

# APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



# Capítulo 22

## Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) en cuencas lecheras con objetivos productivos y ambientales

Andrés Castagna, Lorena Rodríguez Gallego, Antonio Mauttone, Federico Matonte, Agustín Araujo, Agustina Parrilla, Santiago Mancebo, Valentina Moncalvo y Oscar Blumetto

### 1. Introducción

#### 1.1. El aumento de la productividad y sus consecuencias ambientales

El uso de suelo para obtener bienes y servicios genera uno de los impactos más importantes producidos por el ser humano sobre los ecosistemas del planeta: el exceso de nutrientes en sistemas acuáticos (Tilman *et al.*, 2002, Steffen *et al.*, 2011). La intensificación de la actividad agropecuaria ocurrida en las últimas décadas ha estado asociada, en gran medida, al incremento en el uso de fertilizantes (Matson *et al.*, 1997; Tilman *et al.*, 2002; Buytaert y Breuer, 2013). La continua aplicación de fertilizantes y el modo de aplicación han derivado en un aumento de la pérdida de nutrientes desde los cultivos agrícolas hacia los cuerpos de agua (Sharpley *et al.*, 1996; Moss, 2010; Withers *et al.*, 2017). Esta situación ha impactado negativamente sobre la calidad del agua de arroyos y ríos en varias zonas del mundo (Foley *et al.*, 2005; De Paula *et al.*, 2019).

El proceso de eutrofización es el enriquecimiento natural o artificial en nutrientes de los cuerpos de agua, principalmente en nitrógeno y fósforo (National Academy of Science, 1969; Quinlan *et al.*, 2021). Los

efectos de la eutrofización son la excesiva proliferación de fitoplancton y de plantas acuáticas, el consumo de oxígeno por la descomposición de la gran cantidad de materia orgánica acumulada, la simplificación de la trama trófica y, en casos extremos, la presencia de especies de cianobacterias tóxicas (Dolman *et al.*, 2012), mortandad de peces (Moss *et al.*, 1996; Moss, 1998) y pérdida de biodiversidad (Moss, 1996).

En Uruguay ha aumentado la preocupación por la calidad del agua, dado que muchos ecosistemas acuáticos superficiales aumentaron la concentración de nutrientes, incumpliendo la normativa de determinados parámetros físico-químicos (Barreto *et al.*, 2017; Alonso *et al.*, 2019), lo cual constituye un problema de calidad de aguas en muchos sistemas lénticos y lóticos del país (Bonilla *et al.*, 2015). Este proceso está ampliamente documentado en las cuencas de los ríos Santa Lucía, Cuareim, Negro y las lagunas como del Sauce, del Cisne y del Diario (Arocena *et al.*, 2008; Steffen e Inda 2010; Bonilla *et al.*, 2015; Goyenola *et al.*, 2015; Chalar *et al.*, 2017, Aubriot *et al.*, 2020). En Uruguay, la actividad agropecuaria explica el principal uso del suelo y tiene una importante influencia en el aporte de nutrientes a los sistemas hidrológicos (Goyenola *et al.*, 2015; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2017; Chalar *et al.*, 2017).

El marco actual de búsqueda de la sostenibilidad implica que el diseño del sistema productivo, ya sea agrícola o de alta carga animal, deba pensarse no solo desde el punto de vista del retorno económico, sino también desde la perspectiva ambiental y social (Aristide *et al.*, 2020). El entendimiento del proceso de exportación de nutrientes desde los distintos usos del suelo, junto con la modelación multiobjetivo espacialmente explícita de los usos del suelo, puede constituirse en una herramienta de apoyo fundamental para la planificación de usos del suelo en zonas sensibles.

