



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# **Análisis y rediseño de un sistema de producción de leche de base pastoril con base en indicadores económicos, productivos y ambientales**

Ana Virginia Silbermann

Maestría en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias Animales

Octubre 2024

**Análisis y rediseño de un sistema de  
producción de leche de base pastoril con  
base en indicadores económicos,  
productivos y ambientales**

Ana Virginia Silbermann

Maestría en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias Animales

Octubre 2024

Tesis aprobada por el tribunal integrado por (título, nombre), (título, nombre) y (título, nombre) el (día) de (mes) de (año). Autora: Ing. Agr. Ana Virginia Silbermann. Director: Ing. Agr. (PhD.) Pablo Chilbroste. Codirector: Ing. Agr. (PhD) Santiago Dogliotti.

Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mis padres por su permanente apoyo, a mis hijos, quienes son el motor de mi vida, y a Martín, compañero de ruta.

## AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación, por su colaboración en el financiamiento de este trabajo<sup>1</sup>.

A Jeroen Groot y Walter Rossing, por la capacitación y ayuda en el uso del programa Farm Design.

A Gabriel Giudice y Anne Giesberg, por su colaboración con el trabajo de campo.

A J. P. Zamalvide, Amabelia Del Pino, Oswaldo Ernst, Florencia Alliaume, y Santiago Dogliotti, por sus contribuciones.

A Pablo Chilbroste, por su valiosa contribución a mi formación y su enorme paciencia y dedicación.

---

<sup>1</sup>Trabajo parcialmente financiado por beca para posgrados nacionales de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

## TABLA DE CONTENIDO

<u>AGRADECIMIENTOS .....</u>	<u>V</u>
<u>RESUMEN .....</u>	<u>XVI</u>
<u>SUMMARY.....</u>	<u>XVII</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
<u>2. ANTECEDENTES .....</u>	<u>3</u>
2.1. LA LECHERÍA EN URUGUAY .....	3
2.2. DESARROLLO SUSTENTABLE Y SUSTENTABILIDAD DE SISTEMAS .....	4
2.3. EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD EN SISTEMAS LECHEROS EN EL PAÍS .....	5
2.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL EN SISTEMAS LECHEROS.....	7
<u>2.4.1. Balance de nutrientes.....</u>	<u>7</u>
<u>2.4.2. Carbono orgánico del suelo .....</u>	<u>16</u>
<u>2.4.3. Uso del suelo y erosión.....</u>	<u>18</u>
2.5. MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD.....	19
<u>2.5.1. Métodos empleados para la evaluación de la sustentabilidad .....</u>	<u>20</u>
<u>2.5.2. Ejemplo de modelo integrador: el programa Farm Design (PFD) .</u>	<u>23</u>
2.6. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	25
<u>2.6.1. Objetivo general.....</u>	<u>25</u>
<u>2.6.2. Objetivos específicos .....</u>	<u>25</u>
<u>2.6.3. Hipótesis .....</u>	<u>25</u>
<u>3. MATERIALES Y METODOS.....</u>	<u>26</u>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PREDIO EN ESTUDIO .....	27
3.2. INFORMACIÓN INGRESADA AL PROGRAMA FARM DESIGN. 28	
<u>3.2.1. Información productiva y económica ingresada al PFD.....</u>	<u>30</u>

3.2.2. Información climática y ambiental ingresada al PFD.....	35
3.2.3. Información de suelos y erosión.....	36
3.3. OPERATIVA DEL PROGRAMA FARM DESIGN (PFD) .....	38
3.3.1. Indicadores productivos.....	39
3.3.2. Indicadores económicos.....	41
3.3.3. Indicadores ambientales.....	42
3.4. EMPLEO DEL PFD PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL .....	45
3.5. APLICACIÓN DEL PFD PARA EL REDISEÑO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN.....	46
3.5.1. Variables de decisión.....	46
3.5.2. Restricciones impuestas.....	48
3.5.3. Objetivos optimizados .....	48
<u>4. RESULTADOS .....</u>	<u>52</u>
4.1. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE PRODUCCIÓN.....	52
4.1.1. Indicadores productivos y económicos.....	52
4.1.2. Indicadores ambientales.....	53
4.2. REDISEÑO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN .....	57
4.2.1. Relaciones entre los objetivos optimizados.....	57
4.2.2. Estudio de los sistemas alternativos seleccionados en los diferentes escenarios .....	61
4.2.3. Simulación de un nuevo escenario .....	79
<u>5. DISCUSIÓN .....</u>	<u>85</u>
5.1. EVALUACIÓN DE LA FASE DESCRIPTIVA DEL PFD .....	85
5.1.1. Indicadores productivos y económicos.....	85
5.1.2. Indicadores ambientales.....	85
5.2. REDISEÑO DEL SISTEMA.....	93
5.2.1. Intensificación y estrategia productiva .....	93

<u>5.2.2. Efecto de la inclusión del balance de materia orgánica del suelo como objetivo a optimizar.....</u>	101
<u>5.2.3. Efecto de incluir un tercer objetivo de optimización.....</u>	103
6. <u>CONCLUSIONES .....</u>	106
7. <u>BIBLIOGRAFÍA .....</u>	107
8. <u>ANEXOS .....</u>	114
8.1. ESTIMACIONES Y ASUNCIONES REALIZADAS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN PROVENIENTE DE LA BASE DE DATOS DEL PREDIO BRINDADA POR CONAPROLE (BD CONAPROLE) PARA OBTENER LOS DATOS ECONÓMICOS Y PRODUCTIVOS EN EL FORMATO REQUERIDO POR EL PROGRAMA .....	114
8.1.1. <u>Información económica.....</u>	114
8.1.2. <u>Información sobre cultivos .....</u>	115
8.1.3. <u>Información productos de origen vegetal (<i>crop products</i>).....</u>	121
8.1.4. <u>Información de animales .....</u>	123
8.1.5. <u>Productos de origen animal.....</u>	125
8.1.6. <u>Información sobre estiércol.....</u>	126
8.1.7. <u>Información referente a maquinaria.....</u>	127
8.1.8. <u>Información referente a infraestructura.....</u>	128
8.2. <u>COSTOS DE CULTIVOS .....</u>	129
8.3. <u>INFORMACIÓN AMBIENTAL INGRESADA AL PROGRAMA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....</u>	130
8.3.1. <u>Información sobre suelo .....</u>	130
8.3.2. <u>Información sobre clima .....</u>	132
8.3.3. <u>Información sobre erosión .....</u>	133
8.4. <u>INFORMACIÓN INGRESADA Y SALIDAS DEL PROGRAMA EROSIÓN 5.91 .....</u>	134
8.5. <u>SALIDAS DEL PROGRAMA FARM DESIGN .....</u>	136

8.6 ARTÍCULO: REDISEÑO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE LECHE DE BASE PASTORIL CON BASE EN INDICADORES ECONÓMICOS, PRODUCTIVOS Y AMBIENTALES .....	139
<u>RESUMEN .....</u>	<u>139</u>
<u>ABSTRACT .....</u>	<u>140</u>
<u>INTRODUCCIÓN .....</u>	<u>141</u>
<u>METODOLOGIA.....</u>	<u>142</u>
<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</u>	<u>145</u>
<i>Correlación entre objetivos optimizados.....</i>	145
<i>Comparación de los sistemas alternativos seleccionados.....</i>	148
<i>Efecto de la inclusión del balance de materia orgánica del suelo como objetivo a optimizar .....</i>	157
<i>Efecto de incluir un tercer objetivo de optimización.....</i>	159
<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>161</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA .....</u>	<u>163</u>

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: balances de nutrientes y eficiencias de utilización reportados por diferentes autores. ....	9
Cuadro 2: efecto de la dotación (BC = 3,3 vacas/ha y AC = 4,4 vacas/ha) y de la dosis fertilizante (0, 200 y 400 kgN/ha.año) sobre el balance y pérdidas de N de sistema lechero de la Dairying Research Corporation (DRC). Pastura mezcla de raigrás perenne y trébol blanco. Datos promedio de 3 años (Ledgard et al., 1997)...	11
Cuadro 3: tasas de erosión estimadas mediante modelo USLE/RUSLE para diferentes usos y manejos del suelo. ....	19
Cuadro 4: información ingresada al PFD (ventana «Describe»).	28
Cuadro 5: uso del suelo. Base de datos Conaprole vs. Farm Design.	31
Cuadro 6: estimación de consumo y producción de materia seca de cada uno de los componentes de la rotación. ....	33
Cuadro 7: kg de MS de rastrojos ingresados en el PFD como <i>to soil</i> . ....	34
Cuadro 8: cálculo de la materia orgánica efectiva radicular por cultivo .....	35
Cuadro 9: materia orgánica efectiva radicular por módulo ingresado al PFD .	35
Cuadro 10: deposiciones atmosféricas de nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio (kg/ha/año).....	36
Cuadro 11: parámetros de suelo y erosión ingresados al PFD. ....	36
Cuadro 12: principales indicadores productivos, económicos y ambientales estimados por el PFD. ....	39
Cuadro 13: composición química de productos de origen animal empleada en el PFD .....	44
Cuadro 14: variables de decisión modificables por PFD durante la exploración. ....	47
Cuadro 15: restricciones impuestas para la exploración.....	48
Cuadro 16: características de cada escenario de optimización. ....	49
Cuadro 17: cantidad de rastrojo dejado en escenario 5 y en escenario 5.2 rastrojos modificados .....	50

Cuadro 18: destino de la materia seca de la rotación en escenario 5 y en escenario 5.2 rastrojo modificado. ....	51
Cuadro 19: producción de carne y leche en base de datos de Conaprole y estimada por el PFD. ....	52
Cuadro 20: indicadores de resultado económico, en base de datos de Conaprole y estimados por el PFD. ....	52
Cuadro 21: datos generales y erosión estimada para el sistema actual.....	53
Cuadro 22: balance de materia orgánica del suelo estimado por el PFD .....	54
Cuadro 23: balance de nutrientes del sistema actual, simulados con PFD.....	55
Cuadro 24: contribución de cada fuente a la entrada de nutrientes del sistema. ....	55
Cuadro 25: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación bajo y medio.....	67
Cuadro 26: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación alto y muy alto.....	68
Cuadro 27: correlación entre balance de nutrientes y cantidad de alimento comprado y entre balance de nutrientes y productividad.....	73
Cuadro 28: estimación de pérdida de suelo con programa Erosión 5.9 para rotaciones con diferentes proporciones de perennes y anuales.....	78
Cuadro 29: indicadores productivos, económicos y ambientales del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 5 .....	80
Cuadro 30: área de cada módulo en la rotación en sistema actual y sistemas alternativos seleccionados. Escenario 5 .....	80
Cuadro 31: balance de materia orgánica del suelo en escenario 5 y en escenario 5 modificado.....	82
Cuadro 32: flujo de nutrientes en el sistema en E5 y en E5 rastrojo modificado... ..	83
Cuadro 33: indicadores productivos, económicos y ambientales del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 5.2 rastrojos modificados .....	83

Cuadro 34: tasas de erosión estimadas mediante modelo USLE/RUSLE para diferentes usos y manejos del suelo .....	85
Cuadro 35: comparación de balances de materia orgánica del suelo .....	87
Cuadro 36: balance* <sup>1</sup> (kg /ha/año) y eficiencia* <sup>2</sup> de N, P y K en el sistema, reportados por la bibliografía nacional y estimado por el PFD para el sistema actual. ....	89
Cuadro 37: mejores resultados obtenidos por los sistemas alternativos seleccionados para cada objetivo según escenario .....	104
Cuadro 38: resultados de sistemas alternativos con similares costos de alimentación que el sistema actual .....	104
Cuadro 39: coeficientes parte aérea / raíz empleados para la estimación de la materia seca radicular.....	118
Cuadro 40: composición nutricional de productos de origen vegetal.....	121
Cuadro 41: aporte de cada módulo a la materia seca de la pradera de larga duración.....	122
Cuadro 42: composición química de los productos leche y carne.....	125
Cuadro 43: estimación de los nutrientes ingresados por concepto de deposiciones atmosféricas.....	132
Cuadro 44: datos generales y erosión estimada del sistema actual. ....	134
Cuadro 45: componentes de la rotación en el sistema actual. ....	135

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: rotación ingresada al programa Erosión 5.9 para la simulación de la situación actual del sistema estudiado.....	38
Figura 2: diagrama de flujo de N (kg/ha/año) en el sistema actual. ....	56
Figura 3: diagrama de flujo de P (kg/ha/año) en el sistema actual. ....	56
Figura 4: diagrama de flujo de K (kg/ha/año) en el sistema actual. ....	57
Figura 5: relación entre costo de alimentación (US\$/ha) y cantidad de alimento comprado (kg/ha) .....	58
Figura 6: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 2.....	59
Figura 7: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 3.....	59
Figura 8: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 4.....	60
Figura 9: relación entre balance de materia orgánica (kg/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 3.....	61
Figura 10: relación entre balance de materia orgánica (kg/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 4.....	61
Figura 11: ventana de exploración escenario 2. Objetivos: margen neto (US\$/año) y costo alimentación (US\$/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM. ....	62
Figura 12: ventana de exploración escenario 3. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año) y balance de materia orgánica del suelo (kg/ha/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.....	62
Figura 13: ventana de exploración escenario 4. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año), minimizar costo alimentación (US\$/año) y maximizar balance de materia orgánica del suelo (kg/ha/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.....	63
Figura 14: relación entre margen neto y costo de alimentación, por hectárea y por año. Escenario 2.....	63

Figura 15: parámetros productivos del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 1.....	64
Figura 16: parámetros productivos del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 2.....	65
Figura 17: parámetros productivos del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en escenario 3.....	69
Figura 18: parámetros productivos del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en escenario 4.....	70
Figura 19: cantidad de alimento comprado y balance de nutrientes según nivel de productividad.....	72
Figura 20: producción de forraje de la rotación y nivel de suplementación según nivel de productividad de leche/ha en los diferentes escenarios simulados. ...	74
Figura 21: forraje ofrecido a animales, nivel de suplementación y margen neto según nivel de productividad por hectárea.....	75
Figura 22: correlación entre producción de materia seca y porcentaje de perennes en la rotación.....	76
Figura 23: superficie de cada módulo de la rotación según porcentaje de perennes en la rotación.....	77
Figura 24: ventana de exploración escenario 5. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año), minimizar costo alimentación (US\$/año) y maximizar balance de materia orgánica del suelo (kg/ha.año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.....	79
Figura 25: relación entre la producción por hectárea y sus componentes. ....	96
Figura 26: correlación entre margen neto y cantidad de alimento comprado en cada escenario. ....	103
Figura 27: parámetros físicos y químicos del suelo ingresados al PFD .....	130
Figura 28: deposiciones atmosféricas y temperatura promedio ingresada al PFD. ....	132
Figura 29: información sobre suelo ingresad al PFD. ....	133
Figura 30: resultados del sistema actual y los sistemas alternativos seleccionados en escenario 1.....	136

Figura 31: valores de las variables de decisión en el sistema actual y en los sistemas alternativos seleccionados en escenario 1 .....	136
Figura 32: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos en el escenario 2.....	136
Figura 33: valores de las variables de decisión en sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en escenario 2.....	137
Figura 34: resultado del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en escenario 3.....	137
Figura 35: valores de las variables de decisión en sistema actual y sistemas alternativos en escenario 3 .....	137
Figura 36: resultados del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en escenario 4.....	138
Figura 37: valores de las variables de decisión en el sistema actual y sistemas alternativos en escenario 4.....	138

## RESUMEN

Los sistemas lecheros pastoriles son sistemas complejos que deben cumplir con objetivos económico-productivos y ambientales para ser sustentables. Por esto la cantidad y complejidad de la información a manejar a la hora de evaluar y rediseñar el sistema hace que el uso de herramientas de simulación constituya una estrategia promisoría. La hipótesis propuesta en este trabajo sostenía que era posible rediseñar un sistema de producción de leche pastoril con el objetivo de mejorar el resultado económico, sin comprometer, e incluso mejorando, los indicadores de sustentabilidad ambiental. Como herramienta para el análisis y rediseño se utilizó el programa Farm Design (PFD). Esta herramienta permite la evaluación integrada del sistema actual y su rediseño con varios objetivos de optimización en simultáneo. Durante la fase de rediseño, los objetivos optimizados fueron el margen neto y el balance de materia orgánica del suelo (máximos) y el costo de alimentación (mínimo). Los indicadores económico-productivos estimados por el PFD representaron correctamente la situación de partida. Los indicadores ambientales estimados por el PFD (balance de materia orgánica del suelo de -363 kg/ha/año y balance de nutrientes de 83, 29 y 12 kg/ha/año para N, P y K, respectivamente) coincidieron con los resultados reportados por la bibliografía nacional. La volatilización y la erosión aparecieron como las principales causas de pérdida de N (49 y 30 kg/ha/año, respectivamente). En P, en cambio, la mayor pérdida fue por lavado (20 kg/ha/año) seguida por la erosión (9 kg/ha/año). El PFD permitió la integración de los diferentes componentes económico-productivos y ambientales del sistema y la comprensión de sus interacciones. El PFD aportó alternativas productivas con mejores resultados económicos que el sistema actual (918 vs. 676 US\$/ha en el sistema actual), con similares costos de producción y manteniendo los indicadores ambientales (balance de materia orgánica del suelo kg/ha -379 en sistema J vs. -370 en sistema actual), las que además mostraron diferentes estrategias productivas adaptables a las necesidades o preferencias del productor.

**Palabras clave:** simulación, FarmDESIGN, optimización múltiple-objetivo, intensificación, sustentabilidad

**ANALYSIS AND REDESIGN OF A DAIRY SYSTEM USING A  
SIMULATION PROGRAM AND BASED ON ECONOMIC AND  
ENVIRONMENTAL INDICATORS**

SUMMARY

Dairy farming systems should achieve economic and environmental objectives in order to be sustainable. Evaluation and design of such systems involves many components and their interaction, therefore the usefulness of integrated simulation models, that allows multidimensional predictions. We hypothesise that re-design of a dairy farm is possible in order to improve economic outputs and, at the same time, maintain or reduce environmental impact. The objective of this work was to evaluate and re-design a real grazing dairy farm applying the Farm Design tool, looking forward to improve its economic and environmental performance. This tool supports whole farm evaluation and re-design with multi-objective optimization. The optimized objectives were to maximize operating profit, minimize feed costs and maximize soil organic matter balance. The economic-productive indicators estimated by the PFD correctly represented the current system. Environmental indicators estimated by the PFD (soil organic matter balance -363 kg/ha/y and nutrients balance of 83, 29 y 12 kg/ha/y for N, P and K, respectively) were similar to those reported in literature. Volatilization and erosion were the main N losses (49 and 30 kg/ha/y, respectively), while leaching was the main P loss (20 kg/ha/y). PFD provided an integrative approach of economic-productive and environmental indicators and their interactions. Alternative farms improve operating profit (918 US\$/ha alternative farm J vs. 676 US/ha current farm), while maintaining feed costs and environmental indicators (soil organic matter balance -379 kg/ha in alternative farm J vs. -370 in current farm), showing different production strategies.

**Keywords:** simulation, FarmDESIGN, multi-objective optimization, intensification, sustainability

## 1. INTRODUCCIÓN

La lechería es un rubro de suma importancia para el Uruguay tanto desde el punto de vista económico como social. En el año 2018, este sector ocupó una superficie de 761.550 hectáreas, aportando los productos lácteos el 12 % del producto bruto agropecuario (DIEA-MGAP, 2020), y ocupando el 4.º lugar dentro de los principales productos de exportación (CIU, 2019). Además, es un rubro muy demandante en mano de obra, lo que implica generación de empleo y asentamiento de población en el medio rural.

En las últimas décadas, el sector lechero ha crecido con tasas del orden del 5 % anual (INALE, 2014). Esta intensificación, caracterizada por el aumento de carga animal y del uso de insumos externos (fertilizante, alimentos externos, etc.), conlleva una creciente presión sobre los recursos naturales (fundamentalmente el suelo) y mayor potencial de contaminación. (La Manna et al., 2008, Durán, 2004), lo que pone en riesgo la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

Por esto, a la hora de evaluar y rediseñar un sistema de producción sustentable, es importante considerar tanto aspectos productivos como económicos y ambientales, lo que lleva a la necesidad de emplear un enfoque holístico. En este sentido, es cada vez más necesario contar con herramientas que permitan evaluar la sustentabilidad de los predios, comprender los procesos que la determinan y las posibles formas de influir sobre estos (Dogliotti et al., 2009).

En las últimas décadas se han desarrollado en el país estudios que buscan determinar y evaluar el impacto de la lechería y su proceso de intensificación sobre los recursos naturales y su sustentabilidad. Estos estudios han empleado diferentes metodologías, concentrándose la mayoría de ellos en la descripción y evaluación del sistema más que en su rediseño. El presente trabajo buscó probar la aplicación y utilidad de una herramienta que permitiera, además de la evaluación integrada del sistema, su rediseño. Para ello, se empleó el programa Farm Design. (Groot et al., 2010). Este programa permite simular el sistema productivo en su conjunto, traduce la información básica del predio en indicadores objetivos de performance productiva,

económica y ambiental y además permite la exploración de sistemas alternativos en búsqueda de la optimización de múltiples objetivos.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. LA LECHERÍA EN URUGUAY

En el año 2018, este sector ocupó una superficie de 761.550 ha distribuidas en 3423 establecimientos comerciales, aportando los productos lácteos el 12 % del producto bruto agropecuario (DIEA-MGAP, 2020).

El 70 % de la leche producida se industrializa para exportación (INALE, 2019), teniendo así los productos lácteos una participación del 9 % de las exportaciones totales (CIU, 2019).

Este rubro se caracteriza por sus requerimientos de mano de obra permanente, ocupando el 12,8 % de los trabajadores permanentes del sector (DIEA-MGAP, 2011). Es un rubro muy demandante en mano de obra, lo que implica generación de empleo y asentamiento de población en el medio rural.

En las últimas décadas el sector lechero ha crecido con tasas del orden del 5 % anual, crecimiento que se aceleró en el período 2007 a 2014 con tasas del 7 % anual (INALE, 2014). Este crecimiento, basado en aumentos de la productividad (litros/ha), se debe a cambios tecnológicos como mejoras en la sanidad, genética y fundamentalmente en la alimentación animal. En este sentido, se destaca la mejora de la base forrajera mediante el uso de praderas permanentes y la suplementación con ensilajes (Uruguay XXI, 2010, Dabezies, 2008, DIEA-MGAP, 2003).

Trabajos de monitores de empresas realizados durante los años 2011 a 2013 detectaron incrementos de productividad basados en aumentos conjuntos de la carga, producción individual y la relación vaca ordeñe/vaca masa (VO/VM). Esta estrategia de intensificación implica aumentos en el consumo de concentrados, reservas y forraje cosechado directamente (pasando este último de 2604 a 4227 kg MS/ha), siendo las dos primeras variables las de mayor peso. El mayor consumo de forraje (asociado a la mayor carga animal) permite que los aumentos en la producción individual no se traduzcan en aumentos significativos de los costos, lo que explica la mejora del margen de alimentación y, por tanto, el resultado económico del sistema (Chilibroste y Battezzore, 2014).

Fariña y Chilibroste (2019) proponen que los sistemas de producción de leche de base pastoril del Uruguay presentan el potencial para intensificar su producción y a la vez mantener su competitividad en el ámbito internacional aumentando la producción y utilización del forraje mediante un aumento de la carga. Sin embargo, esto trae aparejado algunos desafíos tales como mayor riesgo de contaminación con nutrientes por fuentes puntuales (principalmente en el caso del fósforo) y la necesidad de mejoras en la infraestructura de los sistemas de producción. Por esto, a la hora de evaluar y rediseñar un sistema de producción sustentable, es importante considerar todos los aspectos, tanto productivos como económicos y ambientales.

En las últimas décadas se han desarrollado en el país estudios que buscan determinar y evaluar el impacto de la lechería y su proceso de intensificación sobre los recursos naturales y su sustentabilidad. Estos estudios han empleado diferentes metodologías, concentrándose la mayoría de ellos en la descripción y evaluación del sistema más que en su rediseño en busca de una diferente combinación de recursos que permitan incrementar o mantener la productividad con un mejor balance ambiental. Experiencias de este tipo existen en el país en otros rubros (Dogliotti et al., 2004).

## 2.2. DESARROLLO SUSTENTABLE Y SUSTENTABILIDAD DE SISTEMAS

La comisión Bruntland en 1987 (WECD, 1987, citado por Gallopín, 2003) define el desarrollo sustentable como «... desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer las propias». Como objetivo ambiental, el desarrollo sustentable debe proponerse conservar y, en lo posible, mejorar el estado de los recursos naturales, mediante la promoción de sistemas tecnológicos que hagan un uso eficiente de estos. En cuanto a los objetivos económicos y sociales, debe procurar sistemas productivos que brinden los bienes y servicios que necesita la sociedad, promover la diversidad y el pluralismo cultural y reducir las desigualdades (Lawrence, 1997, Lele, 1991, citados por Masera et al., 2000).

Un sistema es sustentable cuando satisface las necesidades sociales a la vez que conserva los recursos naturales (Gomez et al., 1996, citado por Larrosa y Lutz, 2003). Un sistema será ambientalmente más sustentable en la medida en que optimice el flujo de nutrientes, la protección y conservación del suelo y el agua, la preservación e integración de la biodiversidad y el aprovechamiento de la complementariedad de recursos genéticos animales y vegetales (Reijntje, 1992, Altieri, 1987, citados por Masera et al., 2000).

### 2.3. EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD EN SISTEMAS LECHEROS EN EL PAÍS

En el contexto nacional se han desarrollado, en la última década, estudios que buscan determinar y evaluar el impacto de la lechería y su proceso de intensificación sobre los recursos naturales y su sustentabilidad. A continuación, se mencionan algunos de los trabajos realizados y los métodos que emplearon. En cuanto a los resultados que arrojaron, se presentan en la sección 2.4, «Indicadores de sustentabilidad en sistemas lecheros».

Durante los años 2005 y 2006, un equipo de técnicos relevó, procesó y analizó información proveniente de 86 predios comerciales ubicados en los departamentos de Colonia, Florida y San José. El objetivo del proyecto era conocer el estado actual de los suelos bajo producción lechera. Para esto se realizaron determinaciones físicas y químicas de muestras de suelos con diferentes usos (Morón et al., 2011).

Larrosa y Lutz (2003) elaboraron un modelo de interacciones entre subsistemas para la descripción y análisis de sistemas de producción de carne y leche del litoral oeste del Uruguay. Este entiende a la explotación como un sistema integrado por 2 grandes subsistemas (el productivo y el social), los que a su vez son integrados por varios subsistemas de nivel jerárquico inferior. Emplearon un enfoque holístico, el cual considera que cualquier modificación en alguno de los componentes será causa de modificación en todo el sistema. En este trabajo se empleó el balance de nutrientes y la eficiencia de uso de estos como indicadores para la evaluación de la sustentabilidad.

La Manna et al. (2008) también utilizó al balance de nutrientes como herramienta para estudiar el potencial de contaminación del proceso de intensificación de la producción lechera en el Uruguay. El manejo de nutrientes es la estrategia internacional para los casos de polución potencial, y, para ser posible este manejo, debe hacerse antes un balance de nutrientes (Beegle citado por La Manna et al., 2008).

Cardozo y Uribe (2010) optaron por un marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales integrando indicadores de sustentabilidad (MESMIS). La flexibilidad de la herramienta, su enfoque sistémico y multiescalar y su amplia experiencia de aplicación se mencionan como las causas que justificaron su utilización. Estos autores utilizaron, entre otros indicadores, la erosión ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), el valor actual de materia orgánica, el cambio de stock carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) y el balance de nutrientes. Para la estimación de varios de estos, se apoyaron en el uso de herramientas computacionales tales como Erosión 5.91 y Agro-Eco-Index® (Cardozo y Uribe, 2010).

Darré et al. (2021), Llanos (2020) y Lizarralde et al. (2014) en cambio, aplicaron el análisis multivariado como herramienta para evaluar el impacto de prácticas de manejo y de la intensificación de los sistemas lecheros pastoriles sobre diferentes indicadores ambientales tales como gases de efecto invernadero, uso de energía fósil, ecotoxicidad y eutrofización.

Fariña y Chilibróste (2019), al analizar las oportunidades y desafíos para los sistemas lecheros pastoriles en expansión, señalan al aumento del riesgo de contaminación con nutrientes por fuentes puntuales como uno de los mayores desafíos a enfrentar, siendo la acumulación y pérdida de fósforo del sistema el de mayor preocupación. Por esto, uno de los principales desafíos para la intensificación de los sistemas lecheros pastoriles es la eficiente distribución espacial y temporal de la excreta, de manera de evitar zonas de alta concentración de nutrientes.

Barreto et al. (2017) atribuyen el enriquecimiento con P del río Santa Lucía en parte a las pérdidas de P desde suelo y al vertido de efluentes desde sistemas lecheros.

Los trabajos antes mencionados emplean diferentes metodologías para la determinación y evaluación del impacto de la lechería en el ambiente. Sin embargo, ninguno propone explorar diferentes alternativas de combinación de recursos que permitan incrementar productividad con un mejor balance ambiental que el logrado hasta el momento. Experiencias de este tipo existen en el país en otros rubros (Dogliotti et al., 2004).

## 2.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL EN SISTEMAS LECHEROS

Debido al uso intensivo de los recursos naturales y potencial de contaminación que presentan los sistemas lecheros, en los últimos tiempos se han llevado adelante, tanto en el ámbito nacional como internacional, diversos estudios dedicados a la evaluación de su sustentabilidad ambiental. A continuación, se presentan resultados de algunos indicadores empleados para esto.

### 2.4.1. Balance de nutrientes

Los balances de nutrientes se calculan como la diferencia entre la cantidad total de nutrientes ingresados al sistema y su salida en producto, estimándose la eficiencia de uso como la relación entre nutrientes salidos en producto y la entrada de nutrientes (Gourley et al., 2012).

Balance = entrada total de nutrientes – salida de nutrientes en producto

Eficiencia = salida de nutriente en producto / entrada total de nutrientes

Si la extracción de nutrientes es mayor a la entrada, se acumulan balances negativos que causan reducciones en el rendimiento de cultivos que afectan la economía y productividad del sistema. Por el contrario, si las entradas superan a las salidas, se genera una acumulación que puede sobrepasar la capacidad de retención del suelo, lo que incrementa el riesgo de contaminación de aguas superficiales y profundas (Cardozo y Uribe, 2010).

La creciente intensificación de los sistemas lecheros implica un aumento en la entrada de nutrientes al predio (en forma de alimento y fertilizante), que no es acompañada por un aumento proporcional en su salida en producto, por lo que se genera un desbalance. Estos excesos pueden, en cierta medida, ser acumulados

dentro del sistema, pero cuando los niveles exceden la capacidad de acumulación, estos se pierden al ambiente y se convierten en fuentes de contaminación, por lo que su manejo eficiente es clave para el desarrollo de una lechería rentable y sustentable (Gourley et al., 2012, Aarts et al., 1992).

En los últimos 30 años se han desarrollado e implementado en Europa y Estados Unidos políticas ambientales tendientes a disminuir las pérdidas de nutrientes desde sistemas lecheros hacia el ambiente, muchas de las cuales tienen como base los balances de nutrientes. Sin embargo, la aplicabilidad de estos balances a sistemas lecheros de base pastoril como el australiano o el uruguayo podría ser limitada. Las diferencias entre los sistemas (sistemas con confinamiento gran parte del año y suplementados con forraje cosechado y grano vs. sistemas de base pastoril con suplementación con concentrado) determinaría diferencias en los flujos de nutrientes y potenciales diferencias en los balances y eficiencias de utilización (Gourley et al., 2012).

Aarts et al. (1988, citado por Aarts et al., 1992) estimaron balances y eficiencias de utilización de nutrientes en sistemas lecheros de Holanda y encontraron en sistemas intensivos (13.195 kg leche/ha y 2170 kg concentrado/VM/año) balances anuales de N, P y K de 471, 31 y 99 kg/ha y eficiencias de recuperación de 14 %, 32 % y 17 % para N, P y K, respectivamente.

Gourley et al. (2012) estudiaron el balance de nutrientes en un diverso grupo de sistemas lecheros de base pastoril en Australia (n = 41, con producciones que van desde los 2.948 a los 36.637 L/ha) y concluyeron que aumentos en las producciones de leche por hectárea se asocian a mayores balances de nutrientes en predio, con su consecuente aumento en los riesgos de contaminación ambiental.

En el país, algunos de los autores que han empleado esta metodología como forma de evaluación de potencial de contaminación aplicada a uno o varios nutrientes fueron Morón (2014), Cardozo y Uribe (2010), La Manna et al. (2008) y Larrosa y Lutz (2003).

Un resumen de los resultados obtenidos por estos autores se presenta a continuación (Cuadro 1).

**Cuadro 1: balances de nutrientes y eficiencias de utilización reportados por diferentes autores.**

Autor	Sistema	Balance (kg nutriente ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )			Eficiencia (producto/entrada)		
		N	P	K	N	P	K
Aarts (et al. 1992)	Intensivo	470	32	99	0,14	0,32	0,17
	13.200 L ha/año						
	2,3 VM/ha						
Gourley (et al. 2012)	Base pastoril, con suplem.	47 a 601	-7 a 133	13 a 452	0,14	0,06	0,09
	2948 a 36.637 L ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>				a	a	a
	0,45 a 1,75 VM/ha SPL				0,5	1,58	0,48
Larrosa y Lutz (2003)	9 sistemas comerciales	-3 a 86	12 a 31		0,12	0,11	
	1827 s 3820 L SPL <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>				a	a	
	0,96 a 1,58 UL SPL <sup>-1</sup>				0,85	0,27	
La Manna (et al. 2008)	Diferentes modelos tecnológicos	88 a 130			0,17		
					a		
					0,22		
Cardozo y Uribe (2010)	4 sistemas comerciales	24 a 70	9 a 32		0,23	0,1	
	2854 a 5390 L ha <sup>-1</sup> VO año <sup>-1</sup>				a	a	
	0,62 a 0,94 VO ha <sup>-1</sup>				0,45	0,3	
Morón (2014)	Estrato 25 % superior FUCREA	109	64	24	0,21	0,17	0,24
	5383 L ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>						
	1,94 UG/ha						

#### 2.4.1.1. Nitrógeno (N)

Aarts et al. (1988, citado por Aarts et al., 1992) encontraron que del balance de N una mínima proporción se estaría acumulando en la materia orgánica (30 kg N/ha/a), representando los excesos de este nutriente una importante fuente de contaminación ambiental a través de la volatilización de amonio, el lavado superficial y profundo y la desnitrificación. Las pérdidas por lavado y desnitrificación estimadas por el modelo fueron del orden de los 286 kg N/ha/año (Aarts et al., 1992).

Gourley et al. (2012) reportaron una correlación positiva entre el balance de N y la carga, producción de leche y entrada de nutriente en alimentos y fertilizante, sin encontrar correlación con la fijación biológica de nitrógeno (FBN). En cuanto a la eficiencia de uso de este nutriente, si bien encontraron una correlación negativa entre esta y las entradas de N en fertilizante y por FBN, no hallaron correlación entre eficiencia y carga o producción de leche. Esto estaría indicando que las prácticas de manejo aplicadas en el predio y las condiciones de suelo y climáticas serían los

factores claves en determinar la eficiencia de uso del nutriente más que las características de las granjas por sí solas.

En el contexto nacional, Cardozo y Uribe (2010), La Manna et al. (2008) y Larrosa y Lutz (2003) coinciden en reportar correlación positiva entre el balance y las entradas del nutriente al sistema, mientras que se encuentran algunas diferencias entre autores en cuanto a la importancia de las diferentes fuentes (fertilizante, alimento concentrado, FBN).

También hay coincidencia en la buena correlación existente entre balance de N y el área de praderas, dado que una mayor área de praderas determina mayor FBN y, por tanto, mayor entrada de N, pero generalmente sin un aumento proporcional de las salidas, lo que lleva a un balance más positivo (Cardozo y Uribe, 2010 y Larrosa y Lutz, 2003).

Los balances de N estimados por estos autores en el país se encuentran en el rango de 30 a 100 kg de N/ha/año, en el cual el suelo sería capaz de acumular sin que necesariamente existan pérdidas al ambiente. Sin embargo, en el largo plazo se darían acumulaciones y posibles pérdidas al ambiente, lo que genera la incertidumbre de la sustentabilidad en dicho plazo (La Manna et al., 2008). Además, estos balances positivos no se distribuyen de manera homogénea en el predio, sino que existen zonas de acumulación y de desbalance (La Manna et al., 2008).

En cuanto a la eficiencia de utilización de este nutriente, Cardozo y Uribe (2010) y Larrosa y Lutz (2003) encontraron menores eficiencias en sistemas con mayores desbalances. La Manna et al. (2008), en cambio, reportó que los sistemas más intensivos, si bien presentaron un mayor potencial de contaminación (balances positivos mayores), tuvieron las mayores eficiencias de utilización y por esto emplearon menos nutriente por unidad de producto.

Si bien los balances brindan una idea del potencial de contaminación o pérdida de nutriente hacia el ambiente, no indican nada acerca de los posibles procesos de pérdida. Las pérdidas de N pueden darse por lavado, desnitrificación y volatilización, pero también puede ocurrir incorporación del N a la materia orgánica del suelo (Peyraud y Delaby, 2006). Ledgard et al. (1997) midieron estas pérdidas al estudiar el efecto de diferentes dotaciones animales y dosis de fertilizante sobre el balance y

pérdidas de N, en un experimento en la Dairying Research Corporation (DRC), sobre una pastura mezcla de raigrás perenne y trébol blanco. Concluyeron que las pérdidas gaseosas de N son relativamente bajas y que son las pérdidas por lavado el proceso predominante, mientras que todas las pérdidas se incrementan al aumentar el nivel de fertilización (de 0 a 400kg N/ha/a de fertilizante) (Cuadro 2).

**Cuadro 2: efecto de la dotación (BC = 3,3 vacas/ha y AC = 4,4 vacas/ha) y de la dosis fertilizante (0, 200 y 400 kgN/ha/año) sobre el balance y pérdidas de N de sistema lechero de la Dairying Research Corporation (DRC). Pastura mezcla de raigrás perenne y trébol blanco. Datos promedio de 3 años (Ledgard et al., 1997).**

Tratamiento	0 N/BC	200 N/BC	400 N/BC	400 N/AC	200 N/AC
Dotación (vacas/ha)	3,3	3,3	3,3	4,4	4,4
Producción (L/ha)	12.955	15.516	15.921	19.653	20.466
<b>Entradas de N (kg N/ha/año)</b>					
Fertilizante	0	215	413	411	213
Fijación de N <sub>2</sub>	174	117	40	37	117
Alimento comprado	3	4	3	58	101
Deposiciones atmosféricas	2	2	2	2	2
<b>Total</b>	<b>179</b>	<b>338</b>	<b>458</b>	<b>508</b>	<b>433</b>
<b>Salidas de N (kg N/ha/año)</b>					
Leche	75	89	92	113	121
Carne	6	6	6	9	9
Ensilaje	0	15	28	5	0
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>110</b>	<b>126</b>	<b>127</b>	<b>130</b>
<b>Excedentes de N</b>					
	<b>98</b>	<b>228</b>	<b>332</b>	<b>381</b>	<b>303</b>
Eficiencia (N salidas/N entradas)	0,45	0,33	0,28	0,25	0,30
<b>Pérdidas de N</b>					
Desnitrificación	5	17	25	24	
Volatilización	15	41	65	68	
Lavado	40	81	152	136	
Transferencia a patios	57	78	84	85	
Salidas totales (producto + pérdidas)	198	327	452	440	
Entradas - salidas totales	-19	11	6	68	

Adaptado de Ledgard et al., 1997.

En cuanto a las salidas de N, Larrosa y Lutz (2003) estimaron que las salidas por erosión representaron el 40 % de las salidas totales de N del sistema. En sistemas con siembra directa, estas pérdidas se sitúan entre los 3 y 13 kg N/ha/a asociado a la pendiente, rondando los 18 kg N/ha/año en sistemas con laboreo convencional, lo que coincide con lo reportado por la bibliografía nacional (Ernst y Siri, 2009, Clérico et al., 2004, Clérico y García Préchac, 2001). Las pérdidas de N por erosión estimada por Morón (2014) en un brunosol eutríco-La Carolina (asumiendo rotación PPP VI

VV con siembra directa, pérdida de suelo por erosión de 2,4 tt/ha/año y N = 0,25 %) fue de 6 kgN/ha/año.

Otra posible salida no deseada (o pérdida) de este nutriente al ambiente son las pérdidas de N-NH<sub>3</sub>. En sistemas de producción animal, las principales pérdidas de NH<sub>3</sub> se dan durante el almacenamiento y la aplicación del abono, el pastoreo y el encierro de animales, pero también pueden ocurrir pérdidas desde otras fuentes como la aplicación de fertilizantes minerales amoniacales, la senescencia y restos de cultivos. Estas diferentes fuentes de pérdidas (puntuales y difusas), sumado a diferencias en el clima, el tipo de suelo, la composición y manejo del abono, afectan las pérdidas por NH<sub>3</sub>, lo que hace que la estimación de pérdidas por volatilización en la granja sea muy incierta (Bussink y Oenema, 1998).

Las pérdidas de NH<sub>3</sub> durante el almacenamiento del abono líquido se estima que pueden ir desde 0 % a 20 % del N total contenido en el abono, dependiendo del tiempo de permanencia, de la composición y mezclado del abono y del tipo de cobertura que se le ponga (Bussink y Oenema, 1998).

Las pérdidas de NH<sub>3</sub> durante su aplicación dependen del método y de las condiciones ambientales y del suelo durante la aplicación (temperatura, precipitación, humedad del suelo, pH, capacidad de intercambio catiónico, etc.). Estas tienden a aumentar con la temperatura y a ser mayores cuando se aplica sobre pasturas que en tierras cultivadas (Bussink y Oenema, 1998).

Se estima que, durante el pastoreo, entre 9,8 % y 12 % del N contenido en la orina puede perderse (Bussink y Oenema, 1998).

Pérdidas mayores a un 30 % del N aplicado pueden ocurrir cuando se utilizan fertilizantes que contienen urea, mientras que estas se pueden reducir a menos de un 5 % cuando la fuente nitrogenada es nitrato de amonio (Bussink y Oenema, 1998).

Las pérdidas totales de NH<sub>3</sub> en granjas del noroeste de Europa van desde 36 a 105 kg N/ha/año. Este amplio rango se debe a la variabilidad que presentan los factores que determinan las pérdidas, tales como cantidad, composición y manejo del abono, carga animal, tipo de suelo y condiciones ambientales (Bussink y Oenema, 1998).

Jarvis y Ledgard (2002), al estudiar las emisiones de amonio en sistemas lecheros contrastantes, estimaron para la granja modelo de Reino Unido pérdidas de 57,2 kgN/ha y, para la granja modelo de Nueva Zelanda, pérdidas de 24,3 kgN/ha. Las mayores pérdidas del modelo Reino Unido estaban asociadas a las pérdidas durante el almacenamiento y la aplicación del abono producido durante el encierro de los animales (180 días). En el modelo neozelandés, en cambio, donde los animales pastorean durante todo el año, las principales pérdidas ocurren durante el pastoreo (14,0 kgN/ha) y la aplicación de urea a las pasturas perennes (6,4 kgN/ha, asumiendo una tasa de pérdida de 12 % del N aplicado debido a las condiciones de aplicación fría y húmeda). Estas pérdidas totales de N-NH<sub>4</sub> representan el 17 % y el 12 % del N total que entra en los sistemas de Reino Unido y Nueva Zelanda, respectivamente. Las mayores pérdidas en el sistema Reino Unido se deben en gran parte al encierro de los animales, pero también a la mayor entrada de N al sistema. Al expresar estas pérdidas como porcentaje de los superávits (entradas – salidas deseadas), ambos sistemas presentan similares proporciones (21 % en Reino Unido y 17 % en Nueva Zelanda).

Cualquier medida que se tome para de minimizar las pérdidas de NH<sub>3</sub> debe evaluarse en el sistema predio en su conjunto. Este enfoque holístico es necesario, ya que la disminución de las pérdidas de NH<sub>3</sub> en un punto puede estar aumentando las pérdidas de este en otro punto (ej., el N-NH<sub>3</sub> que se ahorró al disminuir las pérdidas por almacenaje puede en parte perderse luego si no se toman medidas para disminuir pérdidas de NH<sub>3</sub> durante la aplicación) o incrementando las pérdidas por lavado o desnitrificación. Para que esto no ocurra, las medidas que se tomen tendientes a minimizar las pérdidas deberían conducir a una disminución de la entrada de N al sistema en forma de fertilizante, concentrados y alimentos comprados, lo que sería posible ya que, al reducirse las pérdidas por NH<sub>4</sub>, aumentaría el poder fertilizante del abono. Medidas tales como ajustes en la dieta (ej.: menor contenido de N en pasturas, suplementación con concentrados con bajo contenido de N) que conduzcan a una disminución de la excreción del N como urea y técnicas más eficientes de aplicación de abono combinadas con el mejor momento de aplicación (en la estación de crecimiento) conducirían a una mejora en la performance animal, menores

requerimientos de fertilizante nitrogenado y disminuciones en las pérdidas de NH<sub>3</sub>. (Bussink y Oenema, 1998).

#### 2.4.1.2. Fósforo (P)

Al igual que lo ocurrido en nitrógeno, varios autores (Cardozo y Uribe, 2010, Larrosa y Lutz, 2003) reportan para P una correlación positiva entre el balance y las entradas totales del nutriente al sistema, y una correlación negativa entre el balance y la eficiencia de uso.

