lo que demuestra la importancia de infraestructuras acordes con la escala de intensificación. En este caso, la cama a cielo abierto se presenta como una potencial solución al manejo de efluentes en áreas de confinamiento para sistemas intensificados con tiempo en encierro. Además, la planificación en la gestión de efluentes se presenta como una oportunidad para reducir los aportes de fertilizantes mejorando el reciclaje de nutrientes dentro de los sistemas. Por lo tanto, la integración de la infraestructura y las estrategias de reciclaje de nutrientes es esencial para encontrar el punto de equilibrio entre la productividad y la sostenibilidad de los sistemas lecheros intensificados en Uruguay.

5. **Bibliografía**

- Aarons, S. R., Gourley, C. J. P., y Hannah, M. C. (2017). Measuring spatial and temporal variation in lactating dairy cow placement on diverse grazing system farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 248, 175-189. doi: 10.1016/j.agee.2017.07.010
- Aarons, S. R., Gourley, C. J. P., y Powell, J. M. (2023). Estimating Excreted Nutrients to Improve Nutrient Management for Grazing System Dairy Farms. *Animals*. 13(8), 1404. doi: 10.3390/ani13081404
- Agricultural Research Council. (1994). The nutrient requirements of ruminant livestock. Slough: CAB International.
- Aguerre, M., Mendez, N., Torterolo, S., y Chilibraste, P. (2018). Dimensionamiento y característica de la infraestructura en sistemas lecheros comerciales 1: Animales en lactancia, VI Congreso AUPA, Tacuarembó, Uruguay, 19 - 21 March. pp. 161. (In spanish).
- Alfaro, M., Salazar Sperberg, F., Iraira, S., Teuber, N., Villarroel, D., y Ramirez, L. (2008). Nitrogen, Phosphorus and Potassium Losses in a Grazing System with Different Stocking Rates in a Volcanic Soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(2), 68. doi: 10.4067/S0718-58392008000200004
- Arocena, R., Chalar, G., y Pacheco, J. P. (2018). Agriculture and elevation are the main factors for Pampasic stream habitat and water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 254. doi: 10.1007/s10661-018-6622-6
- Barreto, P., Dogliotti, S., y Perdomo, C. (2017). Surface Water Quality of Intensive Farming Areas Within the Santa Lucia River Basin of Uruguay. *Air, Soil and Water Research*, 10, 1-8. doi: 10.1177/1178622117715446
- Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Holmes, C., y Macdonald, K. (2010). Effects of stocking rate, supplementation, genotype and their interactions on grazing dairy systems: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(2), 109-133. doi: 10.1080/00288231003777665
- Baudracco, J., Lopez-Villalobos, N., Romero, L.A., Scandolo, D., Maciel, M., Comeron, E.A., Holmes, C.W et al. (2011). Effects of stocking rate on pasture production, milk

- production and reproduction of supplemented crossbred Holstein–Jersey dairy cows grazing lucerne pasture. *Animal Feed Science and Technology*, 168(1-2), 131-143. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.03.017
- Cela, S., Ketterings, Q. M., y Czymmek, K. (2014). Characterization of nitrogen, phosphorus, and potassium mass balances of dairy farms in New York State. *Journal of Dairy Science*, 97(12), 7614-7632. doi: 10.3168/jds.2014-8467
- Chalar, G., Garcia-Pesenti, P., Silva-Pablo, M., Perdomo, C., Olivero, V., y Arocena, R. (2017). Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production. *Limnologica*, 65, 76-84. doi: 10.1016/j.limno.2017.06.002
- Chilibroste, P., Battagazzore, G., Fariña, S. (2024). Productivity versus area: The growth dilemma of the Uruguayan dairy sector. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), Article NE1. doi: 10.31285/AGRO.28.1236
- Ciganda, V., y La Manna, A. (2009). Acumulación y distribución de nutrientes en suelos de potreros sacrificio en predios lecheros de Uruguay. *Revista Argentina de Producción Animal*, 29(supl. 1), 375-376. 32° Congreso AAPA. (In spanish).
- CONAPROLE. (s.f.). Lecheras [en línea]. Disponible en: <http://www.eleche.com.uy/files/planilla-lechera-w-2008?es> [Fecha de acceso: 22 agosto 2024]
- Dalgaard, T., Bienkowski, J., Bleeker, A., Drouet, J., Durand, P., Dragosits, U., Frumau, A., et al. (2012). Farm nitrogen balances in six European agricultural landscapes—A method for farming system assessment, emission hotspot identification, and mitigation measure evaluation. 9, 5303-5321. doi: 10.5194/bg-9-5303-2012
- De Klein, C., Monaghan, R., Alfaro, M., Gourley, C., Oenema, O., y Powell, M. (2017). Nitrogen performance indicators for dairy production systems. *Soil Research*, 55, 479-488. doi: 10.1071/SR16349
- De Klein, C., Monaghan, R., Ledgard, S., y Shepherd, M. (2010). A system's perspective on the effectiveness of measures to mitigate the environmental impacts of nitrogen losses from pastoral dairy farming. *Proceedings of the Australasian Dairy Science Symposium*, 4, 14-28.