## **1.2. La búsqueda de soluciones de compromiso entre objetivos productivos y ambientales**

La sociedad actual enfrenta el desafío de desarrollar estrategias que reduzcan los impactos negativos de los usos del suelo, al tiempo que mantengan beneficios sociales y económicos de estos (Foley *et al.*, 2005; Fu *et al.*, 2015; Smith, 2018). El Instituto Nacional de la Leche (INALE) demostró que los productores lecheros, de escala reducida y limitada capacidad de inversión en Uruguay, necesitan incrementar el volumen total

de leche producida a un bajo costo para asegurar la viabilidad económica de la actividad, lo que conlleva aumentar la productividad primaria por intensificación del sistema (INALE, 2015). Esto implica una intensificación en el uso de insumos, por ejemplo, fertilizantes para elevar la productividad de pasturas y cultivos, lo cual incrementa el potencial de pérdidas de nutrientes.

Para reducir la exportación de nutrientes hacia aguas superficiales y atender las necesidades productivas de los sistemas lecheros de pequeña escala, deben buscarse soluciones de compromiso entre productividad y potencial contaminante, lo que requiere soluciones complejas y multidimensionales de objetivos generalmente contrapuestos.

La planificación espacial de usos del suelo es una medida usada a nivel mundial para la gestión de diferentes objetivos (Nha, 2017). Las técnicas de optimización con soluciones espacialmente explícitas son una de las herramientas que aparecen como prometedoras para resolver situaciones de este tipo (Groot *et al.*, 2007; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2012; Rong *et al.*, 2017; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2019; Mauttone *et al.*, 2019).

En este sentido, la consideración de los problemas ambientales emergentes y socialmente priorizados, contemplando al mismo tiempo las necesidades económicas y sociales de la población residente en los territorios, requiere del desarrollo de herramientas de modelación. Estas, a su vez, deben permitir a los tomadores de decisión y gestores de política pública proyectar distintos escenarios y conocer los recursos necesarios para implementar medidas efectivas.

La herramienta desarrollada, ha incorporado en sus diferentes etapas la posibilidad de trabajar a múltiples escalas, que van desde el potrero de un establecimiento hasta la microcuenca completa, de modo de considerar públicos objetivos diferentes: productores, asesores técnicos, investigadores o gestores de política pública.

## **2. La producción lechera en la cuenca del río Santa Lucía**

### **2.1. La producción lechera familiar en la cuenca del río Santa Lucía**

La producción lechera de la cuenca del río Santa Lucía es de gran importancia, ya que aloja el 38% de los productores lecheros del país (Delgado, 2017), a la vez que se destaca como una de las actividades que

más influye en el aporte de nutrientes a los sistemas acuáticos (Manta *et al.*, 2013, Chalar *et al.*, 2017), siendo uno de los sitios donde la problemática ha tenido mayor relevancia por ser la fuente de agua potable para el 60% de la población de Uruguay. En la cuenca existen múltiples sistemas de producción que resultan en diversos usos del suelo (ganadería, lechería, fruticultura, horticultura, forestación, etc.) (Ackerman *et al.*, 2017), pero la producción lechera se destaca en superficie y relevancia económica.

Según la encuesta lechera 2014 (INALE, 2015), casi un tercio de los productores estaban por debajo de los 154.000 litros de leche anuales y estos productores cuentan en promedio con 31 ha dedicadas a vacas masa y 12 ha a cría, es decir que su escala es pequeña. A su vez, son productores familiares que residen en los predios o a corta distancia de ellos. Por esta razón, este sector de productores tiene una especial vulnerabilidad económica que los obliga a presionar sus recursos para obtener una productividad más alta.

En promedio, solo el 45% de las salas de ordeño cuenta con algún tipo de manejo de efluentes (INALE, 2015), que constituye la fuente de contaminación puntual de este sistema. Las fuentes difusas, que comprenden las pérdidas de nutrientes que se producen directamente por escorrentía en el campo, son también relevantes. En esta zona, las microcuencas con mayor superficie de tambos presentaron mayores niveles de P en agua, coincidiendo con mayores niveles de P lábil del suelo (Arocena *et al.*, 2013). En la producción lechera, la salida de nutrientes con el agua de escurrimiento depende de los tipos de pasturas, fertilizantes, efluentes y prácticas de manejo del ganado (Cornish *et al.*, 2002). Conocer cómo estos factores afectan los procesos de pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial es de importancia para mejorar las prácticas de manejo y lograr disminuir sus impactos sobre la calidad del agua en sistemas lóticos y lénticos.