Los sistemas estudiados por estos autores presentaron balances de entre 9 a 34 kg P/ha/a y eficiencias de entre 0,1 a 0,3 medida como relación P en producto/ P en entradas. La mayoría de los sistemas estudiados mostraron al fertilizante como la principal fuente de entrada.

Por ser el P un nutriente poco móvil, en la mayoría de los suelos la principal pérdida potencial es por flujo superficial (asociado a las partículas de suelo) más que por lavado o flujo subsuperficial. Sin embargo, cuando un suelo se satura con P, el P adicional permanece más soluble y puede moverse por escorrentía o lixiviación (Giuffré, 2005).

Perdomo et al. (2015) encontraron en parcelas de escurrimiento establecidas en un sistema lechero comercial de Candil (cuenca del Santa Lucía) pérdidas de P soluble de 1 kg/ha/año provenientes de suelo sin fertilizar. Estas aumentaron con la dosis de fertilizante agregado en un 1,83 % de la dosis de P agregada. Estos valores estarían por encima del umbral aceptable (Smith et al., 2015, citado por Perdomo et al., 2015).

En este nutriente, las pérdidas por erosión son bajas (2 % de las salidas totales de P, tomándose como salidas totales la suma de P en producto + P erosión); sin embargo, su importancia ambiental puede ser muy alta debido al potencial de contaminación de los cursos de agua. Los sistemas con siembra directa son los que más P pierden (0,92 kg P/ha/año reportado por Morón, 2014 y 0,12 kg P/ha/año reportado por Larrosa y Lutz, 2003) debido al enriquecimiento que presentan las capas superficiales del suelo en estos sistemas (Larrosa y Lutz, 2003).

Perdomo et al. (2015) encontraron un factor de estratificación de P promedio de 3,8 en 32 sitios en predios lecheros de Florida. Con base en esto afirman que en suelos con alta estratificación y tasas de erosión cercanas al umbral de 7 Mg/ha/año se estaría superando el valor límite del Índice de P (5 kg/ha/año). Por esto es importante controlar, además de la erosión, la fertilización fosfatada excesiva e incorporar el fertilizante fosfatado al suelo para disminuir la estratificación.

García Pesenti (2013), al estudiar la relación entre intensidad y modalidad de la producción lechera y la calidad del agua de los arroyos en 10 microcuencas de la cuenca de Paso Severino, encontró que la exportación de nutrientes es mayor en aquellas cuencas con mayor superficie dedicada a cultivos y tambos sin tratamientos de efluentes y menor en las de uso más naturales como pasturas o matorrales. Los principales mecanismos de incorporación de este nutriente a los cursos de agua serían la erosión del suelo en áreas de cultivo y la llegada del agua de lavado en los tambos. Los coeficientes de exportación de fósforo total (PT) (definido como la descarga hidráulica de un río para determinado soluto [carga] por unidad de área) estimados en este estudio se encontraron en el rango de 0,16 a 5,02 kg/ha/año en las 8 cuencas con actividad lechera como principal rubro y en 0,10 kg/ha/año en la cuenca control.

#### 2.4.1.3. Potasio (K)

Dado que las pérdidas de K al ambiente en general no se asocian con problemas ambientales, los balances para este nutriente servirían como orientación de los requerimientos potenciales de fertilizante (Gourley et al., 2012).

Morón (2014), al estimar el balance de nutrientes en sistemas de producción lechera de altos rendimientos (estrato 25 % superior FUCREA), encontró para potasio balance ligeramente negativo (-12,2 kg/ha/año), considerando dentro de las salidas tanto las deseadas como las no deseadas (deyecciones fuera del área y lixiviación). Ahora, si se estimara el balance teniendo en cuenta solo las salidas deseadas, este pasaría a ser positivo (24,4 kg/ha/año), con una eficiencia de utilización del nutriente de 0,24 (K producto/K entradas).

La principal fuente de entrada de este nutriente al sistema es el alimento comprado fuera del predio (silo y concentrado), siendo las principales salidas la transferencia a áreas improductivas, las pérdidas por lixiviación (Morón, 2014) y la erosión (Del Pino, S.f.). En cuanto a las salidas por erosión, Morón (2014) estima pérdidas de 5,8 kg K/ha/año, asumiendo una pérdida de suelo de 2,4 tt/ha/año y un contenido de K total de 2400 mg K/kg.

La mayor parte del reciclaje de este nutriente en sistemas pastoriles se realiza por la orina, estando el K contenido en ella (y en heces) inmediatamente disponible, ya que no forma parte de compuestos orgánicos. Esto hace que el reciclaje de K en estos sistemas sea relativamente eficiente (Del Pino, S.f.). Si bien las determinaciones de K intercambiable en los suelos bajo producción lechera presentan valores por encima del nivel crítico, estos muestran una disminución importante al compararlos con los valores obtenidos en los suelos de referencia. Esto se explica por la permanente salida del nutriente en productos y pérdidas por erosión sumado a la no utilización de fertilizantes que contengan potasio (Morón et al., 2008).

#### 2.4.2. Carbono orgánico del suelo

La materia orgánica o carbono orgánico del suelo ha sido mencionada por muchos autores como un indicador de la calidad de este por su importancia en la determinación de la estructura y porosidad, la dinámica del agua y del aire, la erodabilidad y la actividad biológica y química del suelo. Por esto, su evolución en el tiempo es un factor clave para asegurar la productividad y sustentabilidad de los sistemas intensivos (Morón et al., 2011, Durán y García Préchac, 2007, Dogliotti et al., 2004).

Los resultados de un ensayo realizado en la estación INIA Treinta y Tres (Terra y García Préchac, 2001) muestran que cuando la agricultura continua es forrajera (sucesión de 2 cultivos anuales/año en forma continua cuyo destino es el consumo directo o indirecto por parte de los animales), aun cuando hecha en siembra directa, no aporta cantidades importantes de biomasa como residuos en cobertura ni dentro del suelo, lo que lleva a una pérdida de C orgánico que tiende a equilibrarse en pocos años (7,5 % desde 1995 a 1999). En cambio, cuando la secuencia incluye

una fase de pasturas de larga duración, el contenido de carbono orgánico a largo plazo se mantendría e incluso podría llegar a aumentar. Esto indicaría que, desde el punto de vista de la sustentabilidad del recurso suelo, los sistemas de producción con pastoreo, aún con siembra directa, deben incluir pasturas en sus rotaciones.

Morón et al. (2011) y Cardozo y Uribe (2010) reportaron en suelos bajo producción lechera comercial reducciones de entre 8 % y 33 % de carbono orgánico respecto a la situación imperturbada. Esto estaría indicando que el efecto restaurador de las praderas sobre la materia orgánica no sería suficiente para llegar a los valores originales, posiblemente debido a la baja productividad de las praderas y a las pérdidas de C orgánico por mineralización y erosión (Morón et al., 2008).

En cuanto a la tasa de pérdida de C, Cardozo y Uribe (2010) encontraron, en todos los sistemas estudiados, tasas negativas bajas de entre - 2 y - 101 kg C/ha/año, que correlacionaron con la proporción de verdeos y tiempos de barbecho en la rotación. Ahora, si se considera además la pérdida por erosión (utilizando un factor de enriquecimiento de la fracción erosionable de 1,5), las pérdidas ascienden a valores de entre - 100 y - 1400 kg C/ha/año (entre - 172 y - 2400 kg MO/ha/año). Por esto concluyen que, en la medida en que exista un control de la erosión, el balance de carbono no comprometería sustentabilidad de los sistemas.

Díaz-Rossello y Durán (2011), al analizar el efecto sobre el carbono orgánico del suelo de cuatro sistemas de producción de leche con diferencias en el manejo del suelo, carga y producción de leche, concluyen que existe hoy día un modelo tecnológico que permitiría restaurar la fertilidad y con balances positivos de carbono (acumulación de 2 % anual) basados en la rotación de verdeos y praderas mixtas de gramínea y leguminosa con alto uso de suplementos. Los menores tiempos de barbecho (en que no hay producción y mayor riesgo de erosión), la siembra directa que promueve la acumulación de carbono orgánico y reduce las pérdidas por mineralización, la fertilización y el manejo controlado de pasturas que aumenta su productividad y contribución al carbono orgánico y las entradas de carbono orgánico extrapredio a través de forrajes y concentrados aparecen como los principales factores que explicarían esta acumulación.

### 2.4.3. Uso del suelo y erosión

La erosión es la pérdida de material del suelo en un lugar concreto del paisaje, el cual es transportado y posteriormente depositado en otra parte del paisaje. Este proceso, que ocurre naturalmente, puede verse acelerado por la actividad humana al eliminarse o alterarse la vegetación natural que protege al suelo de la acción erosiva del agua (Durán y García Préchac, 2007).

La cobertura vegetal del suelo, sea por material vivo o muerto, constituye su principal mecanismo de protección contra la erosión. Por esto, el laboreo convencional (que elimina o reduce dicha cobertura) o incluso la siembra directa, en los casos en que esta no asegure una buena cobertura vegetal, generan riesgo de erosión (García Préchac, 2009a).

En el suelo erodado viajan las partículas más finas, con mayor contenido de materia orgánica y químicamente más activas. Esto determina que, además de la pérdida de suelo, ocurra la degradación del suelo que queda, lo que condiciona su posterior capacidad productiva (Durán y García Préchac, 2007).

La erosión también tiene efecto fuera de los límites del sistema, siendo una fuente difusa de pérdida de nutrientes que puede tener un importante impacto ambiental al afectar la calidad del agua y del aire, poniendo en riesgo la sostenibilidad del sistema (Cardozo y Uribe, 2010, La Manna et al., 2008).

Varios autores (Clérici et al., 2004, Clérici y García Préchac, 2001) han empleado el modelo USLE/RUSLE (siglas en inglés de *universal soil loss equation* y su versión revisada *revised universal soil loss equation*, respectivamente) para predecir el efecto de posibles cambios en el uso y manejo del suelo sobre la tasa de erosión en suelos del Uruguay. Estos estimaron la tasa de erosión de diferentes rotaciones cultivo/pastura y encontraron que esta incrementa al aumentar los años de cultivos de la rotación y que la tasa de erosión disminuye con el aumento de los años de pastura (Cuadro 3).

**Cuadro 3: tasas de erosión estimadas mediante modelo USLE/RUSLE para diferentes usos y manejos del suelo.**

Uso y manejo del suelo	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)
Pastura natural, bajo pastoreo continuo	2 a 5,2
Rotación cultivo/pastura (2:2) LC	8,6 a 29,4
Rotación cultivo/pastura SD	2,8 a 6,6
M-S-T/P-P-P	3,2 a 5,7
M-S-T/P-P-P-P	2,8 a 4,9
M-S-T-S-T/P-P-P	3,7 a 6,6
M-S-T-S-T/P-P-P-P	3,2 a 5,7
Agricultura continua SD (S-T)	6,6 a 11,9
Referencias: LC = laboreo convencional SD = siembra directa M = maíz S = soja T = trigo P = pradera	
Fuente: Clérico et al., 2004, Clérico y García Préchac, 2001.	

Cardozo y Uribe (2010) empleando el programa Erosión 5.91 estimaron para los 4 predios estudiados valores de pérdida de suelo que oscilaron entre 4 y 10 tt/ha/año para rotaciones de verdes y pasturas y valores de entre 9 y 31 tt/ha/año en rotaciones de verdes puros y concluyeron que existe una clara relación entre la pérdida de suelo por erosión y la proporción de verdes en la rotación debido a que estos determinan mayores tiempos de barbecho en los que el suelo queda expuesto a la acción de la lluvia.

Los valores estimados por estos autores superan a los reportados por la bibliografía para siembra directa y resultan similares a los reportados para laboreo intensivo. Atribuyen este hecho a la baja cobertura del suelo, tanto en la fase de cultivo como durante el barbecho, debido al manejo del pastoreo y la baja cantidad de rastrojo dejado en superficie (Cardozo y Uribe, 2010).

## 2.5. MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE SUSTENTABILIDAD

En los últimos tiempos se han desarrollado en el mundo diferentes métodos, más o menos complejos, para la evaluación de la sustentabilidad. Estos van desde simples modelos de entrada-salida (balances) hasta complejos modelos integradores con múltiples objetivos. A continuación, se presenta una breve descripción de estos.

## 2.5.1. Métodos empleados para la evaluación de la sustentabilidad

### 2.5.1.1. Modelos de entrada-salida

Los modelos son una representación simplificada de la realidad. Los modelos simples permiten realizar predicciones exactas y confiables, dentro del ambiente en que fueron calibrados. Modelos más exhaustivos incluyen muchas funciones y parámetros, cada una de los cuales agrega incertidumbre asociada, lo que afecta la precisión del resultado predicho (Aarts et al., 1992).

Se pueden emplear modelos simples para describir e integrar los diferentes componentes del sistema lechero. Los modelos de flujos de nutrientes permiten la estimación de balances y su eficiencia de utilización (Aarts et al., 1992).

El balance de nutrientes a escala del predio (*Whole-Farm or Farm-Gate Balance*) aparece como una de las primeras herramientas que se comienza a utilizar para evaluar la sustentabilidad del sistema en términos ambientales, permitiendo estimar con ellos la eficiencia de uso y potencial de pérdida de nutrientes al ambiente (Gourley et al., 2012; Aarts et al., 1992).

### 2.5.1.2. Programación lineal

La búsqueda de sistemas sustentables, que cumplan con objetivos económicos, sociales y ambientales, requiere de la combinación sistemática de conocimientos agrotécnicos-agroecológicos y agroeconómicos, para lo cual los modelos de programación lineal resultan ser una herramienta útil. Estos permiten explorar sistemas productivos alternativos.

Si bien estos modelos fueron inicialmente desarrollados para la evaluación económica del sistema, se ha agregado el componente ambiental mediante la incorporación de balances de nutrientes en estos (Rotz et al., 2005).

En la programación lineal el predio es representado por una combinación lineal de actividades y el valor alcanzado para los objetivos resulta de la suma de las contribuciones que cada actividad individual aporta a este.

Todos los cultivos, animales y tecnologías de producción representan el universo de *actividades* que pueden ser elegidas y combinadas en predio. Para la selección de la combinación de actividades que mejor cumple con todos los objetivos, se emplean procedimientos de optimización numérica, siendo la que mejor se adecua al diseño de sistemas productivos la programación lineal múltiples objetivos (MGLP por sus siglas en inglés). Esta consiste en varias rondas de optimización en las cuales un objetivo es seleccionado y optimizado mientras que los demás objetivos actúan como límites. Este método de optimización presenta las siguientes ventajas: no requiere que los objetivos sean expresados en las mismas unidades, tampoco requiere de una ponderación *a priori* de estos y permite, además, la identificación de posibles compromisos o *trade-offs* que puedan existir entre los objetivos (Ten Berge et al., 2000).

La principal limitante de la programación lineal es que no permite una adecuada descripción de la dinámica de los procesos físicos y biológicos que ocurren en el predio, lo que impide considerar sus efectos e interacciones en el análisis de la performance de este (Rotz et al., 2005).

Un ejemplo de aplicación de esta metodología es el trabajo realizado por Van de Ven (1996, citado por Ten Berge et al., 2000), quien la utilizó para buscar sistemas lecheros ambientalmente más amigables. En este caso, el modelo contempla objetivos económicos y ambientales tales como producción de leche, mano de obra, pérdidas de N por lavado y volatilización y balance de nutrientes (Ten Berge et al., 2000).

#### 2.5.1.3. Modelos integradores

Los modelos integradores son herramientas que expresan o traducen el comportamiento que presenta el sistema estudiado en términos de los indicadores definidos. Los métodos que se emplean en el cálculo de los indicadores pueden ser simples reglas, modelos de regresión o hasta modelos de simulación más o menos complejos (Rossing et al., 2007).

Modelos como estos han sido empleados en Uruguay en sistemas de producción vegetal intensiva. Con estos modelos es posible analizar, diseñar y

evaluar cualitativa y cuantitativamente diferentes alternativas de manejo. Por esto han demostrado ser de gran ayuda para la planificación y diseño de sistemas productivos complejos al lograr conciliar objetivos económicos-productivos con los ecológicos o ambientales (Dogliotti et al., 2005).

Dogliotti, trabajando en sistemas de producción vegetal intensiva del sur del Uruguay, desarrolló una metodología que permite diseñar y evaluar de manera sistemática un amplio rango de usos alternativos del suelo: el ROTAT (Dogliotti, 2003, citado por Dogliotti et al., 2004). El modelo genera todas las posibles combinaciones de usos de suelo para el potrero (rotaciones) que cumplen con un número de reglas agronómicas ingresadas por el usuario. Estas rotaciones son luego combinadas en el predio empleando un modelo de programación lineal con múltiples objetivos, lo que permite el diseño de sistemas productivos alternativos acordes con los recursos disponibles y los objetivos propuestos, combinando para esto aspectos técnicos, económicos-sociales y ambientales (Casagrande et al., 2010, Dogliotti et al., 2004).

Este tipo de herramientas de modelación han demostrado ser muy útiles tanto para la planificación y diseño sistemático de granjas alternativas, como para la evaluación ex-ante de las mismas, y lograr conciliar objetivos económicos-productivos con los ecológicos o ambientales (Casagrande et al., 2010, Dogliotti et al., 2005).

Groot et al. (2010), empleando un modelo cuantitativo de simulación llamado Farm Design, diseñó y evaluó sistemas de producción mixtos. Los resultados del estudio demuestran que, con los mismos recursos de la granja estudiada, varias alternativas de manejo logran el mismo nivel de ingreso económico que la situación inicial, pero con muy diferentes efectos sobre el ambiente. Esta metodología permite comprender las interacciones que existen entre los componentes del sistema y predecir los efectos que cambios en uno o varios de ellos tendrán sobre los otros. Por ser este el modelo que se empleó en el presente estudio, a continuación, se realiza una descripción detallada de este.

### 2.5.2. Ejemplo de modelo integrador: el programa Farm Design (PFD)

Los agroecosistemas pueden ser vistos como sistemas complejos, integrados por varios componentes que se relacionan entre sí. En consecuencia, cualquier cambio que ocurra en uno de ellos va a actuar sobre los otros y así el sistema tendrá una respuesta emergente, posiblemente diferente a la que tendrían cada uno de sus componentes por separado.

Si a esto se agregan, además, objetivos y restricciones que el sistema debe cumplir, la cantidad y complejidad de la información a manejar es tal que se necesita de modelos computacionales que faciliten su análisis (Groot et al., 2010).

El programa Farm Design (PFD) facilita el análisis y comprensión del predio como un sistema complejo (enfoque sistémico) y permite describir, explicar y predecir el efecto que cambios en el manejo o estado de algunos de sus componentes va a tener en los otros. Con este programa se puede explorar nuevas configuraciones del sistema para buscar optimizar más de un objetivo a la vez, y así visualizar los compromisos (*trade-offs*) que pueden existir entre diferentes objetivos como, por ejemplo, económicos y ambientales (Groot et al., 2010).

El PFD es un modelo cuantitativo de simulación que opera a escala predial. Es un modelo estático, que evalúa el resultado del predio con base en balances anuales (Groot et al., 2010). Además de la descripción del sistema actual, este programa permite la exploración de sistemas alternativos mediante la diferente combinación de recursos y permite la optimización de varios objetivos en simultáneo debido al criterio de evaluación empleado (óptimo Pareto).

La información de entrada (o requerida por el programa) comprende la descripción de los cultivos, de los animales, las raciones utilizadas, el fertilizante, la mano obra, el equipamiento y la infraestructura, así como también información económica y ambiental.

La información de salida (indicadores calculados por el programa) comprende: flujos de nitrógeno, fósforo y potasio, el balance de materia orgánica del suelo, el balance nutricional de los animales, la cantidad y composición del abono producido, el uso de la mano de obra y el resultado económico del predio, todo en base anual (Groot et al., 2010). El detalle de los cálculos que realiza el programa para la

estimación de estos balances puede ser encontrada en el manual del PFD (Groot y Oomen, 2011).

Tal como es explicado en el manual, el PFD se desarrolla en 5 etapas: «*Describe*» (describir), «*Explain*» (explicar), «*Evaluate*» (evaluar), «*Explore*» (explorar) y «*Re design*» (rediseñar), aunque el programa las presenta en 4 ventanas.

En la ventana «*Describe*», el usuario ingresa la información básica del predio y se obtiene la descripción completa de todos los componentes del sistema. Varios de estos componentes podrán ser luego seleccionados como «variables de decisión» que el programa podrá modificar durante la fase de exploración para buscar una mejor combinación de recursos.

Durante la etapa de «*Explain*», el PFD calcula y presenta los indicadores económicos, productivos y ambientales para mostrar la performance del sistema actual. Estos indicadores podrán ser seleccionados como restricciones u objetivos a optimizar durante la exploración. Las restricciones son límites que el usuario establece para algunos indicadores que pretende que los sistemas alternativos no sobrepasen. Estos pueden ser, por ejemplo, límites para la entrada o salidas de recursos del sistema como pérdidas de nutrientes, entre otros. Los objetivos, en cambio, son salidas del sistema que el programa procurará maximizar o minimizar durante la etapa exploratoria.

En la ventana «*Evaluate*», el PFD contrasta las configuraciones y resultados del sistema actual con los objetivos y restricciones impuestas en la ventana anterior. Si todas estas cumplen con los límites establecidos, entonces la fase exploratoria es habilitada.

Durante la etapa exploratoria (ventana «*Explore*»), el PFD busca alternativas de granja con mejor performance, que maximicen o minimicen los objetivos seleccionados y cumplan con las restricciones planteadas en las ventanas anteriores. Para su evaluación se aplica el criterio de optimización de múltiples objetivos de Pareto. El óptimo Pareto es el punto de equilibrio en el cual ninguno de los objetivos es capaz de ser mejorado sin perjudicar a otro objetivo.

Al finalizar el proceso de exploración, el PFD muestra un gráfico donde se representa la performance del sistema actual y de los sistemas alternativos para los

objetivos seleccionados. En este gráfico, el usuario puede seleccionar varios sistemas alternativos y compararlos con el original, ya que sus configuraciones y performance aparecen listadas junto a los del sistema original en la ventana «*Evaluate*» (Groot, 2011).

El sistema alternativo seleccionado puede ser guardado en el PFD y posteriormente usado como punto de partida para un nuevo ciclo de rediseño y evaluación con el programa (Groot, 2011).

## 2.6. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.6.1. Objetivo general

Evaluar la aplicación del programa Farm Desing como herramienta para la descripción, análisis y rediseño de un sistema pastoril de producción de leche en términos bioeconómicos y ambientales.

### 2.6.2. Objetivos específicos

2.6.2.1. Evaluar el empleo del programa Farm Design como herramienta para el análisis del sistema actual de producción: evaluación de la fase descriptiva del PFD

2.6.2.2. Evaluar la utilidad del programa Farm Design para el rediseño del sistema de producción y la evaluación de propuestas alternativas en búsqueda de la optimización de múltiples objetivos: evaluación de la fase exploratoria del PFD.

### 2.6.3. Hipótesis

2.6.3.1. El PFD permite la correcta descripción y análisis del sistema actual con base en indicadores objetivos de performance económico-productivos y ambientales.

2.6.3.2. Es posible el rediseño del sistema actual para lograr un mejor resultado económico y a la vez mantener o mejorar los indicadores de sustentabilidad ambiental.

### 3. MATERIALES Y METODOS

En el presente trabajo se decidió emplear el programa computacional Farm Design como herramienta para el análisis integrado y rediseño de un sistema de producción de leche de base pastoril.

Como ya fue mencionado en los antecedentes, el PFD es un modelo cuantitativo de simulación que opera a escala de predio o granja (*whole farm model*), lo que quiere decir que evalúa al sistema en su globalidad, sin discriminar espacialmente diferentes zonas del predio. Es un modelo estático, que evalúa el resultado del predio con base en balances anuales y, por tanto, tampoco es posible visualizar variaciones estacionales.

Además del análisis del sistema actual, este programa permite la exploración de sistemas alternativos mediante la diferente combinación de los recursos, y la optimización de varios objetivos en simultáneo debido al criterio de optimización empleado (óptimo Pareto).

Como ya fue descrito en los antecedentes, el programa transcurre en 5 etapas: «Describe», «Explain», «Evaluate», «Explore» y «Re design», pero se visualizan solo 4 ventanas, ya que para el rediseño las características de los sistemas alternativos se muestran en la ventana «Evaluate», lo que permite la comparación con sistema original.

En la ventana «Describe» el usuario ingresa la información básica del predio. En la ventana «Explain» el programa calcula y muestra los indicadores productivos, económicos y ambientales del sistema. En la ventana «Evaluate» se comparan los resultados del actual sistema con los objetivos y restricciones impuestas por el usuario en la ventana anterior y durante la etapa exploratoria o «Explore» el PFD explora sistemas alternativos con mejor performance que el actual. El usuario puede seleccionar uno o varios de estos sistemas alternativos y comparar sus características con las del sistema actual pensando de esta manera su posible rediseño.

A continuación, se realiza una breve descripción del predio estudiado, las fuentes de información empleadas para la obtención de los datos ingresados al PFD,

de los principales indicadores estimados por el PFD y de los criterios y objetivos que se emplearon para el rediseño del sistema.

### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL PREDIO EN ESTUDIO

La información productiva y económica ingresada al PFD corresponde a uno de los predios que integran la base de datos del proyecto de costos de Conaprole (Batteggazzore com. per. 2011). La selección de este predio para su estudio en el presente trabajo se basó en que este representa una de las estrategias productivas que se repiten en la base de datos, siendo este un sistema con un nivel medio-alto en el uso de insumos y buenos indicadores productivos y económicos, además de contar con un buen nivel de registros necesarios para la aplicación de este trabajo.

Se trata de un predio de 493 hectáreas de superficie útil, ubicado en el departamento San José (índice CONEAT promedio de 128). Con un área de 166 ha. destinadas a la recría y un área de 327 ha. destinadas a las vacas masa (VM), presenta una dotación total (recría + VM) de 1,23 equivalente vaca lechera por hectárea (EVL/ha) y una relación vaca ordeñe/vaca masa (VO/VM) de 86 %.

La producción total de leche del predio es de 2.626.485 L al año (8.032 L/ha) con una producción individual de 21,2 litros por vaca ordeñe por día (L/VO/día). Además, presenta una producción total de carne de 81.047 kg al año (488 kg/ha de recría).

En cuanto a la alimentación de las vacas masa (kg/ha VM), esta consiste en un 30 % de pasturas, 42 % de reservas y 28 % de concentrado (270 g concentrado/L leche). El alimento es suministrado en patios de alimentación, donde los animales permanecen unas 5 horas.

Con respecto al manejo del ordeñe, este dura unas 7 h (espera y ordeñe). Terminada esta etapa, el estiércol sólido es separado por barrido y el líquido de lavado se almacena en pileta de almacenamiento. Tanto el estiércol sólido como el efluente de la pileta son luego distribuidos en el campo.

En cuanto al área mejorada, esta ocupa el 93 % de la superficie útil del predio, correspondiendo 58 % a praderas y el 35 % restante a verdeos. Según información provista por el técnico, la rotación teórica aplicada consiste en praderas de larga

duración (4 años) seguidas por un verdeo de invierno y un cultivo de verano con destino de silo planta entera, sembrándose en algunos años además un verdeo de verano. También realiza silos y fardos de pradera.

### 3.2. INFORMACIÓN INGRESADA AL PROGRAMA FARM DESIGN

En el Cuadro 4 se muestra un listado de la información requerida por el PFD en cada área.

**Cuadro 4: información ingresada al PFD (ventana «Describe»).**

Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- temperatura</li> <li>- deposiciones atmosféricas (N, P y K)</li> <li>- suelo (tipo, materia orgánica, fracción degradable de la MO, profundidad, densidad aparente, pH, contenido de nutrientes y de humedad, riego)</li> <li>- erosión (cantidad y contenido de nutrientes del suelo erodado )</li> </ul>
Económico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- costo e intereses de la tierra</li> <li>- costos generales de la empresa</li> <li>- costos generales del rodeo animales</li> <li>- costos y horas de mano de obra</li> </ul>
Cultivos (para cada módulo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre</li> <li>- fijación simbiótica</li> <li>- aporte de materia orgánica efectiva</li> <li>- costos</li> <li>- mano de obra requerida</li> </ul>
Productos de origen vegetal (para cada producto y dentro de cada módulo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre del producto</li> <li>- aporte de MS al suelo (<i>to soil</i> = rastrojos)</li> <li>- MS consumida por los animales usado para consumo familiar</li> <li>- <i>full self supply</i> (si es exclusivamente producido y consumido en el predio)</li> <li>- rendimiento fresco</li> <li>- contenido de MS</li> <li>- pérdidas durante la alimentación de animales</li> <li>- contenido de nutrientes (N, P y K) ceniza y fibra</li> <li>- digestibilidad, contenido de energía y de proteína</li> <li>- precio fresco</li> </ul>

<p>Animales (para cada categoría)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre de la categoría</li> <li>- tiempo de encierro y de pastoreo</li> <li>- número de animales de la categoría</li> <li>- tasa de reemplazo</li> <li>- raza, edad, peso vivo</li> <li>- porcentaje de carcasa</li> <li>- tasa de crecimiento</li> <li>- producción de leche</li> <li>- contenido de grasa y proteína de la leche</li> <li>- requerimientos de fibra</li> <li>- requerimientos de energía y proteína para mantenimiento, producción y crecimiento</li> <li>- tiempo en la pastura y en los corrales</li> <li>- mano de obra requerida</li> </ul>
<p>Productos de origen animal (para cada producto)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre del producto</li> <li>- destinado para consumo de los animales</li> <li>- destinado para consumo familiar</li> <li>- contenido de MS, P, N, K, cenizas, de energía y proteína, digestibilidad</li> <li>- precio fresco</li> </ul>
<p>Estiércol (para cada uno de los tipos de estiércol)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre</li> <li>- cantidad ingresada al sistema</li> <li>- contenido de MS, MO, N, P, K</li> <li>- precio</li> <li>- lugar en que se produjo (pastura, establo o corral)</li> <li>- proporción del abono total producido en cada lugar</li> <li>- pérdidas durante la excreción</li> <li>- pérdidas durante la aplicación</li> <li>- proporción degradable en condiciones de aerobiosis</li> <li>- fracción del N mineral que se pierde durante el almacenamiento en aerobiosis</li> <li>- fracción de la materia orgánica que se degrada durante el almacenamiento en aerobiosis</li> <li>- eficiencia de utilización por los microorganismos en condiciones de aerobiosis</li> <li>- relación C:N de los microorganismos en condiciones de aerobiosis</li> <li>- fracción del N mineral que se pierde durante almacenamiento en condiciones de anaerobiosis</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fracción de la materia orgánica que se degrada durante el almacenamiento en anaerobiosis</li> <li>- relación C:N de los microorganismos en condiciones de anaerobiosis</li> <li>- coeficiente de humificación</li> </ul>
Maquinaria (para cada equipo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre</li> <li>- número de equipos iguales</li> <li>- precio del equipo</li> <li>- costo de depreciación anual</li> <li>- costos de operación, mantenimiento y seguro</li> </ul>
Infraestructura (para cada una de las construcciones)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre</li> <li>- número de construcciones similares</li> <li>- precio de la construcción</li> <li>- costo anual de depreciación</li> <li>- costo de operación, mantenimiento y seguro</li> </ul>

La información contenida en la base de datos del predio (BD Conaprole) tuvo que ser procesada para obtener los datos en el formato requerido por el PFD. El detalle de las asunciones, los cálculos y las estimaciones que se hicieron para esto se encuentran en los Anexos 8.1 y 8.2.

### 3.2.1. Información productiva y económica ingresada al PFD

Debido a que el análisis es del sistema en su conjunto, se decidió no discriminar las áreas de recría y vaca masa y se tomó un área mejorada total. Por este motivo los indicadores expresados por hectárea en el presente estudio refieren a la superficie lechera total y no al área VM.

Con respecto al uso del suelo, la información ingresada al PFD procuró representar un sistema estabilizado, para evitar incluir en el análisis las variaciones de las áreas que pueden ocurrir algunos años puntuales debido a factores climáticos o de otra índole.

Debido a esto, existen algunas diferencias entre las áreas mejoradas ingresadas en el PFD y las que aparecen en la BD Conaprole del productor, las que, al pertenecer a un ejercicio determinado (2009-2010), sí se ven afectadas por estas variaciones (Cuadro 5).

Debido a que el PFD estima la superficie total del sistema como la suma de las áreas de cada uno de los módulos de la rotación en caso de realizarse en un mismo

potrero 2 cultivos en el año, estos tuvieron que ser ingresados como un único módulo (ej., el módulo avena/sorgo) para no duplicar el área.

**Cuadro 5: uso del suelo. Base de datos Conaprole vs. Farm Design**

	Base de datos		Farm Design	
	ha.	%	has.	%
Área VM	327			
Área recria	166			
Área total	493			
Área mejorada	458	100 %	445	100 %
Praderas mejoradas (PPM)	285	62 %	326	73 %
Verdeo de invierno (VI)	93	20 %	38	9 %
Verdeo de verano (VV)	79	17 %	81	18 %

Con la información existente en la BD Conaprole (superficie, dotación, consumo de reservas y de concentrados, forraje reservado) se estimó el consumo de materia seca de los animales. A partir de esto, y aplicando conceptos de presupuestación forrajera, se estimó la producción de materia seca total de la rotación y de cada uno de los módulos que la integran, para lo cual se aplicaron la siguientes ecuaciones numeradas abajo, todo con base anual:

- Estimación del **consumo de materia seca** por hectárea (**CMS**), a partir de la carga expresada en equivalente vaca lechera y del consumo de materia seca estimado por animal (15 kg MS/EVL/día) (ec. 3.1).
- Al resultado anterior se descontó el consumo de forraje reservado y el consumo de concentrado de los animales para así obtener una estimación del **consumo de materia seca de forraje** por hectárea y por año (**CMSF**) (ec. 3.2).
- Luego, a partir del consumo de materia seca de forraje estimado y al adicionar los datos de forraje reservado y el rastrojo dejado por hectárea y corrigiendo por las eficiencias supuestas de cada proceso (60 % de utilización en pastoreo y 75 % de eficiencia de henificación), se estimó la **producción**

**de materia seca de forraje por hectárea (PMSF) y la total (PMSF total)** al multiplicar el resultado anterior por la superficie útil (ec. 3.3 y 3.4).

- Empleando las tablas para presupuestación forrajera de Leborgne R (2000), se estimó la producción de materia seca total teórica de la rotación y, a partir del aporte o contribución que hace cada cultivo a esa producción, se estimó el **coeficiente del cultivo** en la MS de la rotación (ec. 3.5).
- Finalmente, se estimó la producción por hectárea o **rendimiento de cada uno de los módulos** de la rotación real del productor multiplicando la PMSF total por el coeficiente del cultivo hallado en la rotación teórica y dividido el número de hectáreas de ese cultivo sembradas por el productor (ec. 3.6).

- Los rendimientos de los ensilajes y fardos (materia seca por hectárea a reservar) son estimados a partir de los datos reales presentes en la base de datos de Conaprole asumiendo una pérdida de 0,25 de la materia seca durante el proceso de reserva (ensialje o enfardado) (ec. 3.7.)

$$\text{Ec. 3.1} \quad \text{CMS (kgMS/ha)} = \text{EVL} * 15 \text{ kg MS/día} * 365 \text{ días}$$

$$\text{Ec. 3.2} \quad \text{CMSF (kgMS/ha)} = \text{CMS} - \text{consumo de reservas} - \text{consumo}$$

de concentrado.

$$\text{Ec. 3.3} \quad \text{PMSF (kgMS/ha)} = (\text{CMSF/ha} / \% \text{ utilización}) + \text{forraje reservado} + \text{rastros (estimado)}.$$

$$\text{Ec. 3.4} \quad \text{PMSF total} = \text{PMSF/ha} * \text{sup. utilizable del predio}.$$

$$\text{Ec. 3.5} \quad \text{Coef. cultivo en rotación} = \text{kg MS cultivo} / \text{kg MS rotación teórica (según Leborgne 2000)}$$

$$\text{Ec. 3.6} \quad \text{Rmto cultivo (kgMS/ha)} = (\text{PMSF total} * \text{coef. cultivo en rotación}) / \text{ha. de cultivo en la rotación}.$$

$$\text{Ec. 3.7} \quad \text{MS a reservar (kgMS/ha)} = \text{kgMS/ha de reserva} / 0,75$$

(eficiencia proceso henificación).

Donde:

CMS: consumo de materia seca por hectárea.

CMSF: consumo de materia seca de forraje por hectárea.

PMSF: producción de materia seca de forraje por hectárea.

PMSF total: producción de materia seca de forraje total en la superficie útil.

EVL: equivalente vaca lechera.

Coef. cultivo: proporción de MS de la rotación que es aportada por ese cultivo.

Los resultados de estas estimaciones se presentan en el Cuadro 6.

**Cuadro 6: estimación de consumo y producción de materia seca de cada uno de los componentes de la rotación.**

Componente.	Kg MS/ha
<b>CMS =</b>	6.707
<b>CMSF = CMS – consumo reserva – consumo concentrado =</b>	2.611
<b>PMSF = (CMSF/% utilización) + forraje reservado + rastrojo =</b>	5.883
- CMSF/% utilización	4.352
- Forraje producido reservado (se asume eficiencia de henificación de 0,75). No incluye el ensilaje de maíz.	593
- Forraje producido dejado como rastrojo	938
<b>Rendimiento avena</b>	4.567
<b>Rendimiento sorgo</b>	8.931
<b>Rendimiento alfalfa</b>	5.582
<b>Rendimiento PPM 1 año</b>	4.567
<b>Rendimiento PPM 2 año</b>	10.148
<b>Rendimiento PPM 3 año</b>	7.104
<b>Rendimiento PPM 4 año</b>	5.074
<b>Rendimiento PPM promedio</b>	6.878
<b>Silo de maíz (kg de MS a ensilar)</b>	16.500
<b>Silo de pasturas (kg de MS a ensilar)</b>	2.461
<b>Fardos de pradera (kg de MS a enfardar)</b>	3.555

Los rastrojos y las pérdidas de materia seca ocurridas durante los procesos de ensilaje y henificación fueron ingresados en el PFD como aportes de materia seca al suelo (*to soil* o *green manure*).

En el Cuadro 7 se presentan los valores de rastrojos supuestos en los cálculos antes mencionados y que fueron ingresados en el PFD. Se tomaron estos valores de referencia porque reflejan las prácticas más comunes tanto de manejo del pastoreo como de corte de los materiales para ensilaje.

**Cuadro 7: kg de MS de rastrojos ingresados en el PFD como *to soil*.**

Módulo	Kg MS rastrojo/ha
Avena	800
Sorgo	2000
Alfalfa	800
PPM 4 año	1000
PPM prom.	407
Maíz	2000

La estimación de la materia seca consumida por los animales (*MS to animals*) de cada módulo se estimó descontando al rendimiento del módulo la materia seca dejada como rastrojo y, en caso de realizarse reservas, descontándose también la materia seca a enfardar o ensilar como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 3.8 } MS \text{ to animals} = r_{mto} - MS \text{ reservada} - MS \text{ rastrojo}$$

También debió estimarse, para su ingreso en el PFD, la materia orgánica efectiva radicular (EOMR por sus siglas en inglés), para lo cual primero se estimó la materia seca radicular (MSR) como el cociente entre la MS producida y el coeficiente parte aérea/raíz de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 3.9 } MSR = MS \text{ producida} / \text{coef. PA/R}$$

Posteriormente se estimó la EOMR de cada módulo multiplicando la MSR por la proporción de raíces en los primeros 20 cm de suelo (se asume 0,6 en anuales y 0,7 en perennes), el coeficiente de muerte (*turnover*) y el coeficiente de humificación tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Ec. 3.10 } EOMR = MSR * \text{prop. raíces 20 cm} * \text{turnover} * \text{coef. humificación}$$

El coeficiente de muerte de raíces (*turnover*) se calculó aplicando la ecuación reportada por Gill et al. (2002) (Ec. 3.11), salvo el último año de pasturas, en que el coef. es 1 .

$$\text{Ec. 3.11 } Turnover = 0,2884e(0.046 * MAT) \text{ (Gill et al., 2002)}$$

Donde MAT es la temperatura media anual (por sus siglas en inglés).

En los Cuadros 8 y 9 se presentan las materias orgánicas efectivas radiculares estimadas para cada cultivo y las calculadas e ingresadas en el PFD por módulo.

**Cuadro 8: cálculo de la materia orgánica efectiva radicular por cultivo**

Cultivo	Rmto (kgMS/ha)	MS radicular (kgMS/ha)	% de raíces en los primeros 20 cm	<i>Turnover</i>	Coef. humificación	EOMR (kgMS/ha)
Avena	4.567	2.283	0,6	1,00	0,18	247
Sorgo	8.931	4.465	0,6	1,00	0,15	402
Alfalfa	5.582	5.582	0,6	0,65	0,20	432
Maíz	16.500	2.946	0,6	1,00	0,15	265
PPM	6.878	6.878	0,6	0,79	0,25	818
Trigo	6.875	929	0,6	1,00	0,18	100
Soja	4.470	860	0,6	1,00	0,20	103
Sorgo grano	8.800	1.571	0,6	1,00	0,15	141

**Cuadro 9: materia orgánica efectiva radicular por módulo ingresado al PFD**

Módulo	EOMR (kgMS/ha)
Av/mz	512
PPM/silo	818
PPM/heno	818
Av/sg	648
Tg/sg	242
Alfalfa	432

Por mayor detalle de los cálculos, consultar el Anexo 8.1.

### 3.2.2. Información climática y ambiental ingresada al PFD

La temperatura media ingresada al PFD es la reportada en la base de datos del INIA de 1980 a 2009 ([www.inia.org.uy](http://www.inia.org.uy)) para el departamento Colonia.

La entrada de nutrientes por concepto de deposiciones atmosféricas fue estimada a partir de información bibliográfica (Zunckel et al., 2003). El detalle de los cálculos realizados puede verse en el Anexo 8.3. Los parámetros ingresados al PFD fueron los siguientes (Cuadro 10):

**Cuadro 10: deposiciones atmosféricas de nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio (kg/ha/año)**

kg/ha	Elemento
N	4,45
P	0,62
K	3,32

### 3.2.3. Información de suelos y erosión

En cuanto a la información de suelos se toma como suelo representativo del predio un brunosol eutrico típico LAc, siendo este el suelo dominante del grupo CONEAT más frecuente en el predio.

Los parámetros físicos y químicos que se ingresaron al PFD fueron obtenidos a partir de bibliografía nacional (MAP-DS, 1979) o brindados por profesionales investigadores especializados en la temática (Anexo 8.3.) En el Cuadro 11 se presentan los parámetros de suelo y erosión ingresados al programa.

**Cuadro 11: parámetros de suelo y erosión ingresados al PFD.**

Parámetro de suelo	Valor ingresado al PFD
Tipo de suelo	franco arcillo limoso
Materia orgánica (%)	3
Degradación de la mat. orgánica. (%)	1,5
Profundidad del perfil del suelo para la descomposición de la materia orgánica (m)	0,2
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1250
pH del suelo	6
Fósforo extractable en agua (kg/ha)	25
Contenido de K total (kg/ha)	6000
Contenido de carbonatos (%)	0
Fijación no simbiótica de N (kg/ha/año)	10
Dato USLE RUSLE (tt/ha)	6,6
Cantidad suelo erosionado (mm).	0,528
Contenido de mat. org. en el suelo erodado (%)	7,5
Contenido de N en suelo erodado (%)	0,435
Contenido de P en suelo erodado (%)	0,125
Contenido de K en suelo erodado (%)	0,24

Dado que el productor aplica siembra directa, los contenidos de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en el material erodado se estimaron a partir de los contenidos de estos nutrientes en el suelo original, corregido por un factor de 2,5

debido al enriquecimiento que ocurre en los primeros centímetros del suelo en situaciones de siembra directa (O. Ernst, com. pers., 2012).

En el caso de K se decidió no aplicar el factor de corrección por enriquecimiento, ya que este no se asocia con la materia orgánica y debido a la escasa historia de fertilización con este nutriente en el país no sería esperable su concentración en los primeros centímetros de suelo (J. P. Zamalvide com. pers., setiembre 2018).

Si bien se empleó el valor de 2,5 como factor de corrección, este está todavía en investigación y probablemente requiera de revisión. Por esto motivo, el presente trabajo no pretende realizar comparación entre las tecnologías de siembra.

Con respecto a la pérdida de suelo por erosión, el PFD carece de un modelo que la estime, siendo este parámetro una de las variables de entrada al programa (*inputs*). Creemos que este aspecto puede resultar un problema a la hora de explorar sistemas alternativos, ya que, al no calcular la erosión, el PFD no podrá tener en cuenta el efecto que los cambios en el uso del suelo de los sistemas alternativos pueden llegar a tener sobre esta ni sobre las otras variables ambientales que se relacionan con ella, como el balance de materia orgánica.

Para el cálculo de la erosión, en este trabajo se empleó el programa Erosión 5.91, que se basa en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y su versión revisada (RUSLE) (Renard et al., 1997, Wischmeier y Smith, 1960, citados por García Prechac et al., 2009b).

El programa Erosión 5.91, validado para las condiciones de Uruguay, permite la estimación de las pérdidas de suelo por erosión (Mg suelo/ha/año) que se generan en un sistema agrícola al usar un determinado suelo, con determinadas características geográficas y topográficas, bajo un determinado uso y manejo (García Préchac et al., 2009b).