- Deloitte. (2017). Global Dairy Sector: Trends and opportunities. Disponible en: <https://www.deloitte.com/ie/en/pages/consumer-industrial-products/articles/global-dairy-trends-2017.html> (Accessed October 28, 2024)
- Dirección de Estadística Agropecuaria (DIEA). (2023). Anuario Estadístico Agropecuario 2023. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2023>. (Accessed March 13, 2024)
- Fariña, S., y Chilibróste, P. (2019). Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay. *Agricultural Systems*, 176, 102631. doi: 10.1016/j.agry.2019.05.001
- Fariña, S., García, S., Fulkerson, W., y Barchia, I. (2011). Pasture-based dairy farm systems increasing milk production through stocking rate or milk yield per cow: Pasture and animal responses. *Grass and Forage Science*, 66, 316-332. doi: 10.1111/j.1365-2494.2011.00795.x
- Gourley, C. (2012). Farm-scale nitrogen, phosphorus, potassium and sulphur balances and use efficiencies on Australian dairy farms. *Animal Production Science*, 52, 929-944.
- Gourley, C. P., Aarons, S. R., Hannah, M. C., Awty, I. M., Dougherty, W. J., y Burkitt, L. L. (2015). Soil phosphorus, potassium and sulphur excesses, regularities and heterogeneity in grazing-based dairy farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 201, 70-82. doi: 10.1016/j.agee.2014.12.010
- Gutiérrez, S., Cabrera, N., Benítez, A., y Melani, E. (2009). Reducing variability in estimating wastewater composition in dairy farms during milking operations. *Biosystems Engineering*, 103(4), 497-503. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.004
- Contzen, S., y Häberli, I. (2021). Exploring dairy farmers' quality of life perceptions – A Swiss case study. *Journal of Rural Studies*, 88, 227-238. doi: 10.1016/j.jrurstud.2021.11.007
- Illarze, G., Del Pino, A., Azzíz, G., y Irisarri, P. (2024). Effect of untreated and stabilized dairy effluent applications on soil fertility and associated health risks. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), p. e1184. doi: 10.31285/AGRO.28.1184.