## **2.2. Las unidades de análisis para la gestión de producción y las políticas públicas**

El análisis y la planificación de escenarios pueden presentar distintos requerimientos de escala según el público al que están destinados. Cuando se quiere atender las posibilidades de influir en el sistema productivo de un productor individual, ya sea para la toma de decisiones del propio

productor o de un asesor técnico, el nivel predial o de potrero es, sin dudas, el más útil. Sin embargo, en la planificación de políticas públicas para el desarrollo de un sector, una zona o un conjunto de actores, el nivel adecuado involucra a un conjunto de productores o a una región. En el caso de planificación ambiental, aunque puede realizarse a nivel predial, se utiliza la cuenca hidrográfica como unidad espacial natural. La unidad de cuenca puede ser también muy adecuada para la planificación de acciones de organismos públicos o empresas, sobre todo si involucra, como en este caso, la calidad de agua como un objetivo central.

El área piloto seleccionada para este trabajo es la microcuenca del arroyo El Tala, en el departamento de San José, una subcuenca (114.000 ha) de la gran cuenca del río Santa Lucía. Esta subcuenca está en su mayoría ocupada por pequeños establecimientos lecheros.

### **3. Modelación para la optimización de usos del suelo**

#### **3.1. Las bases conceptuales del modelo**

La modelación consiste en transformar en lenguaje matemático los flujos y relaciones entre componentes de sistemas de interés. La programación matemática es un lenguaje formal que permite expresar relaciones entre los parámetros –aspectos que son fijos y están dados por el contexto– y las variables del sistema. En particular, es posible especificar una medida de desempeño del sistema que se busca minimizar o maximizar (en términos generales, optimizar), y un conjunto de restricciones que expresan condiciones que deben cumplir las decisiones para que el sistema se encuentre en un estado coherente. En este contexto, y en particular en el del presente trabajo, el término “programación” hace referencia a la planificación del uso de recursos que se traduce en decisiones de asignación de estos (Hillier y Lieberman, 2009). En general, los elementos que componen un problema de programación matemática son los que siguen.

- Variables de decisión: representan las decisiones a tomar. Sus valores óptimos (que minimizan/maximizan la función objetivo) y factibles (que respetan las restricciones) son determinados por un método computacional de optimización.
- Parámetros: son valores que indican características del sistema que no están bajo control de quien toma decisiones y, en general, quedan determinados *a priori*.

- Restricciones: son expresiones que vinculan a las variables de decisión con los parámetros y determinan condiciones que debe cumplir la solución que buscamos.
- Función objetivo: es la función que se quiere optimizar y que vincula los parámetros con las variables de decisión. En general, se busca maximizar un beneficio o minimizar un costo.

### **3.2. Descripción general de la herramienta y proceso de desarrollo**

El trabajo desarrollado considera a nivel de cuenca la problemática ambiental relacionada con la calidad de agua, al mismo tiempo que se persiguen objetivos de productividad. Esto ha llevado al desarrollo de un modelo que trabaja en niveles mayores (cuenca), pero que desagrega la información a niveles menores (productores y potreros). El objetivo general fue minimizar las externalidades ambientales, estableciendo metas productivas individuales a alcanzar e incluyendo restricciones ambientales, agronómicas y económicas.

El proceso contó con dos etapas. En la primera se desarrolló un modelo cuyo objetivo fue minimizar la exportación de fósforo hacia los recursos hídricos superficiales, manteniendo niveles aceptables de productividad primaria (en kg de materia seca por unidad de superficie, kg MS/ha) por estación del año, en los establecimientos de producción lechera de la microcuenca seleccionada. A través del modelo se determinaron las rotaciones de los cultivos forrajeros de los productores que componían la cuenca que minimizaran la exportación de fósforo. Las rotaciones debían cumplir con restricciones acerca de la sucesión y la diversidad de los cultivos y la productividad mínima en términos de materia seca, para un período de tiempo determinado (cuatro años). Como primera aproximación, el modelo fue resuelto en la instancia computacional de forma aproximada (o “heurística”) (Castagna, 2020; Mauttone *et al.*, 2019), debido a la complejidad, tanto de lograr una formulación matemática del problema como de diseñar un algoritmo que lo resuelva de manera exacta (que garantice soluciones óptimas). En una segunda etapa, se avanzó en la construcción de un modelo exacto de programación lineal entera mixta (Matonte, 2019) y en la incorporación de nuevos elementos al problema (Araújo *et al.*, 2020). Concretamente, se incorporó el modelado de decisiones relativas al almacenamiento y a la conservación de materia seca, el consumo de proteína cruda y energía neta de lactancia, y