Para simular el sistema estudiado en su situación actual se ingresó al programa Erosión 5.9 una rotación de 6 años de duración, sobre un suelo brunosol eutrítico típico perteneciente a la unidad Isla Mala. La erodabilidad de este suelo se estima en 0,240 Mg/J (factor K recomendado por el programa) y la pérdida de suelo tolerable en este es de 7 Mg/ha/año. El cálculo del factor C se hizo por componentes. La

secuencia de cultivos ingresada se presenta en la Figura 1. Esta se diseñó de manera de lograr una rotación cultivos-pastura de 6 años de duración y una relación perennes/anuales de 75/25, lo más cercana a la relación 73/27 ingresada en el PFD.

**Figura 1: rotación ingresada al programa Erosión 5.9 para la simulación de la situación actual del sistema estudiado.**

PPM 1	PPM 2	PPM 3	PPM 4	PPM 5	Sorgo	Cereal Invierno	Maíz
-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------------------	------

Debido a que el programa Erosión 5.9 fue desarrollado para sistemas agrícolas, fue necesario hacer ciertos supuestos que permitieran simular el efecto del retiro del rastrojo que hacen los animales al pastorear. Los supuestos realizados fueron los siguientes:

- En caso de que la selección del rendimiento del cultivo defina el rastrojo remanente luego de la cosecha, se elige la opción «bajo rendimiento», de manera de simular el escaso rastrojo que queda luego del pastoreo.
- Si bien el método de siembra empleado por el productor es siembra directa, en ciertos componentes debió seleccionarse la opción «laboreo reducido con retiro de rastrojo» para que existiera coherencia entre los porcentajes de cobertura dejados por el cultivo anterior y el siguiente.

Con respecto al manejo del estiércol producido en la granja (en la pastura, en la sala de ordeño, en el corral de espera y en el patio de alimentación), fue asignado a las categorías de estiércol propuestas por el PFD (*pasture manure-farm yard manure* y *slurry*). Los parámetros de degradación que se emplearon en la simulación fueron los sugeridos por el creador del programa, Jeroen Groot, y reportados por Giesbers (2011).

### 3.3. OPERATIVA DEL PROGRAMA FARM DESIGN (PFD)

Una vez ingresada toda esta información al PFD se visualizó en la hoja «*Explain*» la performance del sistema actual, a través de los indicadores estimados por el programa (evaluación de la fase descriptiva). En el Cuadro 12 se muestran los principales indicadores estimados por el PFD usados en este trabajo.

**Cuadro 12: principales indicadores productivos, económicos y ambientales estimados por el PFD.**

Indicadores productivos	- producción total de leche - producción total de carne - balance nutricional
Indicadores económicos	- margen bruto por actividad - margen neto
Indicadores ambientales	- balance de materia orgánica del suelo - balance de nutrientes (N, P y K)

A continuación, se presenta una descripción de alguno de estos indicadores y su forma de cálculo. En la fórmula se identifican con letra *cursiva y negrita* las variables de entrada que se ingresaron en el PFD en la ventana «Describe», ya descritas en la sección anterior. Por mayor detalle, dirigirse al manual operativo del PFD, capítulo 5 (Groot y Oomen, 2011).

### 3.3.1. Indicadores productivos

#### 3.3.1.1. Producción total de leche

Esta es calculada a partir del número de animales (*AnmNumber*) y su producción de leche individual (*MilkProduction*) mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Ec. 3.12. } Produced_{milk} = \sum 365 * AnmNumber_a * MilkProduction_a \quad \forall a$$

Donde:

*Produced<sub>milk</sub>*: producción total de leche

*a*: categoría animal

*AnmNumber*: número de animales en la categoría *a*

*MilkProduction*: producción individual de leche de la categoría *a*

Si bien entre las salidas del PFD no aparece la producción de leche/ha como indicador, esta se estimó fácilmente a partir de las salidas del programa en la ventana «Explain» como el cociente entre la producción total de leche y el área total del sistema, ya que, como se dijo, no se encuentra discriminada el área VM. La misma metodología se aplicó para el cálculo de este indicador a partir de la información de la BD de Conaprole de forma de hacerlos comparables.

### 3.3.1.2. Producción total de carne

El PFD estima la producción total de carne con base en el número de animales (*AnmNumber*), su tasa de crecimiento (*Growth*) y el porcentaje de carcasa (*Carcass*), empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 3.13 } \textit{Produced}_{meat} = \sum 365 * \textit{AnmNumber}_a * \textit{Carcass}_a * \textit{Growth}_a \forall a$$

Dónde:

*a*: categoría animal

*AnmNumber*: número de animales en esa categoría

*Carcass*: porcentaje de carcasa de la *a* categoría

*Growth*: tasa de crecimiento (kg/día) de la *a* categoría

En la base de datos de Conaprole, en cambio, este indicador es estimado como la diferencia entre los kg de carne total al final del ejercicio y los kg totales al inicio de este, a lo que se agregan los kg vendidos y se restan los kg comprados.

$$\text{Ec. 3.14 } \text{kg carne prod.} = \text{kg final ejercicio} - \text{kg inicio ejercicio} + \text{kg vendidos} - \text{kg comprados}$$

### 3.3.1.3. Balance nutricional de los animales

Se optó por el sistema de alimentación holandés (VEM: unidad de medida de energía equivalente a 6,9 kJ de energía neta de lactación y DVE: gramos de proteína digestible en el intestino) para la estimación de los requerimientos nutricionales de los animales. Estos requerimientos son estimados por el PFD para todo el rodeo a partir de la información ingresada por categoría en la ventana «*Describe*».

El balance es calculado por el PFD como el desvío entre la cantidad de nutriente disponible en los alimentos suministrados (ya sean estos producidos dentro o comprados fuera del predio) y la cantidad de nutriente requerido por los animales, como se muestra en la ecuación 3.15. Este es calculado para energía y proteína e incluye los requerimientos de mantenimiento, producción de leche y crecimiento. También se realiza el balance de fibra necesaria para el correcto funcionamiento del

rumen y se contrasta la capacidad de consumo del animal con la capacidad de llenado de la dieta.

Ec. 3.15 Balance nutriente = (nutriente disponible – nutriente requerido) / nutriente requerido \* 100

#### 3.3.1.4. Concentrado por litro de leche (kgMS/L)

Este indicador no aparece como tal en las salidas del PFD, pero se lo estimó como el cociente entre los kg totales de concentrado comprados y los litros totales de leche producida estimados por el PFD, asumiéndose de esta manera que la totalidad del concentrado es comprado fuera del predio y consumido por las vacas masa y nada es consumido por la recria.

En cuanto su forma de cálculo, a partir de la BD de Conaprole se aplicó el mismo criterio (cociente entre la totalidad del concentrado consumido, tanto por la recria como por las VM, y la producción de leche) para hacerlo comparable con el indicador estimado en el PFD.

#### 3.3.1.5. Carga animal

Este indicador tampoco aparece como tal en las salidas del PFD, pero se estimó empleando los datos de salida brindados por el programa a partir del número de animales en cada categoría y la superficie lechera mediante la siguiente ecuación:

Ec. 3.16 Carga (sin recria) = VM/sup. lechera

Ec. 3.17 Carga (con recria) = (VM + vaq. reemp.\*0,80 + vaq.1-2\*0,60 + terneros/a\*0,2)/ sup. lechera

### 3.3.2. Indicadores económicos

#### 3.3.2.1. Margen bruto

El margen bruto de los productos de origen animal (MA) es estimado como:

Ec. 3.18. MA = (producción x precio) – costos alimentación – costos interés – otros costos animales

El margen bruto de los productos de origen vegetal (MC) es estimado como:

Ec. 3.19  $MC = (\text{producción} \times \text{precio}) - \text{costos cultivo} - \text{costos contratación de maquinaria}$

### 3.3.2.2. Margen neto (*operating profit*)

El margen neto (OP) es estimado como la suma de los márgenes brutos y descontando a estos los costos adicionales fijos (costo de la tierra, depreciación y costo de interés de mejoras y maquinaria, costos generales) y variables (fertilizantes y mano de obra) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 3.20 } OP = MA + MC - CM - CA - CC - CR - CL - CG$$

Donde

OP: margen neto.

MA: margen bruto productos de origen animal.

MC: margen bruto productos de origen vegetal.

CM: costo abono o fertilizante.

CA: costos bienes.

CC: costo mano de obra zafral.

CR: costo mano de obra regular.

CL: costo de la tierra.

CG: costos generales.

### 3.3.3. Indicadores ambientales

#### 3.3.3.1. Balance de la materia orgánica del suelo (BMO)

El balance de materia orgánica es estimado por el PFD como la diferencia entre la materia orgánica acumulada y la pérdida.

Se consideran entradas de materia orgánica las provenientes de los rastrojos de cultivo ( $OM_{CR}$  y  $OM_{GM}$ ), del desperdicio de los alimentos ( $OM_{FL}$ ) y del estiércol ( $OM_{MN}$ ). Dentro de las pérdidas tenemos la degradación de la materia orgánica del suelo ( $OM_{SD}$ ) y las pérdidas por erosión ( $OM_{ER}$ ).

$$\text{Ec. 3.21 } BMO = OM_{CR} + OM_{GM} + OM_{FL} + OM_{MN} - OM_{SD} - OM_{ER}$$

La  $OM_{CR}$  considera la materia orgánica efectiva radicular (EOMR) que es dejada por los cultivos y pasturas. Este último parámetro fue estimado e ingresado al PFD para cada módulo de la rotación, como ya fue explicado en el punto 3.2.1 (ec. 3.10 y 3.11).

Dentro de la  $OM_{GM}$  se incluye la materia seca de los rastrojos dejados luego del pastoreo o corte y las pérdidas de materia seca que ocurren durante los procesos de henificación y ensilaje (se asumen en un 25 %) que fueron ingresados en el PFD como variable *ToSoil* (Cuadro 7). Se asume que el 80 % de esta materia orgánica será degradada durante el primer año luego de su aplicación, por lo que quedará solo un remanente del 20 %.

Las entradas de materia orgánica por desperdicio de alimento se estiman a partir del contenido de materia seca de los alimentos destinados a consumo, de la tasa de pérdida asumida para cada uno (*FeedLoss*) y del contenido de materia orgánica de este. Al igual que en las entradas por concepto de  $OM_{GM}$  se asume que solo un 20 % de esta materia orgánica permanecerá luego de un año.

La cantidad de materia orgánica del suelo que es degradada ( $OM_{SD}$ ) se calcula a partir del contenido de materia orgánica de este (*ActiveOM*) y de la densidad aparente para una profundidad de 20 cm (*SoilDepth* y *BulkDensity*), información ingresada por el usuario en «Variables Ambiente». Su tasa de degradación es también una variable ingresada al programa (*OrganicMatterDegradation*). Esta tasa es afectada por variables ambientales tales como textura del suelo, humedad y temperatura promedio, los cuales son todos parámetros ingresados al programa por el usuario (*TextureFactor*, *MoistPeriodPf35*, *MeanTemperature*). Con base en estos 3 parámetros, el programa estima un factor de corrección  $f$  por el cual corrige la tasa de degradación.

$$\text{Ec. 3.22 } OM_{SD} = A * \% MO * \text{prof.} * \text{DAP} * \text{tasa de degradación} * f$$

Donde:

$OM_{SD}$ : materia orgánica del suelo degradada (kg).

A: área de la granja (ha).

% MO: contenido de materia orgánica del suelo (%).

Prof.: profundidad 0,2 (m).

DAP: densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>).

Tasa de degradación (%) = 1,5 en siembra directa o 2 en laboreo convencional.

f: factor de corrección por textura del suelo, humedad y temperatura.

En cuanto a la materia orgánica perdida por erosión (OM<sub>ER</sub>), se calcula a partir de la cantidad de suelo erodado ingresada a programa (mm/año) (*ErosionAmount*) y del contenido de materia orgánica del suelo erodado (*ErosionOMContent*) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 3.23 } OM_{ER} = \text{Erosion Amount} * 13000 * \text{Erosion OMContent}/100$$

### 3.3.3.2 Balance de nutrientes (entradas y salidas deseables) y salidas no deseables

El programa estima para cada nutriente (N, P y K) su balance en el sistema como la diferencia entre las entradas (en alimentos y raciones importadas, por fijación biológica, fijación no biológica, deposiciones atmosféricas y fertilizante) y las salidas deseables del sistema (venta de productos de origen vegetal y animal). No se consideran en el balance las salidas no deseables o pérdidas del sistema (como volatilización, lavado o escurrimiento), por lo cual el resultado final del balance es un indicador de la magnitud de estas o de la acumulación de nutrientes en el sistema.

Las salidas deseables de nutrientes en producto animal (carne y leche) son estimadas en el PFD con base en la cantidad de producto exportado y su composición. Como se mencionó en el apartado 3.2, la composición de estos productos es parte de la información ingresada por el usuario del programa. En el Cuadro 13 se muestra la composición de carne y leche ingresadas al PFD.

**Cuadro 13: composición química de productos de origen animal empleada en el PFD**

<b>Parámetro</b>	<b>Leche</b>	<b>Carne</b>
<b>DMContent</b> (%)	12,9	25
<b>NContent</b> (% de la materia seca)	4	10,9
<b>PContent</b> (% de la materia seca)	0,8	3
<b>KContent</b> (% de la materia seca)	1,2	0,8
<b>AshContent</b> (% de la materia seca)	33	33

Además de los balances, el programa muestra en sus salidas un diagrama de flujo de cada nutriente en el sistema, lo que permite visualizar la dinámica de este.

Las entradas al sistema se representan con globos celestes y las salidas (deseables y no deseables) con globos de color anaranjado.

Dentro de las salidas no deseables el PFD estima las siguientes pérdidas:

- *Manure degradation*: son las pérdidas gaseosas de carbono (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) debido a la degradación del estiércol durante su almacenamiento.
- *Volatilization*: pérdidas de nitrógeno como NH<sub>4</sub>.
- *Erosion*: pérdida de C y nutrientes (N, P y K) en el suelo erodado, determinado por los parámetros de erosión ingresados en «*environmental data*» (Describe Windows).
- *Degradation*: pérdida de C debido a la degradación de la materia orgánica del suelo y del estiércol aplicado.
- *Soil losses*: pérdida de nutrientes (N, P y K) debido a lavado, etc.
- *Accumulation*: acumulación de C y de nutrientes en el suelo, por ejemplo, debido a inmovilización.

#### 3.3.3.3. Eficiencia de utilización de nutrientes

Este indicador no es estimado por el PFD. Sin embargo, puede ser fácilmente estimado a partir de la información de salida que brinda el PFD en su ventana «*Explain*» al aplicar la siguiente fórmula:

Ec. 3.25. Eficiencia utilización =  $\frac{\text{nutriente en productos (kg/ha/año)}}{\text{nutrientes en entradas (kg/ha/año)}}$

### 3.4. EMPLEO DEL PFD PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

Evaluación de la fase descriptiva del programa

Para la evaluación de la fase descriptiva del PFD (objetivo específico n.º 1) se compararon los indicadores productivos y económicos estimados por el programa con los reales que aparecen en la base de datos de Conaprole (BD ejercicio 2009-2010).

En cuanto a la evaluación ambiental, se compararon los indicadores estimados por el programa (balance de materia orgánica del suelo, balance de nutrientes y flujo de nutrientes) con los reportados por la bibliografía nacional y, en caso de no haber nacional, con la internacional.

### 3.5. APLICACIÓN DEL PFD PARA EL REDISEÑO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

Evaluación del programa en su fase exploratoria

Por último, el programa fue probado en su fase exploratoria en búsqueda de sistemas alternativos con mejores resultados que el actual. Durante esta fase, el PFD generó sistemas alternativos mediante diferentes combinaciones en la asignación de los recursos, y los evaluó aplicando el criterio de óptimo Pareto. De esta evaluación surgieron, en cada escenario, 720 sistemas alternativos que maximizaron de manera simultánea todos los objetivos de optimización establecidos y, a la vez, cumplieron con las restricciones impuestas.

Para crear estos sistemas alternativos se le permitió al PFD modificar las siguientes variables de decisión: suplementación animal, área de cada cultivo, número de animales y producción individual de leche.

#### 3.5.1. Variables de decisión

El valor de estas variables en el sistema actual y los límites dentro de los cuales se le permitió al PFD modificarlas se muestran en el Cuadro 14.

**Cuadro 14: variables de decisión modificables por PFD durante la exploración.**

	Variables de decisión	Valor en sistema actual	Rango	
			Mínimo	Máximo
Suplemento ofrecido a animales (kg MS/año)	Afrechillo trigo	444.083	0	1.000.000
	Grano maíz	168.415	0	1.000.000
	Concentrado proteico	6.319	0	1.000.000
	Sorgo grano húmedo	158.519	0	1.000.000
Superficie de cada módulo (ha)	Pradera permanente promedio (PPM)	188	0	445
	Alfalfa	29	0	445
	PPM/ensilaje	87	0	445
	PPM/heno	22	0	445
	Avena/sorgo	39	0	445
	Avena/ensilaje maíz	37	0	445
	Ensilaje maíz	43	0	445
	Sorgo grano	0	0	445
Trigo/sorgo grano	0	0	445	
Número de animales	Vaq. reemplazo	83	10	500
	Terneras	83	2	830
	Vacas masa	393	50	1.000
	Vaquillonas de 1-2 años	83	10	600
Prod. individual de leche (L/VM)	Producción de leche	18	0	25

Las variables cuyo valor en el sistema actual es cero (ej., grano de sorgo como suplemento o área de cultivo de sorgo para grano) no son realizadas por el productor en la actualidad (no presentes en la situación actual), pero se considera que pueden ser alternativas promisorias para el rediseño.

Si bien el número de vacas masa y el de recría de hembras fueron establecidos como variables, se dejaron fijos los porcentajes de reemplazo de manera de mantener la proporción de reemplazos que el productor tiene actualmente.

Dado que solo el número de hembras fue incluido como variable de decisión, en las salidas de la exploración solo se muestra la cantidad de animales en estas categorías y, por tanto, la carga calculada para la comparación entre sistemas alternativos incluye a las vacas masa y a la recría, pero solo de hembras, no incluye machos.

En cuanto a la producción individual de leche (L/VM), se probaron dos situaciones: una sin restricción de la producción individual y la otra con restricción para explorar las diferentes estrategias de intensificación sugeridas por el programa en ambos casos. Para esto, en la situación sin restricción, se estableció un valor

máximo de producción individual de leche difícilmente alcanzable por nuestros sistemas en la actualidad (35 L/VM). En cambio, para la situación con restricción, la máxima producción individual se estableció en 25 L/VM, basado en los datos observados en sistemas comerciales en el proyecto *Producción competitiva* (Chilibroste y Battezzore, 2019).

### 3.5.2. Restricciones impuestas

En cuanto a las restricciones, estas se establecieron para el área de la granja y el balance nutricional de los animales para asegurar su adecuada nutrición. Los balances de nutrientes del sistema (N, P y K), si bien no pretendieron ser restricciones, tuvieron que ser incluidos como tales para poder visualizar su valor en las salidas de la exploración. Por esto, y para que estos no implicaran realmente una restricción, se les asignaron límites muy amplios.

En el Cuadro 15 se muestran las restricciones impuestas, su valor en el sistema actual y los límites permitidos.

**Cuadro 15: restricciones impuestas para la exploración**

Variables de restricción	Valor en sistema actual	Rango permitido	
		Mínimo	Máximo
Superficie del sistema (ha)	445	423	445
Desvío a la capacidad de consumo del animal (saturación)	-17	-99	1
Desvíos a los requerimientos de energía (VEM)	0	-5	21
Desvíos a los requerimientos de proteína (DVE)	21,53	0	22
Desvío a los requerimientos de fibra	82	0	1000
Balance N (kgN/ha/a)	82	-20	1000
Balance P (kgP/ha/a)	29	-20	1000
Balance K (kgK/ha/a)	11	-20	1000

### 3.5.3. Objetivos optimizados

Los objetivos de optimización fueron:

- Maximizar el ingreso económico o margen neto (*Operating Profit*) (MN).

- Minimizar los costos de alimentación del ganado (*Feed Costs*) (CA).
- Maximizar el balance de materia orgánica del suelo (BMO).

Se realizaron 5 corridas de optimización a las que llamamos escenarios (E). En algunos escenarios se optimizaron solo 2 objetivos (E1, E2 y E3) y en otros los 3 objetivos en simultáneo (E4 y E5). En los escenarios con 2 objetivos, el objetivo excluido de la optimización se incluyó como restricción (con amplios límites), de manera de hacer visible el resultado de este en la salida de la exploración. En el Cuadro 16 se resumen las características que definieron cada escenario.

**Cuadro 16: características de cada escenario de optimización**

Escenario	Objetivos optimizados	Prod. indiv leche max.	Observaciones
Escenario 1	MN y CA	35	Prod. indiv. de leche no restringida
Escenario 2	MN y CA	25	Mismos objetivos que E1 pero con producción individual leche restringida
Escenario 3	MN y BMO	25	Se sustituye el objetivo CA por el BMO
Escenario 4	MN, CA y BMO	25	3 objetivos de optimización simultáneos
Escenario 5	MN, CA y BMO	25	Igual que E4 pero agregando como restricción un área mínima de praderas permanente
Escenario 5.2	MN, CA y BMO	25	Ídem. que el E5 pero ingresando al PFD rastrojos más altos

En E1 y E2 los objetivos de optimización fueron el MN y los CA, diferenciándose estos escenarios por la restricción en la producción individual de leche que se incluyó en el E2.

En E3 se sustituyó el objetivo CA por el objetivo BMO y en el E4 se buscó probar el efecto de incluir un tercer objetivo de optimización.

Dada la importancia comprobada en el país de la inclusión de pasturas perennes o de cultivos como maíz y sorgo para el control de la erosión y para preservar la calidad y productividad del suelo (Ernst et al., 2020) se simuló un quinto escenario (E5). En este se mantuvieron todas las características y parámetros de exploración del E4, diferenciándose de este en el área mínima de los módulos de

pasturas perennes (PPM y alfalfa) ingresadas como variables de decisión, estableciéndose como área mínima la superficie actual de praderas.

El escenario 5.2, por su parte, es una variante del escenario 5, diferenciándose de este por la cantidad de residuos dejados como rastrojo que se ingresaron al PFD en algunos módulos de la rotación (Cuadro 17). Dado que una posible forma de mejorar del BMO es a través de la entrada de materia seca en forma de restos de cultivos (rastros), se realizó esta variante para evaluar el efecto de un mayor rastrojo sobre el BMO.

**Cuadro 17: cantidad de rastrojo dejado en escenario 5 y en escenario 5.2 rastros modificados**

Cultivo	kg MS rastrojo E5	kg MS rastrojo E5.2 modific.
Avena	800	2000
Alfalfa	800	2000
PPM	407	611

Dado que no se modificó el rendimiento total de los módulos, al aumentarse la cantidad de materia seca dejada como rastrojo (kg MS *to soil*) se debió recalcular la cantidad de materia seca con destino a los animales (kg MS *to animals*). También se realizaron ajustes al rendimiento estimado del ensilaje de maíz por considerarse el rendimiento actual muy exigente.

En el siguiente cuadro (Cuadro 18) se muestran las cantidades de materia seca destinadas a rastrojo y a los animales ingresadas en los escenarios anteriores y las nuevas cantidades ingresadas en el E5.2.

**Cuadro 18: destino de la materia seca de la rotación en escenario 5 y en escenario 5.2 rastrojo modificado.**

Módulo	Sup. (ha)	MS rastrojo (kgMS/ha)	MS rastrojo modif. (kgMS/ha)	MS destino animales (kgMS/ha)	MS destino animales modif. (kgMS/ha)
PPM	188	407	611	6.471	6.267
Alfalfa	29	800	2.000	4.782	3.582
PPM/silo (PPM)	87	407	611	4.010	3.806
PPM/silo (silo)	87	615	615	1.821	1.821
PPM/heno (PPM)	22	407	611	2.916	2.713
PPM/heno (heno)	22	889	889	3.516	3.516
Avena (silo maíz)	37	800	2.000	3.767	2.567
Silo maíz (avena)	37	4.125	3.333	12.581	12.581
Avena (sorgo)	39	800	2.000	3.767	2.567
Sorgo (avena)	39	2.500	2.500	6.431	6.431
Silo maíz solo	43	4.125	3.333	12.581	12.581

Los resultados de la exploración muestran las interrelaciones que existen entre los objetivos y servirán de inspiración a la hora de pensar en el rediseño del predio (Groot y Oomen, 2011).

Luego de realizada la exploración, el PFD presenta el gráfico de exploración donde se muestra el sistema actual (botón rojo señalado con círculo verde en Figuras 11, 12, 13 y 24) y los sistemas alternativos explorados. Estos últimos se separan en dos: los que no cumplen con el óptimo Pareto (por existir otra alternativa con un resultado mejor) y los que sí lo cumplen (puntos verdes).

Dentro de los sistemas alternativos que cumplen con el óptimo Pareto se seleccionaron en cada escenario entre 6 y 8 granjas para su estudio siguiendo los siguientes criterios:

- alternativa con el menor CA o BMO (según el escenario),
- alternativa con similar costo de alimentación pero mayor margen neto que el sistema actual (o punto de inflexión de la curva en el caso del escenario 3),
- alternativa que maximiza el MN o el BMO (según el escenario),
- 2 alternativas ubicadas en el segmento de la curva con mayor pendiente,
- 2 alternativas ubicadas en el segmento de la curva con menor pendiente.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL DE PRODUCCIÓN

#### 4.1.1. Indicadores productivos y económicos

Para evaluar la capacidad del PFD para representar de manera adecuada el sistema actual de producción se compararon los indicadores productivos y económicos simulados por el programa con los valores reales del predio disponibles en la BD Conaprole para el ejercicio 2009-2010 (Cuadros 19 y 20).

**Cuadro 19: producción de carne y leche en base de datos de Conaprole y estimada por el PFD.**

	<b>Base de datos</b>	<b>Farm Design</b>
Leche producida (L totales/año)	2.626.485	2.627.912
Prod. leche (L/ha)	5.729	5.905
Prod. leche (L/VM)	6.683	6.687
Concentrado (kgMS/L)	0,30	0,30
Carne producida (Kg totales/año)	81.047	76.538

Con respecto a los indicadores para producción de leche, estos no se diferenciaron mayormente. En el caso de la producción de carne, las diferencias podrían explicarse por la distinta forma de cálculo y por valores supuestos ingresados al programa (porcentaje de carcasa y ganancias diarias). Aun así, estas no afectarían de manera significativa el análisis del predio por no ser esta la actividad principal de la empresa y representar el producto bruto leche un 93 % de su producto bruto total.

**Cuadro 20: indicadores de resultado económico, en base de datos de Conaprole y estimados por el PFD.**

	<b>Real</b>	<b>Farm Design</b>
Margen neto sistema (OP) (US\$/año)	355.946	304.156
Margen neto sistema (OP/ha) (US\$/ha/año)	722	683

Parte de las diferencias en el margen neto podrían estar explicadas por las distintas producciones de carne a las que se hizo alusión antes (aunque en menor medida) y a la forma de estimación de los costos, sin hallar diferencias en la producción de leche.

#### 4.1.2. Indicadores ambientales

##### 4.1.2.1. Pérdida de suelo por erosión

Como ya se mencionó, la estimación de esta variable se realizó mediante el uso del programa Erosión 5.91. Los resultados obtenidos se visualizan en los Cuadros 21 y 22.

Cuadro 21: datos generales y erosión estimada para el sistema actual

Caso	EROSION_% P/A 75/25
Duración de la rotación	6 años
Localidad	Colonia
Unidad / suelo	Isla Mala; brunosol eutrico típico Fr.
Tolerancia	7 Mg/ha/año de pérdida de suelo
Longitud de la pendiente	300 m
Gradiente de la pendiente	2,5
Relación de erosión	No encauzada
Practica mecánica de apoyo	No aplica
Porc. cubierto por pastura	0
Forma de cálculo factor C	por componentes
FACTORES	
Factor C (uso y manejo)	0,122
<b>Erosión anual estimada</b>	<b>6,6 Mg/ha</b>

La pérdida de suelo estimada por el programa Erosión 5.9 para el sistema actual fue de 6,6 Mg/ha/año, por lo que estaría dentro del rango de tolerancia (7 Mg/ha/año).

En cuanto a las relaciones de pérdida de suelo (RPS) simuladas con Erosión 5.9 para el sistema actual, las mayores RPS se presentaron a la siembra de la pradera permanente y al comienzo del cultivo de invierno (0,790); mientras que las menores (0,009) se presentaron en los primeros años de la pastura establecida (componentes 2 y 3).

Los detalles de los datos generales y de cada uno de los componentes de la rotación ingresados al programa Erosión 5.91 pueden verse en el Anexo 8.4 (Cuadros 44 y 45).

#### 4.1.2.2. Balance de materia orgánica del suelo

Como ya se explicó en «Materiales y métodos», el PFD estima el balance de materia orgánica del suelo (BMO) como la diferencia entre la materia orgánica acumulada y la perdida.

En el Cuadro 22 pueden observarse las entradas, salidas y el BMO que el PFD estimó para la situación actual.

**Cuadro 22: balance de materia orgánica del suelo estimado por el PFD**

<b>Entradas</b>	kg/ha/año
Residuos de cultivos	592
Abonos verdes	221
Estiércol	2562
<b>Salidas</b>	
Degradación del estiércol	1895
Degradación mat. org. suelo	1328
Erosión	515
<b>Balance</b>	
Balance	-363

Del cuadro anterior se desprende que la principal vía de entrada de materia orgánica al suelo fue el estiércol animal, siendo las salidas más importantes la degradación de este y de la materia orgánica del suelo.

#### 4.1.2.3. Balance de nutrientes del sistema

A continuación, se presenta el resultado de los balances estimados por el PFD para cada nutriente, así como también las diferentes fuentes de aporte y el diagrama de flujo de estos en el sistema (Cuadros 23 y 24 y Figuras 2, 3 y 4).

**Cuadro 23: balance de nutrientes del sistema actual, simulados con PFD.**

		<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
<b>Entradas</b>		<b>kg/ha/año</b>		
	Alimentos y raciones importadas	37	14	19
	Fijación biológica de N	41	0	0
	Deposiciones atmosféricas	4	1	3
	Fijación no simbiótica	10	0	0
	Fertilizante importado	31	23	0
	<b>Total</b>	<b>123</b>	<b>38</b>	<b>22</b>
<b>Salidas</b>				
	Productos vegetales exportados	0	0	0
	Productos animales exportados	40	9	10
	Estiércol o fertilizante exportado	0	0	0
	<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Balance</b>				
	Entradas	123	38	22
	Salidas	40	9	10
	<b>Balance</b>	<b>83</b>	<b>29</b>	<b>12</b>
<b>Eficiencia</b>				
	Salidas/entradas	0,33	0,24	0,45

**Cuadro 24: contribución de cada fuente a la entrada de nutrientes del sistema.**

<b>Entradas</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
	<b>%</b>		
Alimentos y raciones importadas	30	37	86
Fijación biológica de N	33	0	0
Deposiciones atmosféricas	3	3	14
Fijación no simbiótica	8	0	0
Estiércol o fertilizante importado	25	61	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

El Cuadro 24 muestra para el caso del N entradas relativamente equitativas entre fijación biológica, entrada en alimentos y fertilizante. En P, en cambio, la principal fuente resulta ser el fertilizante, mientras que, en el caso del K, prácticamente la única entrada es en forma de alimento animal.

Figura 2: diagrama de flujo de N (kg/ha/año) en el sistema actual.

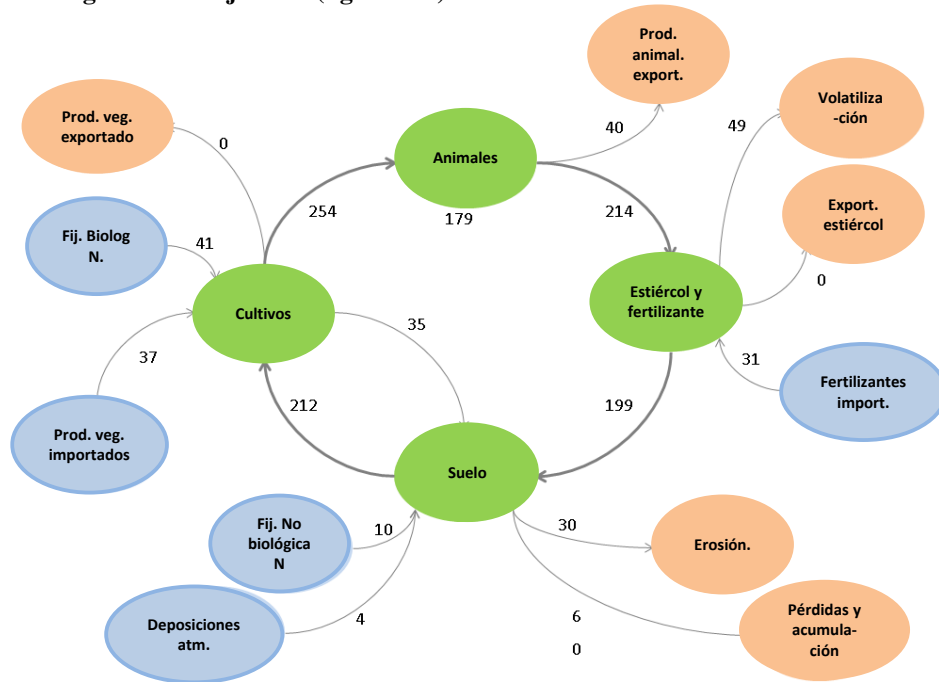


Figura 3: diagrama de flujo de P (kg/ha/año) en el sistema actual.

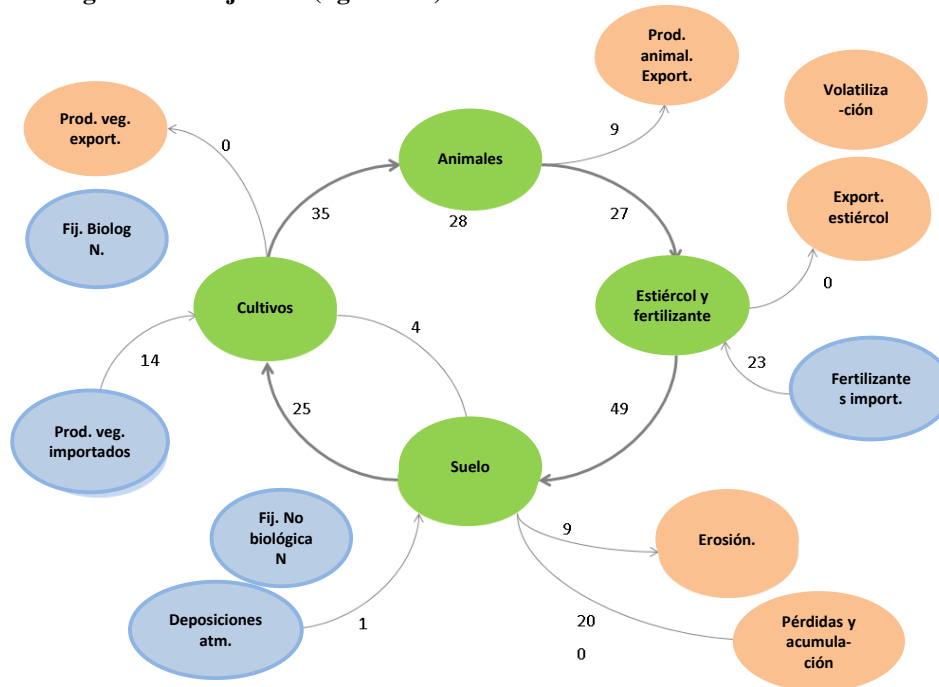
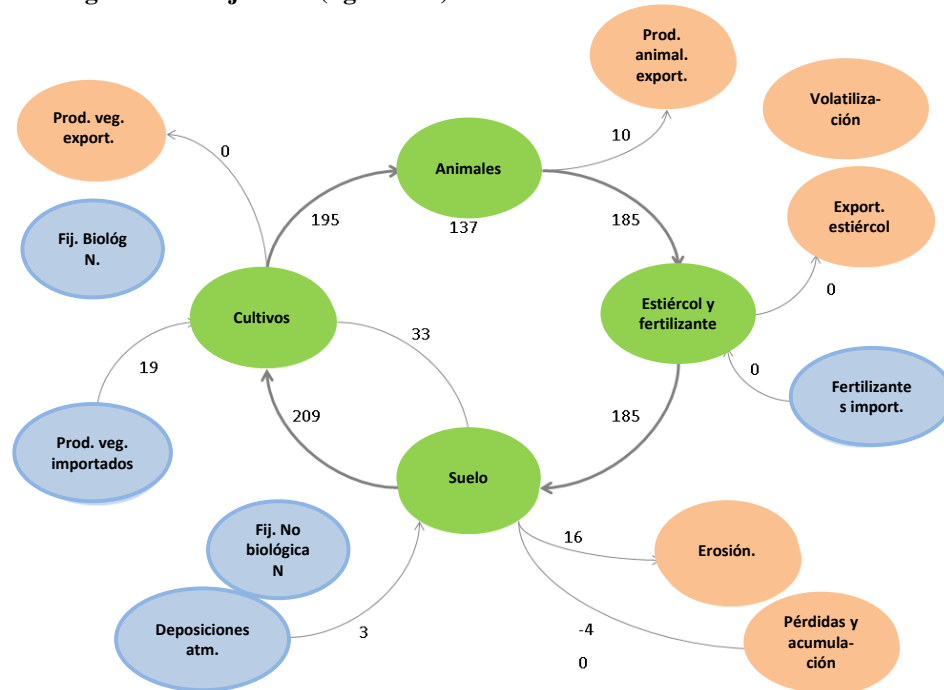


Figura 4: diagrama de flujo de K (kg/ha/año) en el sistema actual.



Los diagramas de flujo nos permitieron identificar las principales pérdidas de nutrientes del sistema. En el caso del N, aparecieron la volatilización y la erosión como las principales causas. En P, en cambio, la mayor pérdida fue por el lavado y, en segundo lugar, debido a la erosión. Entre ambas fuentes se perdió un total de 76 % del P ingresado al sistema (53 % por lavado y 24 % por erosión). En cuanto al K, las principales pérdidas fueron por erosión. El valor negativo en las pérdidas por lavado indicó una disminución de las reservas de este nutriente en el suelo.

## 4.2. REDISEÑO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

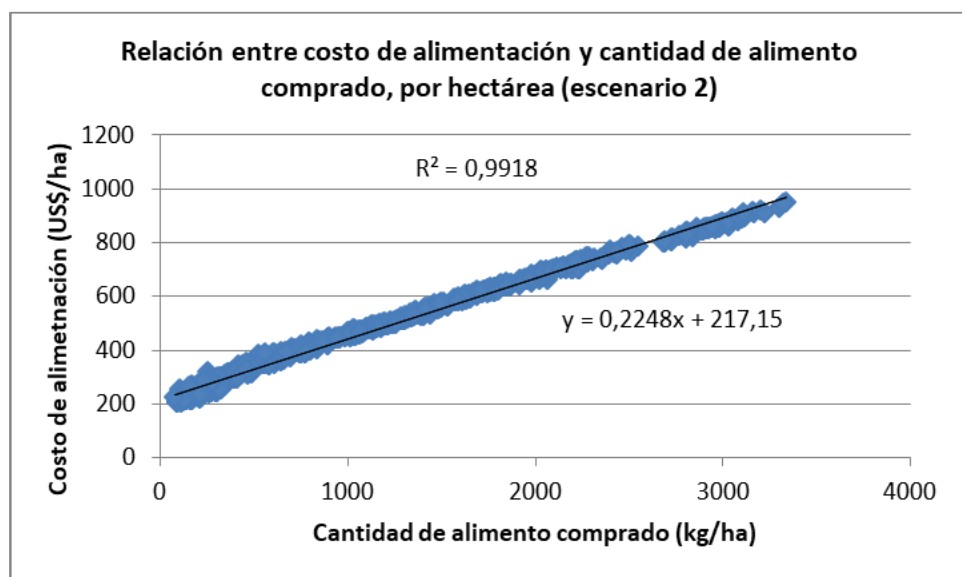
El análisis y la discusión de los resultados obtenidos en esta fase se focalizaron en el proceso de intensificación de los sistemas, las estrategias productivas y en el impacto ambiental de estos.

### 4.2.1. Relaciones entre los objetivos optimizados

Con los datos de salida de todos los sistemas alternativos simulados por el PFD se estudió la relación entre costo de alimentación y cantidad de alimento comprado y se encontró, en todos los escenarios que incluyeron este parámetro como objetivo de

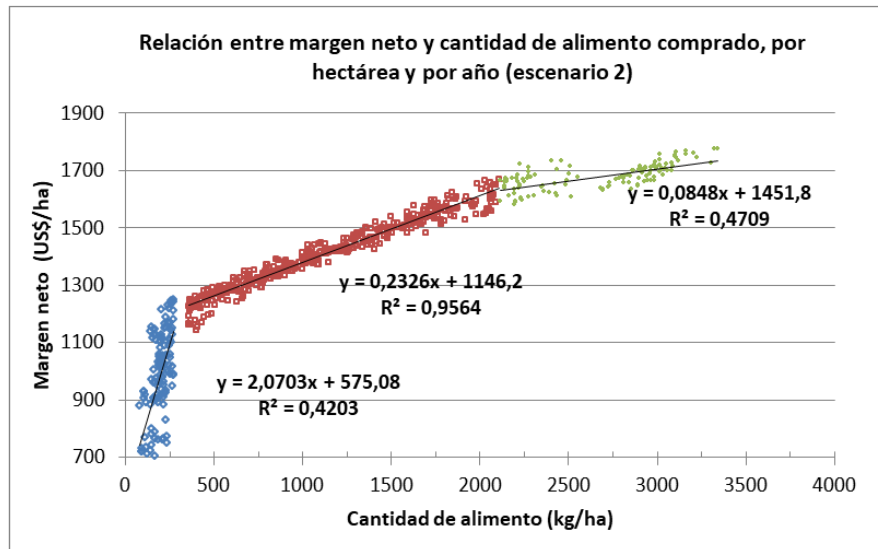
optimización, una relación lineal similar a la mostrada en la Figura 5. Es decir que los mayores costos de alimentación entre los sistemas alternativos se asociaron siempre a una mayor cantidad de alimento comprado. Por este motivo se decidió tomar esta variable como indicador de intensividad del sistema, ya que tiene una correlación muy alta con el costo de alimentación y está presente en todos los escenarios.

**Figura 5: relación entre costo de alimentación (US\$/ha) y cantidad de alimento comprado (kg/ha)**

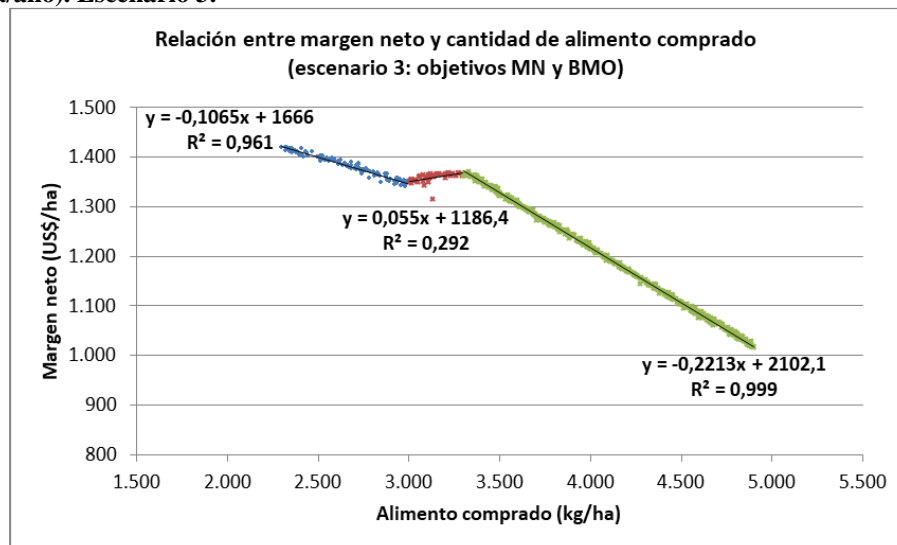


Por otro lado, la relación entre margen neto y cantidad de alimento comprado no fue la misma en todos los escenarios. En los E1 y E2 se encontró una relación directa entre estas variables, del tipo logarítmica (Figura 6). En el escenario 3, en cambio, esta relación fue inversa (Figura 7): disminuyó el MN al aumentar el alimento comprado, sin encontrar una relación clara en el E4 (Figura 8).