- Instituto Nacional de la Leche (INALE). Encuesta Lechera 2019: Resultados preliminares. Disponible en: <https://www.inale.org/estadisticas/encuesta-lechera-2019-resultados-preliminares/>. (Accessed July 23, 2024)
- Instituto Nacional de la Leche (INALE). (2022). Sistemas de producción de leche de Uruguay. Disponible en: <https://www.inale.org/informes/sistemas-de-produccion-de-leche-de-uruguay/>. (Accessed March 11, 2024)
- La Manna, A., y Durán, H. (2008). Balance de nutrientes en tambos, una primera aproximación al proceso de intensificación y su potencial impacto en el ambiente, XXXVI Jornadas Uruguayas de Buiatría, Paysandú, Uruguay, 12-14 June. Paysandú: CMV, 12-17. (In spanish)
- LaManna, A. (2002). Feeding strategies and nutrient management of grazing cattle in Uruguay [PhD]. [Oklahoma (OK)]: Oklahoma State University
- Luo, J., y Ledgard, S. (2021). New Zealand dairy farm systems and key environmental effects. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 148-158. doi: 10.15302/J-FASE-2020372
- Lombardi, B., Orden, L., Varela, P., Garay, M., Iocoli, G.A., Montenegro, A., Sáez-Tovar, J., Bustamante, M., Juliarena, M., y Moral, R. (2022). Is dairy effluent an alternative for maize crop fertigation in semiarid regions? An approach to agronomic and environmental effects. *Animals*, 12(16), 2025. doi: 10.3390/ani12162025.
- Luo, J., Ledgard, S., De Klein, C., Lindsey, S., y Kear, M. (2007). Effects of dairy farming intensification on nitrous oxide emissions. *Plant and Soil*, 309, 227-237. doi: 10.1007/s11104-007-9444-9
- Lussich, F. (2020). Variabilidad de la fijación biológica de nitrógeno de leguminosas forrajeras en Uruguay: Posibles causas y consecuencias nutricionales. [master's tesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República.
- Macdonald, K. A., Penno, J. W., Lancaster, J. A. S., y Roche, J. R. (2008). Effect of Stocking Rate on Pasture Production, Milk Production, and Reproduction of Dairy Cows in Pasture-Based Systems. *Journal of Dairy Science*, 91(5), 2151-2163. doi: 10.3168/jds.2007-0630
- Mcdowell, R., Monaghan, R., Dougherty, W., Gourley, C., Vibart, R., y Shepherd, M. (2017). Balancing water-quality threats from nutrients and production in Australian

- and New Zealand dairy farms under low profit margins. *Animal Production Science*, 57. doi: 10.1071/AN16646
- Méndez, M. N., Chilibróste, P., y Aguerre, M. (2020). Pasture dry matter intake per cow in intensive dairy production systems: Effects of grazing and feeding management. *Animal*, 14(4), 846-853. doi: 10.1017/S1751731119002349
- Ministerio de Ambiente. (2020). Manual para la gestión ambiental de tambos. Ministerio de Ambiente. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/manual-para-gestion-ambiental-tambos>. (Accessed April 20, 2024)
- NRC (Ed.). (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev. ed). National Academy Press.
- Öborn, I., Edwards, A. C., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P. J. A., et al. (2003). Element balances as a tool for sustainable nutrient management: A critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*, 20(1-2), 211-225. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00080-7
- Oenema, J., y Oenema, O. (2021). Intensification Of Grassland-Based Dairy Production and its Impacts on Land, Nitrogen and Phosphorus Use Efficiencies. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8, 130. doi: 10.15302/J-FASE-2020376
- Oenema, J., y Oenema, O. (2022). Unraveling feed and nutrient use efficiencies in grassland-based dairy farms. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. doi: 10.3389/fsufs.2022.846561
- Oenema, J., van Ittersum, M., y van Keulen, H. (2012). Improving nitrogen management on grassland on commercial pilot dairy farms in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 162, 116-126. doi: 10.1016/j.agee.2012.08.012
- Oenema, O., Kros, H., y De Vries, W. (2003). Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 20(1-2), 3-16. doi: 10.1016/S1161-0301(03)00067-4
- Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la República (OPP). (2020). Una prospectiva estratégica del sector Agroalimentario uruguayo. Disponible en: <https://www.opp.gub.uy/es/node/3817>. (Accessed March 10, 2024)

- Ortega, G., Chilibraste, P., Garrido, J. M., Waller, A., Fariña, S. R., y Lattanzi, F. A. (2023). Monitoring herbage mass and pasture growth rate of large grazing areas: A comparison of the correspondence, cost and reliability of indirect methods. *The Journal of Agricultural Science*, 161(4), 502-511. doi: 10.1017/S0021859623000333
- Ortega, G., Berberian, N., y Chilibraste, P. (2024). The effects of stocking rate, residual sward height, and forage supplementation on forage production, feeding strategies, and productivity of milking dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, 5, 1319150. doi: 10.3389/fanim.2024.1319150
- Patton, D., Pierce, K. M., y Horan, B. (2016). Effect of stocking rate on milk and pasture productivity and supplementary feed use for spring calving pasture fed dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5904-5915. doi: 10.3168/jds.2015-10305
- Pearce, A., y Maguire, R. (2020). The state of phosphorus balance on 58 Virginia dairy farms. *Journal of Environmental Quality*, 49(2), 324-334. doi: 10.1002/jeq2.20054
- Powell, J. M., Gourley, C. J. P., Rotz, C. A., y Weaver, D. M. (2010). Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environmental Science and Policy*, 13(3), 217-228. doi: 10.1016/j.envsci.2010.03.007
- Quemada, M., Lassaletta, L., Jensen, L. S., Godinot, O., Brentrup, F., Buckley, C., Foray, S., et al. (2020). Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies. *Agricultural Systems*, 177, 102689. doi: 10.1016/j.agry.2019.102689
- Ros, M. B. H., Godber, O. F., Olivo, A. J., Reed, K. F., y Ketterings, Q. M. (2023). Key nitrogen and phosphorus performance indicators derived from farm-gate mass balances on dairies. *Journal of Dairy Science*, 106(5), 3268-3286. doi: 10.3168/jds.2022-22297
- Ruane, E. M., Treacy, M., McNamara, K., y Humphreys, J. (2014). Farm-gate phosphorus balances and soil phosphorus concentrations on intensive dairy farms in the south-west of Ireland. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 53(2), 105-119.
- Shortall, J., Shalloo, L., Foley, C., Sleator, R.D., O'Brien, B., 2016. Investment appraisal of automatic milking and conventional milking technologies in a pasture-based dairy system. *Journal of Dairy Science*. 99, 7700–7713. doi: 10.3168/jds.2016-11256.

- Stirling, S., Delaby, L., Mendoza, A., y Fariña, S. (2021). Intensification strategies for temperate hot-summer grazing dairy systems in South America: Effects of feeding strategy and cow genotype. *Journal of Dairy Science*, 104(12), 12647-12663. doi: 10.3168/jds.2021-20507
- Stirling, S., Lussich, F., Ortega, G., Manna, A., Pedemonte, A., Artagaveytia, J., Guidice, G., et al. (2024a). Balancing nitrogen at the farm gate: Economic-environmental sustainability trade-off in pastoral dairy systems of Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), p. e1243. doi: 10.31285/AGRO.28.1243
- Stirling, S., Lattanzi, F. A., Fariña, S., y Vibart, R. (2024b). Nitrogen loss partitioning and emissions in intensive subtropical hybrid dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. doi: 10.1007/s10705-024-10359-4
- Stott, K. J., y Gourley, C. J. (2016). Intensification, nitrogen use and recovery in grazing-based dairy systems. *Agricultural Systems*, 144, 101-112. doi: 10.1016/j.agry.2016.01.003
- Suliman, S., Ha, C. V., Schulze, J., y Tran, L. S. P. (2013). Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability. *Journal of Experimental Botany*, 64(10), 2701-2712. doi: 10.1093/jxb/ert122
- Tamminga, S. (2003). Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production. *Livestock Production Science*, 84(2), 101-111. doi: 10.1016/j.livprodsci.2003.09.008
- Tse, C., Barkema, H.W., DeVries, T.J., Rushen, J., Pajor, E.A., 2017. Effect of transitioning to automatic milking systems on producers' perceptions of farm management and cow health in the Canadian dairy industry. *Journal of Dairy Science*. 100, 2404–2414. doi: 10.3168/jds.2016-11521.
- White, S. L., Sheffield, R. E., Washburn, S. P., King, L. D., y Green Jr., J. T. (2001). Spatial and Time Distribution of Dairy Cattle Excreta in an Intensive Pasture System. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 2180-2187. doi: 10.2134/jeq2001.2180
- Wivstad, M., Salomon, E., y Spångberg, J. (2023). Survey of farm-gate N and P balances on arable and dairy organic and conventional farms in Sweden: Basis for improved management. *Organic Agriculture*, 13(3), 411-430. doi: 10.1007/s13165-023-00436-3

6. Anexos

Anexo 1. Áreas de confinamiento para tratamiento alta productividad (HP; A, B y C) y bajo costo (BC; D y E)



A, plaza de alimentación; B, potrero de sacrificio con sombra; C, cama a cielo abierto; D, potrero de sacrificio con sombra; E, comederos de henilaje en potrero de sacrificio.