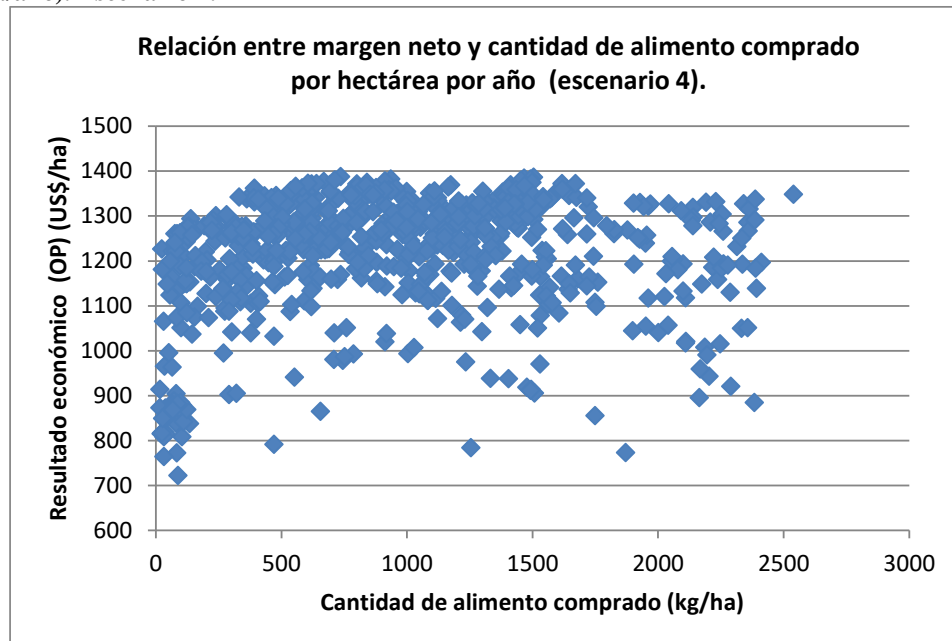
**Figura 6: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 2.**



**Figura 7: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 3.**



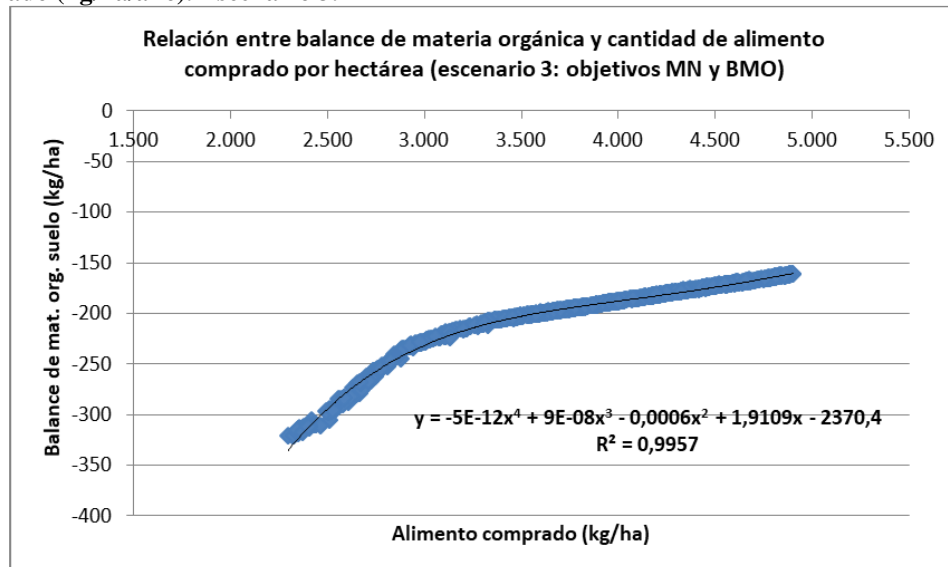
**Figura 8: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 4.**



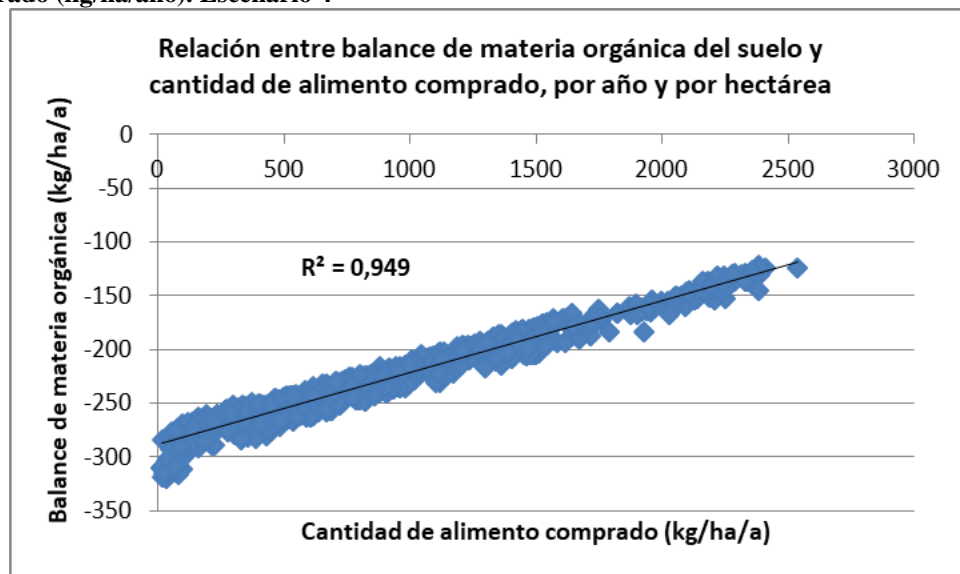
Por otro lado, al estudiarse la relación entre cantidad de alimento comprado y BMO en los escenarios que incluyeron esta variable como objetivo de optimización (E3 y E4) se encontró en ambos una correlación positiva, del tipo logarítmica en el E3 (Figura 9) y lineal en el E4 (Figura 10), pero los niveles de suplementación explorados en uno y otro escenario fueron muy diferentes, coincidiendo el máximo nivel de suplementación del E4 con el mínimo nivel de suplementación del E3, aproximadamente 2300-2500 kg/ha.

En el E3, el rango que va desde aproximadamente los 2300 a los 3000 kg/ha de alimento comprado es donde se ven las menores caídas en el MN y las mayores respuestas en el BMO por kilo de alimento comprado, coincidiendo ser este el rango de alimento comprado donde el PFD limita la exploración en el E4. Esto parece indicar que la inclusión de los costos de alimentación como tercer objetivo de optimización llevó al PFD a mantener la exploración del E4 dentro del rango de suplementación en el que se obtuvo en el E3 la mayor respuesta en el BMO (hasta los 2800 kg/ha de alimento comprado aproximadamente; Figura 9) y las menores caídas en el MN por kilo de alimento comprado (Figura 7).

**Figura 9: relación entre balance de materia orgánica (kg/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 3.**



**Figura 10: relación entre balance de materia orgánica (kg/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 4**

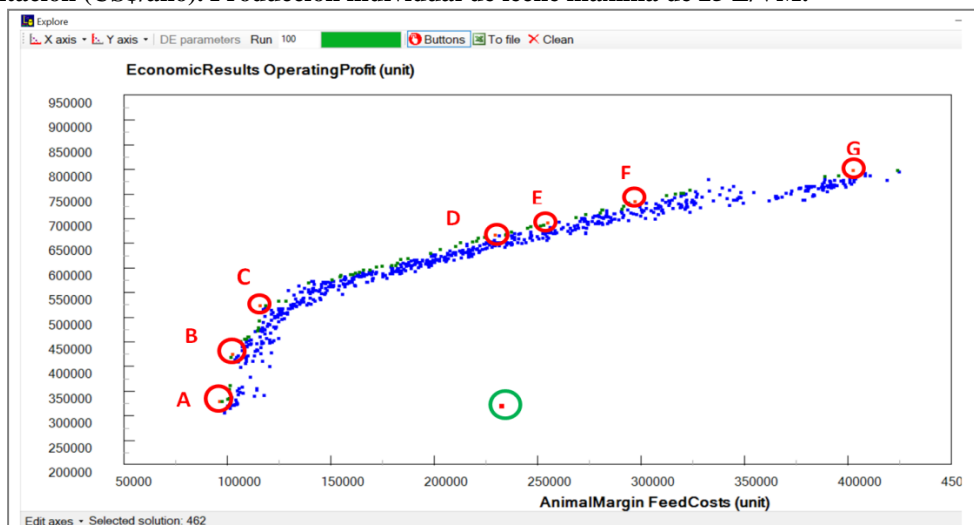


#### 4.2.2. Estudio de los sistemas alternativos seleccionados en los diferentes escenarios

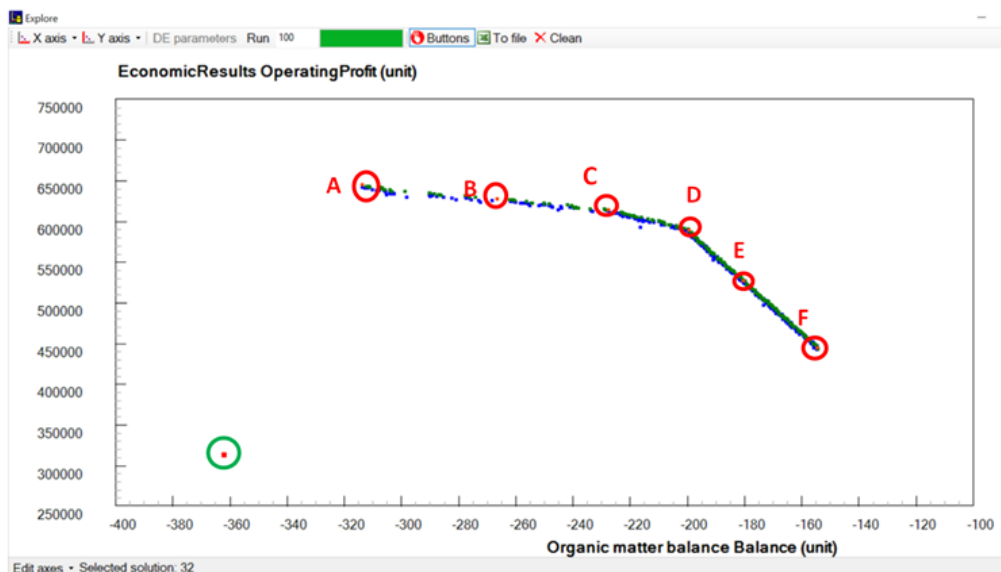
Como ya se explicó en «Materiales y métodos», en cada escenario se seleccionaron entre 6 y 8 sistemas alternativos para su estudio y comparación con la situación actual.

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran los gráficos de exploración salidos del PFD en los escenarios 2, 3 y 4, respectivamente, y los sistemas seleccionados en cada uno de ellos. En cada gráfico se señala el sistema actual con un círculo verde y los sistemas alternativos seleccionados con círculos rojos.

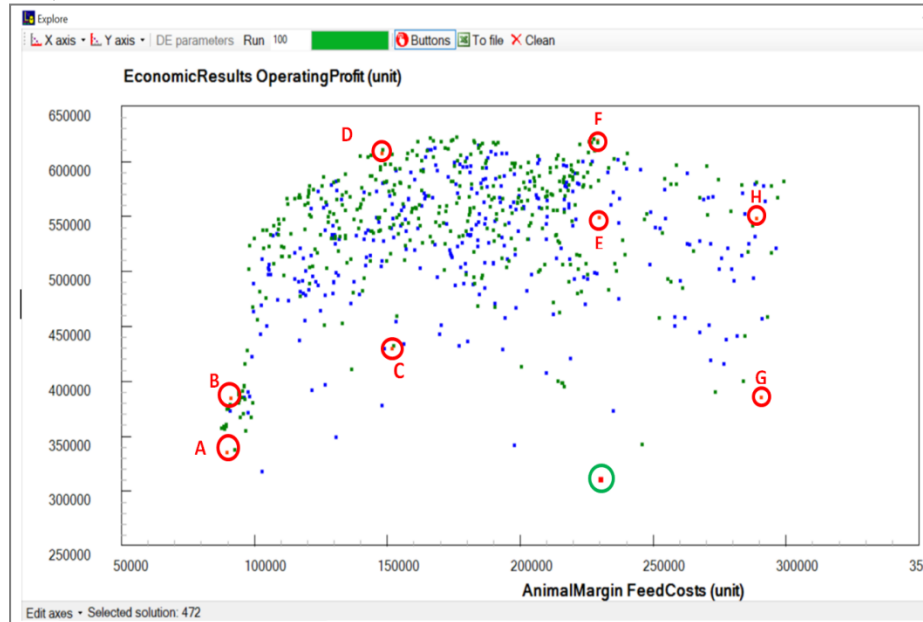
**Figura 11: ventana de exploración escenario 2. Objetivos: margen neto (US\$/año) y costo alimentación (US\$/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.**



**Figura 12: ventana de exploración escenario 3. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año) y balance de materia orgánica del suelo (kg/ha/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.**

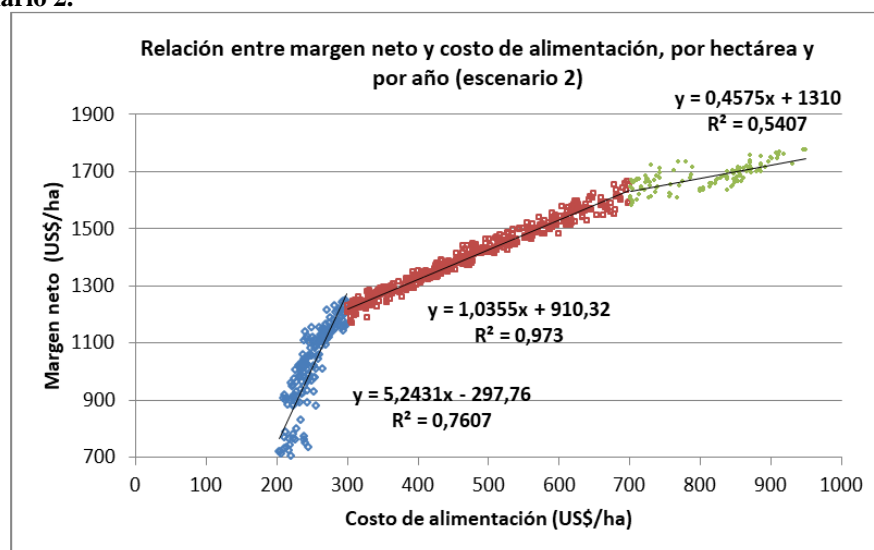


**Figura 13: ventana de exploración escenario 4. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año), minimizar costo alimentación (US\$/año) y maximizar balance de materia orgánica del suelo (kg/ha/año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.**



Debido a la gran similitud entre los gráficos de exploración de los E1 y E2 se presenta aquí solo el gráfico del E2 (Figura 11). Ambos gráficos (del E1 y del E2) mostraron aumentos en el margen neto al incrementar el costo de alimentación, pudiendo distinguirse en las curvas 3 tramos de diferente pendiente, con el primer punto de quiebre en el entorno de 250-300 US\$/ha/a y el segundo punto cercano a los 700 US\$/ha/a de costos de alimentación (Figura 14).

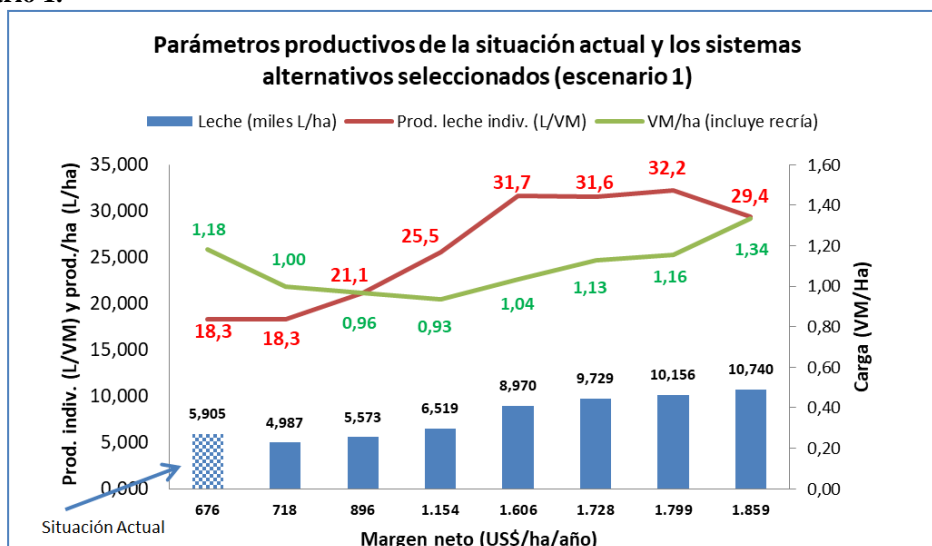
**Figura 14: relación entre margen neto y costo de alimentación, por hectárea y por año. Escenario 2.**



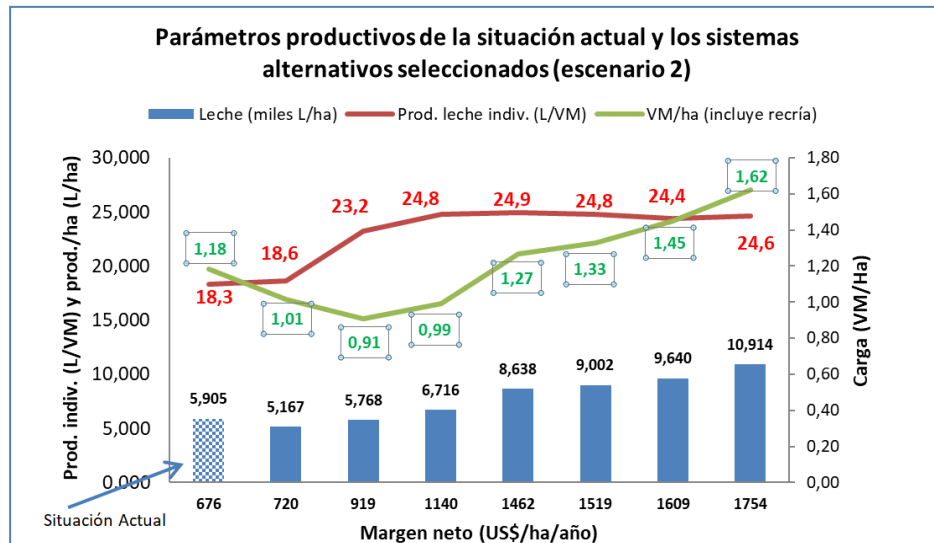
No se encontraron diferencias en los niveles de productividad (prod. leche/ha) entre los escenarios 1 y 2 (sin y con restricción de la prod. leche indiv., respectivamente), encontrándose en ambos escenarios sistemas alternativos con producciones que van desde aproximadamente los 5.000 hasta más de 10.000 L/ha. Sin embargo, estos escenarios se diferenciaron en la estrategia productiva aplicada para la intensificación, presentando el escenario 2 mayor carga animal, sobre todo a altos niveles de productividad.

En el escenario 1, la mejora en la productividad por hectárea se basó en el aumento de la producción individual, teniendo todos los sistemas alternativos una carga animal inferior a la situación actual, a excepción de la alternativa que maximizó el margen neto (Figura 15). En cambio, en el escenario 2, al restringirse la producción individual antes (en 25 L), se observaron en los sistemas más intensivos aumentos en la carga animal, además del aumento en la producción individual (Figura 16).

**Figura 15: parámetros productivos del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 1.**



**Figura 16: parámetros productivos del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 2.**



El gráfico de exploración del escenario 3 (Figura 12) mostró una correlación negativa entre ambos objetivos, de pendiente suave hasta aproximadamente los -200 kg/ha de BMO y luego más pronunciada. Todos los sistemas alternativos seleccionados presentaron mejor comportamiento que el sistema actual para ambos objetivos optimizados (Cuadros 25 y 26).

En el escenario 4 se seleccionaron, para diferentes niveles de costos de alimentación, pares de sistemas alternativos con diferentes resultados económicos (Figura 13). Al comparar entre pares de sistemas alternativos con similar costo de alimentación se encontró que el sistema con mayor cantidad de alimento comprado presentaba una menor producción de leche por hectárea, lo que determina un peor margen neto pero mejor BMO (menos negativo) que el sistema con menor cantidad de alimento comprado (Cuadro 25 y 26). Esto no se cumple en los sistemas menos intensivos (letras A y B), en donde la mayor cantidad de alimento comprado se asoció a una mejora en la producción por hectárea y margen neto, teniendo también mejora en el BMO. Por tanto, en esta optimización la relación entre los objetivos cambió según el nivel de intensificación. Esto puede deberse a que, si bien el BMO presentó siempre una correlación positiva con la cantidad de alimento comprado, no ocurre lo mismo con el MN, cuyo nivel de respuesta cambia con el nivel de suplementación.

Para facilitar el análisis conjunto de estos sistemas se los agrupó y clasificó en 4 categorías según cantidad de alimento comprado: sistemas con menos de 100g/L (identificados con color verde), sistemas con entre 100 y 200g/L (color amarillo), sistemas con entre 200 y 350g/L (color anaranjado) y los sistemas con más de 350g/L (color rojo), apareciendo estos últimos únicamente en el escenario 3. En los siguientes cuadros se presentan los resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario (Cuadros 25 y 26).

**Cuadro 25: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación bajo y medio.**

INDICADORES	Indicadores productivos, económicos y ambientales		NIVEL BAJO ( ≤100 g/L conc.)									NIVEL MEDIO (100 < hasta ≤ 200 g/L conc.)								
			E1			E2			E4			E1			E2			E4		
			A	D	E	A	B	C	A	B	D	B	F	D	E	F	C	E	F	
	Nombre Sistema	S. actual	278	275	4	280	417	549	279	223	13	563	466	137	567	328	470	179	187	
	Identificación sistema en PFD	ld.																		
PRODUCTIVOS	VM/ha (sin recría)	<b>0,88</b>	0,75	0,72	0,70	0,76	0,68	0,74	0,86	0,86	0,86	0,78	0,84	0,95	1,00	1,08	0,83	0,93	0,95	
	VM/ha (incluye recría)	<b>1,18</b>	1,00	0,96	0,93	1,01	0,91	0,99	1,15	1,16	1,15	1,04	1,13	1,27	1,33	1,45	1,11	1,24	1,27	
	Uso del suelo (% perennes/ % anuales)	<b>73/27</b>	67/33	67/33	63/37	63/37	64/36	60/40	57/43	56/44	51/49	63/37	65/35	56/44	53/47	52/48	54/46	51/49	53/47	
	Alimento comprado (kg/ha)	<b>1.747</b>	18	28	41	90	109	139	32	39	433	1.369	1.884	1.234	1.413	1.869	745	1.620	1.492	
	Alimento comprado (g/L)	<b>296</b>	4	5	6	17	19	21	6	7	56	153	194	143	157	194	110	192	173	
	Prod indiv. leche (L/VM)	<b>18</b>	18	21	26	19	23	25	17	19	25	32	32	25	25	24	22	25	25	
	Productividad (L/ha)	<b>5.905</b>	4.987	5.573	6.519	5.167	5.768	6.716	5.495	5.851	7.801	8.970	9.729	8.638	9.002	9.640	6.787	8.420	8.613	
ECONÓMICOS	Costo alim. (US\$/L)	<b>0,08</b>	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	
	Costo alimentación (CA) (US\$/ha/a)	<b>500</b>	177	181	216	203	211	240	194	196	318	484	587	497	555	648	338	526	505	
	Margen neto (OP) (US\$/ha/a)	<b>676</b>	718	896	1.154	720	919	1.140	764	872	1.345	1.606	1.728	1.462	1.519	1.609	979	1.271	1.382	
AMBIENTALES	Balance de mat. org. (BMO) (kg/ha/a)	<b>-370</b>	-418	-422	-417	-411	-414	-379	-314	-310	-281	-375	-362	-349	-358	-318	-229	-172	-205	
	Balance N (kg/ha/año)	<b>82</b>	49	46	39	48	43	38	39	36	29	44	48	42	43	43	47	60	52	
	Balance P (kg/ha/año)	<b>29</b>	17	16	15	17	16	15	17	16	15	16	17	17	16	17	23	32	27	
	Balance K (kg/ha/año)	<b>11</b>	-5	-6	-7	-5	-6	-7	-6	-6	-7	-6	-6	-5	-6	-4	1	11	7	

Similar o mayor CA que sistema actual y mejor BMO

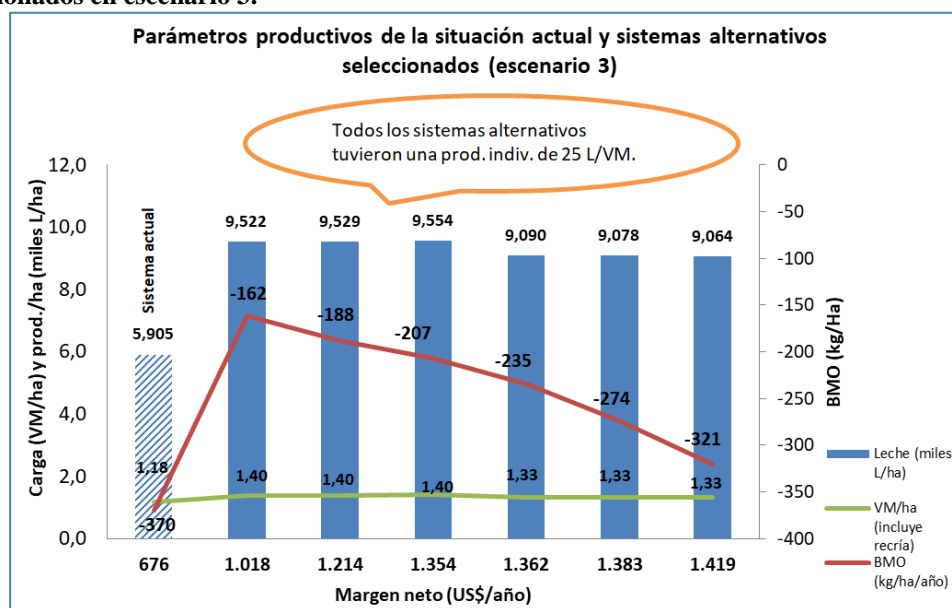
**Cuadro 26: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación alto y muy alto.**

INDICADORES	Indicadores productivos, económicos y ambientales		NIVEL ALTO (200 < hasta ≤ 350 g/L conc.)								NIVEL MUY ALTO (>350 g/L)		
			E1		E2	E3			E4		E3		
	Nombre sistema	S. actual	C	G	G	A	B	C	G	H	D	E	F
	Identificación sistema en PFD	Id.	388	105	462	138	286	623	9	472	250	406	32
PRODUCTIVOS	VM/ha (sin recría)	<b>0,88</b>	1,00	0,86	1,21	0,99	0,99	1,00	0,93	1,00	1,05	1,04	1,04
	VM/ha (incluye recría)	<b>1,18</b>	1,34	1,16	1,62	1,33	1,33	1,33	1,24	1,33	1,40	1,40	1,40
	Uso del suelo (% perennes/ % anuales)	<b>73/27</b>	66/34	64/36	53/47	67/33	67/33	67/33	51/49	52/48	66/34	66/34	66/34
	Alimento comprado (kg/ha)	<b>1.747</b>	2.695	2.153	3.101	2.322	2.636	2.898	2.384	2.359	3.379	4.016	4.892
	Alimento comprado (g/L)	<b>296</b>	251	212	284	256	290	319	314	267	354	421	514
	Prod indiv. leche (L/VM)	<b>18</b>	29	32	25	25	25	25	22	24	25	25	25
	Productividad (L/ha)	<b>5.905</b>	10.740	10.156	10.914	9.064	9.078	9.090	7.590	8.840	9.554	9.529	9.522
ECONÓMICOS	Costo alim. (US\$/L)	<b>0,08</b>	0,07	0,06	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,10	0,12
	Costo alimentación (CA) (US\$/ha/a)	<b>500</b>	766	639	887	673	711	742	669	663	841	981	1.177
	Margen neto (OP) (US\$/ha/a)	<b>676</b>	1.859	1.799	1.754	1.419	1.383	1.354	885	1.267	1.362	1.214	1.018
AMBIENTALES	Balance de mat. org. (BMO) (kg/ha/a)	<b>-370</b>	-345	-353	-269	-321	-274	-235	-122	-135	-207	-188	-162
	Balance N (kg/ha/año)	<b>82</b>	53	48	62	59	74	87	83	75	94	103	116
	Balance P (kg/ha/año)	<b>29</b>	17	17	26	20	31	40	42	40	43	45	47
	Balance K (kg/ha/año)	<b>11</b>	-4	-6	6	3	13	22	23	20	25	28	33

Todos los sistemas alternativos seleccionados presentaron mejor margen neto que la situación actual (Cuadros 25 y 26). Al ordenar los sistemas alternativos dentro de cada escenario según su margen neto, se encontró que en los E1 y E2 las mejoras en el MN estuvieron asociadas a aumentos en la productividad (L/ha) (Figuras 15 y 16); sin embargo, no ocurrió lo mismo en los E3 y E4 (Figuras 17 y 18, respectivamente).

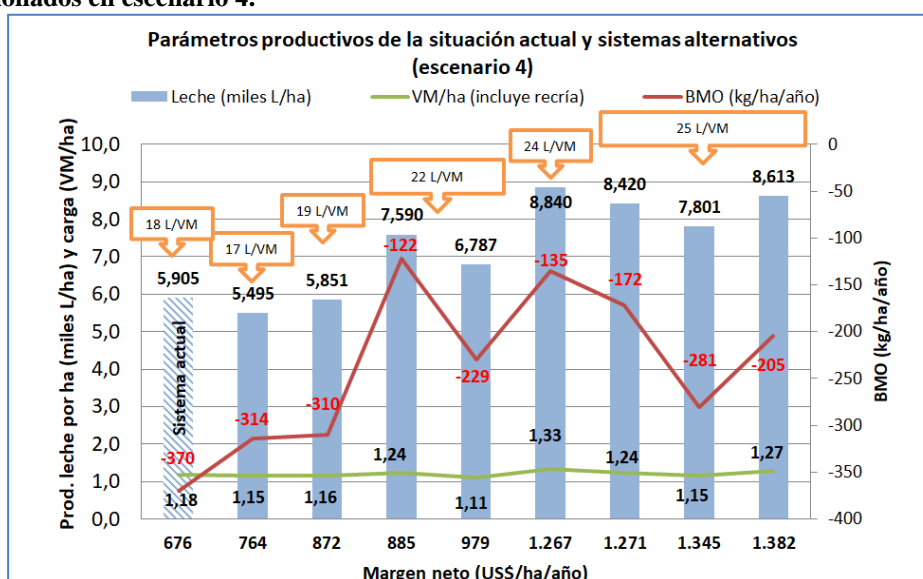
En el E3 (Figura 17), las 3 alternativas con mejores resultados en MN no tuvieron la máxima producción de leche por hectárea, ya que, si bien maximizan la producción individual de leche, presentan una menor carga que los otros sistemas, aunque mayor a la situación actual. Esta mejora en el MN, pero con menor producción de leche por hectárea, se debe a los menores costos de alimentación, lo que determinó también un peor resultado en el BMO (Cuadros 25 y 26). La búsqueda por mejorar el BMO sin tener en cuenta los costos de alimentación dentro de los objetivos de optimización llevó a que el PFD explore en el E3 cargas y niveles de suplementación en el rango de la curva en donde las caídas en el MN/kg alimento comprado son mayores (por encima de los 2300 kg/ha; Figura 7). En dicho tramo de la curva, los aumentos en los costos de alimentación no serían compensados por el mayor nivel de producción y por esto la caída del MN, pero sí mejoraron el BMO.

**Figura 17: parámetros productivos del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en escenario 3.**



En el E4, las mejoras en el margen neto tampoco se asociaron siempre a aumentos en la producción de leche por hectárea. Por otra parte, los aumentos en la producción se lograron debido a mejoras en la producción individual y por incrementos en la carga (Figura 18), tal como ocurrió en el escenario n° 2.

**Figura 18: parámetros productivos del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en escenario 4.**



Al analizar la estrategia productiva de los sistemas alternativos y compararlos con el sistema actual se encontró que los sistemas de nivel bajo (color verde en Cuadro 26) presentaron menor cantidad del alimento comprado fuera del predio (18 a 433 kg/ha), menor carga y mayor producción individual de leche que el sistema actual, encontrándose estos predios en el tramo de la curva con mayor respuesta en el MN (5,24 US\$/ha por cada US\$/ha de aumento en los costos de alimentación).

Por otra parte, los sistemas alternativos de nivel alto y muy alto (anaranjado y rojo en Cuadro 26) presentaron mayor cantidad de alimento comprado (2100 a 4800 kg/ha) y mayor carga animal que el sistema actual, por lo que se ubica al sistema actual como un sistema de nivel medio.

En cuanto al costo por litro de leche producida (US\$/L), todos los sistemas alternativos de los E1 y E2 presentaron menor costo que la situación actual (Cuadros 25 y 26), incluso aquellos sistemas que emplearon alta cantidad de alimento

comprado (kg/ha), iguales o mayores a la situación actual, debido a la mayor producción de leche por hectárea. Solo se presentaron mayores costos/L leche en los sistemas más intensivos de los E3 y E4 y en el sistema que maximizó el MN en el E2 (Cuadro 26), en donde los aumentos en los costos no fueron compensados por el incremento en la producción, lo que determinó así el mayor costo por litro.

Los sistemas con menores costos de alimentación que la situación actual mostraron una disminución importante en los niveles de alimento comprado por unidad de superficie, lo que se asocia con peores resultados en los balances de materia orgánica del suelo (BMO). Los sistemas alternativos con similares o mayores CA que el sistema actual presentaron mejores BMO (menos negativos). Los mayores costos de alimentación asociados a la mayor compra de alimento fuera del predio, y la asociación de esta última variable con el BMO explican la relación existente entre costos de alimentación y el BMO del suelo (Cuadros 25 y 26).

En lo referente al balance de nutrientes, todos los sistemas de nivel bajo y medio presentaron balances más ajustados y, por tanto, menores excesos en N y P que la situación actual, sin encontrarse mayores diferencias entre los balances de los sistemas alternativos presentes a esos niveles (Cuadro 25).

En cambio, en los sistemas de nivel alto y muy alto (Cuadro 26), el aumento en la cantidad de alimento comprado sí se asoció a balances de nutrientes menos ajustados y se observaron en los sistemas más intensivos en su uso balances crecientes de N y P muy superiores a los de la situación actual.

En el escenario 3 se encontraron tríos de sistemas alternativos que, teniendo igual carga y producción individual de leche y, por tanto, similar producción de leche por hectárea, se diferenciaron en la cantidad de alimento comprado y sus respectivos BMO. Esto nuevamente parece indicar que la estrategia empleada por el PFD para la mejora del BMO es la compra de alimento comprado, pero, al no asociarse aquí esta mayor compra de alimento con mejoras en la producción/hectárea, tienen un impacto negativo en los balances de nutrientes (mayores desbalances), lo que determina a este nivel una relación negativa entre ambos indicadores ambientales.

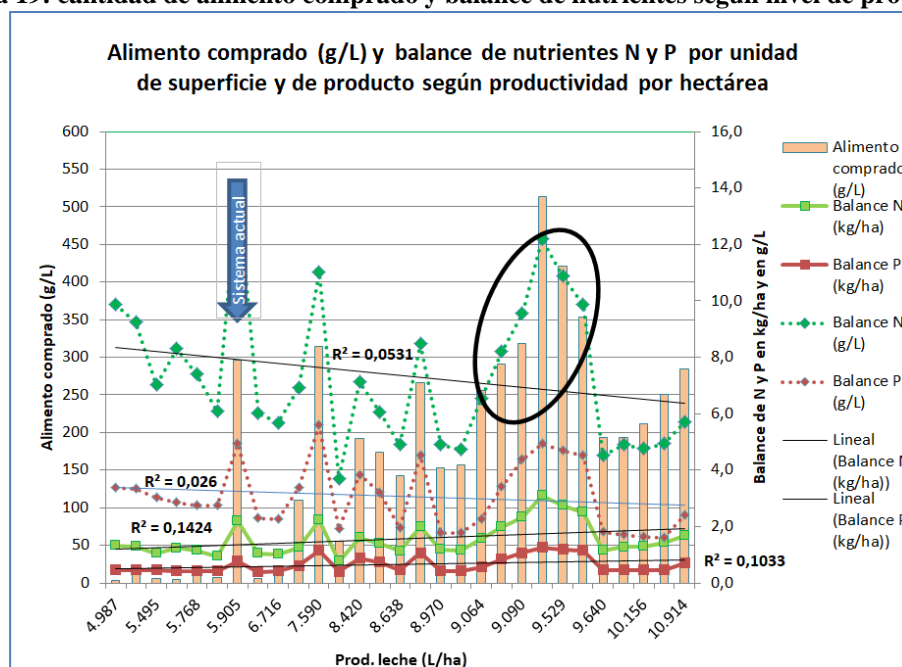
Solo en los escenarios 3 y 4 se encontraron sistemas con balances positivos para K, lo que puede explicarse por las cantidades de alimento comprado que se

manejan en estos escenarios, ya que, como se mencionó en la fase descriptiva del PFD y fuera reportado por Morón (2014), la principal vía de entrada de este nutriente en sistemas lecheros es en forma de alimento animal.

Algo similar ocurre con P, que se encontró solo en los escenarios 3 y 4 sistemas alternativos con balance de 40 kg/ha, y también explicado por la importancia del alimento comprado como fuente de entrada de este nutriente al sistema.

Al estudiarse la relación entre los balances de nutrientes N y P y el nivel de productividad de los sistemas alternativos (L/ha) (Figura 19) se observó cierta tendencia a su aumento al expresarlos por hectárea y a su disminución al expresarlos por unidad de producto, al aumentar la productividad. Por otro parte, la correlación entre estas variables fue baja (0,35 - 0,36) y resultó mucho más alta la correlación entre los balances y la cantidad de alimento comprado (Cuadro 27).

**Figura 19: cantidad de alimento comprado y balance de nutrientes según nivel de productividad**



**Cuadro 27: correlación entre balance de nutrientes y cantidad de alimento comprado y entre balance de nutrientes y productividad.**

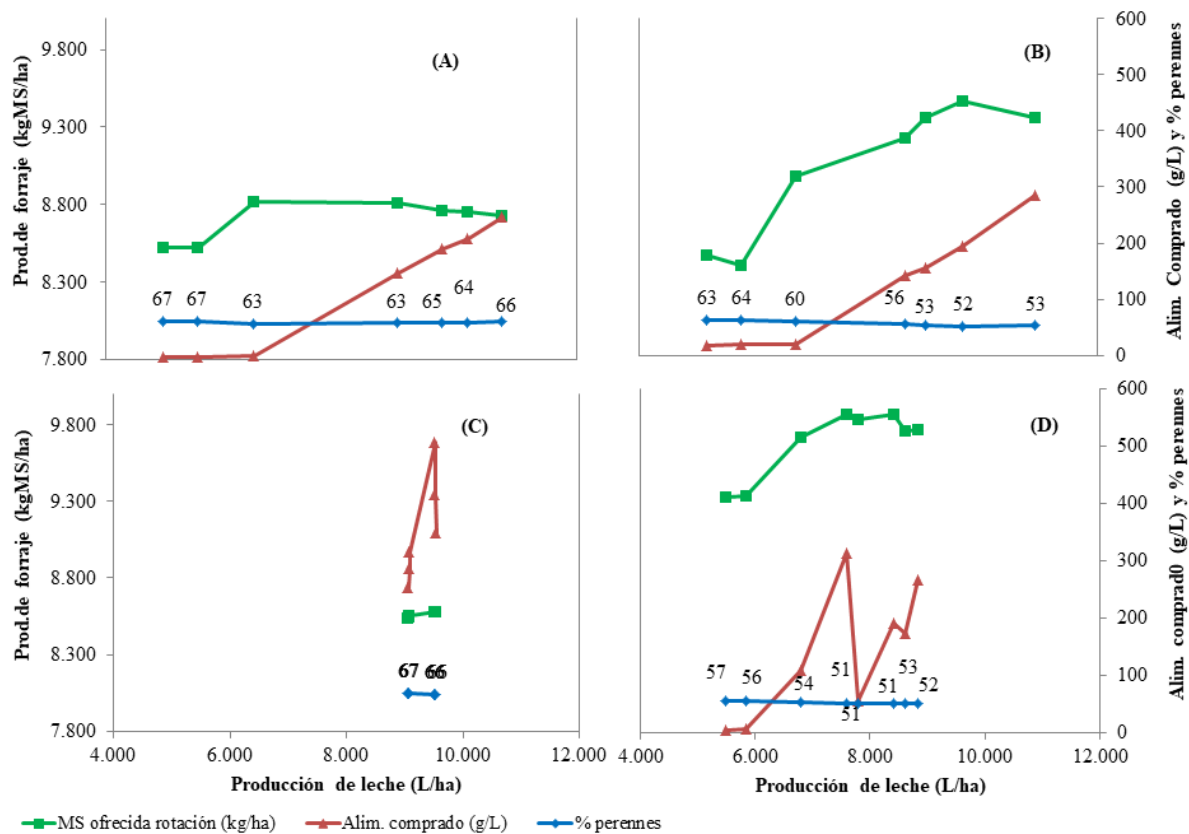
<b>Coefficientes de correlación entre balance de N y P y cantidad de alimento comprado y nivel de productividad.</b>	
BN (kg/ha) / alimento (g/L)	0,89
BN (kg/ha) / productividad (L/ha)	0,36
BP (kg/ha) / alimento (g/L)	0,83
BP (kg/ha) / productividad (L/ha)	0,35
BN (g/L) / productividad (L/ha)	-0,27
BP (g/L) / productividad (L/ha)	-0,15

Al expresarse los balances de nutrientes por unidad de producto en lugar de por unidad de superficie cambia la correlación que guardan estos con la productividad debido al efecto de dilución por el aumento de la producción. Sin embargo, por ser esta una variable de impacto ambiental local, es mejor realizar el análisis por unidad de superficie (Darré et al., 2021).

Con respecto al uso del suelo, todos los sistemas alternativos presentaron una rotación más anualizada que el sistema actual, y se encontraron en los escenarios 2 y 4 las rotaciones con menor proporción de perennes (en el entorno del 55/45 Cuadros 25 y 26). Ambos escenarios coinciden en tener restringida la producción individual y minimizar los costos de alimentación como objetivo de optimización.

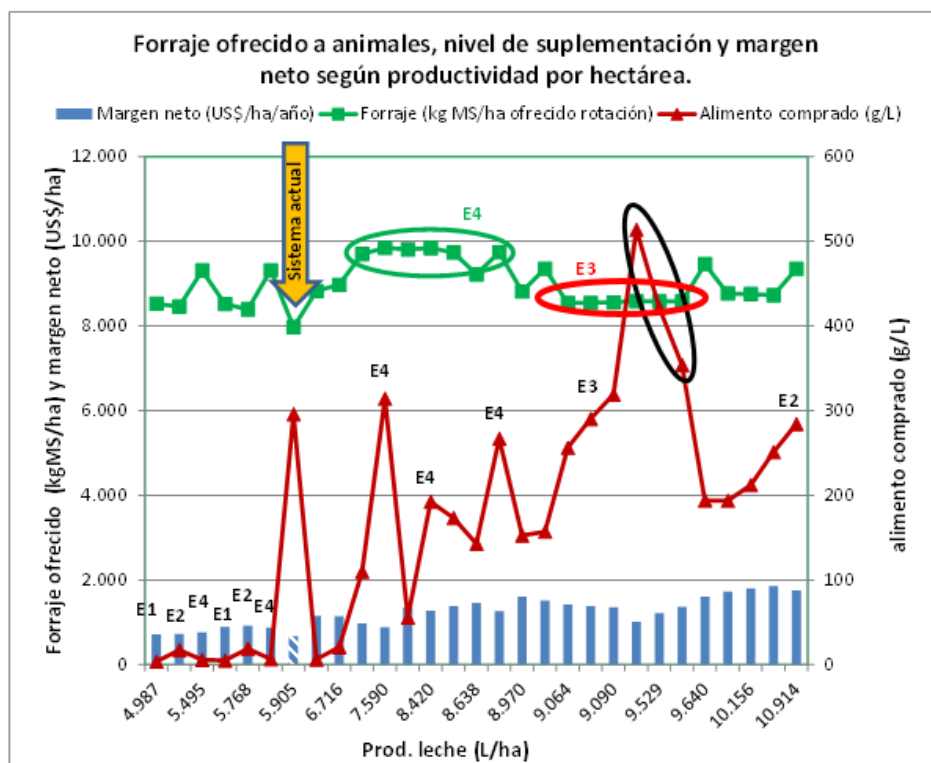
Al comparar entre sistemas alternativos dentro de cada escenario, no se encontraron mayores diferencias en la proporción perennes/anuales, por lo que no parecería haber relación entre esta variable y el nivel de intensificación, excepto en el escenario 2, por lo que las características del escenario afectaron esta respuesta.

Figura 20: producción de forraje de la rotación (kgMS/ha) y nivel de suplementación (alimento comprado g/L) según nivel de productividad de leche (L/ha) en los escenarios 1 (A), escenario 2 (B), escenario 3 (C) y escenario 4 (D).



En cuanto a la producción de forraje de la rotación en el escenario 1, al no tener la producción individual restringida, los aumentos en la producción por hectárea se dan principalmente por mejoras en la producción individual, la que se sostiene con el incremento del alimento comprado y con pocos cambios en la producción de forraje por hectárea (8.300 a 8.800). En los E2 y E4, al tener la producción individual restringida, los aumentos en la producción por hectárea se consiguen con mayores cargas y estas cargas se asociaron a mayores producciones de forraje por hectárea (8.300 a 9.300). En el E3, al no incluir los costos de alimentación como objetivo de optimización, el PFD realiza la exploración en un rango de producciones por hectárea superior (por encima de los 9000 L/ha) y haciendo un mayor uso del alimento comprado (hasta casi 600 g/L vs. 300 g/L en los otros escenarios; Figura 20).

**Figura 21: forraje ofrecido a animales, nivel de suplementación y margen neto según nivel de productividad por hectárea**

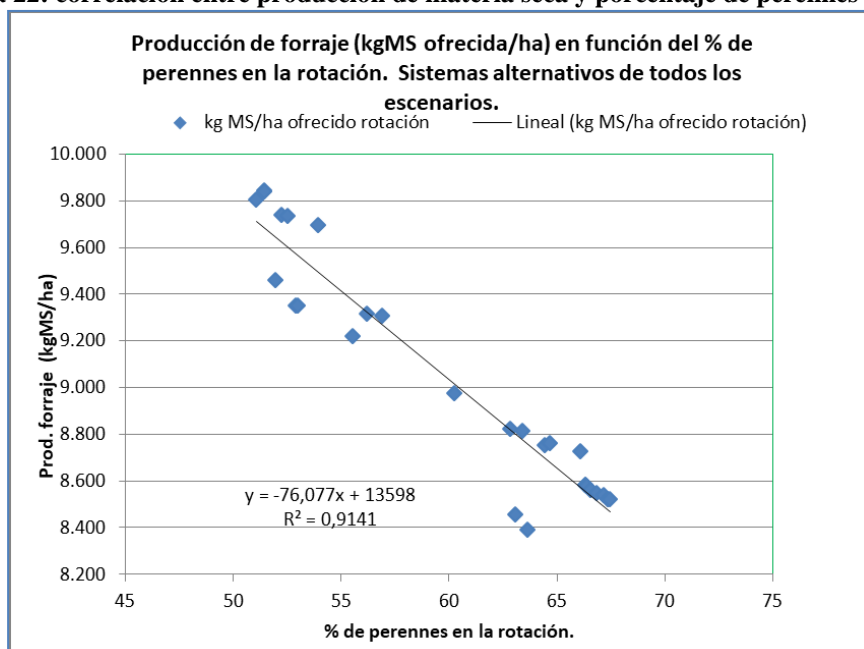


El forraje destinado a los animales fue máximo en el escenario 4 (Figuras 20 y 21), escenario que incluyó los 3 objetivos de optimización. En cambio, fue mínimo

en el escenario 3, probablemente debido a la no inclusión de los costos de alimentación como objetivo de optimización y a la inclusión el BMO. Esto también explica que sea en este escenario donde se maximiza el alimento comprado (Figura 21).

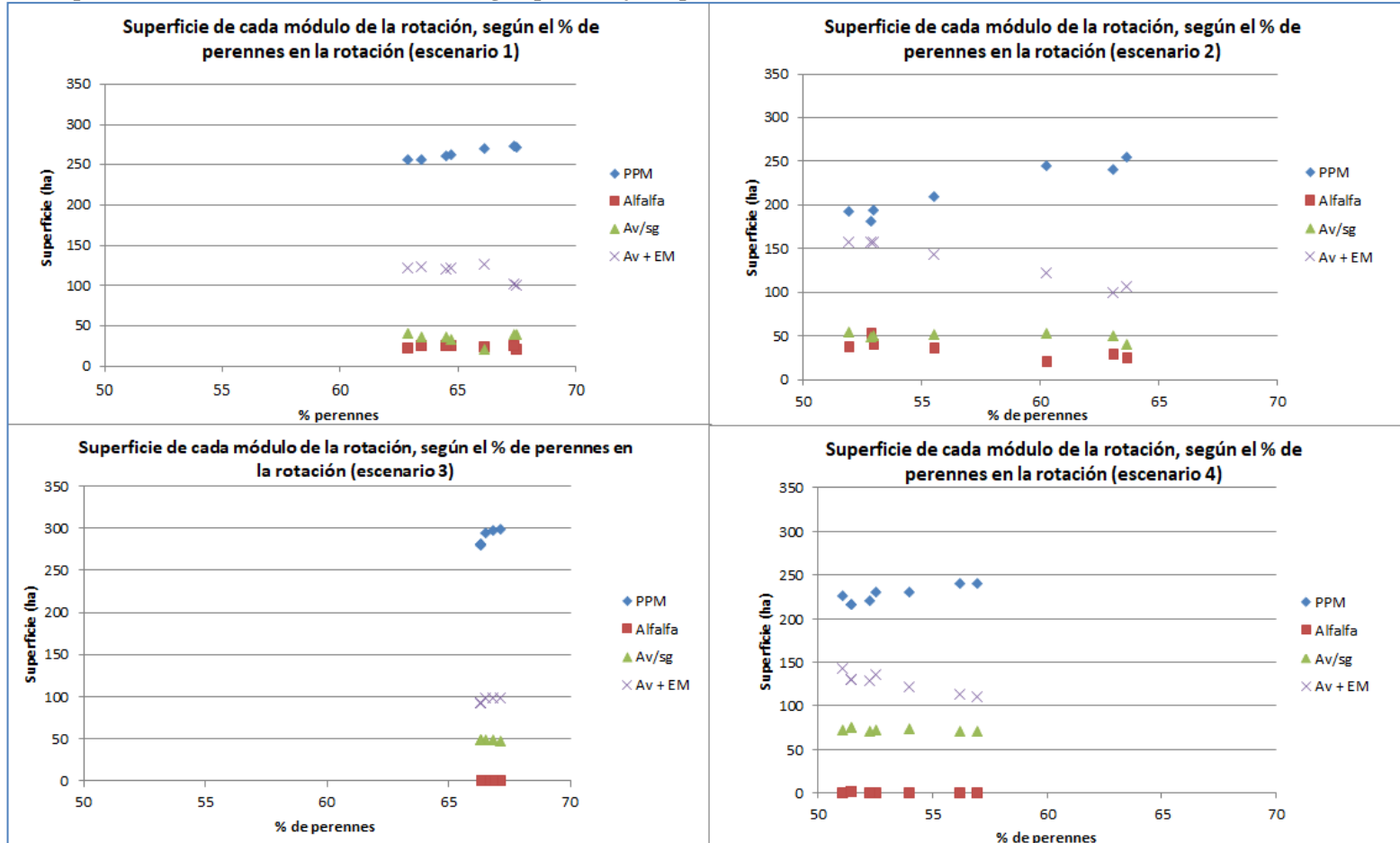
Al estudiar la correlación entre la producción de materia seca y el porcentaje de perennes en la rotación se encontró una correlación negativa (Figura 22), disminuyendo la materia seca ofrecida al aumentar la proporción de perennes en la rotación.

**Figura 22: correlación entre producción de materia seca y porcentaje de perennes en la rotación**



Esta anualización observada en los E2 y E4 está dada por una disminución en el área de praderas permanente y un aumento en el área de avena y de ensilaje de maíz, lo que se puede explicar por el mayor rendimiento de materia seca de ese módulo mixto en comparación con la pradera permanente. Por otro lado, se aprecia la desaparición del módulo de alfalfa en los sistemas alternativos de los escenarios que incluyeron al BMO como objetivo de optimización (Figura 23).

Figura 23: superficie de cada módulo de la rotación según porcentaje de perennes en la rotación.



Debido a esta anualización, y su efecto en la erosión y, por tanto, en el BMO, se guardó en el PFD uno de los sistemas alternativos seleccionados en cada uno de los escenarios 2, 3 y 4. Luego se calculó con el programa Erosión 5.9 el valor de pérdida de suelo de la nueva rotación (Cuadro 28) y se sustituyó con este valor en el PFD para recalculer el BMO del sistema alternativo con la nueva rotación. Al hacer esto, la alternativa F (328) del escenario 2, cuyo valor inicial de BMO era -318, pasó a tener un balance de -528, peor al del sistema actual.

En el escenario 3 se seleccionó la alternativa D (n.º 250), por lograr su potencial de producción de leche manteniendo una relación costo/L similar a la situación actual, y determinó así el mejor MN de todas las alternativas y un BMO suelo mejor a la situación actual. Al calcular el valor de erosión de la nueva rotación y reingresarlo a PFD, el nuevo BMO pasó a ser -308 kg/ha, es decir, peor al BMO inicialmente estimado por el PFD para este sistema (-207 kg/ha/año), pero aun así continuó siendo mejor al del sistema actual (-370 kg/ha/año).

El sistema alternativo seleccionado y guardado a los efectos de este estudio en el escenario 4 fue el sistema E (n.º 179), por presentar similar costo de alimentación que el sistema actual, pero con mejor margen neto y BMO. Luego de corregido el valor de erosión, el nuevo valor del BMO para este sistema fue de -437 kg/ha/año, peor que el del sistema actual.

**Cuadro 28: estimación de pérdida de suelo con programa Erosión 5.9 para rotaciones con diferentes proporciones de perennes y anuales**

Rotación % P/A	75/25	67/33	50/50	42/58	33/67
Años de rotación	6	6	6	6	6
Años pradera	4,5	4	3	2,5	2
Años de cultivo	1,5	2	3	3,5	4
% perennes	75	67	50	42	33
% anuales	25	33	50	58	67
Resultado C					
tt/ha/año	6,6	7,9	10,0	12,0	12,7
mm/año	0,528	0,632	0,800	0,960	1,016

Debido a la falta de un submodelo que estime la erosión, el PFD no puede considerar el efecto que la anualización tiene sobre la erosión y, por tanto, el BMO durante la exploración. Esto determina que el valor BMO estimado para los sistemas alternativos requiera de corrección. Por este motivo se simuló un 5.º escenario en

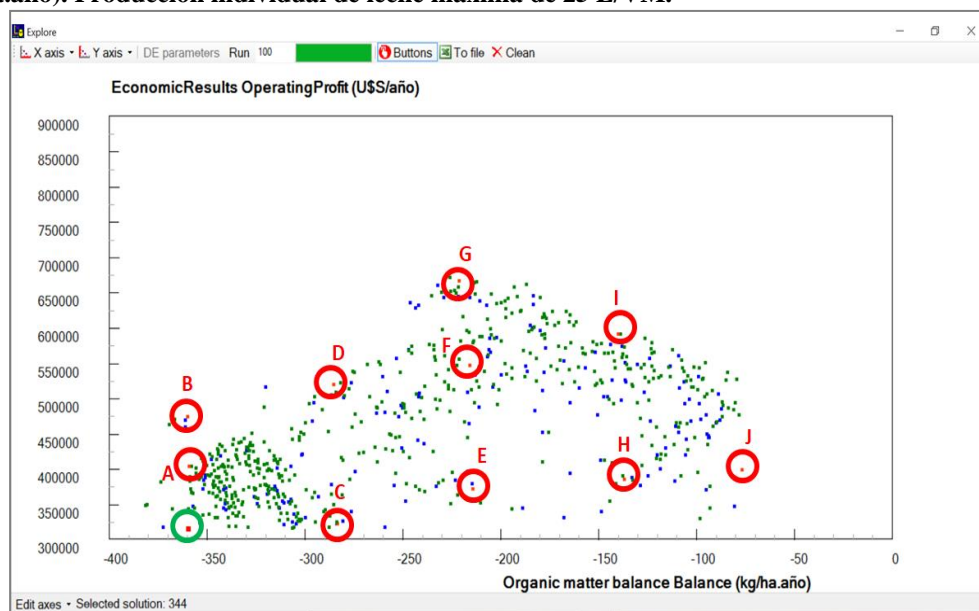
donde se estableció como límite inferior para la superficie de perennes el área de las mismas en el sistema actual.

#### 4.2.3. Simulación de un nuevo escenario

En el gráfico de exploración se seleccionaron para diferentes valores de BMO (abscisas) pares de sistemas alternativos con diferente margen neto (ordenadas).

A continuación, se presentan el gráfico de exploración (Figura 24) y el cuadro con los resultados e indicadores productivos, económicos y ambientales de los sistemas alternativos seleccionados en este escenario (Cuadro 29).

**Figura 24: ventana de exploración escenario 5. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/año), minimizar costo alimentación (US\$/año) y maximizar balance de materia orgánica del suelo (kg/ha.año). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.**



**Cuadro 29: indicadores productivos, económicos y ambientales del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 5**

INDICADORES	Indicadores productivos, económicos y ambientales. Escenario 5.											
	Nombre del sistema	S. actual	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Identificación del sistema en PFD	Id.	9	447	429	660	627	6	73	624	424	344
PRODUCTIVOS	VM/ha (sin recría)	0,88	0,71	0,82	0,84	0,91	0,92	1,11	1,24	1,33	1,33	1,38
	VM/ha (incluye recría)	1,18	0,94	1,09	1,12	1,22	1,23	1,49	1,65	1,77	1,78	1,84
	Uso del suelo ( % perennes/ % anuales)	73/27	74/26	74/26	74/26	74/26	77/23	76/24	74/26	77/23	76/24	77/23
	Alimento comprado (kg/ha)	1.747	1.317	1.791	2.388	2.898	4.006	4.463	5.008	6.186	6.211	7.557
	Alimento comprado (g/L)	296	209	249	373	349	484	456	447	594	513	614
	Prod. indiv. leche (L/VM)	18	24	24	21	25	25	24	25	22	25	24
	Productividad (L/ha)	5.905	6.297	7.196	6.397	8.297	8.279	9.795	11.193	10.421	12.113	12.318
ECONÓMICOS	Costo alm. (US\$/L)	0,08	0,06	0,07	0,09	0,09	0,11	0,10	0,11	0,15	0,13	0,17
	Costo alimentación (CA) (US\$/ha/a)	500	374	507	570	723	952	1.018	1.259	1.553	1.596	2.082
	Margen neto (OP) (US\$/ha/a)	676	878	1.040	700	1.144	839	1.238	1.468	867	1.336	900
AMBIENTALES	Balance de mat. org. (BMO) (kg/ha/a)	-370	-369	-370	-293	-295	-224	-225	-231	-146	-150	-87
	Balance N (kg/ha/año)	82	73	77	101	100	126	116	118	153	146	184
	Balance P (kg/ha/año)	29	26	28	40	40	48	44	44	55	53	64
	Balance K (kg/ha/año)	11	6	9	22	23	33	30	32	45	44	59

**Cuadro 30: área de cada módulo en la rotación en sistema actual y sistemas alternativos seleccionados. Escenario 5**

Nombre del sistema	S. actual	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Identificación sistema en PFD	Id.	9	447	429	660	627	6	73	624	424	344
PPM (ha)	188	188	189	188	188	189	188	189	188	189	188
Alfalfa (ha)	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
PP/silo (ha)	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
PP/heno (ha)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Av/sg (ha)	39	57	40	58	40	59	55	36	62	58	59
Av/EM (ha)	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
EM (ha)	43	22	38	16	37	1	10	43	1	8	3
Sorgo grano (ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trigo/sorgo grano (ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como puede verse en el Cuadro 30, los sistemas alternativos seleccionados mantuvieron al mínimo las áreas de pasturas perennes, presentando así similar relación P/A que el sistema actual. Se observó la tendencia hacia el aumento del área del módulo mixto avena/sorgo en detrimento del módulo único de ensilaje de maíz.

Si bien se consiguieron en este escenario sistemas alternativos con resultados de BMO tan buenos como los encontrados en el escenario 4, estos se logran con costos de alimentación mayores.

Al igual que en los escenarios anteriores, se encontraron aquí sistemas alternativos capaces de cumplir con las características según diferentes intereses. A modo de ejemplo, si el interés fuera por sistemas alternativos con similar impacto

ambiental que el sistema actual (ej., similar o mejor BMO y balance de nutrientes más ajustados) pero con mejoras significativas en el margen neto y sin aumentos en los costos de alimentación, se podría elegir entre los sistemas A y B (n.º 9 y 447). Si, por el contrario, la preferencia fuera por mejoras significativas en el BMO (BMO menores a -300) se podría optar por los sistemas E, F y G, aunque esto lleva a balances de nutrientes más desajustados, asociados además a mayores costos de alimentación, aunque también a mayores márgenes. Por esto se puede decir también que en este escenario la mejora en el BMO sigue estando asociada a aumentos en la compra del alimento.

Al estudiarse el efecto del aumento en la cantidad de rastrojo (E5.2) sobre los resultados del sistema actual (fase descriptiva del PFD) se encontraron los siguientes cambios:

- menor cantidad de materia seca destinada a consumo animal y mayor cantidad destinada como rastrojo,
- mayor cantidad de ensilaje de maíz comprado (debido a la reducción del rendimiento del cultivo),
- menor consumo de energía, proteína cruda, materia seca y fibra de los animales.

En cuanto al BMO (Cuadro 31), si bien aumenta la entrada de materia orgánica por rastrojos, disminuye la entrada por estiércol, aunque también se reduce la salida por degradación de este. Esto lleva a un nuevo BMO levemente menos negativo que el original en la situación actual (-363 original vs. -350 rastrojo modificado).

**Cuadro 31: balance de materia orgánica del suelo en escenario 5 y en escenario 5 modificado.**

<b>Balance materia orgánica</b>		Escenario 5	E5 rastrojos modif.
		kg/ha/año	kg/ha/año
<b>Entradas</b>			
	Residuos de cultivos	592	592
	Abonos verdes	221	269
	Estiércol	2562	2427
<b>Salidas</b>			
	Degradación del estiércol	1895	1796
	Deg. mat. org. suelo	1328	1328
	Pérdidas por erosión	515	515
<b>Balance</b>			
	Balance	-363	-350

Con respecto al balance de nutrientes, la compra de mayor cantidad de ensilaje de maíz hace que aumente la entrada de nutrientes al sistema, lo que conduce a un mayor desbalance.

En cuanto al flujo de nutrientes dentro del sistema (Cuadro 32), el cambio en las cantidades de rastrojo llevó a un aumento en la cantidad de nutrientes en abonos verdes y disminuyó la cantidad de nutrientes consumidos por los animales habiendo, entonces, menos nutrientes en el estiércol y, por tanto, menores pérdidas por esta vía. En cambio, aumentaron las pérdidas de nutrientes desde el suelo (probablemente debido al mayor desbalance), pero disminuyó la volatilización y se incrementó la inmovilización.

**Cuadro 32: flujo de nutrientes en el sistema en E5 y en E5 rastrojo modificado.**

Todos los flujos	Escenario 5				E5 rastrojos modificados			
	C	N	P	K	C	N	P	K
Prod. veg. importados	877	37	14	19	1081	42	15	24
Consumo por cultivos	3982	212	25	209	3615	205	24	202
Fijación biológica de N	0	41	0	0	0	41	0	0
Deposiciones atmosféricas	0	4	1	3	0	4	1	3
Fijación no biológica	0	10	0	0	0	10	0	0
Abonos verdes	407	35	4	33	431	48	5	42
Provisto a animales	4450	254	35	195	4263	239	34	184
Consumo animal	3407	179	28	137	3295	170	28	131
Respiración animal	2199	0	0	0	2116	0	0	0
Estiércol producido	1967	214	27	185	1864	199	26	174
Estiércol en cama	1045	75	7	58	970	69	7	53
Estiércol al suelo	1281	168	27	185	1214	157	26	174
Fertilizantes importados	0	31	23	0	0	31	23	0
Disponible en estiércol	1281	199	49	185	1214	188	49	174
Pérdidas desde el suelo	1612	6	20	-4	1562	16	21	1
Volatilización	686	49	0	0	650	45	0	0
Pérdidas por erosión	257	30	9	16	257	30	9	16
Prod. veg. exportados	2	0	0	0	2	0	0	0
Prod. animales exportados	282	40	9	10	282	40	9	10
Estiércol exportado	0	0	0	0	0	0	0	0
Inmovilización	76	0	0	0	82	0	0	0
Pérdidas de nutrientes totales	72	56	20	-4	83	61	21	1

Con respecto a la fase de rediseño realizada en el nuevo escenario 5 (5.2 con rastrojos modificados), se presentan en el Cuadro 33 los resultados e indicadores productivos de los sistemas alternativos seleccionados.

**Cuadro 33: indicadores productivos, económicos y ambientales del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en el escenario 5.2 rastrojos modificados**

INDICADORES	Indicadores productivos, económicos y ambientales		Escenario 5.2 rastrojos modificados									
	Nombre del sistema	S. actual	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Identificación del sistema en PFD	Id.	144	589	423	257	544	637	556	320	140	635
PRODUCTIVOS	VM/ha (sin recría)	0,88	0,70	0,73	0,84	0,88	1,02	1,26	1,25	1,59	0,75	0,76
	VM/ha (incluye recría)	1,18	0,93	0,98	1,12	1,17	1,36	1,68	1,67	2,12	1,00	1,02
	Uso del suelo ( % perennes/ % anuales)	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27	73/27
	Alimento comprado (kg/ha)	1.747	1.395	1.634	2.931	2.890	5.469	5.507	5.511	7.926	1.819	1.778
	Alimento comprado (g/L)	296	232	248	426	371	605	520	488	548	286	262
ECONÓMICOS	Prod. indiv. leche (L/VM)	18	24	25	22	24	24	23	25	25	23	24
	Productividad (L/ha)	5.905	6.011	6.603	6.885	7.797	9.034	10.582	11.301	14.472	6.356	6.777
	Costo alim. (US\$/L)	0,08	0,07	0,07	0,10	0,09	0,14	0,12	0,11	0,15	0,08	0,07
	Costo alimentación (CA) (US\$/ha/a)	500	398	454	711	695	1.257	1.261	1.289	2.145	481	482
	Margen neto (OP) (US\$/ha/a)	676	778	895	721	1.005	805	1.256	1.439	1.513	796	918
AMBIENTALES	Balance de mat. org. (BMO) (kg/ha/a)	-370	-383	-384	-305	-308	-226	-225	-230	-120	-356	-379
	Balance N (kg/ha/año)	82	82	79	108	101	131	123	118	167	90	80
	Balance P (kg/ha/año)	29	32	29	43	41	47	45	43	59	36	29
	Balance K (kg/ha/año)	11	12	10	26	23	35	32	30	53	18	10

Al igual que en los escenarios anteriores, se encontraron en esta exploración sistemas alternativos que, con similar BMO que el sistema actual, lograron mejor resultado económico y menores costos de alimentación. Esto quiere decir que sería posible mejorar el resultado económico del sistema actual manteniendo los indicadores ambientales (BMO y balance de nutrientes).

La búsqueda de alternativas con mejoras significativas en el BMO lleva a sistemas con mejor resultado económico, pero también con mayores costos de alimentación asociados a la mayor compra de alimento y mayores desbalances de nutrientes. Por tanto, la estrategia para mejorar el BMO sigue siendo la compra de alimento.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. EVALUACIÓN DE LA FASE DESCRIPTIVA DEL PFD

#### 5.1.1. Indicadores productivos y económicos

De la comparación entre los indicadores productivos y económicos simulados por el programa y los valores disponibles en la BD Conaprole, podemos concluir que el programa representó, en términos generales, correctamente al sistema actual.

Las diferencias que aparecen entre los indicadores reales y los estimados por el programa (para uso del suelo, Cuadro 5) se explican por diferencias en la información ingresada y no debido al funcionamiento del programa.

#### 5.1.2. Indicadores ambientales

##### 5.1.2.1. Erosión

La pérdida de suelo estimada con el programa Erosión 5.9 para el sistema actual (6,6 Mg/ha/año, Cuadro 21) estaría dentro del rango de tolerancia (7 Mg/ha/año). Este valor coincide con el límite superior del rango reportado por la bibliografía nacional para rotaciones cultivo/pastura en siembra directa (Clérici et al., 2004, Clérici y García Préchac, 2001) (Cuadro 34).

**Cuadro 34: tasas de erosión estimadas mediante modelo USLE/RUSLE para diferentes usos y manejos del suelo**

Uso y manejo del suelo	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)
Pastura natural, bajo pastoreo continuo	2 a 5,2
Rotación cultivo/pastura (2:2) LC	8,6 a 29,4
Rotación cultivo/pastura SD	2,8 a 6,6
M-S-T/P-P-P	3,2 a 5,7
M-S-T/P-P-P-P	2,8 a 4,9
M-S-T-S-T/P-P-P	3,7 a 6,6
M-S-T-S-T/P-P-P-P	3,2 a 5,7
Agricultura continua SD (S-T)	6,6 a 11,9

Referencias: LC = laboreo convencional SD = siembra directa M = maíz S = soja T = trigo P = pradera

En cuanto a las relaciones de pérdida de suelo (RPS) del sistema actual (Anexo 8.4 Cuadro 45), los valores simulados a la siembra de la pradera permanente y al comienzo del cultivo de invierno (0,790), si bien resultan superiores a los reportados por García Prechac et al. (2017), este coincide en identificar la etapa de transición de cultivo de verano a pradera como la de mayor riesgo de erosión, sobre todo en casos con retiro del rastrojo para ensilar o enfardar.

Las RPS estimadas para los primeros años de la pastura consociada (componentes 2 y 3 de la rotación) resultan muy bajos y similares a los encontrados por García Prechac et al. (2017) previo al pastoreo de una pastura de 2.º año con alta cobertura vegetal.

En cuanto a las RPS de los componentes 4 y 5 (0,030 y 0,050), se asemejan a los encontrados en verdeos de invierno y praderas establecidas con buena cobertura vegetal (65-90 %) y buena cobertura por residuos (40-50 %) (García Prechac et al., 2017).

Con respecto a las RPS de los cultivos de verano e invierno (componentes 6, 7 y 8), coinciden con los encontrados por García Prechac et al. (2017) en verdeo de invierno y de verano con baja cobertura vegetal y baja cobertura de residuos. Esto estaría indicando que si bien el programa Erosión 5.9, empleado en este trabajo para la estimación de la pérdida de suelo por erosión, fue desarrollado para sistemas agrícola, estaría simulando de manera correcta este sistema lechero al coincidir los RPS estimados por el programa con los RPS encontrados en experimentos.

#### 5.1.2.2. Balance de materia orgánica del suelo

Al analizar las entradas de materia orgánica al suelo se encuentra como principal componente el estiércol animal y, en menor medida, los rastrojos de cultivos y pasturas. Esto lleva a 2 consideraciones: la importancia del reciclaje (y redistribución) del estiércol y la baja cantidad de rastrojo vegetal que es reincorporado al sistema. Algo similar a esto ya había sido mencionado por Terra y García Préchac (2001) en ensayo en INIA Treinta y Tres, donde reportaron que la agricultura continua forrajera, aun cuando hecha en siembra directa, no aporta cantidades significativas de biomasa debido al retiro de la misma que realizan los

animales, lo que lleva a pérdidas de C orgánico. Por otra parte, los mismos autores mencionan que, en caso de incluirse en la rotación una fase de pastura de larga duración, el C orgánico tendería a mantenerse en el largo plazo. Sin embargo, esto no fue lo que simuló el PFD para el sistema actual ni tampoco fue la estrategia empleada en los sistemas alternativos seleccionados durante la etapa de rediseño al buscar maximizar el BMO.

En cuanto a la importancia del estiércol en el balance del carbono del suelo, este también fue mencionado por Ernst y Siri (2009). Luego de 12 años de experimento, al comparar un sistema de agricultura continua contra un sistema de rotación con pasturas de larga duración encontraron que si bien las entradas de C en biomasa aérea son mayores en el sistema de agricultura continua, debido a que el 84 % de la materia seca fue consumida por los animales en el sistema con rotación, el reciclaje de carbono en el estiércol y la mayor biomasa radicular en este último lo compensarían, sin encontrar diferencias en el carbono orgánico del suelo entre sistemas.

Con respecto a las salidas de la materia orgánica del suelo, las más importantes resultaron ser la degradación del estiércol y de la materia orgánica del suelo. Si bien la erosión no es una de las principales fuentes de pérdida, sería una de las más fácilmente manejables y, en caso de eliminarse, el balance pasaría a ser positivo.

Al comparar el resultado del BMO simulado por PFD con información similar presente en bibliografía nacional, se encuentra que este se ubica dentro del rango reportado por Cardozo y Uribe (2010) en sistemas de producción similares (Cuadro 35).

**Cuadro 35: comparación de balances de materia orgánica del suelo**

Fuente	BMO (kg/ha/año)
Estimado por PFD situación actual	-363
Cardozo y Uribe (2010)	-127 a -2414

#### 5.1.2.3. Balance de nutrientes del sistema

Si bien los balances de nutrientes a escala del sistema son útiles para brindar una idea de su potencial de contaminación, presentan las siguientes limitantes:

1. No informan acerca de los posibles procesos involucrados en esas pérdidas (Peyraud y Delaby, 2006).
2. El reciclaje de nutrientes en sistemas pastoriles se da a través de los animales y, dado que la distribución de heces y orina no es uniforme, se presentan en algunas zonas, áreas con mayor nivel (enriquecidas) y áreas con menor nivel (empobrecidas) de nutrientes. Esto afecta la eficiencia de utilización de estos y aumenta el potencial de contaminación (Del Pino, s. f., La Manna et al., 2008). Es decir que un mismo valor de balance puede tener diferentes implicancias según cómo sea su distribución física y temporal en el predio.
3. En el balance, todas las formas químicas del nutriente tienen el mismo valor. Sin embargo, en la realidad esto no ocurre así: las diferentes formas del nutriente tienen diferente disponibilidad y poder contaminante (Morón, 2014).
4. Por otra parte, un mismo valor de balance puede tener diferentes implicancias según cuál sea el valor inicial o punto de partida en que se encuentra el sistema. Por este motivo, en el caso de P y K es importante a la hora de interpretar el resultado del balance considerar otros factores como nivel de fertilidad, capacidad de acumulación y agotamiento del suelo y el potencial de contaminación (Gourley et al., 2007, citado por Gourley et al., 2012).

Si bien en el PFD se emplea el balance de nutrientes como indicador de sustentabilidad ambiental, el programa integra información complementaria como, por ejemplo, los flujos de nutrientes en el sistema, lo que permite levantar varias de las limitantes mencionadas antes.

Los flujos de nutrientes mostrados por el programa permiten la identificación y cuantificación de los procesos de entrada y salida de estos hacia y desde el sistema, lo que permite el diseño y la evaluación de posibles medias de mitigación a través de la simulación.

En cuanto a los balances de nutrientes estimados por el PFD en el sistema actual, se encuentran dentro del rango reportado por la bibliografía nacional en

sistemas de producción similares (Morón, 2014, Cardozo y Uribe, 2010, La Manna et al., 2008, Larrosa y Lutz, 2003) (Cuadro 36).

**Cuadro 36: balance\*<sup>1</sup> (kg /ha/año) y eficiencia\*<sup>2</sup> de N, P y K en el sistema, reportados por la bibliografía nacional y estimado por el PFD para el sistema actual.**

	Estimado por Farm Design	Larrosa y Lutz (2003)	La Manna et al. (2008)	Cardozo y Uribe (2010)	Morón (2014)
<b>Balance N</b>	83	-3 a 86	88 a 130	24 a 70	109
<b>Eficiencia N</b>	0,33	0,12 a 0,85	0,17 a 0,22	0,23 a 0,45	0,21
<b>Balance P</b>	29	12 a 31	-	9 a 32	64
<b>Eficiencia P</b>	0,24	0,11 a 0,27	-	0,1 a 0,3	0,17
<b>Balance K</b>	12	-	-	-	24
<b>Eficiencia K</b>	0,45	-	-	-	0,24
* <sup>1</sup> Balance = entrada - salidas deseables		* <sup>2</sup> Eficiencia = producto/ entradas			
Fuente: Larrosa y Lutz 2003, La Manna et al., 2008, Cardozo y Uribe, 2010, Morón, 2014)					

## Nitrógeno

El sistema actual presentó un balance positivo de N que estaría dentro del rango de tolerancia donde el sistema sería capaz de acumular este nutriente (La Manna et al., 2008).

La eficiencia de utilización de este nutriente (0,33), si bien se encuentra en el orden de lo reportado por la bibliografía nacional, resulta algo elevada en comparación con la eficiencia de sistemas con balances similares (Cardozo y Uribe, 2010, La Manna et al., 2008, Larrosa y Lutz, 2003). Esta eficiencia resulta similar a la reportada por Ledgard et al. (1997) para una granja lechera promedio de Nueva Zelanda y superior a la reportada en sistemas con mayores entradas de N o mayores balances (Gourley et al., 2012, Ledgard et al., 1997).

La principal entrada de N al sistema fue por fijación biológica (FBN); sin embargo, esta representa solo el 33 % del N total que ingresa, siendo el ingreso de N en alimentos y fertilizantes importados una entrada también importante. La contribución de la FBN a las entradas totales resulta bastante inferior a la reportada por La Manna et al. (2008) (al menos 50 % de las entradas de N aportado por la FBN) pero similar al reportado por Larrosa y Lutz (2003).

Dentro de las salidas no deseables la volatilización es la más importante, ya que por esta vía se pierde un 40 % del N total que entra (49 kg N/ha/año), seguido

por la erosión (24 % de las entradas de N) y, por último, por lavado (5 % de las entradas de N) (Figura 2).

Con respecto a las pérdidas por volatilización, la bibliografía internacional reporta pérdidas de 57,2 kg N/ha en el sistema modelo de Reino Unido con encierro de 180 días y de 24,3 kg N/ha para el sistema modelo de Nueva Zelandia con pastoreo todo el año (Jarvis y Ledgard, 2002). Si bien Ledgard et al. (1997) en experimento en el DRC reportó pérdidas de 15 y de 41 kg N/ha/año (en los tratamientos sin y con agregado de 200 kg de N/ha/año), similares a las pérdidas estimadas por el PFD, ese resultado fue obtenido en un sistema con un balance de N de 338 kg N/ha/año, muy superior al balance que presentó el sistema actual. Por esto podemos decir que las pérdidas de N-NH<sub>4</sub> estimadas por el PFD para el sistema estudiado parecen algo elevadas, teniendo en cuenta su balance y sin encierro de animales, pero esto podría explicarse por el reciclaje del abono que realiza el productor.

En cuanto a las pérdidas por lavado estimadas por el PFD (6 kg N/ha/año), estas resultan muy inferiores a las encontradas por Ledgard en experimento en DRC (Ledgard et al., 1997). En ese experimento, el tratamiento sin agregado de fertilizante (0 kg/ha N fertilizante) y con 3,3 vacas/hectárea, cuyo balance de nitrógeno es de 97 kg/ha (similar al balance obtenido por el predio aquí estudiado) y donde la principal entrada de N es por fijación biológica, las pérdidas por lavado se estimaron en 40 kg N/ha, y aumentaron con el agregado de fertilizante.

Ahora, si consideramos la suma de ambas pérdidas (volatilización + lavado) en el sistema actual y en el experimento de Ledgard, estas resultan iguales ( $49 + 6 = 55$  en el sistema actual y  $15 + 40 = 55$  experimento DRC). Esto podría indicar que la mayor pérdida de N por volatilización estimada por el PFD dejaría un menor remanente de N disponible a perderse por lavado, lo que explicaría las diferencias en la estimación en ambas variables.

Las pérdidas de N por erosión estimadas por el PFD (30 kg/ha/año) resultaron bastante más altas que las estimadas por Larrosa y Lutz (2003) en sistemas agrícolas lecheros con siembra directa (3 a 13 kg N/ha/año) y a la estimada por Morón (2014) para un brunosol eutrico de La Carolina.

En el caso de Larrosa y Lutz (2003), estas diferencias pueden deberse a la forma de estimación del parámetro. Estos autores estimaron el N perdido por erosión como la suma de la pérdida de materia orgánica por erosión de todas las rotaciones de sistema y el campo natural y luego aplicando la relación C:N de 10:1. El PFD, en cambio, la estima como el producto del valor de pérdida de suelo por erosión y el contenido de N del suelo erodado, el que en nuestro caso fue corregido por un factor de enriquecimiento de 2,5. Por otro lado, Morón (2014), si bien emplea la misma metodología que el PFD, asume una pérdida de suelo de 2,4 tt/ha y un contenido de N = 0,25 %, lo que representa la mitad del valor de N ingresado al PFD (contenido de N = 0,44).

## **Fósforo**

En el caso del fósforo, el sistema actual también presenta un balance positivo, siendo el fertilizante la principal fuente de entrada (61 % de las entradas totales de P) (Cuadro 16).

Tanto el balance como la eficiencia de utilización de este nutriente estimada por el PFD coinciden con los valores reportados por la bibliografía nacional (Morón, 2014, Cardozo y Uribe, 2010, Larrosa y Lutz, 2003).

En cuanto a las salidas no deseables simuladas por el programa, las pérdidas por lavado resultan ser la principal causa (20 kg P/ha/año), seguidas por las pérdidas por erosión (9 kg P/ha/año, Figura 5). En total, el 76 % del P ingresado al sistema se pierde por estas causas.

Las pérdidas por erosión estimadas por el PFD resultaron bastante más altas que las encontradas por Morón (2014) o la estimada por Larrosa y Lutz (2003). Al igual que en N, esto podría deberse, en el caso de Larrosa y Lutz (2003), a diferencias en la forma de estimación o a los coeficientes ingresados al programa. En el caso de Morón (2014), quien emplea la misma metodología que el PFD, asume una pérdida de suelo de 2,4 tt/ha y un contenido de P total = 388 mg P/kg, mucho menor a la pérdida de suelo (6,6 tt/ha) y contenido de P total (1250 mg P/kg) que se ingresó al PFD para simular el sistema actual, lo que explica las diferencias mencionadas.

En relación con las salidas totales, el peso relativo que tiene la pérdida de P por erosión es menor que la pérdida de N por erosión, lo cual ya fue advertido por Larrosa y Lutz (2003). Ahora, si bien estas pérdidas aparecen como menores, no son por esto menos importantes, ya que pueden tener un importante impacto ambiental debido a su potencial efecto en la eutrofización del agua.

Con respecto a las pérdidas por lavado estimadas por el PFD (*Soil Losses*), estas resultaron bastante más altas que los valores de pérdida de P soluble encontradas por Perdomo et al. (2015) en parcelas ubicadas en Candil-Florida. Esto podría deberse a que probablemente el PFD incluya dentro de este indicador otras fracciones de P además del soluble y contemple otras fuentes además del fertilizante.

Se desconoce el submodelo empleado por el PFD para estimar las pérdidas de P y, por tanto, no es posible determinar las causas que expliquen las diferencias. Más allá de esto, la organización SERA-17, que agrupa a investigadores de EE. UU que estudian las pérdidas de P desde sistemas agrícolas, hace especial énfasis en la necesidad de que estos modelos vayan acompañados de investigación local que permita estimar los parámetros empíricos y que sean validados en el ámbito nacional. Esta recomendación de la organización nos permite suponer que parte de las diferencias pueda deberse a la falta de adaptación de este modelo a las condiciones locales (Perdomo et al., 2015).

## **Potasio**

Para este nutriente, el PFD estima un balance levemente positivo y una muy alta eficiencia en su uso (Cuadro 24). Este balance estaría en el orden del estimado por Morón (2014) considerando dentro de las salidas solamente las deseables (carne y leche).

Las principales pérdidas de este nutriente ocurren por erosión (Figura 4). El PFD estimó valores casi 3 veces superiores a los estimados por Morón (2014). La causa de esto probablemente sea la mayor pérdida de suelo ingresada al PFD en comparación con la supuesta por Morón, ya que los contenidos de K total en el material erodado en ambas simulaciones son iguales.

Con respecto a las pérdidas por lavado, su valor negativo estaría indicando una disminución de las reservas del suelo. Por esto, a pesar del resultado levemente positivo del balance de K en el sistema actual, sería necesario el agregado de fertilizantes con este nutriente para evitar el descenso de las reservas del suelo. Esto coincide con lo reportado por Morón et al. (2008), quienes observaron una disminución importante de los valores de K intercambiable en suelos bajo producción lechera explicado por la permanente salida de nutrientes en producto sumado a las pérdidas por erosión y a la no utilización de fertilizantes con K. Más allá de esto, debido al nivel de reservas de K del suelo en el sistema actual y en comparación con las pérdidas de K de otros sistemas (del orden de -1000 kg/ha/a en sistemas hortícolas, Dogliotti com. pers, 2023), las pérdidas en este sistema y su consecuente descenso en las reservas no aparecen de momento como algo preocupante.

La principal fuente de entrada de K al sistema son los alimentos comprados fuera del predio (86 %) (Cuadro 24). En este nutriente, el reciclaje que realizan los animales es un componente muy importante del ciclo, ya que el K reciclado en el estiércol (185 kg/ha/año) representa 8 veces la cantidad de K que ingresa al sistema.

## 5.2. REDISEÑO DEL SISTEMA

### 5.2.1. Intensificación y estrategia productiva

Al estudiarse la correlación entre el objetivo de optimización costo de alimentación (CA) y la variable cantidad de alimento comprado se encontró, en todos los escenarios que incluyeron este parámetro como objetivo de optimización, una alta correlación ( $>0,99$ ), es decir que el aumento de los costos de alimentación entre sistemas alternativos se asoció siempre a una mayor cantidad de alimento comprado. Por este motivo se decidió tomar esta variable (cantidad de alimento comprado) como indicador de intensividad del sistema, ya que tiene una correlación muy alta con el costo de alimentación y está en presente en todos los escenarios.

La relación directa y logarítmica observada entre las variables margen neto y cantidad de alimento comprado o costo de alimentación en los E1 y E2 (Figuras 6 y 14) indica que cuanto más intensivo es el sistema, mejor es el resultado económico

obtenido, pero el nivel de respuesta en el MN cambia con el nivel de suplementación. La mayor respuesta en el MN (2,07 US\$/ha por kilo/ha de alimento comprado extra) se obtuvo a bajos niveles de suplementación (inferiores a 300 US\$/ha en Figura 14 o 300 kg/ha en Figura 6). A mayores niveles de suplementación (entre 300 y 2100 kg/ha de alimento comprado, tramo donde se sitúa el sistema actual en estudio), el nivel de respuesta baja a 0,23 US\$/ha por kg de alimento extra, y llega a ser muy baja (0,08 US\$/ha) por encima de los 2100 kg/ha y hasta los 3500 kg/ha de alimento comprado, que es hasta donde llega esta exploración.

En el E3, en cambio, esta relación se invierte: disminuye el MN al aumentar el alimento comprado. Este cambio puede deberse a los diferentes niveles de suplementación que se manejan en este escenario a diferencia de los otros (niveles de entre 0 y 3000 kg/ha en los E1 y E2 vs. 2250 a 5000 kg/ha en E3) y/o a la sustitución del objetivo de optimización. Al incluirse un objetivo ambiental como el BMO y no tener en cuenta la minimización de los costos de alimentación, el E3 exploró niveles de suplementación muy superiores, lo que llevó a la inversión de la relación entre el margen neto y la cantidad de alimento comprado.

Este cambio en el tipo de relación (directa o inversa) entre el MN y la cantidad de alimento comprado en los diferentes escenarios probablemente se explique por la forma de respuesta que muestra la producción de leche con el nivel de suplementación, con aumentos decrecientes hasta maximizarse la producción. Luego de ese punto, los aumentos en la cantidad de alimento comprado no generarían mejora en la producción, por lo que solo implicarían mayores costos de alimentación con caída del MN.

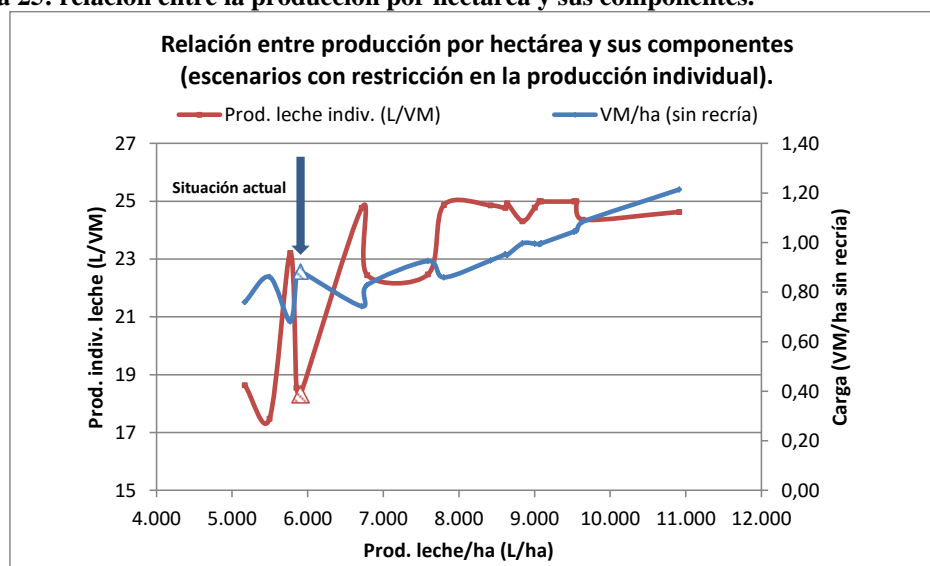
Por otro lado, la inclusión de los 3 objetivos a la vez en el E4 llevó a la pérdida de esta correlación (Figura 8). Por tanto, la inclusión de un indicador ambiental (como lo es el BMO) dentro de los objetivos de optimización afectó la correlación entre indicadores económicos (MN-CA). En otro orden, la optimización de los 3 objetivos en simultáneo hizo que el PFD redujera el rango de exploración a las zonas en donde se verificaron las mayores respuestas en el MN en los escenarios anteriores y, por tanto, donde el proceso de suplementación es más eficiente y donde se dan menores riesgos de contaminación.

Todos los sistemas seleccionados presentaron un mejor margen neto que la situación actual. En los escenarios 1 y 2, las mejoras en los MN entre los sistemas alternativos se asociaron a mejoras en la productividad (L/ha), pero no ocurrió lo mismo en los E3 y E4. La inclusión del BMO como objetivo de optimización en los escenarios 3 y 4 llevó a que se perdiera la correlación entre margen neto y productividad (L leche/ha). En esos sistemas, la mayor compra de alimento lleva a la mejora del BMO y de la productividad (L/ha), pero dicha mejora no compensaría los mayores costos de alimentación, lo que afectaría de manera negativa el MN. Por otra parte, la creciente entrada de alimento sin una mejora proporcional en la producción conduce a mayores desbalances o excesos de nutrientes N, P y K, lo que aumenta el riesgo de contaminación.

Con respecto a la estrategia productiva puede verse que los sistemas alternativos de nivel medio, alto y muy alto de suplementación (señalados en color amarillo, anaranjado y rojo en el Cuadro 26), presentaron mayor carga que el sistema actual. La excepción a esto solo ocurre en el E1, donde al no restringirse la producción individual de leche, el PFD aumenta la producción individual en lugar de aumentar la carga. Por otro lado, prácticamente todos los sistemas alternativos presentaron una mayor producción individual de leche que el sistema actual (Cuadro 25 y 26 y Figura 25 abajo).

La restricción en la producción individual de leche no implicó una limitante productiva y se lograron en ambos escenarios (E2 con y E1 sin restricción) similares niveles de productividad/ha mediante la adaptación de la estrategia productiva (mayor o menor carga). Sin embargo, los resultados del modelo indicarían que, para mejorar el margen neto, el aumento de la producción individual sería más eficiente que incrementar la carga, al minimizar los costos de alimentación.

**Figura 25: relación entre la producción por hectárea y sus componentes.**



Los sistemas de bajo nivel de suplementación (verdes) prácticamente eliminan la compra de alimento y mantienen similar producción de leche por hectárea que el sistema actual, con base en una menor carga pero mayor producción individual. De esta manera reducen los costos de alimentación, lo que redundaría en un mejor margen neto pero peor balance de materia orgánica que la situación actual (Cuadro 25). Esto probablemente se debe a que el PFD es un modelo estático, basado en balances anuales, y por esto no contempla las variaciones estacionales de producción de forraje de nuestros sistemas que hacen necesaria la compra de suplemento para cubrir los requerimientos estacionales. Esto pone en duda la viabilidad real de los modelos de bajo nivel (Cuadro 26; verde).

Los sistemas de nivel medio (en amarillo; Cuadro 25) logran, con similares costos de alimentación (US\$/ha) y similar cantidad de alimento comprado por hectárea que la situación actual, mayores producciones por hectárea (con base en mayor carga que la actual y maximizando la producción individual), lo que mejora los márgenes netos y balances de materia orgánica, además de un mejor ajuste en los balances de nutrientes. Este uso más eficiente del alimento comprado (menos gramos de alimento comprado por litro de leche que el sistema actual) podría deberse a un mejor balance de la dieta (sistemas alternativos con mejor balance en la proteína cruda (Anexo 8.5 Figura 30); o a mayor consumo de forraje, tal como fuera

reportado por Fariña y Chilbroste (2019). Estos autores concluyen que esta estrategia de crecimiento con altas cargas mejoraría los porcentajes de producción y utilización de forraje, lo que lograría un efecto positivo en los resultados biofísicos y económicos de los sistemas lecheros.

En el caso de los sistemas de nivel alto y muy alto (color anaranjado y rojo, respectivamente, en Cuadro 26), si bien presentan mayor uso de alimento comprado por hectárea que el sistema actual, los aumentos en la producción (debidos a la mayor carga y máxima producción individual) compensarían los mayores costos de alimentación al presentar un menor costo/L que repercute en mejores márgenes, excepto en los sistemas más intensivos. Estos sistemas, al maximizar la compra de alimento, logran además mejoras en el balance de materia orgánica, pero presentaron costos por litro de leche mayores que el sistema actual, lo que se asocia a la mejora de este indicador.

Esta estrategia de intensificación (mayor producción de leche por hectárea a base de alta producción individual y alta carga) se encuentra en línea con lo reportado por Fariña y Chilbroste (2019). Estos autores, al analizar una base de datos de 256 sistemas lecheros comerciales, concluyen que los sistemas que presentaron un crecimiento de la productividad anual de leche mayor a 5 % se basaron en una mayor carga y aumento del consumo de forraje producido en el predio. La mayor demanda de alimentos que implica este aumento de la producción es cubierta por un aumento proporcional de los diferentes componentes de la dieta (forraje fresco, conservado y concentrado), lo que permite mantener bajos los costos de producción por litro.

Pero, a diferencia de lo reportado por estos autores, el PFD sustenta este aumento en la demanda de alimento con la compra del mismo, debido a que los porcentajes de utilización y rendimiento de materia seca de las pasturas no pudieron ser introducidos como variable de decisión del programa, lo que tiene un efecto diferente tanto en lo económico como en lo ambiental (Figura 21), ya que las mejoras en los márgenes se reducen debido a los altos costos de alimentación, pudiendo, además, aumentar los excesos de nutrientes, lo que incrementa los riesgos de contaminación.

Esta situación se hizo más evidente en el escenario 3, donde no se incluyó el costo de alimentación como objetivo de optimización y sí se incluyó el BMO. En cambio, la inclusión del costo de alimentación como objetivo de optimización en los escenarios 2 y 4 llevó a que se encontraran en estos escenarios las rotaciones con mayor cantidad de forraje destinado a los animales (Figura 20).

Por otro lado, la correlación negativa encontrada entre la MS ofrecida por la rotación y el porcentaje de perennes explicaría la mayor anualización de la rotación en los escenarios 2 y 4, los que al buscar minimizar los costos de alimentación procuran maximizar la producción de forraje, lo que el PFD consigue a través de la anualización.

Esta anualización de la rotación, sobre todo en el escenario 4, donde se incluye el BMO como objetivo de optimización, parecería contraponerse a los resultados de investigación nacional (Terra y García Préchac, 2001), donde se plantea que la inclusión de pasturas de larga duración permitiría la manutención o incluso el aumento de C orgánico del suelo, a diferencia de sistemas de agricultura continua forrajera que llevan a una pérdida de aquel. Esto se explica porque la disminución en la relación perennes/anuales de los sistemas alternativos se debe, en parte, a la reducción del área de alfalfa y aumento del área del módulo avena/sorgo, el cual presenta una mayor producción de materia seca por hectárea y mayor aporte de materia orgánica efectiva radicular que el módulo de alfalfa (mat. org. efectiva radicular alfalfa de 432 kg/ha vs mat. org. efectiva radicular módulo av/sg de 648 kg/ha) (Anexos 8.5 Figura 37). Esto estaría en línea con lo propuesto por Ernst et al. (2020), quienes concluyen que la rotación de cultivos anuales en siembra directa no es suficiente para preservar la productividad del suelo (propiedades químicas y físicas del suelo) y que para esto sea posible es necesario incluir pasturas perennes o rebalancear la secuencia de cultivos en la rotación con aumento en la frecuencia de cultivos, tales como maíz y sorgo, con mayor aporte de materia seca y con un denso y profundo sistema radicular y disminuir la frecuencia de cultivos como la soja.

Por otro lado, al no contar con un submodelo que estime la pérdida de suelo asociada a la rotación, el PFD no puede considerar el aumento en las pérdidas de

suelo (y carbono) por erosión que conlleva la anualización de la rotación en los sistemas alternativos.

En cuanto al balance de nutrientes la baja correlación entre las variables balances de nutrientes y nivel de productividad, en comparación con la alta correlación entre balances de nutrientes y nivel de alimento comprado (Cuadro 27), coincide con lo reportado por Darré et al. (2021), quienes concluyen que la estrategia de producción y prácticas de manejo aplicadas guardarían mejor relación con el potencial de contaminación que el solo nivel de productividad

Los sistemas alternativos de niveles bajo y medio presentaron balances más ajustados que el sistema actual. No se encontraron mayores diferencias entre los balances de los sistemas alternativos presentes a esos niveles; por esto se puede concluir que, en esos rangos de suplementación, los balances de nutrientes no se asociaron con el nivel de intensificación del sistema.

En cambio, en los niveles alto y muy alto, los sistemas alternativos más intensivos presentaron mayores excesos que los del sistema actual (Cuadros 25 y 26). Por esto podemos concluir que la estrategia propuesta por el programa para mejorar el BMO basada en la compra de alimento llevaría, luego de cierto punto, a pérdidas importantes en el margen neto y mayor riesgo de contaminación debido a los mayores desbalances de nutrientes.

El mejor ajuste en los balances de los sistemas de niveles bajo y medio puede deberse al mayor incremento en la salida de nutrientes en forma de producto, que el aumento en la entrada de estos en forma de alimento y, en el caso particular del N, a una reducción en la entrada por FBN asociada a la disminución del área de praderas permanentes

Esto concuerda con lo reportado por Cardozo y Uribe (2010) y Larrosa y Lutz (2003), quienes al analizar los procesos de intensificación y su efecto sobre el balance de N concluyen que este presenta una correlación positiva con el área de praderas permanentes debido a que el aumento del área de praderas se asocia a una mayor entrada de N por FBN sin un aumento proporcional en las salidas como producto.

A niveles superiores de suplementación (>350 g/L alimento), el aumento en la salida de nutrientes en forma de producto no sería proporcional a su entrada, lo que conduce a mayores desbalances.

Todos los sistemas alternativos seleccionados mostraron la tendencia a una rotación más anualizada, sobre todo los sistemas más intensivos y en el escenario 2 (prod. individual de leche topeada a 25 L). Esto afectaría el nivel de erosión del sistema y, por tanto, también el BMO y los flujos de nutrientes del sistema. Sin embargo, al ser la erosión un dato ambiental ingresado al PFD durante la fase descriptiva, no es posible evaluar el impacto de cambios en esta variable durante la fase de exploración.

Para evitar estos cambios en la relación perennes/anales con efectos sobre la erosión durante la exploración se diseñó el escenario 5, donde se establecieron áreas mínimas de praderas permanentes iguales a las del sistema actual. Con esto se logró mantener la relación P/A y, por tanto, no fue necesario el recálculo de la erosión. Sin embargo, esto tuvo un impacto negativo en los BMO, ya que para obtener valores similares a los encontrados en escenarios anteriores fueron necesarios mayores costos de alimentación. Esto probablemente se deba a un menor aporte de materia orgánica de la rotación, y a la ya mencionada asociación entre las mejoras del BMO y la cantidad de alimento comprado. Aun así, también se encontraron en este escenario sistemas que, con costos de alimentación similares a los del sistema actual (482 US\$/ha en sistema J vs. 500 US\$/ha en sistema actual), lograron mejoras significativas en el margen (918 US\$/ha sistema J vs. 676 US\$/ha sistema actual), manteniendo los indicadores ambientales (BMO kg/ha -379 en sistema J vs. -370 en sistema actual) (Cuadro 29).

Por otra parte, los cambios introducidos en las cantidades de rastrojo dejados por la rotación (escenario 5 rastrojos modificados) tuvieron un leve impacto positivo en el BMO del sistema actual, ya que en realidad lo que ocurre es una mera redistribución de la materia orgánica entre las vías de entrada al suelo (rastrojo o estiércol animal). Para que haya un cambio significativo en el BMO es necesario aumentar la entrada de esta (a través un aumento de la producción de materia seca de la rotación o la entrada de estiércol a través de la compra de alimento) o disminuir su

salida mediante control de la erosión. Dado que los rendimientos de las pasturas y la erosión no son variables de decisión modificables durante la exploración, el PFD recurrió nuevamente a la compra de alimento como principal estrategia para mejorar el BMO en este escenario.

#### 5.2.2. Efecto de la inclusión del balance de materia orgánica del suelo como objetivo a optimizar

La sustitución del objetivo de optimización costo de alimentación por el objetivo BMO en el escenario 3 provocó un cambio en la correlación entre margen neto y cantidad de alimento comprado, y se observó una correlación negativa entre ambos objetivos (Figura 7). Este cambio en la correlación posiblemente se deba al tramo de la curva en la que se ubican estas exploraciones y a los ya mencionados aumentos decrecientes de la producción de leche según el nivel de suplementación.

El cambio en el objetivo de optimización condujo a alternativas más intensivas en el uso de alimento, lo se explica por la correlación positiva observada entre BMO y cantidad de alimento comprado. Esta correlación se debe a que, de las variables que afectan el balance de materia orgánica (rastreo de cultivos, desperdicio de alimento, abono animal, degradación de materia orgánica, erosión), el alimento comprado resulta ser una de las principales variables de entrada de materia orgánica que el programa puede modificar. Al no poder eliminar las pérdidas (ya que la erosión es un dato de entrada), la forma de mejorar el balance es mediante un aumento de la entrada y, como ya se mencionó en «Materiales y métodos», 2 de las 3 vías de entrada de materia orgánica al suelo se relacionan directa e indirectamente con el alimento comprado. Una de ellas es el desperdicio del alimento y cuanto más alimento ingrese al sistema, mayor será el alimento desperdiciado que llega al suelo. La otra vía de entrada es el estiércol animal, el cual se incrementa al aumentar la carga, y para sostener esta mayor carga es necesario comprar más alimento.

Otra posible forma de mejorar el BMO sería mediante un aumento de la producción de forraje/ha. Sin embargo, al igual que la erosión, esta no es una variable de decisión que el PFD pueda modificar durante la exploración. Por este

motivo la compra de alimento resulta ser la principal vía de entrada de MO al sistema.

Los sistemas alternativos seleccionados en el E3 presentaron un mejor BMO (menos negativo) que el sistema actual, pero también mejor BMO que los sistemas alternativos de los otros escenarios para similares márgenes netos, lo que da cuenta del efecto del cambio en el objetivo de optimización.

En cuanto a las mejoras en el margen neto, si bien todas las alternativas presentaron márgenes netos superiores al sistema actual, estos resultaron algo inferiores a los obtenidos en los escenarios anteriores (1.419 US\$/ha E3 vs. 1754 US\$/ha en E1). Ambos hechos estarían demostrando el efecto del cambio en el objetivo de optimización.

El gráfico de exploración (Figura 12) muestra una curva con dos segmentos de muy diferente pendiente. En el segmento de menor pendiente (hasta los -230 kg/ha de BMO aprox.) por cada kilo de mejora en el BMO representa una pérdida en el margen neto de 0.7 US\$/ha. En cambio, en el segmento de mayor pendiente (por encima de los -210 kg/ha de BMO) las pérdidas ascienden a -7,4 US\$/ha por cada kilo de mejora en el BMO. El punto de quiebre de la curva y la caída abrupta del margen neto por encima de este se explicarían por el no aumento en la producción de leche a pesar de los incrementos en la cantidad de alimento comprado, lo que lleva a que los sistemas alternativos más intensivos de este escenario presenten mayores excesos de nutrientes N, P y K que el sistema actual, lo que no ocurrió en los escenarios 1 y 2.

Las alternativas más intensivas del escenario 3 presentaron desbalances de N que superarían el límite en que el sistema es capaz de acumular. En el caso del K, los excesos no implicarían un riesgo, ya que sus pérdidas no determinan un problema ambiental. Pero en el caso del P, debido a su potencial de contaminación, deberían tenerse en cuenta otras variables (resultado de análisis, forma en la que ingresa al sistema, distribución, disponibilidad, pérdidas, cercanía a cursos de agua, etc.) para evaluar el riesgo de contaminación.

La estrategia propuesta por el PFD para mejorar el BMO, basado en la compra de alimento, llevaría luego de cierto punto a pérdidas importantes en el margen neto

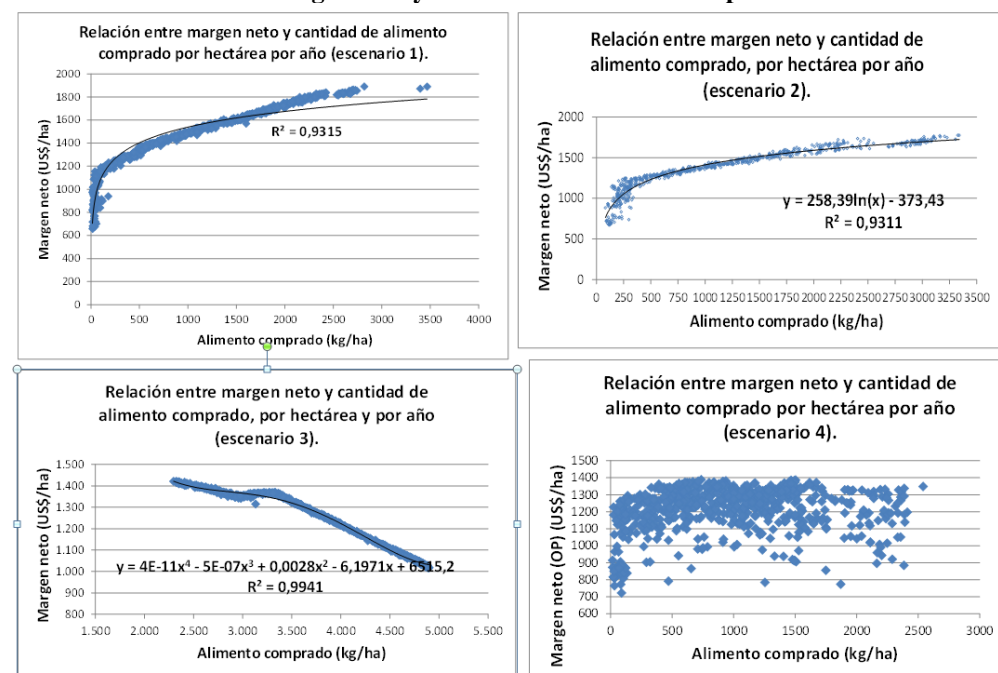
y mayor riesgo de contaminación debido a los mayores desbalances de nutrientes, lo que determina un compromiso negativo entre ambos indicadores ambientales.

### 5.2.3. Efecto de incluir un tercer objetivo de optimización

A diferencia de lo ocurrido en los otros escenarios, no se encontró en el escenario 4 una clara correlación entre margen neto y cantidad de alimento comprado, manteniéndose la correlación con los otros objetivos (BMO/cantidad de alimento comprado y costo alimentación/cantidad de alimento comprado) (Figuras 8 y 26).

La introducción de un tercer objetivo de optimización aumentó el número de sistemas alternativos que, dado un determinado nivel de alimento comprado, cumplen con el óptimo Pareto, y se diferencian entre ellos en el énfasis puesto en cada objetivo.

**Figura 26: correlación entre margen neto y cantidad de alimento comprado en cada escenario.**



La inclusión BMO como objetivo de optimización en el E4 permitió que se encontraran en este escenario sistemas alternativos con resultados similares y hasta mejores para esta variable a los hallados en el E3, pero con menores costos de

alimentación y menos intensivos en el uso de alimento comprado, observándose solo en el E3 sistemas con un uso mayor a 350 g/L de alimento comprado.

Por otro lado, ninguno de los sistemas alternativos del escenario 4 presentó niveles de margen neto tan altos como los alcanzados por los sistemas alternativos en los E1 y E2, aunque siguieron siendo superiores a los del sistema actual (Cuadro 25). Esto demuestra que los óptimos múltiples son diferentes (y en general más bajos) que los óptimos parciales o para una sola variable.

**Cuadro 37: mejores resultados obtenidos por los sistemas alternativos seleccionados para cada objetivo según escenario**

	escenario 1	escenario 2	escenario 3	escenario 4
Objetivos optimizados	MN/CA	MN/CA	MN/BMO	MN/BMO/CA
Max. margen neto (MN) (US\$/ha)	1.859	1.754	1.419	1.382
Max. balance de mat. org. (BMO) (kg/ha)	-345	-269	-162	-122
Min. costo alimentación (CA) (US\$/ha)	177	203	673	194

Por tanto, la inclusión del tercer objetivo de optimización limitó la capacidad de mejora de los objetivos individuales (Cuadro 37), pero su inclusión permitió mejoras significativas simultáneas en todos los objetivos, siendo el escenario 4 el único en que se encontró un sistema alternativo que, con similares costos de alimentación al sistema actual, presentó mejoras significativas del BMO y a la vez duplicó el margen neto (Cuadro 38).

**Cuadro 38: resultados de sistemas alternativos con similares costos de alimentación que el sistema actual**

	Sistema actual	escenario 1	escenario 2	escenario 3	escenario 4
Identificación del sistema en PFD		563	137	138	187
Margen neto (MN) (US\$/ha)	676	1.606	1.462	1.419	1.382
Costo alimentación (CA) (US\$/ha)	500	484	497	673	505
Balance de mat. org. (BMO) (kg/ha)	-370	-375	-349	-321	-205

El aumento en cantidad de alimento comprado en los sistemas alternativos del escenario 4 condujo a balances de nutrientes menos ajustados, observándose mayores excesos en los balances de nitrógeno, fósforo y potasio que los hallados en los sistemas alternativos de los escenarios 1 y 2 y similares a los valores que presenta el sistema actual.

Solo en los escenarios 3 y 4 se encontraron sistemas alternativos con balances positivos para K, lo que puede explicarse por las cantidades de alimento comprado

que se manejaron en estos escenarios, ya que, como ya fuera visto en la fase descriptiva del PFD y antes reportado por Morón (2014), la principal vía de entrada de este nutriente en sistemas lecheros es en forma de alimento animal.

Similar a esto es lo ocurrido con P: solo en los escenarios 3 y 4 se encontraron sistemas alternativos con balance de 40 kg/ha, también explicado por la importancia del alimento comprado como fuente de entrada de este nutriente al sistema.

De todos los sistemas alternativos seleccionados en los diferentes procesos de optimización con límite en la producción individual (escenarios 2, 3 y 4), el sistema con mejor margen neto (1.754 US\$/ha) fue el sistema G (462) del escenario 2. Esta alternativa es a su vez el sistema con mayor producción de leche por hectárea con una producción de 10.914 L/ha, una producción individual de 25 L/VM, carga de 1,21 VM/ha y 284 g/L de alimento comprado. Este sistema presentó además un mejor BMO que el sistema actual; sin embargo, debido a la anualización de la rotación, probablemente de corregirse el valor de erosión en el programa Farm Design, esta ventaja no sería tal.

Por otro lado, si el interés fuera seleccionar el sistema con mejor BMO (menos negativo), esta resultaría ser la alternativa G (n.º 9) de la optimización con 3 objetivos, que, teniendo similares costos de alimentación y margen neto que el sistema actual, presenta un BMO = -122 kg/ha/año.

El PFD encontró sistemas productivos alternativos en los cuales sería posible la intensificación de la producción con mejores márgenes netos, menores excesos de nutrientes y posibles mejoras en los balances de materia orgánica del suelo. Sin embargo, para poder evaluar de manera más precisa el impacto de esto en las variables ambientales, el PFD debería integrar al análisis el efecto que los cambios en la rotación y relación perennes/anuales pudieran tener sobre la erosión.

## 6. CONCLUSIONES

El PFD permitió la integración de los diferentes componentes económico-productivos y ambientales del sistema y la comprensión de sus interacciones, lo que facilita de esta manera una visión integral de aquel.

Los indicadores ambientales estimados por el PFD en general coincidieron en el orden de los resultados reportados por la bibliografía nacional, y, cuando existieron diferencias, pudieron ser atribuidas a la información cargada al programa más que a su operativa interna.

Con respecto al rediseño del sistema, el PFD permitió la visualización de los compromisos existentes entre objetivos optimizados, así como también evaluar el impacto económico y ambiental del proceso de intensificación de los sistemas.

El PFD aportó alternativas productivas con mejores resultados económicos y ambientales que la situación actual, las que además mostraron diferentes estrategias productivas adaptables a las necesidades o preferencias del productor.

La exploración mostró sistemas productivos alternativos con mejores márgenes netos, menores excesos de nutrientes y posibles mejoras en los balances de materia orgánica del suelo. Sin embargo, para poder evaluar de manera más precisa el impacto en las variables ambientales, el PFD debería integrar al análisis el efecto que los cambios en la rotación y relación perennes/anuales pudiera tener sobre la erosión.

Sería deseable integrar al PFD un submodelo de estimación de la erosión que le permitiera al programa considerar el impacto de los cambios en el uso del suelo de los sistemas alternativos propuestos durante la fase de exploración.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aarts H, Biewinga EE, van Keulen H. 1992. Dairy farming systems based on efficient nutrient management. *Netherlands Journal of Agriculture Science*, 40 (3): 285-299.
- Barreto P, Dogliotti S, Perdomo C. 2017. Surface Water Quality of Intensive Farming Areas within the Santa Lucia River Basin of Uruguay. *Air, Soil and Water Research*, 10 (1178622117715446): 1-8.  
doi:[10.1177/1178622117715446](https://doi.org/10.1177/1178622117715446)
- Bolinder MA, Janzen HH, Gregorich EG, Angers DA, VandenBygaart AJ. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118 (1-4): 29-42.
- Bussink DW, Oenema O. 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 51: 19-33.
- Cardozo G, Uribe E. 2010. Evaluación de sustentabilidad en sistemas pastoriles de producción de leche en el litoral oeste del Uruguay, mediante indicadores biofísicos. Tesis ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía-Universidad de la República, Montevideo-Uruguay. P. 105.
- Casagrande M, Dogliotti S, Groot J, Aguerre V, Abbasa A, Albín A, Claassen F, Chilibroste P, Rossing W. 2010. Exploring options for sustainable farming systems development for vegetable family farmers in Uruguay using a modeling toolkit. 9<sup>th</sup> European IFSA Symposium, 4-7 July 2010, Vienna-Austria: 463-469.
- Chilibroste P, Battezzore G. 2019. Dinámica bio-económica de los sistemas de producción de leche. Proyecto Producción Competitiva 2013-2018. Conaprole. 40 p.
- Chilibroste P, Battezzore G. 2014. Proyecto Producción Competitiva 2011-2013. Conaprole. 31 p.
- CIU (Cámara de Industrias del Uruguay). 2019. Informe anual de exportaciones de bienes del Uruguay. Informe anual 2019. [En línea] Consultado en abril 2021.

Disponible en

[http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/89576/1/anual\\_exportaciones\\_2019.pdf](http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/89576/1/anual_exportaciones_2019.pdf).

Clérici C, Baethgen W, García Prechac F, Hill M. 2004. El cultivo de Soja y la conservación del suelo. *Revista Cangüé* 26:20-22.

Clérci C, García Préchac F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región Sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*, 5 (1): 92-103.

CVB. 2008. CVB Table booklet feeding of ruminants – feeding standards, feeding advices and nutritional values of feed ingredients. NL 2502 LS Den Haag. CVB Serie. 43, febrero 2008. ISSN 1567-8679

Dabezies M. 2008. Área cadenas agroindustriales: informe final de la consultoría sobre cadenas agroindustriales en el marco del Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (n.º 338.43 (899) DABa) Uruguay. 96 p.

Darré E, Llanos E, Astigarraga L, Cadenzzi M, Picasso V. 2021. Do pasture-based mixed dairy systems with higher milk production have lower environmental impacts? A Uruguayan case study. *New Zealand Journal of Agricultural*, 64 (3): pp. 444-462. Research. Taylor & Francis Group.  
<https://doi.org/10.1080/00288233.2020.1750433>.

Díaz-Rossello R, Durán H. 2011. Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola lecheros mixtos en Uruguay. *Revista Agrociencia Uruguay*, 15 (2):109-119.

DIEA-MGAP (Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias-Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2020. Anuario estadístico agropecuario 2020. [En línea] Consultado en setiembre 2021. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea>

DIEA-MGAP. 2011. Censo General Agropecuario 2011 [En línea]. Resultados Definitivos. Consultado en setiembre 2021. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-general-agropecuario-2011>

- DIEA-MGAP. 2003. La lechería comercial en Uruguay; contribución a su conocimiento. Montevideo, Uruguay. 68 p.
- Del Pino A. S. f. Ciclaje de nutrientes por animales en pastoreo. [En línea]. Consultado el 5/6/2015. Disponible en:  
<http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/PASTURAS%20CRS/13%20-%20Ciclaje%20de%20nutirentes%20en%20pastoreo.pdf>.
- Dogliotti S, Peluffo S, Dieste JP, García M, Rossing WAH. 2009. Re-designing of vegetable farming systems in South Uruguay: linking theory and practice. En Farming Systems Design Conference Monterey, California. pp. 95-96.
- Dogliotti S, van Ittersum MK, Rossing WAH. 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 86 (1): 29-51.
- Dogliotti S, Rossing WAH, Van Ittersum MK. 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms. *Agricultural Systems*, 80 (3): 277-302.
- Durán A, García Prechac F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo - Uruguay.
- Durán H. 2004. Cambios tecnológicos e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay. Resultados experimentales en lechería. INIA. *Actividades de difusión* n.º 361:7.
- Ernst O, Kemanian A, Mazzilli S, Siri-Prieto G, Dogliotti S. 2020. The dos and don'ts of no-till continuous cropping: Evidence from wheat yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 257 (107934). ISSN 0378-4290.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107934>
- Ernst O, Siri G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage system on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*, 105 (2): 260-268.
- Fariña SR, Chilbroste P. 2019. Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay. *Agricultural Systems*, 176, p. 102631

- Gallopín G. 2003. Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico. CEPAL. Serie medio ambiente y desarrollo 64. Proyecto NET/00/063. Publicación de las Naciones Unidas, Santiago de Chile. ISBN: 92-1-322181-9
- García Pesenti PL. 2013. Exportación de nutrientes y sólidos en cuencas lecheras del Uruguay. Tesis final de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Montevideo Uruguay. Facultad de Ciencias-Udelar. 56 p.
- García Préchac F, Perez Bidegain M, Taschdjian M. 2017. Relaciones de pérdida de suelo. En: Informe final del proyecto obtención de valores de RPS para USLE/RUSLE en sistemas de producción Lechera. Pablo Chilibróste julio 2017.
- García Préchac F. 2009a. La erosión en la agricultura de Uruguay. Simposio Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas. Serie Actividades de difusión n.º 587: pp. 29-30.
- García Préchac F, Hill M, Clerici C. 2009b. Erosión 5.91. [En línea]. Montevideo, Facultad de Agronomía. S. p. Consultado febrero 2011. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/~manejo>.
- Giesbers A. 2011. Efficiency-productivity contrasts between mixed farming systems in Uruguay - exploring improvements, Organic Farming Systems Group, Wageningen UR, Droevendaalsteeg 1-6708 PB Wageningen-The Netherlands. pp. 50.
- Gill RA, Kelly RH, Parton WJ, Day KA, Jackson RB, Morgan JA, Scurlock JMO, Tieszen LL, Castle JV, Ojima DS, Zhang XS. 2002. Using simple environmental variables to estimate belowground productivity in grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 11 (1): 79-86.
- Giuffré L. 2005. El fósforo como elemento crítico. En: Tecnologías en análisis de suelo. Marbán L, Ratto S. (eds.). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 2005. ISBN 987-21419-1-6
- Gourley CJP, Dougherty WJ, Weaver DM, Aarons SR, Awty IM, Gibson DM, Hannah MC, Smith AP, Peverill KI. 2012. Farm-scale nitrogen, phosphorus, potassium and sulfur balances and use efficiencies on Australian dairy farms.

- Animal Production Science, 52 (10): 929-944. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1071/AN11337>.
- Groot JCJ, Oomen G, Rossing WAH. 2010. Model Based on Farm Design of Mixed Farming Systems. En: Congreso de co-innovación de sistemas sostenibles de sustento rural. 28-30 abril 2010. Lavalleja-Uruguay. PP. 155-158.
- Groot JCJ, Oomen G. 2011. Farm DESIGN Manual, En: G. Oomen (Ed.). pp. 40.
- INALE (Instituto Nacional de la Leche). 2019. Uruguay lechero [En línea]. Consultado en octubre 2020. Disponible en <https://www.inale.org/uruguay-lechero/>
- INALE (Instituto Nacional de la Leche). 2014. Encuesta lechera [En línea]. Consultado en setiembre 2021. Disponible en:  
<https://www.inale.org/estadisticas/>
- Jarvis SC, Ledgard S. 2002. Ammonia emissions from intensive dairying: a comparison of contrasting systems in the United Kingdom and New Zealand. Agriculture, Ecosystems and Environment, 92 (1): pp. 83-92
- La Manna A, Durán H, Mieres J. 2008. Una primera aproximación al proceso de intensificación y su impacto al ambiente en tambos a través del balance de nutrientes. En: Jornada de actualización técnica en lechería; para una lechería eficiente, INIA, 2008, Florida, Uruguay. (Eds.). Impreso en Colonia, Uruguay INIA 2008. (INIA Serie actividades de difusión 549). PP. 91-97. [En línea]. Disponible en  
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/538/1/112761120908112907.pdf>
- Larrosa A, Lutz G. 2003. Intensificación y eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en sistemas agrícolas lecheros del litoral oeste uruguayo. Tesis Ing. Agr., Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía-Universidad de la República. 146 p.
- Leborgne R. 2000. Antecedentes técnicos y metodología para presupuestación en establecimientos lecheros. Montevideo, Uruguay: Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur. 1983 Series: Informe de campo. Proyecto URU/78/004

- Ledgard SF, Penno JW, Sprosen MS. 1997. Nitrogen balances and losses on intensive dairy farms. En: Proceedings of the New Zealand Grassland Association 59: pp. 49-53.
- Lizarralde C, Picasso V, Rotz CA, Cadenazzi M, Astigarraga L. 2014. Practices to reduce milk carbón footprint on grazing dairy farms in southern Uruguay: case studies. Sustainable Agriculture Research, 3 (2). DOI: [10.22004/ag.econ.230518](https://doi.org/10.22004/ag.econ.230518)
- Llanos E. 2020. Estrategias de intensificación en sistemas de producción de leche y sus impactos ambientales. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, opción Ciencias Animales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía-Universidad de la República. 109 p.
- Masera O, Astier M, López-Ridaura S. 2000. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales; el marco de evaluación MESMIS. En: D. F. México, Mundi-Prensa. 109 p. (Ed.).
- Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos (MAP-DS). 1979. Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo III. Apéndice Parte I. Montevideo-Uruguay.
- Morón A. 2014. Balance de nutrientes, fertilización de pasturas e impacto ambiental en la calidad de agua de la producción lechera. [En línea]. Último acceso el 5/6/2015. Disponible en: <http://www.eleche.com.uy/files/fertilizacion-y-balance-de-nutrientes?es>.
- Morón A, Molfino J, Ibañez W, Sawchik J, Califra A, Lazabal E, La Manna A, Malcuori E. 2011. La calidad de los suelos bajo producción lechera en los principales departamentos de la cuenca: carbono y nitrógeno. Sustentabilidad ambiental de los sistemas lecheros en un contexto económico de cambios. INIA La Estanzuela. Serie Actividades de difusión n.º 663: pp. 41-46.
- Morón A, Molfino J, Sawchik J, Califra A, Lazabal E, La Manna A, Malcuori E, Ibañez W. 2008. Calidad de suelo en las principales áreas de producción lechera en el Uruguay: avances en el departamento de Florida. Jornada de actualización técnica en lechería. Florida. Para una lechería eficiente. Montevideo, INIA. Actividades de difusión n.º 549: pp. 99-104.

- Perdomo CH, Barreto P, Piñeiro V. 2015. Pérdidas de fósforo desde suelos agrícolas hacia aguas superficiales: resultados preliminares para Uruguay y posibles medidas de manejo para mitigar riesgos. En: IV Simposio nacional de agricultura, Udelar-Facultad de Agronomía, pp. 77-94. Paysandú-Uruguay. Ribeiro A, Barbazán M (eds.). ISSN: 2393-6436.
- Peyraud JL, Delaby L. 2006. Capítulo 6: «Grassland management with emphasis on nitrogen flows». En: Elgersma A, Dijkstra J, Tamminga S. (eds.). Fresh Herbage for Dairy Cattle. Países Bajos: Springer: pp. 103-123.
- Rossing WAH, Zander P, Josien E, Groot JCJ, Meyer BC, Knierim A. 2007. Integrative modeling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: a review for France, Germany and The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120 (1): pp. 41-57  
doi:10.1016/j.agee.2006.05.031.
- Rotz CA, Taube F, Russelle MP, Oenema J, Sanderson MA, Wachendorf M. 2005. Whole-Farm Perspectives of Nutrient Flows in Grassland Agriculture. *Crop Science*, 45 (6): 2139-2159. doi:10.2135/cropsci2004.0523
- Ten Berge H F M, van Ittersum M K, Rossing W A H, van de Ven GWJ, Schans J. 2000. Farming options for The Netherlands explored by multi-objective modelling. *European Journal of Agronomy*, 13 (2-3): pp. 263-277. doi: 10.1016/s1161-0301(00)00078-2.
- Terra J A, García Préchac F. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: síntesis 1995-2000. Unidad de Agronegocios y difusión del INIA. Serie Técnica n.º 125. INIA. Montevideo-Uruguay.
- Uruguay XXI. 2010. Promoción de inversiones y exportaciones. Sector Lácteo. Oportunidades de inversión en Uruguay. P. 26.
- Zunckel M, Saizarb C, Zarauz J. 2003. Rainwater composition in northeast Uruguay. *Atmospheric Environment*, 37 (12): p. 1601-1611.

## 8. ANEXOS

8.1. ESTIMACIONES Y ASUNCIONES REALIZADAS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN PROVENIENTE DE LA BASE DE DATOS DEL PREDIO BRINDADA POR CONAPROLE (BD CONAPROLE) PARA OBTENER LOS DATOS ECONÓMICOS Y PRODUCTIVOS EN EL FORMATO REQUERIDO POR EL PROGRAMA

### 8.1.1. Información económica

- Moneda empleada: dólares americanos
- Tasa de interés anual: 2,5 %
- **Costo arrendamiento tierra:** en caso de ser propietario es cero. En caso de ser arrendatario o tener animales a pastoreo se estima el costo por hectárea a partir de la información presente en la hoja «egresos» de la planilla Excel del productor.
- **Costos generales:** corresponde a los gastos que no sean mano de obra, que no hayan sido asignados a ninguna actividad en particular y que no hayan sido incluidos como costos de la tierra, equipos o infraestructura. Esta información se encuentra en la hoja «costos». Se incluyen en este ítem los gastos de
  - Administración
  - Impuestos fijos
  - Asistencia agronómica
  - Camioneta y otros vehículos
  - Electricidad vivienda
  - Varios
  - Fondo de inversión

Dado que el dato de gastos de los vehículos brindados en la planilla del productor ya incluye los costos de depreciación, el costo de depreciación para vehículos ingresado al PFD será cero a los efectos de no contabilizarlos dos veces.

- **Otros costos animales:** se estima a partir de información presente en la hoja «costos» y en la hoja «egresos». Incluye los siguientes ítems:
  - Costo cosecha de leche: electricidad ordeño, gasoil estercolera y acceso, higiene y limpieza.
  - Distribución y almacenamiento de forraje: combustible.
  - Producción animal: campo de recría y pastoreo, impuesto a las ventas de animales, mejoramiento genético.
  - Costo estructura leche y carne: impuesto a la venta de leche.
  - Sanidad vaca masa y recría: el 100 % de los específicos veterinarios.
  - Asistencia veterinaria VM y recría (100 de la asistencia veterinaria).
- **Costo mano de obra zafral:** se estima dividiendo los costos de MO zafral entre las horas totales zafrales contratadas. Esta información se encuentra en las hojas «egresos» y «datos», respectivamente.
- **Costo mano de obra permanente:** se asume 1 equivalente hombre (EH) como una persona trabajando 8 horas diarias, 300 días al año. El costo de la mano de obra permanente se estima como la suma de los costos por mano de obra de ordeñadores, guachero y chacras + ficto de administración y dividiendo luego todo entre el total de horas trabajadas (familiar + asalariada). La información se obtiene de las hojas «egresos» y «datos».
- **Costo mano de obra productor:** se asume igual al ficto de administración.
- **Horas de trabajo fijas para mantenimiento del predio:** se asume igual a las horas de administración (hoja datos).
- **Horas de trabajo fijas asignadas a los animales:** se asume que es cero, siendo toda la mano de obra demandada por los animales variable.
- **Horas de trabajo propio:** se asume igual a la mano de obra familiar.

#### 8.1.2. Información sobre cultivos

- Para el ingreso de las áreas de cultivos y pasturas al PFD se procuró representar lo más cercanamente posible al sistema estabilizado, y así evitar incluir en el análisis variaciones de las áreas puntuales de algunos años debidas a factores

climáticos o de otra índole, pero procurando acercarse lo más posible a los usos reales del suelo en ese año. De esta manera es posible trabajar con los ciclos completos de los cultivos, aunque parte de este corresponda al siguiente ejercicio.

- Cuando se siembran 2 cultivos al año en el mismo potrero, estos son ingresados al programa como un único módulo mixto a los efectos de no duplicar el área (ejemplo: módulo avena/sorgo). Este módulo tendrá luego 2 productos (siguiendo con el ejemplo, uno sería el pastoreo de la avena y el otro el pastoreo del sorgo). Así, la información solicitada por el programa para ese módulo (fijación de N – materia orgánica efectiva – costos del cultivo – costos de contratación de maquinaria y mano de obra empleada) deberá incluir la información de los 2 cultivos y se deberán sumar ambos valores.
- En algunos casos en donde el área de cultivos de verano es mayor al área de verdeos de invierno, se ingresa parte del área de cultivo de verano como un módulo simple, en lugar del módulo mezcla.
- En cuanto a las áreas destinadas para reserva, se emplean los datos reales que aparecen en la planilla del productor (BD Conaprole), hoja datos.
- Todas las áreas de las praderas de diferentes años son sumadas e ingresadas al programa como un único cultivo (pradera promedio). Los datos de rendimiento y fijación biológica de nitrógeno de este cultivo se estiman como un promedio ponderado.
- Cuando se hace silo o heno de pradera se agrega un módulo al que llamaremos pradera/silo, el cual va a tener dos productos: el pastoreo y la reserva. El dato del rendimiento de la reserva es tomado de la planilla del productor (hoja datos), mientras que el dato del rendimiento de la pastura de la cual se hizo la reserva se estima como

Rmto. = Rmto. PPM - material a ensilar o enfardar

- **Fijación biológica de N:** la estimación de los kg de N fijados por hectárea al año se calcularon como:

$\text{Kg N fijados/ha.año} = \text{kg MS pastura} * \text{proporción de leguminosa en la pastura}$   
\* (kg N fijados/kg MS leguminosa)

Se asume para el trébol blanco una fijación de 30 kg N/tt y para alfalfa una fijación de 20 kg N/tt MS.

- **Materia orgánica efectiva** (*Effective Organic Matter*)

Se ingresa en el PFD como EOM solo la EOM radicular (EOMR), ya que la materia seca que dejan los rastrojos y las pérdidas durante los procesos de henificación y ensilaje se ingresan dentro de la variable «*To soil*» y, por tanto, no se tiene en cuenta la EOM aérea.

La estimación de la EOMR se realizó de la siguiente manera:

1. Se estima la **PRODUCCIÓN MS** de cada uno de los componentes de la rotación a partir de los datos de consumo de forraje de los animales y reservas forrajeras producidas en el año de la siguiente manera:

- Consumo de materia seca por hectárea (CMS) (kgMS/ha) =  $\text{EVL} * 15 \text{ kgMS} * 365 \text{ días}$  (cálculo de la BD Conaprole)
- Consumo de materia seca de forraje/ha (CMSF) (kgMS/ha) =  $\text{CMS} - \text{consumo reservas} - \text{consumo concentrado}$
- Forraje producido/ha (PMSF) =  $\text{CMSF} / \% \text{ utilización}$  (asumiendo una utilización de 60 %) + forraje reservado en el ejercicio + rastrojo dejado en campo
- Forraje producido total en el predio (PMSF total) =  $\text{PMSF} * \text{sup utilizable predio}$
- Empleando las tablas de Leborgne (2000) se calcula la producción teórica de MS/ha de la rotación y luego se halla el aporte de cada cultivo a esta producción (kg MS cultivo / kg MS rotación según Leborgne 2000) para obtener un coeficiente del cultivo en la MS de la rotación.
- Finalmente se estima la producción/ha de cada módulo de la rotación multiplicando el forraje producido total en el predio por el coeficiente del cultivo en la rotación y dividido el número de ha sembradas.

- Los rastrojos de pasturas y las pérdidas durante el proceso de henificación son ingresados como «*To soil*» o «*Green manure en crop product destination*».
- En el caso de pasturas solo para pastoreo se calcula la MS «*to animals*» como la MS producida - MS rastrojo.
- En el caso de pasturas que además se ensilan o enfardan, se calcula la MS «*to animals*» como: MS producida - MS enfardada - MS rastrojo
- En el caso de reservas (silo y fardo) en «*to animals*» se ingresa el dato real de consumo que aparece en la BD Conaprole, que puede incluir tanto reservas producidas este año como en años anteriores.

2. Se estima la MS radicular (MSR) de cada módulo a partir de la MS producida y los coeficientes parte aérea/raíz (PA/R). Los coeficientes PA/R empleados en la estimación se muestran en el Cuadro 39.

$$MSr = MS \text{ producida} / (\text{coef. PA/R})$$

**Cuadro 39: coeficientes parte aérea / raíz empleados para la estimación de la materia seca radicular.**

Cultivo	Coef. PA/R
Trigo y cebada grano	7.4
Maiz y sorgo grano	5.6
Pradera mezcla	1
Avena y sorgo pastoreo	2
Moha	2

Fuentes: Dogliotti com. pers. (2012) y Bolinder et al. (2007)

3. Se estimó la EOMR de cada módulo multiplicando la MSR por la proporción de raíces en los primeros 20 cm de suelo (se asume 0,6 en anuales y 0,7 en perennes), el coeficiente de muerte (*turnover*) y el coeficiente de humificación tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$EOMR = MSR * \text{prop. raíces 20 cm} * \textit{turnover} * \text{coef. humificación}$

Donde *turnover* es la tasa de muerte de raíces en pasturas perennes estimada como

$\textit{Turnover} = 0,2884e(0,046 * MAT)$ .

Salvo el último año en que es 1., y donde MAT es la temperatura media anual.

En caso de haber 2 cultivos en el año se suman las EOM de ambos.

Aun cuando el ciclo de uno interfiera en el ciclo del otro (por ejemplo, acortando su ciclo), las EOM se suman tal cual son, ya que, al acortarse el ciclo del cultivo, lo que se ve acortado es su producción de MS y al hacerse el cálculo de EOM con base en esta ya queda corregida.

- **Costos de cultivos**

Se calcula como la suma de los costos de semilla, fertilizante, urea y herbicida que aparecen en el archivo «costos cultivo» brindado por técnico de Conaprole (Anexo 8.2).

A esto se agrega los costos de combustible que aparecen en la hoja «costos» de la BD Conaprole bajo el título «laboreo». Se asume que este combustible incluye tanto el usado tanto para el laboreo como para la siembra. Se estima el costo por hectárea dividiendo el monto total entre las hectáreas sembradas ese año y se usa el mismo valor para todos los cultivos.

En caso siembra directa se estima el costo de herbicida de igual manera que se hizo con el combustible. Se halló un costo de glifosato/ha sembrada de la base de datos del productor y luego se empleó el mismo valor para todos los cultivos. Es decir que tanto los costos del glifosato como del combustible provienen de la BD Conaprole del productor.

Los costos de implantación de praderas son divididos entre 4, de manera de asignar a cada año su cuota parte del costo de implantación.

No se incluyeron en estos gastos los costos de reparación y mantenimiento, ya que el programa los estima automáticamente.

- **Contratación de maquinaria**

La información se obtiene de la BD Conaprole del productor (hoja «costos») dividiendo el costo total de la maquinaria contratada entre las hectáreas sembradas. De esta manera se estima un costo fijo por hectárea y se emplea luego el mismo valor para todos los cultivos.

- **Mano de obra requerida**

Esta se estimó de la siguiente manera:

1. Se estimaron las horas de trabajo regular por hectárea como: horas chacra (EH \*300\*8) de la hoja datos) / superficie sembrada

2. Se calcularon las horas destinadas a la realización de fardos (hoja «costos») como los US\$ totales destinados a mano de obra enfardada (hoja costos) dividido el costo por hora. Con esto se obtienen las horas destinadas a enfardada. Luego, las horas totales de trabajo dedicadas a enfardada son divididas entre el área total enfardada.

3. A las horas totales de chacra se restaron las horas de enfardada y el valor resultante se dividió entre el área total sembrada ese año. Con esto se obtuvieron las horas requeridas por ha sembrada.

4. En caso de haber trabajo zafral se asume que todo fue dedicado a las chacras. Este se suma al trabajo regular chacras y se divide entre toda el área sembrada de manera de obtener un valor total por hectárea. Luego para saber cuánto es zafral se proratea por la proporción de trabajo zafral en el total de horas chacra.

- **El costo de la enfardada** (solo enfardada sin incluir los costos del cultivo) se calculó como la suma de los insumos y el combustible usados para hacer los fardos (hoja costos / enfardada) y dividido el total de hectáreas enfardada (23 US\$/ha). De este modo se obtiene un costo de enfardada por ha que será el mismo tanto para los fardos de moha como de pradera. La contratación de maquinaria para la enfardada es el valor de contratación maquinaria que aparece en la base de datos - hoja costos - enfardada contratación maquinaria.
- **External.** Se ingresa aquí todo el alimento comprado fuera. Dado que la planilla no discrimina para el caso de los forrajes conservados, las cantidades producidas

de las compradas, se asumió que todos los concentrados son comprados fuera del establecimiento y que todo el forraje conservado es producido dentro de aquel.

En caso de no ser este suficiente, el programa lo comprará (*no self supply*).

La información de los kg de concentrado consumidos fueron obtenidos de la hoja «producción» de la BD Conaprole y los montos de dinero invertidos en esto se obtuvieron de la hora «egresos». Del cociente entre ambos valores (monto y kg concentrado) surge el precio/kg. Al ser montos generales, no discriminados por tipo de suplemento, solo se puede hallar un único precio/kg de concentrado, sin discriminar por tipo.

Para el caso del concentrado de terneros se utiliza la información nutricional que aparece en el *CVB (2008) table booklet* para maíz gluten CP < 200.

Para el porcentaje de pérdidas se asume un 5 %.

### 8.1.3. Información productos de origen vegetal (*crop products*)

- Los valores nutricionales de los diferentes productos son tomados del libro *CVB (2008) table booklet*. En caso de no encontrarse la información de alguno de los alimentos o pasturas empleados en la publicación se utilizaba la composición de algún otro alimento similar

Siguiendo este criterio se buscaron en *CVB (2008) table booklet* las especies que más se asemejaban (que mejor representaran) en composición química a la avena, el sorgo y la pastura natural. Las especies y valores empleados se presentan en el Cuadro 40.

**Cuadro 40: composición nutricional de productos de origen vegetal**

<b>Cultivo</b>	<b>Especie a usar</b>	<b>VEM</b>	<b>DVE</b>
Festuca	<i>Grass average</i>	1062	96
Avena	<i>Grass average</i>	1062	96
Sorgo	<i>Green cereals</i>	852	58
PN	<i>Green cereals</i>	852	58
Alfalfa	<i>Red clover</i>	827	95

T. blanco	<i>Red clover</i>	827	95
Heno alfalfa	<i>Red clover hay</i>	649	71
Heno de moha	<i>Grass hay average quality.</i>	790	58

VEM y DVE expresados en unidades de nutriente/kg MS.

- Los valores nutricionales (VN) de las praderas mezcla se calculan prorrateando los VN de sus componentes por el peso de estos en la materia seca de la mezcla. Por ejemplo,  $PP1 = \% \text{ achicoria} * VN \text{ achicoria} + \% \text{ alfalfa} * VN + \% \text{ festuca} * VN \text{ grass average}$ .
- Se asumió que la composición de las praderas mezcla en cada año es la siguiente (Cuadro 41):

**Cuadro 41: aporte de cada módulo a la materia seca de la pradera de larga duración.**

Aporte de cada modulo a la materia seca de la pradera de larga duración.

Módulo	PP1	PP2	PP3	PP4
Festuca	35 %	60 %	80 %	80 %
Trébol blanco	50 %	30 %	15 %	15 %
Achicoria	15 %	10 %	5 %	5 %

- La digestibilidad de la material seca (DMS) de los forrajes verdes se toma de Leborgne (2000); la DMS, de los henos del Farm Design (valores que aparecen por defecto). En el caso del silo de sorgo planta entera se tomaron valores de bibliografía nacional (EEMAC-maíz blanco Cangüé). Para el campo natural se utiliza un valor de 600 gm/kg.
- Se asumen las siguientes pérdidas en utilización de alimentos:
  - Pasturas sembradas: 40 %
  - Pastura natural: 50 %
  - Henos: 30 %
  - Silos: 20 % o 5 % si son dados en mixer o planchada de alimentación.

- Solo se estima el precio del alimento («*Fresh Price*») para heno pastura a partir de información presente en la base de datos del productor (en la hoja «costos»). Los demás no llevan «*Fresh Price*», ya que son «*self supply*».
- «*To Soil*» o «*Green Manure*». Se ingresaron aquí los kilos de materia seca dejados como rastrojo, así como también los kilos de materia seca que se pierden durante los procesos de henificación y ensilaje (estimados como un 25 % de la MS a ensilar).
- **Rendimientos de cultivos:** estos se estiman a partir del dato de consumo de forraje. El procedimiento del cálculo fue descrito antes en el punto materia orgánica efectiva.

Para los fardos y silo, el rendimiento se estima a partir de datos reales en la hoja «Datos/fardos» o «silo producido».

- MS suministrada a animales («*To Animals*»).

En el caso de las pasturas para pastoreo se asume que todo lo producido es suministrado a los animales y por esto se estima como:

$$To\ Animals = Rmto.\ (MS/ha) * ha - kg\ MS\ rastrojo.$$

En el caso de fardo y silo, el dato de cantidad suministrada («*To Animals*») se obtuvo de la hoja «existencias» y se calcula con base en los fardos y ensilaje efectivamente consumidos ese año. Se marca en el PFD como variable «*no self supply*» de manera de que si el consumo es mayor al producido en el año, la diferencia faltante se compra fuera.

El cálculo de la MS consumida («*To Animals*») en pasturas de las que además se hace reserva se estimó como:

$$Rmto./ha\ (kg\ MS/ha) * ha - kg\ MS\ to\ soil - kg\ MS\ enfardados$$

#### 8.1.4. Información de animales

- Se ingresan como *Dairy Cows* todas las vacas secas y en ordeño del establecimiento. Se utiliza el dato de n.º de animales promedio anual que está en la hoja «animales» de la BD Conaprole.

- Se consideran vaquillonas de reemplazo a las vacas próximas y las inseminadas. Se usa el dato de n.º animales promedio anual.
- Las vaquillonas de 1 a 2 años son consideradas como una categoría aparte. Se usa el dato de n.º animales promedio + vaquillonas vendidas.
- Terneros y terneras se ingresan por separado. Se utiliza el dato de n.º de animales promedio anual más ventas.
- Novillos 1 a 2 años. Se utiliza el dato de n.º animales promedio, sumando además las ventas.
- Los pesos de estas categorías se calculan haciendo el promedio ponderado de los pesos de las categorías que la integran.
- El número de vaquillonas y terneras puede ser calculado automáticamente por el programa a partir de la tasa de reemplazo y el número de VM si se ingresa en el PFD a estas categorías como de reemplazo de las VM. Esta función no es utilizada al simular la situación actual, ya que el PFD automáticamente disminuye el número de animales de recría en la granja (dejando solo los necesarios para reemplazo) y baja la producción de carne. Por esto, para la simulación de la situación actual se ingresó el número real de animales de reemplazo. Por otro lado, en la etapa de optimización, las terneras y vaquillonas sí fueron ingresadas en el PFD como categorías de reemplazo de las VM para que su número varíe conforme lo hacen las vacas masa, siendo el número de animales (VM, terneras y vaquillonas) variables de decisión.
- **% reemplazo:** se estimó como  $\text{las vaq. Reemplazo} / \text{VM}$ .
- **Asignación de las categorías de reemplazo:** al correr el PFD se observó que, al asignar a cada categoría animal su categoría y % de reemplazo, las únicas categorías que durante la optimización mantenían su relación original eran la de vacas masa y las vaquillonas de reemplazo, mientras que las demás categorías (terneras y vaq. 1 a 2) tendían a sufrir una reducción en su número. Por esto se decidió cambiar la forma de asignación de reemplazos y se ingresaron todas las categorías de recría (vaquillonas reemplazo, vaq. 1 a 2 y terneras) como reemplazos de las VM, pero al hacer esto, y por cómo está

diseñado el programa, todas las categorías quedan afectadas por la misma tasa (0,21)

- Se considera como «*time in yard*» el tiempo que los animales están en los piquetes o patios de alimentación. El tiempo en la sala de ordeño es tomada como «*time in stable*».
- Se estima la mano de obra por vaca (MO/vaca) a partir de la información existente en la hoja datos. Mano obra ordeñadores/n.º vacas. Para la recría se reparte la «MO terneros» entre los terneros y las vaquillonas y se le asigna el 20 % de la MO terneros a la recría y el 80 % a los terneros.
- La producción de leche es estimada como producción de leche/n.º VM / 365 (información en hoja producción).
- Los porcentajes de grasa y proteína se estimaron como los kg grasa o proteína totales / kg leche producidos \* 100
- Los requerimientos de los animales en energía, proteína y estructura para producción y mantenimiento son estimados automáticamente por el programa, basados en el sistema holandés de alimentación.

#### 8.1.5. Productos de origen animal

- Se estima el consumo interno de leche como un 5 % de la producción anual. Dentro de este, un 7 % es para consumo humano correspondiendo el resto a consumo animal (BD Conaprole/ hoja producción).
- La composición química de los productos leche y carne (material seca, nitrógeno, fósforo, potasio, ceniza, energía y proteína de la leche) es la que propone el PFD por defecto (Cuadro 42).

**Cuadro 42: composición química de los productos leche y carne.**

<b>Parámetro</b>	<b>Leche</b>	<b>Carne</b>
<b>DMContent</b> (%)	12,9	25
<b>NContent</b> (% de la materia seca)	4	10,9
<b>PContent</b> (% de la materia seca)	0,8	3
<b>KContent</b> (% de la materia seca)	1,2	0,8
<b>AshContent</b> (% de la materia seca)	33	33

El contenido de N se expresa como g de N por cada 100 g de MS leche. Si se asume un % PC de 3,2, entonces el % N =  $3,2 / 6,25 = 0,512$  % N. Dado que la leche tiene un contenido de 12 % MS, al expresar los 0,512 % N cada 100 g MS queda  $0,512 / 12 * 100 = 4,3$  g N cada 100 g MS leche.

- El precio fresco de la leche es el precio promedio que se encuentra en la hoja datos.
- El dato de consumo de carne varía según el predio. Información en hoja «animales».

#### 8.1.6. Información sobre estiércol

- Las cantidades de estiércol producidas en cada lugar del predio (pastura, patios alimentación, sala de ordeño) son calculadas automáticamente por el programa como proporcionales al tiempo de permanencia de los animales en cada sitio.
- Se consideró a los patios de alimentación y piquetes como *yard* y la sala de ordeño como *stable*.
- Aunque no exista en el predio *yard manure*, uno de los estiércoles debe llevar exactamente este nombre ya que, en caso contrario, y por la forma en que opera el programa, el balance de nutrientes será incorrecto (las pérdidas de alimento no regresan al suelo, sino que simplemente se pierden fuera del sistema y conducen a errores).
- Se producen diferentes tipos de abonos:
  - *Pasture manure*: el producido en la pastura
  - *Farm yard manure*: sólido; incluye orina, heces y paja (material usado como cama). Aunque no lo tengamos en el predio, debe aparecer 1 sola vez en el programa y con exactamente la misma forma de deletreo, espacios, mayúsculas y minúsculas.
  - *Slurry*. Líquido; incluye orina y heces.

- En cada sitio puede producirse más de un tipo de abono. La proporción en la que se produce cada tipo se ingresa como «*Proportion at site*».
- El abono de la sala de ordeño se asume es 67 % *yard manure* y 33 % *slurry*.
- Los parámetros de degradación del abono empleados son los sugeridos por el programa.
- Se incluye en este punto también a los fertilizantes químicos, para que sean incluidos en el balance de nutrientes.
- No se completa la información de referente al precio, ya que el costo de los fertilizantes fue incluido dentro del de los cultivos. De esta manera es posible diferenciar los costos de fertilizantes por cultivo.
- La base de datos del productor no contiene información respecto al tipo y la cantidad de fertilizantes empleado, por lo que se toman del archivo «Costos cultivos». Así, las cantidades totales de fertilizante son calculadas a partir de las cantidades usadas por cultivo (kg/ha cultivo \* ha cultivo ingresadas en Farm Design). Se asume que los fertilizantes usados son urea y fosfato diamónico (0,7 US\$/kg) por ser los más frecuentemente usados por los productores.
- ***Application Loss Fertiliser***. Asumimos que se refiere a las pérdidas por volatilización, empleándose el valor de 10 %.
- No se tiene en cuenta refertilización.

#### 8.1.7. Información referente a maquinaria

- Se utiliza la información presente en la hoja «maquinaria» de la BD Conaprole.
- *Price* es el valor a nuevo (VN) de la maquinaria y que el programa utiliza para estimar los costos de depreciación y mantenimiento (por esto no podemos poner el valor actual, ya que los costos de depreciación y mantenimiento serían menores).

- Depreciación %/año se calcula como depreciación / VN.
- *OperationalCosts* %/año se estima como reparación / VN.

#### 8.1.8. Información referente a infraestructura

- Información tomada de la hoja «activos fijos».
- Cuando el objeto tiene más años que su vida útil, su depreciación es cero.
- *Price* = valor a nuevo calculado como edad en años \* depreciación + valor a inicio ejercicio.
- Depreciación % =  $\text{depreciación} / \text{price} * 100$
- Operacional costos =  $\text{mantenimiento} / \text{price} * 100$

## 8.2. COSTOS DE CULTIVOS

Presupuesto otoño 2009		Cultivos forrajeros y praderas															
		avena		raigrás		raigrás Caro		trigo industria		pradera corta		alfalfa		pradera larga		pradera larga gramíneas	
	Precio	kg	Total	kg	Total	kg	Total	kg	Total	kg	Total	kg	Total	kg	Total	kg	Total
Semilla avena	0,45	100	45														
Semilla raigrás	1,5			20	30					15	23						
Sem raigrás Caro Horizon	4					20	80									12	48
Sem trigo forrajero	0,4							120	48								
Sem festuca	4													16	64	12	48
Semilla trébol rojo	6									8	48						
Semilla trébol blanco	6									2	12			3	18	3	18
Semilla achicoria	7													5	35	5	35
Semilla alfalfa	8											18	144				
Semilla lotus	6																
Fertilizante	0,7	80	56	80	56	60	42	80	56	100	70	150	105	100	70	100	70
Urea	0,5	160	80	160	80	100	50	160	80	100	50					80	40
Glifosato	5	8	40	8	40	8	40	8	40	8	40	8	40	8	40	8	40
Herbicidas	15		15		15	1	15	1	15		15		20		15		15
Contratación	8	1	8	1	8		0	1	8	1	8	1	8	1	8	1	8
Combustible	1,5	20	30	30	45	30	45	1	30	30	45	30	45	30	45	30	45
			<b>274</b>		<b>274</b>		<b>272</b>		<b>277</b>		<b>311</b>		<b>362</b>		<b>295</b>		<b>319</b>

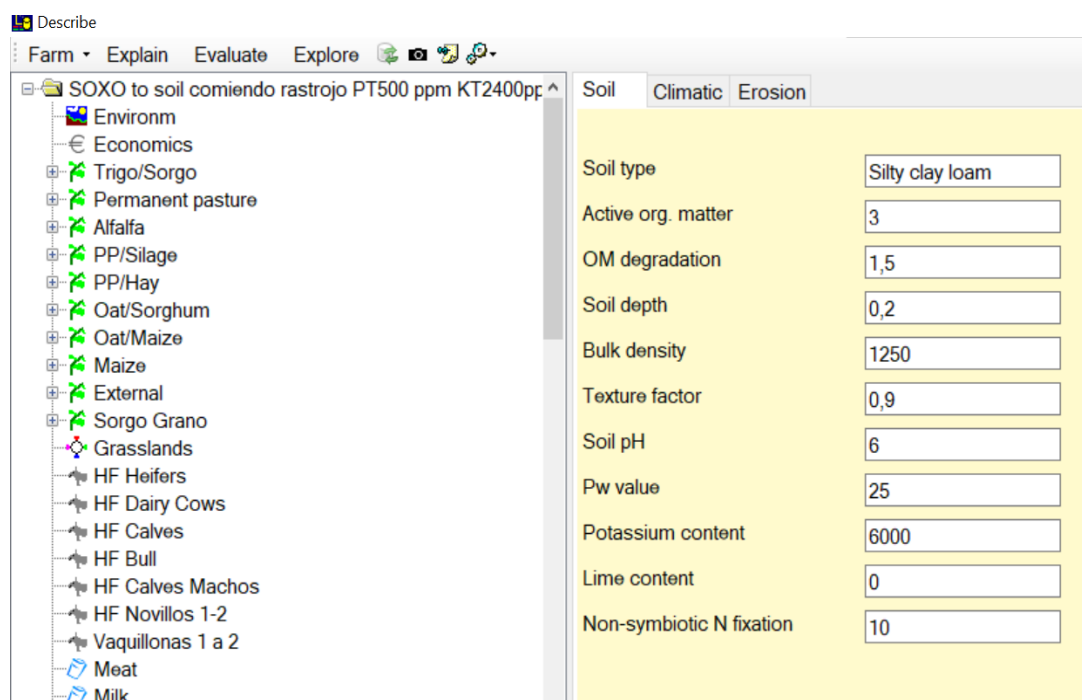
### 8.3. INFORMACIÓN AMBIENTAL INGRESADA AL PROGRAMA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

#### 8.3.1. Información sobre suelo

Con los números de los padrones se realizó la consulta CONEAT en línea y se utilizó como suelo representativo del predio un brunosol eutrítico típico LAc, el suelo dominante del grupo CONEAT más frecuente.

Los parámetros físicos y químicos del suelo ingresados al PFD (Figura 27) fueron sugeridos por profesionales investigadores especializados en el tema (F. Alliaume, A. Del Pino, y O. Ernst com. pers. 2011, JP Zamalvide, com. pers. 2015) o de bibliografía nacional (MAP-DS. 1979).

**Figura 27: parámetros físicos y químicos del suelo ingresados al PFD**



Parameter	Value
Soil type	Silty clay loam
Active org. matter	3
OM degradation	1,5
Soil depth	0,2
Bulk density	1250
Texture factor	0,9
Soil pH	6
Pw value	25
Potassium content	6000
Lime content	0
Non-symbiotic N fixation	10

**Soil Type (tipo de suelo):** franco arcillo limoso.

**ActiveOM (contenido de materia orgánica activa, en %):** por no contar con información nacional para este parámetro se decide utilizar en su lugar la materia orgánica total del suelo, ajustándose en consecuencia la tasa de degradación. El valor ingresado fue 3 %.

**OMDegradationRate (fracción de la materia orgánica degradada, % anual):** se emplean tasas de degradación de 1,5 % anual en siembra directa.

**Soil depth (profundidad del perfil del suelo para la descomposición de la materia orgánica):** 0,20 m.

**Bulk density (densidad aparente del suelo, en kg/m<sup>3</sup>) = 1250**

**TextureFactor (factor textura)** = debido a que la textura del suelo afecta la tasa de mineralización de la materia orgánica, el programa sugiere ingresar aquí un valor de 1,2 para suelos arenosos, 1 para suelos francos y 0,8 para suelos arcillosos. Se ingresó valor de 0,9.

**SoilpH (pH del suelo) = 6**

**Pw (contenido de fósforo extractable en agua) (kg/ha):** se emplearon valores de 25 kg/ha, aunque se sabe que en ciertos lugares en donde ocurre concentración de heces y orina estos valores pueden ser mucho mayores con importantes implicancias ambientales.

**KValue (contenido de potasio) (kg/ha):** se asume un contenido de K total de 2400 ppm (0,24 %) (Morón, 2014) y se lleva a kg/ha mediante la siguiente ecuación:

$$K \text{ (kg/ha)} = K \text{ (ppm)} / 1.000.000 * 2.500.000 \text{ (kg/ha)}$$

Dado que el programa no especifica la forma de K que se debe ingresar (K total, fijado, intercambiable o solución), se decidió ingresar el valor de K total, ya que el objetivo es el balance del nutriente en el sistema y no de su disponibilidad para las plantas.

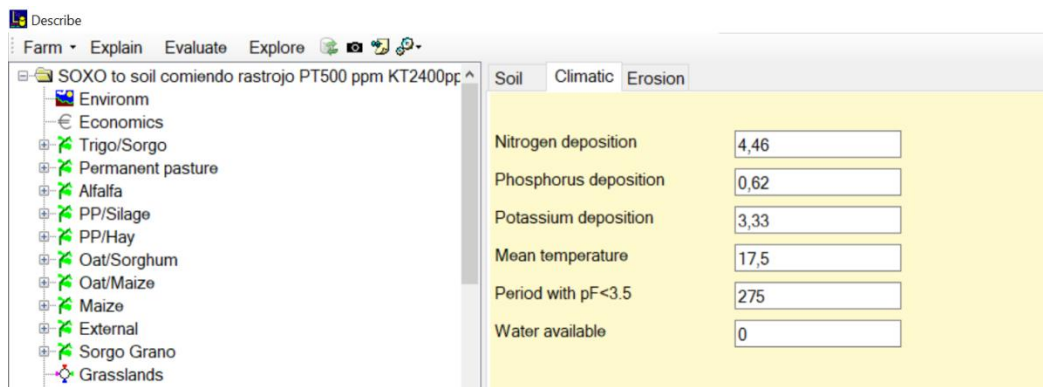
El valor de K total puede presentar grandes variaciones según el material parental y es poco afectado por medidas de manejo como la fertilización, a diferencia del dato de K intercambiable, el cual es más afectado por medidas de manejo.

**Lime (contenido de carbonatos):** se asume cero.

**NonSymbFixation (fijación no simbiótica de N):** se utiliza el valor de 10.

### 8.3.2. Información sobre clima

**Figura 28: deposiciones atmosféricas y temperatura promedio ingresada al PFD.**



- ***NDeposition/PDeposition/KDeposition* (deposiciones atmosféricas de nitrógeno, fósforo y potasio, kg/ha/año).**

Con base en información presente en el artículo Zunckel et al. (2003), se estimó la cantidad de nutrientes ingresados por deposiciones atmosféricas. Los cálculos empleados para realizar la estimaciones se presentan en el Cuadro 43.

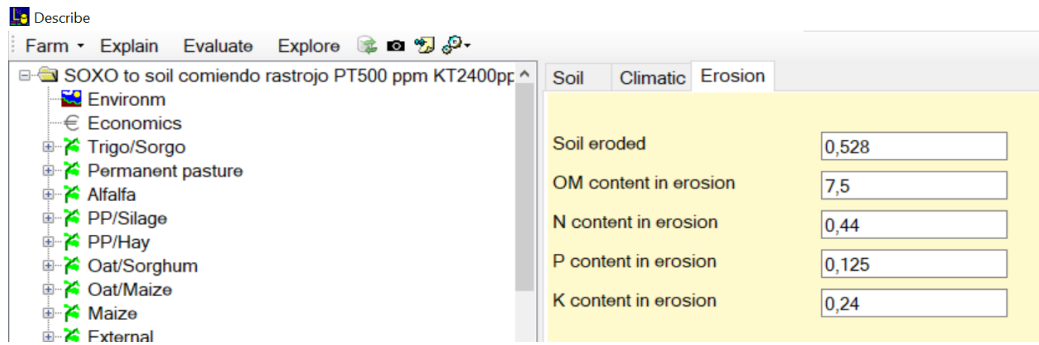
**Cuadro 43: estimación de los nutrientes ingresados por concepto de deposiciones atmosféricas.**

	$\mu\text{Eq/L}$	$\text{Eq/L}$	Peso molecular	Peso elemento	i	$\text{gm/L}$	$\text{Kg/L}$	Pptción L/ha	$\text{kg/ha Molecula}$	$\text{Kg/ha elemento}$	kg/ha Elemento
NH <sub>4</sub>	16,1	0,0000161	18	14	1	0,0002898	2,898E-07	12000000	3,5	2,70	N 4,45
NO <sub>3</sub>	10,4	0,0000104	62	14	1	0,0006448	6,448E-07	12000000	7,7	1,75	P 0,62
PO <sub>4</sub>	5	0,0000050	95	31	3	0,00015833	1,583E-07	12000000	1,9	0,62	K 3,32
K	7,1	0,0000071	39	39	1	0,0002769	2,769E-07	12000000	3,3	3,32	

- ***Mean Temperature* (temperatura promedio, °C).** Se toma la temperatura media de la base de datos del INIA de 1980-2009 ([www.inia.org.uy](http://www.inia.org.uy)) para el departamento de Colonia.
- ***MoistPeriodPf35* (período con humedad de Pf 3,5).** Se utiliza 275 días, calculado como 365 días al año - 90 días de verano.

### 8.3.3. Información sobre erosión

Figura 29: información sobre suelo ingresad al PFD.



**ErosionAmount (cantidad de suelo perdido por erosión en mm/año):** la pérdida de suelo por erosión se halló usando el programa Erosión 5.91. Los detalles de los datos generales y de cada uno de los componentes de la rotación ingresados al programa erosión 5.91, así como del resultado obtenido, pueden verse en el Anexo 8.4, Cuadros 44 y 45.

**Erosion OMContent (contenido de materia orgánica en el suelo erodado, en %):** se asume un contenido de materia orgánica del suelo de 3 %. Debido a que el productor aplica siembra directa, se corrige este valor por un factor de 2,5 debido al enriquecimiento de la capa superficial del suelo (O. Ernst com. pers., 2012), por lo que se ingresa un valor de 7,5 % de materia orgánica en el suelo erodado.

**Erosion NContent (contenido de nitrógeno en el suelo erodado, en %):** asumiendo un contenido de materia orgánica del suelo de 3 % y un contenido de C en la MOS de 0,58, el contenido de carbono orgánico del suelo se halla como

$$\text{COS (\%)} = 3 \% * 0,58 = 1,74 \% \text{ COS}$$

Asumiendo una relación C/N de 10, entonces se obtiene que el contenido de N orgánico del suelo es igual a

$$\text{N (\%)} = 1,74 * 1/10 = 0,174 \% \text{ N.}$$

Debido al enriquecimiento de la capa superficial del suelo por la siembra directa, este valor fue corregido por 2,5 para su ingreso en PFD, por lo que se ingresó el valor de 0,44 % de N en el suelo erodado.

**Erosion PContent (contenido de fósforo en el suelo erodado, en %):** se asumen valores de fósforo total de 0,05 % (500 ppm). Debido al enriquecimiento de

la capa superficial del suelo por la siembra directa, este valor fue corregido por 2,5 para su ingreso en PFD, por lo que se ingresó el valor de 0,125 % de P en el suelo erodado.

**Erosion KContent (contenido de potasio en el suelo erodado, en %):** se asume un contenido de K total de 2400 ppm = 0,24 %. En el caso de K no se corrige por este factor de enriquecimiento, se deja el mismo valor que en el suelo original, ya que debido a la escasa historia de fertilización en el ámbito nacional con este nutriente no sería esperable que se hallara concentrado en los primeros centímetros de suelo (JP Zamalvide com. pers. Setiembre 2018).

#### 8.4. INFORMACIÓN INGRESADA Y SALIDAS DEL PROGRAMA EROSIÓN

5.91

**Cuadro 44: datos generales y erosión estimada del sistema actual.**

Caso	EROSIÓN_% P/A 75/25
Duración de la rotación	6 años
Localidad	Colonia
Unidad / suelo	Isla Mala; brunosol eutrico típico Fr.
Tolerancia	7 Mg/ha/año de pérdida de suelo
Longitud de la pendiente	300 m
Gradiente de la pendiente	2,5
Relación de erosión	No encauzada
Practica mecánica de apoyo	No aplica
Porc. cubierto por pastura	0
Forma de cálculo factor C	por componentes
FACTORES	
Factor C (uso y manejo)	0,122
<b>Erosión anual estimada</b>	<b>6,6 Mg/ha</b>

**Cuadro 45: componentes de la rotación en el sistema actual.**

Caso	EROSION_ % P/A 75/25					
<b>COMPONENTES</b>						
<b>Componente 1</b>						
Cultivo	pastura no consociada					
Manejo del suelo	laboreo reducido de rastrojo eliminado mecánicamente o por pastoreo					
Rendimiento	TODOS	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto luego de la siembra	----	1	4	4	0,790	0,063
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	96	2	5	5	0,620	0,031
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	80	3	6	3	0,250	0,218
		4	0	0	0,070	0,000
<b>Componente 2</b>						
Cultivo	pastura establecida o consociada					
Manejo del suelo	NO APLICA					
Rendimiento	ALTO - 6.75 a 11.25 Mg/ha/año de MS					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----					
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	----	3	4	3	0,009	0,009
<b>Componente 3</b>						
Cultivo	pastura establecida o consociada					
Manejo del suelo	NO APLICA					
Rendimiento	ALTO - 6.75 a 11.25 Mg/ha/año de MS					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----					
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	----	3	4	3	0,009	0,009
<b>Componente 4</b>						
Cultivo	pastura establecida o consociada					
Manejo del suelo	NO APLICA					
Rendimiento	MEDIO - 4.5 a 6.75 Mg/ha/año de MS					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----					
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	----	3	4	3	0,030	0,030
<b>Componente 5</b>						
Cultivo	pastura establecida o consociada					
Manejo del suelo	NO APLICA					
Rendimiento	BAJO - 2.25 a 4.5 Mg/ha/año de MS					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----					
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	----	3	4	9	0,050	0,015
<b>Componente 6</b>						
Cultivo	sorgo o maíz					
Manejo del suelo	siembra directa					
Rendimiento	BAJO - 2.600 k/ha MS de residuos en superficie en el momento del laboreo					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	90	1	10	11	0,210	0,026
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	40	2	12	12	0,200	0,007
		3	1	2	0,160	0,020
		4	3	3	0,300	0,036
<b>Componente 7</b>						
Cultivo	cereales de invierno					
Manejo del suelo	laboreo reducido de rastrojo eliminado mecánicamente o por pastoreo					
Rendimiento	TODOS	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto luego de la siembra	----	1	4	4	0,790	0,057
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	90	2	5	5	0,620	0,028
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	70	3	6	8	0,270	0,029
		4	9	9	0,120	0,006
<b>Componente 8</b>						
Cultivo	sorgo o maíz					
Manejo del suelo	siembra directa					
Rendimiento	BAJO - 2.600 k/ha MS de residuos en superficie en el momento del laboreo					
% de suelo cubierto luego de la siembra	----	PC	MI	MF	RPS	C
% de suelo cubierto por parte aérea en el período 3	90	1	10	10	0,210	0,027
% de suelo cubierto por residuos en el período 4	40	2	11	11	0,200	0,024
		3	12	2	0,160	0,046
		4	3	3	0,300	0,051

## 8.5. SALIDAS DEL PROGRAMA FARM DESIGN

Figura 30: resultados del sistema actual y los sistemas alternativos seleccionados en escenario 1

Description	Value	278	563	388	275	4	466	105
Farm Area (unit)	445,00	434,78	444,33	444,61	442,83	444,54	444,28	444,37
AnimalMargin FeedCosts (unit)	222703,97	76866,40	215219,15	340539,10	80071,63	96117,26	260815,67	284110,02
GrazingPeriod.Deviation EDM (unit)	-16,56	-9,00	-1,65	-12,85	-6,16	0,81	-6,66	-7,50
GrazingPeriod.Deviation TDN (unit)	0,42	-2,66	-3,28	-4,04	-4,98	-4,48	-3,99	-3,74
GrazingPeriod.Deviation CP (unit)	21,53	18,92	0,21	0,03	11,46	3,34	0,08	0,09
GrazingPeriod.Deviation STR (unit)	81,67	110,26	116,01	80,61	116,62	131,37	101,52	98,09
NutrientFlow Balance N (unit)	82,32	49,11	44,05	52,94	46,33	39,14	47,60	48,46
NutrientFlow Balance P (unit)	29,08	16,76	15,86	17,34	15,83	14,90	16,58	16,57
NutrientFlow Balance K (unit)	10,70	-4,86	-6,32	-3,58	-5,68	-6,98	-5,55	-5,57
EconomicResults OperatingProfit (unit)	300744,83	312265,27	713560,83	826735,17	396622,73	513155,30	767700,67	799204,45
Organic matter balance Balance (unit)	-369,63	-418,44	-374,69	-344,50	-422,18	-416,70	-362,22	-353,33

Figura 31: valores de las variables de decisión en el sistema actual y en los sistemas alternativos seleccionados en escenario 1

Description	Value	278	563	388	275	4	466	105
Af. Trigo ... ToAnimals	444083,00	1977,38	5224,80	13877,83	1724,95	2563,55	11979,02	636,97
Grano Maiz ... ToAnimals	168415,00	1558,95	594460,44	981350,98	4510,95	3080,50	818644,94	945328,89
C.Proteico ... ToAnimals	6319,00	1471,14	1696,63	1217,30	2645,28	4775,14	3892,65	2085,13
SGH ... ToAnimals	158519,00	2813,23	6990,43	201678,51	3356,62	8008,25	2472,09	8703,24
PPM ... Area	188,00	191,96	192,48	197,51	194,04	192,10	195,30	194,00
Alfalfa ... Area	29,00	22,08	25,16	24,23	25,48	22,17	25,24	25,99
PP/Silage ... Area	87,00	60,99	63,59	68,47	61,95	61,42	64,56	64,87
PP/Hay ... Area	22,00	18,29	0,65	3,78	16,84	3,75	2,29	1,61
Av/Sg ... Area	39,00	39,40	36,70	20,94	40,09	41,64	33,78	36,16
Av/EM ... Area	37,00	58,63	63,47	65,85	58,77	59,18	61,77	60,90
EM ... Area	43,00	41,58	60,68	61,34	44,19	63,45	60,59	60,13
Sorgo grano ... Area	0,00	0,43	0,46	0,56	0,41	0,05	0,42	0,40
Tg/Sg grano ... Area	0,00	1,42	1,13	1,92	1,06	0,78	0,34	0,31
Vaq_reem ... Number	83,00	68,00	72,00	93,00	67,00	65,00	79,00	81,00
Animal ... MilkProduction	18,32	18,28	31,65	29,40	21,13	25,53	31,58	32,20
Terneas ... Number	83,00	68,00	72,00	93,00	67,00	65,00	79,00	81,00
VM ... Number	393,00	325,00	345,00	445,00	320,00	311,00	375,00	384,00
Vaq_1 - 2 ... Number	83,00	68,00	72,00	93,00	67,00	65,00	79,00	81,00

Figura 32: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos en el escenario 2.

Description	Value	280	417	549	137	567	328	462
Farm Area (unit)	445,00	427,90	440,62	441,58	442,46	442,09	443,63	443,17
AnimalMargin FeedCosts (unit)	222703,97	86756,04	93081,02	106036,73	219729,72	245213,72	287507,33	393099,98
GrazingPeriod.Deviation EDM (unit)	-16,56	-8,94	-0,92	0,53	-9,76	-10,43	-14,10	-18,97
GrazingPeriod.Deviation TDN (unit)	0,42	-3,75	-3,09	-4,65	-4,78	-3,50	-3,87	-3,64
GrazingPeriod.Deviation CP (unit)	21,53	15,17	9,30	2,22	0,10	0,56	0,48	0,05
GrazingPeriod.Deviation STR (unit)	81,67	113,68	131,92	134,99	102,01	98,61	88,42	71,64
NutrientFlow Balance N (unit)	82,32	47,72	42,60	38,14	42,42	42,60	43,40	62,20
NutrientFlow Balance P (unit)	29,08	17,24	15,75	15,15	16,71	15,99	17,35	26,20
NutrientFlow Balance K (unit)	10,70	-4,72	-5,96	-6,69	-5,10	-5,97	-4,24	5,72
EconomicResults OperatingProfit (unit)	300744,83	308091,58	404849,81	503498,71	646867,80	671534,58	713820,36	777485,10
Organic matter balance Balance (unit)	-369,63	-411,37	-413,94	-378,81	-349,21	-357,88	-318,19	-268,73



Figura 36: resultados del sistema actual y sistemas alternativos seleccionados en escenario 4.

Description	Value	279	223	470	13	179	187	9	472
Farm Area (unit)	445,00	424,95	428,16	428,42	443,36	423,52	439,82	423,58	424,57
GrazingPeriod Deviation EDM (unit)	-16,56	-10,03	-9,94	0,01	-0,38	-3,52	-6,10	-0,42	-6,96
GrazingPeriod Deviation TDN (unit)	0,42	-2,63	-4,57	3,16	-2,92	-0,75	-2,88	11,48	0,47
GrazingPeriod Deviation CP (unit)	21,53	15,57	11,09	12,29	0,48	1,86	0,07	16,87	2,93
GrazingPeriod Deviation STR (unit)	81,67	112,11	111,88	131,25	129,58	117,89	111,30	121,24	105,33
NutrientFlow Balance N (unit)	82,32	38,58	35,59	46,94	28,85	60,04	51,97	83,47	74,81
NutrientFlow Balance P (unit)	29,08	16,65	16,02	22,86	15,03	32,32	27,41	42,46	39,78
NutrientFlow Balance K (unit)	10,70	-5,61	-6,26	1,30	-6,84	11,32	6,69	23,15	19,92
EconomicResults OperatingProfit (unit)	300744,83	324770,75	373485,99	419269,39	596356,06	538394,34	607951,62	374674,71	537774,59
Organic matter balance Balance (unit)	-369,63	-313,78	-309,62	-229,42	-280,51	-171,69	-204,82	-121,71	-135,05
AnimalMargin FeedCosts (unit)	222703,97	82449,18	84075,57	144684,80	140770,24	222575,93	221945,58	283355,31	281644,63

Figura 37: valores de las variables de decisión en el sistema actual y sistemas alternativos en escenario 4.

Description	Value	279	223	470	13	179	187	9	472
Af_Trgo ... ToAnimals	444083,00	2126,83	3009,05	269152,03	32074,56	654953,86	520207,77	986931,31	940230,78
Grano Maiz ... ToAnimals	189415,00	6894,10	5263,83	25031,85	100149,33	4404,17	113556,14	4381,89	19702,87
C_Proteico ... ToAnimals	6319,00	637,33	325,72	1306,19	1215,28	7449,30	581,69	1993,96	1799,96
SGH ... ToAnimals	158519,00	3896,15	7915,16	23628,83	58564,75	19436,88	21909,40	16563,40	39756,16
PPM ... Area	188,00	128,23	129,64	124,76	118,16	107,93	120,68	107,76	117,41
Alfalfa ... Area	29,00	0,81	0,55	0,53	0,64	1,60	0,80	1,60	0,84
PP/Silage ... Area	87,00	88,06	87,12	85,19	85,84	85,11	87,67	84,86	85,52
PP/Hay ... Area	22,00	24,85	23,30	20,70	21,85	23,33	21,82	23,69	18,06
Aw/Sg ... Area	39,00	71,40	71,41	73,62	72,77	74,60	71,99	74,56	70,84
Aw/EM ... Area	37,00	88,01	91,15	115,32	104,65	111,90	107,93	111,90	110,65
EM ... Area	43,00	22,34	21,50	6,21	38,59	17,82	27,46	18,04	17,83
Sorgo grano ... Area	0,00	0,83	0,08	0,71	0,26	0,38	0,23	0,38	1,49
Tg/Sg grano ... Area	0,00	0,41	3,41	1,38	0,60	0,84	1,24	0,78	1,93
Vaq_reem ... Number	83,00	77,00	78,00	75,00	80,00	83,00	88,00	82,00	89,00
Animal ... MilkProduction	18,32	17,48	18,55	22,44	24,87	24,86	24,77	22,47	24,31
Teneras ... Number	83,00	77,00	78,00	75,00	80,00	83,00	88,00	82,00	89,00
VM ... Number	393,00	366,00	370,00	355,00	381,00	393,00	419,00	392,00	423,00
Vaq_1 - 2 ... Number	83,00	77,00	78,00	75,00	80,00	83,00	88,00	82,00	89,00

## 8.6 ARTÍCULO: REDISEÑO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE LECHE DE BASE PASTORIL CON BASE EN INDICADORES ECONÓMICOS, PRODUCTIVOS Y AMBIENTALES

### **Rediseño de un sistema de producción de leche de base pastoril con base en indicadores económicos, productivos y ambientales**

Silbermann, AV\*<sup>1</sup>; Dogliotti, S\*<sup>2</sup>; Chilibroste, P\*<sup>3</sup>.

\*<sup>1</sup> Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad de la República-Facultad de Agronomía

\*<sup>2</sup> MsC. PhD. Profesor titular - Sistemas de Producción, Universidad de la República-Facultad de Agronomía

\*<sup>3</sup> MsC. PhD. Profesor titular - Bovinos de Leche, Universidad de la República-Facultad de Agronomía

### RESUMEN

Los sistemas lecheros deben cumplir con objetivos económico-productivos y ambientales para ser sustentables. Por esto la cantidad y complejidad de la información a manejar, a la hora de evaluar y rediseñar el sistema, hace que el uso de herramientas de simulación constituya una estrategia promisoría. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación del programa computacional Farm Design (PFD) como herramienta para el análisis y rediseño de un sistema de producción de leche pastoril procurando un mejor resultado económico y, a la vez, mantener o mejorar los resultados de los indicadores ambientales. El PFD es un modelo estático cuantitativo de simulación. Opera a escala predial y evalúa los resultados del sistema con base en balances anuales. Además de la evaluación del sistema, el PFD permite la exploración de sistemas alternativos con varios objetivos de optimización en simultáneo debido al criterio empleado (óptimo Pareto). Los objetivos optimizados fueron el margen neto y el balance de materia orgánica del suelo (máximos) y el costo de alimentación (mínimo). El PFD permitió la integración de los diferentes componentes económico-productivos y ambientales del sistema y la comprensión de

sus interacciones. Aportó alternativas productivas con mejores resultados económicos que el sistema actual (918 vs. 676 US\$ ha<sup>-1</sup> en el sistema actual), con similares costos de producción y manteniendo los indicadores ambientales (balance de materia orgánica del suelo kg ha<sup>-1</sup> -379 en sistema J vs. -370 en sistema actual). El modelo permitió visualizar un menú de estrategias productivas adaptables a las necesidades o preferencias del productor.

**Palabras clave:** simulación, Farm Design, optimización múltiple-objetivo, intensificación, sustentabilidad

### **Redesign of a dairy system using a simulation program and based on economic and environmental indicators**

#### ABSTRACT

Sustainable dairy farming systems should achieve economic and environmental objectives. Evaluation and design of such systems involves many components and their interaction, therefore the usefulness of integrated simulation models, that allows multidimensional predictions. The objective of this work was to evaluate and redesign a real grazing dairy farm applying the Farm Design tool, looking forward to improve its economic and environmental performance. The Farm Design tool is a quantitative static farm balance model, with an annual basis. For the exploration of alternative farms, the tool used the multi-objective Pareto-based differential evolution (DE; Storn and Price 1997 cited by Groot et al. 2010) algorithm. This tool supports whole farm evaluation and re-design with multi-objective optimization. The optimized objectives were to maximize operating profit, minimize feed costs and maximize soil organic matter balance. PFD provided an integrative approach of economic-productive and environmental indicators and their interactions. Alternative farms improve operating profit (918 US\$/ha alternative farm J vs. 676 US/ha current farm) while maintaining feed costs and environmental indicators (soil organic matter balance -379 kg/ha in alternative farm J vs. -370 in current farm), showing different production strategies.

**Keywords:** simulation, Farm Design, multi-objective optimization, intensification, sustainability.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido del sector lechero en Uruguay (5 % anual en las últimas décadas) (Instituto Nacional de la Leche [INALE], 2014) se ha basado en aumentos de la productividad (litros/ha). Esta intensificación, caracterizada por el aumento de carga animal y del uso de insumos externos, conlleva una creciente presión sobre los recursos naturales y mayor potencial de contaminación (La Manna et al., 2008; Durán, 2004), lo que pone en riesgo la sostenibilidad del sistema en el tiempo. Por esto, a la hora de evaluar y rediseñar un sistema de producción sustentable, es importante considerar tanto aspectos productivos como económicos y ambientales.

En las últimas décadas se han desarrollado en el país estudios que buscan determinar y evaluar el impacto de la lechería y su proceso de intensificación sobre los recursos naturales y su sustentabilidad (Darré et al., 2021; Llanos, 2020; Lizarralde et al., 2014; Morón et al., 2011; Cardozo y Uribe, 2010; La Manna et al., 2008; Larrosa y Lutz, 2003). Estos estudios han empleado diferentes metodologías, concentrándose la mayoría de ellos en la descripción y evaluación del sistema, más que en su rediseño, en busca de una diferente combinación de recursos que permitan incrementar o mantener la productividad con un mejor balance ambiental.

Los agroecosistemas pueden ser vistos como sistemas complejos, integrados por varios componentes que se relacionan entre sí. En consecuencia, cualquier cambio que ocurra en uno de ellos va a actuar sobre los otros. Si a esto se agregan, además, objetivos y restricciones que el sistema debe cumplir, la cantidad y complejidad de la información a manejar es tal que se necesita de modelos computacionales que faciliten su análisis (Groot et al., 2010).

Este tipo de herramientas de modelación han sido empleados en Uruguay en sistemas de producción vegetal intensiva. Con estos modelos es posible analizar, diseñar y evaluar cualitativa y cuantitativamente diferentes alternativas de manejo. Por esto han demostrado ser de gran ayuda para la planificación y diseño de sistemas

productivos complejos al lograr conciliar objetivos económicos-productivos con los ecológicos o ambientales (Dogliotti et al., 2005).

Groot et al. (2010), empleando un modelo cuantitativo de simulación llamado Farm Design, diseñó y evaluó sistemas de producción mixtos. Los resultados del estudio demuestran que, con los mismos recursos de la granja estudiada, varias alternativas de manejo logran el mismo nivel de ingreso económico que la situación inicial, pero con muy diferentes efectos sobre el ambiente.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación del programa Farm Design como herramienta para el análisis y rediseño de un sistema pastoril de producción de leche en términos bioeconómicos y ambientales. Nuestra hipótesis es que es posible el rediseño del sistema actual para lograr un mejor resultado económico y a la vez mantener o mejorar los indicadores de sustentabilidad ambiental.

## METODOLOGIA

El programa Farm Design (PFD) es un modelo cuantitativo de simulación que opera a escala predial, estático, que evalúa los resultados del sistema con base en balances anuales (Groot et al., 2010). Este programa entiende el predio como un sistema complejo y traduce la información de este ingresada al programa en indicadores objetivos de performance productiva, económica y ambiental. De esta manera permite describir, explicar y predecir el efecto que cambios en el manejo o estado de algunos de sus componentes van a tener en los otros. Con este programa es posible, además, explorar sistemas alternativos creados por la diferente combinación de recursos mediante el empleo del algoritmo de evolución diferencial desarrollado por Storn y Price (1995, citado por Groot y Oomen, 2011). Para la evaluación de las alternativas generadas se aplica el criterio de óptimo Pareto, que permite la optimización de varios objetivos en simultáneo. El óptimo Pareto es el punto de equilibrio en el cual ninguno de los objetivos es capaz de ser mejorado sin perjudicar a otro objetivo.

La información de entrada al programa comprende la descripción de los cultivos, los animales, las raciones utilizadas, el fertilizante, la mano de obra, el equipamiento y la infraestructura, así como también información económica y ambiental. La información de salida (indicadores calculados por el programa) comprende flujos de nitrógeno, fósforo y potasio, el balance de materia orgánica del suelo, el balance nutricional de los animales, la cantidad y composición del abono producido, el uso de la mano de obra y el resultado económico del predio, todo en base anual. Estos indicadores pueden ser seleccionados como objetivos de optimización (Groot et al., 2010)<sup>\*4</sup>.

El PFD fue aplicado a un sistema lechero comercial que forma parte de un proyecto de monitoreo llevado adelante por una industria láctea local, motivo por el cual se disponía de su información económica y productiva necesaria para la aplicación de este trabajo en una base de datos (Battezzato com. per. 2011).

Se trata de un predio de 493 hectáreas de superficie útil, con una dotación total (recria + vaca masa) de 1,23 EVL/ha y una relación vaca ordeño/vaca masa de 86 %. Presenta una producción de leche de 8.032 L/ha con una producción individual de 21,2 L/VO/día. En cuanto a la alimentación de las vacas masa (kg MS/ha), consiste en 6 kg de pasturas, 9 kg de reservas y 6 kg de concentrado (270 g concentrado/L leche).

Para el cálculo de la erosión, dato de entrada requerido por el PFD, se empleó el programa Erosión 5.91, que se basa en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y su versión revisada (RUSLE) (Wischmeier y Smith, 1960, Renard et al., 1997, citados por García Préchac et al., 2009).

Las variables de manejo que se permitió fueran factibles de modificación por el programa durante la búsqueda de sistemas alternativos (variables de decisión) se resumen en la Tabla 1.

En cuanto a las restricciones, estas son límites que el usuario establece para algunos indicadores que pretende que los sistemas alternativos no sobrepasen. Estas se establecieron para el área de la granja y el balance nutricional de los animales, de manera de asegurar su adecuada nutrición. Los objetivos optimizados fueron el

<sup>\*4</sup> Por mayor detalle de los cálculos y operativa del programa, ver manual del PFD (Groot y Oomen, 2011).

margen neto (MN) y el balance de materia orgánica del suelo (BMO) (máximos) y el costo de alimentación (CA) (mínimo).

*Tabla 1: variables de decisión modificables por PFD durante la exploración.*

	Variables de decisión	Valor en sistema actual	Rango		
			mínimo	máximo	
Alim. c. ofrecido animales (kgMS/año)	Afrechillo de trigo	444.083	0	1.000.000	
	Grano de maíz	168.415	0	1.000.000	
	Concentrado proteico	6.319	0	1.000.000	
	Sorgo grano húmedo	158.519	0	1.000.000	
	PPM	188	0	445	
	Alfalfa	29	0	445	
Superficie de cada módulo en la rotación (ha)	PPM/ensilaje	87	0	445	
	PPM/heno	22	0	445	
	Avena/sorgo	39	0	445	
	Avena/ensilaje				
	maíz	37	0	445	
	Ensilaje maíz	43	0	445	
	Sorgo grano	0	0	445	
	Trigo/sorgo grano	0	0	445	
	Número de animales	Vaq. reemp.	83	10	500
		Terneras	83	2	830
Vaca masa		393	50	1000	
Vaq. 1 a 2 años		83	10	600	
Prod. in. (L/VM)				25	
		18	0		

*Referencia: Alim c. = alimento comprado, PPM = pradera permanente promedio, Vaq. Reemp = vaquillonas de reemplazo, vaq. 1-2 años = vaquillonas de 1 a 2 años, Prod. in. = producción individual de leche diaria (L/VM)*

El proceso de exploración se realizó en 4 escenarios (E1, E2, E3 y E4), los que se diferenciaron en los objetivos de optimización y restricciones impuestas (Tabla 2).

*Tabla 2: características de los escenarios de optimización.*

Escenario	Objetivo optimizado	Prod. in. leche max.	Observaciones
E1	MN-CA	35	Prod. individual de leche no restringida
E2	MN-CA	25	Igual a E1, pero con prod. in. leche restringida
E3	MN-BMO	25	Sustitución objetivo optimización CA por BMA
E4	MN-CA-BMA	25	Los 3 objetivos de optimización en simultáneo

*Referencia: prod. in. leche max. = restricción impuesta para la máxima producción individual de leche, MN = margen neto, CA = costo alimentación, BMO = balance de materia orgánica del suelo.*

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Correlación entre objetivos optimizados*

Al estudiarse la correlación entre el objetivo costo de alimentación (CA) y la variable cantidad de alimento comprado se encontró, en todos los escenarios que incluyeron este parámetro como objetivo de optimización, una alta correlación ( $>0,99$ ), es decir que el aumento en los costos de alimentación entre sistemas alternativos se asoció siempre a una mayor cantidad de alimento comprado. Por esto motivo se decidió tomar a esta variable (cantidad de alimento comprado) como indicador de intensividad del sistema, ya que tiene una correlación muy alta con el costo de alimentación y está presente en todos los escenarios.

En los escenarios E1 y E2 se encontró una correlación positiva entre el MN y la cantidad de alimento comprado; en cambio, en el E3, esta fue negativa, y no encontró correlación en E4 (Figuras 1, 2 y 3).

Figura 1: relación entre margen neto (US\$/ha) y cantidad de alimento comprado (kg/ha) por año. Escenario 2.

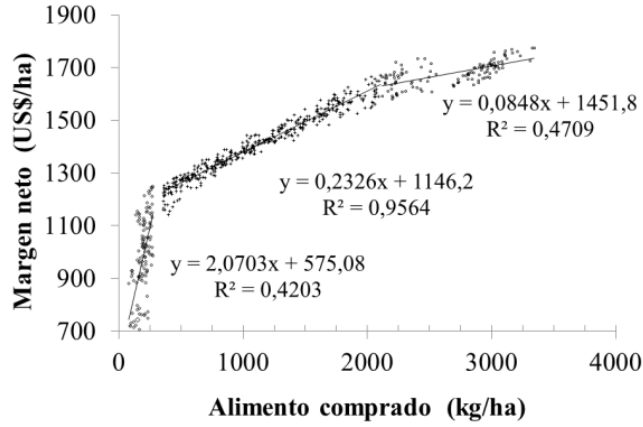


Figura 2: relación entre margen neto (US\$/ha) y cantidad de alimento comprado (kg/ha) por año. Escenario 3

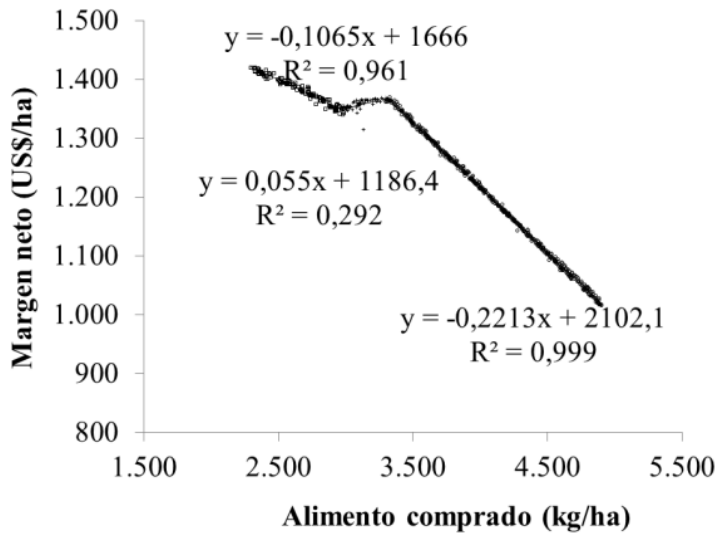
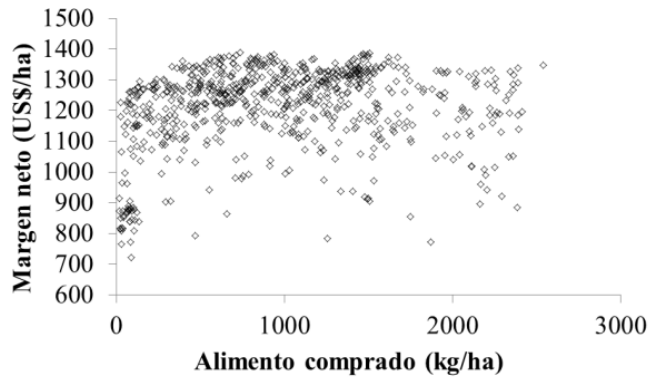


Figura 3: relación entre margen neto (US\$/ha/año) y cantidad de alimento comprado (kg/ha/año). Escenario 4.



Esta relación directa y logarítmica observada entre las variables margen neto y cantidad de alimento comprado (o costo de alimentación debido a la alta correlación entre estas variables) en los E1 y E2 (Figura 1) indica que cuanto más intensivo es el sistema, mejor es el resultado económico obtenido, pero el nivel de respuesta en el MN cambia con el nivel de suplementación. La mayor respuesta en el MN (2,07 US\$/ha por kg/ha de alimento comprado extra) se obtuvo a bajos niveles de suplementación (menores a 300 kg/ha en Figura 1). A mayores niveles de suplementación (entre 300 y 2100 kg/ha de alimento comprado, tramo donde se sitúa el sistema actual en estudio), el nivel de respuesta baja a 0,23 US\$/ha por kg de alimento extra y llega a ser muy baja (0,08 US\$/ha) por encima de los 2100 kg/ha y hasta los 3500 kg/ha de alimento comprado, que es hasta donde llega esta exploración.

En el E3, en cambio, el MN disminuye al aumentar el alimento comprado. Esto puede deberse a los diferentes niveles de suplementación que se manejan en este escenario a diferencia de los otros (niveles de entre 0 y 3000 kg/ha en los E1 y E2 vs. 2250 a 5000 kg/ha en E3) o a la sustitución del objetivo de optimización. Al incluirse el objetivo ambiental BMO y no tener en cuenta la minimización de los costos de alimentación, el E3 exploró niveles de suplementación muy superiores, lo que llevó a la inversión de la relación entre el margen neto y la cantidad de alimento comprado.

Este cambio en el tipo de relación (directa o inversa) entre el MN y la cantidad de alimento comprado en los diferentes escenarios probablemente se explique por la

forma de respuesta que muestra la producción de leche con el nivel de suplementación, con aumentos decrecientes hasta maximizarse la producción. Luego de ese punto, los aumentos en la cantidad de alimento comprado no generarían mejora en la producción, por lo que solo implicarían mayores costos de alimentación con caída del MN.

Por otro lado, la optimización de los 3 objetivos en simultáneo en el E4 llevó a la pérdida de la correlación (Figura 3) y, por tanto, la inclusión del indicador BMO dentro de los objetivos de optimización afectó la correlación entre los indicadores económicos (MN-CA). En otro orden, la optimización de los 3 objetivos en simultáneo hizo que el PFD redujera el rango de exploración a las zonas en donde se verificaron las mayores respuestas en el MN en los escenarios anteriores y, por tanto, donde el proceso de suplementación es más eficiente y donde se dan menores riesgos de contaminación.

#### *Comparación de los sistemas alternativos seleccionados*

En cada uno de los escenarios se seleccionaron entre 6 y 8 sistemas alternativos para su estudio y comparación con la situación actual. La selección de los sistemas se hizo siguiendo los siguientes criterios:

- alternativa con el menor CA o BMO (según el escenario),
- alternativa con similar costo de alimentación, pero mayor margen neto que el sistema actual (o punto de inflexión de la curva en el caso del escenario 3),
- alternativa que maximiza el MN o el BMO (según el escenario),
- 2 alternativas ubicadas en el segmento de la curva con mayor pendiente,
- 2 alternativas ubicadas en el segmento de la curva con menor pendiente.

Para facilitar el análisis conjunto de estos sistemas se los agrupó y clasificó en 4 categorías según cantidad de alimento comprado: sistemas con menos de 100g/L (nivel bajo), sistemas con entre 100 y 200g/L (nivel medio), sistemas con entre 200 y 350g/L (nivel alto) y los sistemas con más de 350g/L (nivel muy alto), apareciendo

estos últimos únicamente en el escenario 3. Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario.

Tabla 3: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación bajo y medio.

Indicadores productivos, económicos y ambientales		NIVEL BAJO ( $\leq 100$ g/L conc.)									NIVEL MEDIO ( $100 < \text{hasta } \leq 200$ g/L conc.)								
Escenario	S. actual	E1			E2			E4			E1			E2			E4		
Nombre	S.	A	D	E	A	B	C	A	B	D	B	F	D	E	F	C	E	F	
Id. sist. en PFD	<b>Id.</b>	278	275	4	280	417	549	279	223	13	563	466	137	567	328	470	179	87	
Carga (VM /ha)	<b>1,18</b>	1,00	0,96	0,93	1,01	0,91	0,99	1,15	1,16	1,15	1,04	1,13	1,27	1,33	1,45	1,11	1,24	1,27	
% perennes	<b>73</b>	67	67	63	63	64	60	57	56	51	63	65	56	53	52	54	51	53	
Alim. c. (kg/ha)	<b>1.747</b>	18	28	41	90	109	139	32	39	433	1.369	1.884	1.234	1.413	1.869	745	1.620	1.492	
Alim. c. (g/L)	<b>296</b>	4	5	6	17	19	21	6	7	56	153	194	143	157	194	110	192	173	
Prod. in. (L/VM)	<b>18</b>	18	21	26	19	23	25	17	19	25	32	32	25	25	24	22	25	25	
Prod. (L/ha)	<b>5.905</b>	4.987	5.573	6.519	5.167	5.768	6.716	5.495	5.851	7.801	8.970	9.729	8.638	9.002	9.640	6.787	8.420	8.613	
SD req. en. (VEM)	-3	-3	-5	-4	-4	-3	-5	-3	-5	-3	-3	-4	-5	-4	-4	3	-1	-3	
SD req. prot. (DVE)	19	19	11	3	15	9	2	16	11	0	0	0	0	1	0	12	2	0	
Costo alim. (US\$/L)	<b>0,08</b>	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	
CA (US\$/ha)	<b>500</b>	177	181	216	203	211	240	194	196	318	484	587	497	555	648	338	526	505	
MN (US\$/ha)	<b>676</b>	718	896	1.154	720	919	1.140	764	872	1.345	1.606	1.728	1.462	1.519	1.609	979	1.271	1.382	
BMO (kg/ha)	<b>-370</b>	-418	-422	-417	-411	-414	-379	-314	-310	-281	-375	-362	-349	-358	-318	-229	-172	-205	
Balance N (kg/ha)	<b>82</b>	49	46	39	48	43	38	39	36	29	44	48	42	43	43	47	60	52	
Balance P (kg/ha)	<b>29</b>	17	16	15	17	16	15	17	16	15	16	17	17	16	17	23	32	27	
Balance K (kg/ha)	<b>11</b>	-5	-6	-7	5	-6	-7	-6	-6	-7	-6	-6	-5	-6	-4	1	11	7	

Referencia: SD req. en. = desvío entre los requerimientos y la oferta de energía neta, SD req. prot. = desvío entre los requerimientos y oferta de proteína digestible en el intestino, VEM: unidad de medida de energía equivalente a 6,9 kJ de energía neta de lactación y DVE: gramos de proteína digestible en el intestino

Tabla 4: resultados del sistema actual y de los sistemas alternativos seleccionados en cada escenario. Sistemas con niveles de suplementación alto y muy alto.

Indicadores productivos, económicos y ambientales			NIVEL ALTO (200 < hasta ≤350 g/L conc.)								NIVEL MUY ALTO (>350 g/L)		
Escenario	S. actual		E1		E2	E3			E4		E3		
Nombre			C	G	G	A	B	C	G	H	D	E	F
Identificación en PFD	Id.		388	105	462	138	286	623	9	472	250	406	32
Carga (VM/ha)	<b>1,18</b>		1,34	1,16	1,62	1,33	1,33	1,33	1,24	1,33	1,40	1,40	1,40
% perennes	<b>73</b>		66	64	53	67	67	67	51	52	66	66	66
Alim. comp. (kg/ha)	<b>1.747</b>		2.695	2.153	3.101	2.322	2.636	2.898	2.384	2.359	3.379	4.016	4.892
Alim. comp. (g/L)	<b>296</b>		251	212	284	256	290	319	314	267	354	421	514
Prod. in. leche (L/VM)	<b>18</b>		29	32	25	25	25	25	22	24	25	25	25
Prod. (L/ha)	<b>5.905</b>		10.740	10.156	10.914	9.064	9.078	9.090	7.590	8.840	9.554	9.529	9.522
SD req. en. (VEM)	<b>0</b>		-4	-4	-4	-4	-5	-5	11	0	-4	3	14
SD req. prot. (DVE)	<b>22</b>		0	0	0	0	0	0	17	3	0	7	16
Costo alim. (US\$/L)	<b>0,08</b>		0,07	0,06	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,10	0,12
CA(US\$/ha)	<b>500</b>		<b>766</b>	<b>639</b>	<b>887</b>	<b>673</b>	<b>711</b>	<b>742</b>	<b>669</b>	<b>663</b>	<b>841</b>	<b>981</b>	<b>1.177</b>
MN (US\$/ha)	<b>676</b>		<b>1.859</b>	<b>1.799</b>	<b>1.754</b>	<b>1.419</b>	<b>1.383</b>	<b>1.354</b>	<b>885</b>	<b>1.267</b>	<b>1.362</b>	<b>1.214</b>	<b>1.018</b>
BMO (kg/ha)	<b>-370</b>		<b>-345</b>	<b>-353</b>	<b>-269</b>	<b>-321</b>	<b>-274</b>	<b>-235</b>	<b>-122</b>	<b>-135</b>	<b>-207</b>	<b>-188</b>	<b>-162</b>
Balance N (kg/ha)	<b>82</b>		53	48	62	59	74	87	83	75	94	103	116
Balance P (kg/ha)	<b>29</b>		17	17	26	20	31	0	42	40	43	45	47
Balance K (kg/ha)	<b>11</b>		-4	-6	6	3	13	22	23	20	25	28	33

Referencia: SD req. En. = desvío entre los requerimientos y la oferta de energía neta, SD req. Prot. = desvío entre los requerimientos y oferta de proteína digestible en el intestino, VEM: unidad de medida de energía equivalente a 6,9 kJ de energía neta de lactación

Todos los sistemas seleccionados presentaron un mejor margen neto que la situación actual. En los E1 y E2, las mejoras en los MN entre los sistemas alternativos se asociaron a mejoras en la productividad (L/ha), pero no ocurrió lo mismo en los E3 y E4. La inclusión del BMO como objetivo de optimización en estos escenarios llevó a que se perdiera la correlación entre margen neto y productividad (L leche/ha). En esos sistemas, la mayor compra de alimento condujo a la mejora del BMO y de la productividad, pero, por encima de cierto nivel de suplementación, la mejora en la productividad no compensaría los mayores costos de alimentación, lo que afectaría de manera negativa el MN. Por otra parte, la creciente entrada de alimento sin una mejora proporcional en la producción, conduce a mayores desbalances o excesos de nutrientes N, P y K, lo que aumenta el riesgo de contaminación (Tablas 3 y 4).

Con respecto a la estrategia productiva, puede verse que los sistemas alternativos de nivel medio, alto y muy alto de suplementación presentaron mayor carga que el sistema actual. La excepción a esto solo ocurre en el E1, donde, al no restringirse la producción individual de leche, el PFD aumenta la producción individual en lugar de aumentar la carga. Por otro lado, prácticamente todos los sistemas alternativos presentaron una mayor producción individual de leche que el sistema actual (Tabla 3 y 4).

La restricción en la producción individual de leche no implicó una limitante productiva y se lograron en ambos escenarios (E1 y E2 sin y con restricción de la producción individual, respectivamente) similares niveles de productividad/ha mediante la adaptación de la estrategia productiva (mayor o menor carga). Sin embargo, los resultados del modelo indican que, para mejorar el margen neto, el aumento de la producción individual sería más eficiente que incrementar la carga, al minimizar los costos de alimentación.

Los sistemas de bajo nivel de suplementación prácticamente eliminaron la compra de alimento, y mantuvieron similar producción de leche por hectárea que el sistema actual, con base en una menor carga, pero mayor producción individual. De esta manera reducen los costos de alimentación, lo que redundaría en un mejor margen neto pero peor balance de materia orgánica que la situación actual (Tabla 3). Esto

probablemente se debe a que el PFD es un modelo estático, basado en balances anuales, y por esto no contempla las variaciones estacionales de producción de forraje de nuestros sistemas que hacen necesaria la compra de suplemento para cubrir los requerimientos estacionales. Esto pone en duda la viabilidad real de los modelos de bajo nivel.

Los sistemas de nivel medio logran, con similares costos de alimentación (US\$/ha) y similar cantidad de alimento comprado por hectárea que la situación actual, mayores producciones por hectárea (con base en mayor carga que la actual y maximizando la producción individual), lo que mejora los márgenes netos y balances de materia orgánica. Este uso más eficiente del alimento comprado (menos gramos de alimento comprado por litro de leche que el sistema actual) podría deberse a un mejor balance de la dieta (sistemas alternativos con mejor balance en la proteína digestible en el intestino (Tabla 3) o a mayor consumo de forraje, tal como fuera reportado por Fariña y Chilbroste (2019). Estos autores concluyen que la estrategia de crecimiento con altas cargas mejoraría los porcentajes de producción y utilización de forraje, lo que lograría un efecto positivo en los resultados biofísicos y económicos de los sistemas lecheros.

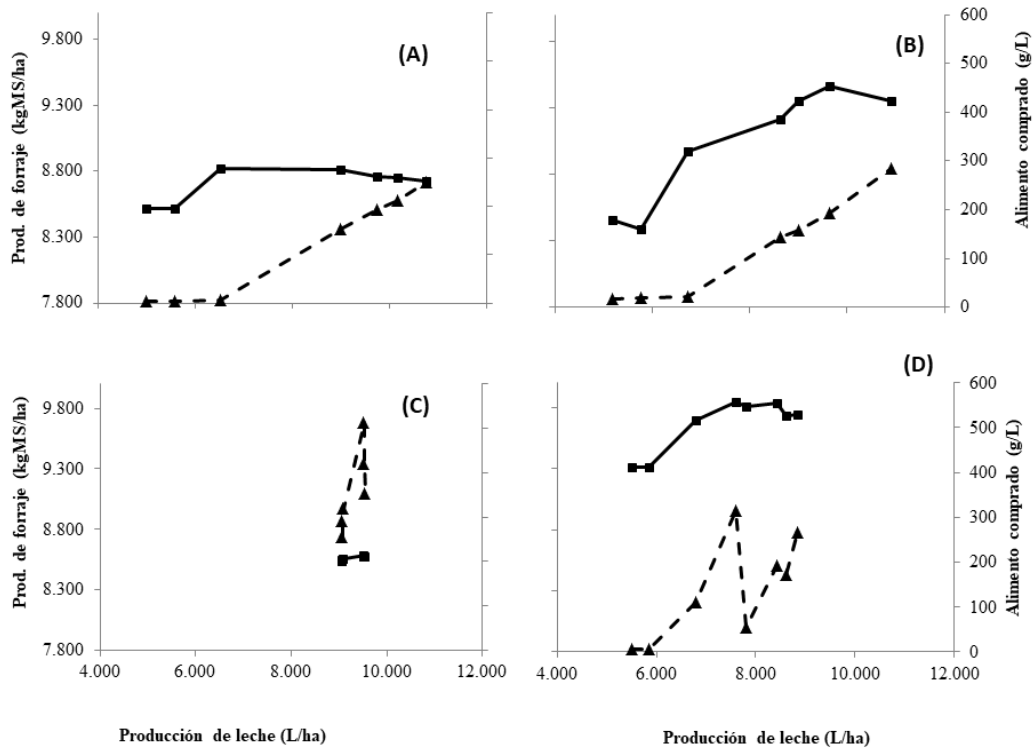
En el caso de los sistemas de nivel alto y muy alto, si bien presentan mayor uso de alimento comprado por hectárea que el sistema actual, los aumentos en la producción (debidos a la mayor carga y máxima producción individual) compensarían los mayores costos de alimentación, lo que se manifiesta en el menor costo/L, que repercute en mejores márgenes, excepto en los sistemas más intensivos. Estos sistemas, al maximizar la compra de alimento, lograron, además, mejoras en el balance de materia orgánica, pero presentaron costos por litro de leche mayores que el sistema actual.

Esta estrategia de intensificación (mayor producción de leche por hectárea a base de alta producción individual y alta carga) se encuentra en línea con lo reportado por Fariña y Chilbroste (2019). Estos autores, al analizar una base de datos de 256 sistemas lecheros comerciales, encontraron que los sistemas que presentaron un crecimiento de la productividad anual de leche mayor a 5 % se basaron en una mayor carga y aumento del consumo de forraje producido en el

predio. La mayor demanda de alimentos para sostener la mayor producción era cubierta por un aumento proporcional de los diferentes componentes de la dieta (forraje fresco, conservado y concentrado), lo que permitía mantener bajos los costos de producción por litro. Pero, a diferencia de lo reportado por estos autores, el PFD sustenta la creciente demanda de alimento con la compra del mismo, debido a que los porcentajes de utilización de las pasturas no pudieron ser introducidos como variable de ajuste del programa, lo que tiene un efecto diferente tanto en lo económico como en lo ambiental, ya que las mejoras en los márgenes se reducen debido a los altos costos de alimentación, pudiéndose, además, aumentar el riesgo de contaminación con nutrientes.

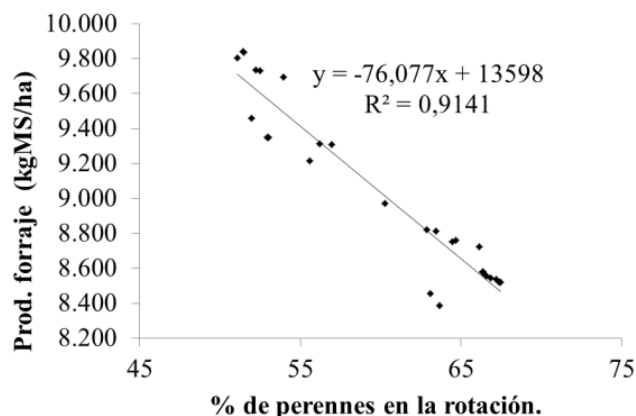
Esta situación se hizo más evidente en el escenario 3, donde no se incluyó el costo de alimentación como objetivo de optimización y sí se incluyó el BMO. En cambio, la inclusión del costo de alimentación como objetivo de optimización en los escenarios 2 y 4 llevó a que se encontraran en estos escenarios las rotaciones con mayor cantidad de forraje destinado a los animales (Figura 4).

Figura 4: producción de forraje de la rotación y nivel de suplementación según nivel de productividad de leche/ha en los diferentes escenarios simulados. --▲-- alimento comprado. —■— producción de forraje rotación.



Al estudiar la correlación entre la producción de materia seca y el porcentaje de perennes en la rotación se encontró una correlación negativa (Figura 5), disminuyendo la materia seca ofrecida al aumentar la proporción de perennes en la rotación. Esta correlación explicaría la mayor anualización de la rotación en los escenarios 2 y 4, los que, al buscar minimizar los costos de alimentación, procuran maximizar la producción de forraje, lo que el PFD consigue a través de la anualización.

Figura 5: correlación entre producción de materia seca de forraje y porcentaje de perennes en la rotación



La anualización de la rotación afecta el nivel de erosión y, por tanto, también el BMO y los flujos de nutrientes del sistema. Sin embargo, a carecer el PFD de un modelo que le permita estimar de pérdida de suelo por erosión y al ser este un dato ambiental ingresado al PFD, no es posible evaluar el impacto de cambios en esta variable durante la fase de exploración.

En cuanto al balance de nutrientes, se encontró una baja correlación entre los balances de N y P y el nivel de productividad de los sistemas alternativos (0,36 y 0,35, respectivamente); en cambio, hubo una alta correlación entre estos y la cantidad de alimento comprado (Tabla 5). Esto coincide con lo reportado por Darré et al. (2021), quienes concluyen que la estrategia de producción y prácticas de manejo aplicadas guardarían mejor relación con el potencial de contaminación que el solo nivel de productividad.

Tabla 5: coeficientes de correlación entre balance de nutrientes N y P (kg/ha) y cantidad de alimento comprado (g/L) y entre balance de nutrientes (kg/ha) y nivel de productividad leche (L/ha).

Variabes	R <sup>2</sup>
Balance N (kg/ha) – alim. comp. (g/L)	0.89
Balance N (kg/ha) – prod. (L/ha)	0.36
Balance P (kg/ha) – alim. comp. (g/L)	0.83
Balance P (kg/ha) – prod. (L/ha)	0.35

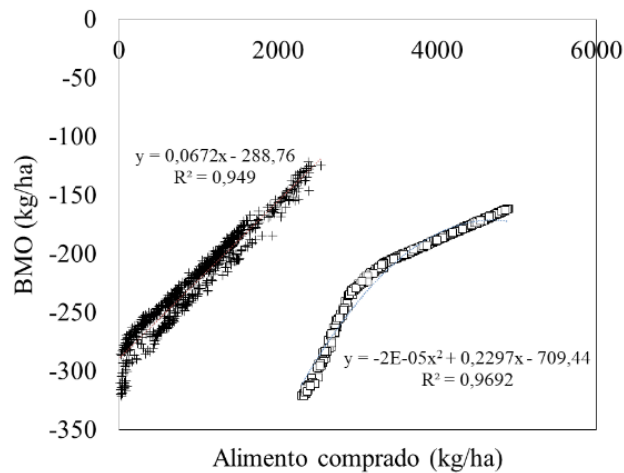
Los sistemas alternativos de niveles bajo y medio presentaron balances de nutrientes más ajustados que el sistema actual y no se encontraron mayores diferencias entre los balances de los sistemas alternativos presentes a esos niveles. Por esto se puede concluir que, en esos rangos de suplementación, los balances de nutrientes no se asociaron con el nivel de intensificación del sistema. En cambio, en los niveles alto y muy alto, los sistemas alternativos más intensivos presentaron mayores excesos que los del sistema actual (Tablas 3 y 4).

El mejor ajuste en los balances de los sistemas de niveles bajo y medio puede deberse al mayor incremento en la salida de nutrientes en forma de producto, que el aumento en la entrada de estos en forma de alimento. A niveles superiores de suplementación (>350 g/L alimento), el aumento en la salida de nutrientes en forma de producto no sería proporcional a su entrada, lo que conduce a mayores desbalances que determinan un incremento en el riesgo de contaminación.

#### *Efecto de la inclusión del balance de materia orgánica del suelo como objetivo a optimizar*

Se encontró una correlación positiva entre el BMO y la cantidad de alimento comprado en los dos escenarios que lo incluyeron como objetivo de optimización (Figura 6). Esta correlación se debe a que, de las variables que afectan el balance de materia orgánica (rastreo de cultivos, desperdicio de alimento, abono animal, degradación de materia orgánica, erosión), el alimento comprado resulta ser una de las principales variables de entrada de materia orgánica que el programa puede modificar. Al no poder eliminar las pérdidas (ya que la erosión es un dato de entrada), la forma de mejorar el balance es mediante un aumento de la entrada y 2 de las 3 vías de entrada de materia orgánica al suelo se relacionan directa e indirectamente con el alimento comprado. Una de ellas es el desperdicio del alimento y cuanto más alimento ingrese al sistema, mayor será el alimento desperdiciado que llega al suelo. La otra vía de entrada es el estiércol animal, el cual se incrementa al aumentar la carga, y para sostener esta mayor carga es necesario comprar más alimento.

Figura 6: correlación entre BMO y alimento comprado en escenarios 3 (□) y 4 (+)



Esta correlación positiva y el no contemplar los costos de alimentación como objetivo de optimización condujeron al escenario 3 a explorar sistemas alternativos mucho más intensivos en el uso de alimento que en los otros escenarios. Por esto, y debido al tipo de respuesta que presenta el MN con la cantidad de alimento comprado (positiva o negativa según el nivel de suplementación), es que se encontró en este escenario una correlación negativa entre MN y BMO (Figura 7).

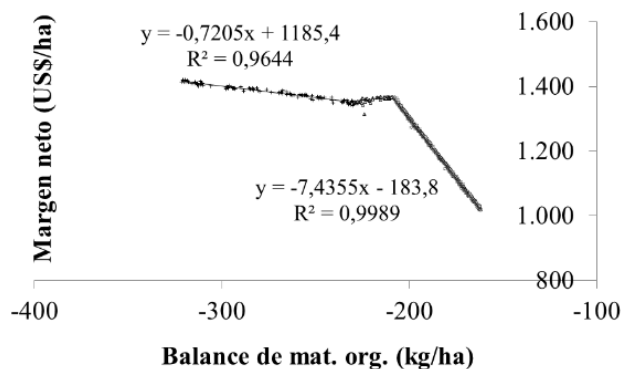
Los sistemas alternativos seleccionados en el E3 presentaron un mejor BMO (menos negativo) que el sistema actual, pero también mejor BMO que los sistemas alternativos de los otros escenarios para similares márgenes netos, lo que da cuenta del efecto del cambio en el objetivo de optimización (Tabla 4).

En cuanto a las mejoras en el margen neto, si bien todas las alternativas presentaron márgenes netos superiores al sistema actual, estos resultaron algo inferiores a los obtenidos en los escenarios anteriores (ej., 1.419 US\$/ha E3 vs. 1754 US\$/ha en E2, tabla 4). Ambos hechos estarían demostrando el efecto del cambio en el objetivo de optimización.

El gráfico de exploración del E3 (Figura 7) muestra una curva con dos segmentos de muy diferente pendiente. En el segmento de menor pendiente (hasta los -230 kg/ha de BMO aprox.), cada kilo de mejora en el BMO representa una pérdida en el margen neto de 0,7 US\$/ha. En cambio, en el segmento de mayor pendiente (por encima de los -210 kg/ha de BMO), las pérdidas ascienden a 7,4 US\$/ha por

cada kilo de mejora en el BMO. El punto de quiebre de la curva y la caída abrupta del margen neto por encima de este se explicarían por el no aumento en la producción de leche a pesar de los incrementos en la cantidad de alimento comprado, lo que lleva a que los sistemas alternativos más intensivos de este escenario presenten mayores excesos de nutrientes N, P y K que el sistema actual, lo que no ocurrió en los escenarios 1 y 2. Por tanto, la estrategia empleada por el PFD para mejorar el BMO basado en la compra de alimento llevaría, luego de cierto punto, a pérdidas importantes en el margen neto y mayor riesgo de contaminación debido a los mayores desbalances de nutrientes, lo que determina un compromiso negativo entre ambos indicadores ambientales.

*Figura 7: ventana de exploración escenario 3. Objetivos: maximizar margen neto (US\$/ha) y balance de materia orgánica del suelo (kg/ha). Producción individual de leche máxima de 25 L/VM.*



#### *Efecto de incluir un tercer objetivo de optimización*

A diferencia de lo ocurrido en los otros escenarios, no se encontró en el escenario 4 una clara correlación entre margen neto y cantidad de alimento comprado (Figura 3). La introducción de un tercer objetivo de optimización aumentó el número de sistemas alternativos que, dado un determinado nivel de alimento comprado, cumplen con el óptimo Pareto, y estos se diferencian entre ellos en el énfasis puesto en cada objetivo.

Mientras, se mantuvo la correlación entre los otros objetivos (BMO/cantidad de alimento comprado y costo alimentación/cantidad de alimento comprado, Figura 6).

La inclusión BMO como objetivo de optimización en el E4 permitió que se encontraran en este escenario sistemas alternativos con resultados similares y hasta mejores para esta variable a los hallados en el E3, pero con menores costos de alimentación y menos intensivos en el uso de alimento comprado, observándose solo en el E3 sistemas con un uso mayor a 350 g/L de alimento comprado.

Por otro lado, ninguno de los sistemas alternativos del escenario 4 presentó niveles de margen neto tan altos como los alcanzados por los sistemas alternativos en los E1 y E2, aunque siguieron siendo superiores a los del sistema actual (Tabla 6). Esto demuestra que los óptimos múltiples son diferentes (y, en general, más bajos) que los óptimos parciales o para una sola variable.

*Tabla 6: mejores resultados obtenidos por los sistemas alternativos seleccionados, para cada objetivo según escenario.*

Escenario	E1	E2	E3	E4
Objetivos optimizados	MN-CA	MN-CA	MN-BMO	MN-CA-BMO
Max. MN (US\$/ha)	1.859	1.754	1.419	1.382
Min CA (US\$/ha)	177	203	673	194
Max. BMO (kg/ha)	-345	-269	-162	-122

Por tanto, la inclusión del tercer objetivo de optimización limitó la capacidad de mejora de los objetivos individuales, pero su inclusión permitió mejoras significativas simultáneas en todos los objetivos, siendo el escenario 4 el único en que se encontró un sistema alternativo que, con similares costos de alimentación al sistema actual, presentó mejoras significativas del BMO y a la vez duplicó el margen neto (Tabla 7).

*Tabla 7: resultados de sistemas alternativos con similares costos de alimentación que el sistema actual*

Escenario	Sistema actual	E1	E2	E3	E4
Id. sistema en PFD	Sistema actual	563	137	138	187

MN (US\$/ha)	676	1.606	1.462	1.419	1.382
CA (US\$/ha)	500	484	497	673	505
BMO (kg/ha)	-370	-375	-349	-321	-205

El aumento en cantidad de alimento comprado en los sistemas alternativos más intensivos del escenario 4 condujo a balances de nutrientes menos ajustados, observándose mayores excesos en los balances de nitrógeno, fósforo y potasio que los encontrados en los sistemas alternativos de los escenarios 1 y 2 y similares a los valores que presenta el sistema actual.

De todos los sistemas alternativos seleccionados en los diferentes procesos de optimización con límite en la producción individual (escenarios 2, 3 y 4), el sistema con mejor margen neto (US\$ 1.775 US\$/ha) fue el G (462) del escenario 2. Este presentó, además, un mejor BMO que el sistema actual (-269 kg/ha); sin embargo, debido a la anualización de la rotación, probablemente de corregirse el valor de erosión en el programa Farm Design, esta ventaja no sería tal.

Por otro lado, si el interés fuera seleccionar el sistema con mejor BMO (menos negativo), esta resultaría ser la alternativa G (n.º 9) de la optimización con 3 objetivos, que, teniendo similares costos de alimentación y margen neto que el sistema actual, presenta un BMO = -122 kg/ha/año.

### CONCLUSIONES

El PFD permitió la integración de los diferentes componentes económico-productivos y ambientales del sistema y la comprensión de sus interacciones. Permitió la visualización de los compromisos existentes entre los objetivos optimizados, así como también la evaluación del impacto económico y ambiental del proceso de intensificación de los sistemas.

El PDF aportó alternativas productivas con mejores resultados económicos y ambientales que la situación actual, las que además mostraron diferentes estrategias productivas adaptables a las necesidades o preferencias del productor. La exploración mostró sistemas productivos alternativos con mejores márgenes netos, menores excesos de nutrientes y posibles mejoras en los balances de materia orgánica del

suelo. Sin embargo, para poder evaluar de manera más precisa el impacto en las variables ambientales, el PFD debería integrar al análisis el efecto que los cambios en la rotación y relación perennes/anuales pudiera tener sobre la erosión.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cardozo, G. y Uribe, E. (2010). *Evaluación de sustentabilidad en sistemas pastoriles de producción de leche en el litoral oeste del Uruguay, mediante indicadores biofísicos*. Tesis ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía-Universidad de la República, Montevideo-Uruguay. P. 105.
- Darré, E., Llanos, E., Astigarraga, L., Cadenzzi, M., Picasso, V. (2021). Do pasture-based mixed dairy systems with higher milk production have lower environmental impacts? A Uruguayan case study. *New Zealand Journal of Agricultural*, 64 (3), 444-462. Research. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1080/00288233.2020.1750433>.
- Dogliotti, S., van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H. (2005). A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 86 (1), 29-51.
- Durán, H. (2004). Cambios tecnológicos e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay. *Resultados experimentales en lechería. INIA. Actividades de difusión n.º 361*, 115 - 121.
- Fariña, S.R., Chilibroste, P. (2019). Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay. *Agricultural Systems*, 176, p. 102631
- García Préchac, F., Hill, M. y Clerici, C. (2009). *Erosión 5.91*. Facultad de Agronomía. Recuperado en Febrero 2011 de <http://www.fagro.edu.uy/~manejo>.
- Groot, J.C.J., Oomen, G. y Rossing, W.A.H. (2010). Model Based on Farm Design of Mixed Farming Systems. En: *Congreso de co-innovación de sistemas sostenibles de sustento rural*. 28-30 abril 2010. Lavalleya-Uruguay. PP. 155-158.
- Groot, J.C.J y Oomen, G. (2011). *Farm DESIGN Manual*, En: G. Oomen (Ed.). pp. 40. Recuperado en 31 julio 2024 de <https://es.scribd.com/document/379689984/Farm-DESIGN-Manual>
- Instituto Nacional de la Leche. (2014). *Encuesta lechera INALE 2014*. INALE Estadísticas. Recuperado en setiembre 2021 de <https://www.inale.org/estadisticas/>

- La Manna, A., Durán, H. y Mieres, J. (2008). Una primera aproximación al proceso de intensificación y su impacto al ambiente en tambos a través del balance de nutrientes. En: *Jornada de actualización técnica en lechería; para una lechería eficiente*, INIA, 2008, Florida, Uruguay. (Eds.). Impreso en Colonia, Uruguay INIA 2008. (INIA Serie actividades de difusión 549). PP. 91-97.
- Larrosa, A. y Lutz, G. (2003). *Intensificación y eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en sistemas agrícolas lecheros del litoral oeste Uruguayo*. Tesis Ing. Agr., Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía-Universidad de la República. 146 p.
- Lizarralde, C., Picasso, V., Rotz, C.A., Cadenazzi, M. y Astigarraga, L. (2014). Practices to reduce milk carbon footprint on grazing dairy farms in southern Uruguay: case studies. *Sustainable Agriculture Research*, 3 (2). DOI: [10.22004/ag.econ.230518](https://doi.org/10.22004/ag.econ.230518)
- Llanos, E. (2020). *Estrategias de intensificación en sistemas de producción de leche y sus impactos ambientales*. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias, opción Ciencias Animales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía-Universidad de la República. 109 p.
- Morón, A., Molfino, J., Ibañez, W., Sawchik, J., Califra, A., Lazabal, E., La Manna, A. y Malcuori, E. (2011). La calidad de los suelos bajo producción lechera en los principales departamentos de la cuenca: carbono y nitrógeno. En: *Sustentabilidad ambiental de los sistemas lecheros en un contexto económico de cambios*. INIA La Estanzuela. Serie Actividades de difusión n.º 663, pp. 41-46.