la elección de los distintos métodos de consumo. En particular, al modelo original se le agregó una serie de restricciones y nuevos objetivos (Tabla 1), que mejoran las posibilidades de adaptación de los sistemas a las exigencias ambientales y productivas como, por ejemplo:

- Cálculo y tratamiento de costos de cada cultivo y suplemento.
- Reserva y transferencia de materia seca mediante distintos métodos de conservación.
- Adquisición de ración, de forma de contar con un complemento en caso de que no se logre cumplir con la demanda de energía y proteína.
- Consideración de la ocupación de cultivos en las parcelas durante cuatro estaciones previas al período en estudio.
- Reserva de materia seca disponible bajo distintos métodos, al comienzo del período en estudio.
- Balances de proteína y energía.

La Tabla 1 esquematiza los componentes del modelo para sus dos versiones (original, desarrollado en la primera etapa; y extendido, desarrollado en la segunda etapa).

**TABLA 1.** ESQUEMA DE ENTRADAS, SALIDAS Y OBJETIVOS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN. LA COLUMNA MODELO EXTENDIDO INDICA LOS ELEMENTOS QUE SE AGREGAN A LOS INDICADOS EN LA COLUMNA MODELO ORIGINAL

ENTRADAS		
	Modelo original	Modelo extendido
Contexto	<p>Unidades espaciales (con atributo de área), agrupadas en productores-potreros.</p> <p>Cultivos (con atributos de exportación de fósforo, productividad de materia seca, ciclo de plantación, sucesores).</p>	<p>Costos de cada cultivo.</p> <p>Productividad de cultivos en términos de proteína y energía, en lugar de materia seca.</p> <p>Modalidad posible de reserva de cada cultivo para consumo posterior.</p> <p>Posibilidad de utilizar ración.</p>
Criterios	<p>Período de planificación.</p> <p>Diversidad de cultivos.</p> <p>Productividad mínima en materia seca.</p>	<p>Mínimos de materia seca a transferir para consumo posterior y de adquisición de ración.</p> <p>Requerimientos de proteína y energía mínimas.</p>

(Continúa en página siguiente)



<b>Salidas</b>	
<b>Modelo original</b>	<b>Modelo extendido</b>
Cultivo en cada unidad espacial para toda unidad temporal.	Conservación de materia seca para uso posterior.  Compra de ración.  Consumos de materia seca producida o almacenada.

<b>Objetivos</b>	
<b>Modelo original</b>	<b>Modelo extendido</b>
Minimización de exportación de fósforo.	Minimización de costos (cultivo, ración, almacenamiento para uso posterior).

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.3. Estructura del modelo

La información requerida para la operatividad del modelo puede dividirse en dos grandes componentes: la información geográfica y las bases de datos para cálculos agronómicos, ambientales y nutricionales. La información geográfica requiere de la unidad espacial de trabajo y sus subdivisiones clasificatorias. Esto hace referencia a la cuenca objeto de estudio, los padrones de los productores dentro de la cuenca y el parcelamiento de dichos establecimientos. Esta información debe ser incluida en un sistema de información geográfica, lo que permite que las soluciones del modelo sean espacialmente explícitas, es decir que se traduzcan en mapas. A cualquier polígono dentro de este sistema se le puede asociar otra información georeferenciada: topografía, tipo de suelo, usos, ecosistemas naturales, distancia a cursos de agua, entre otras.

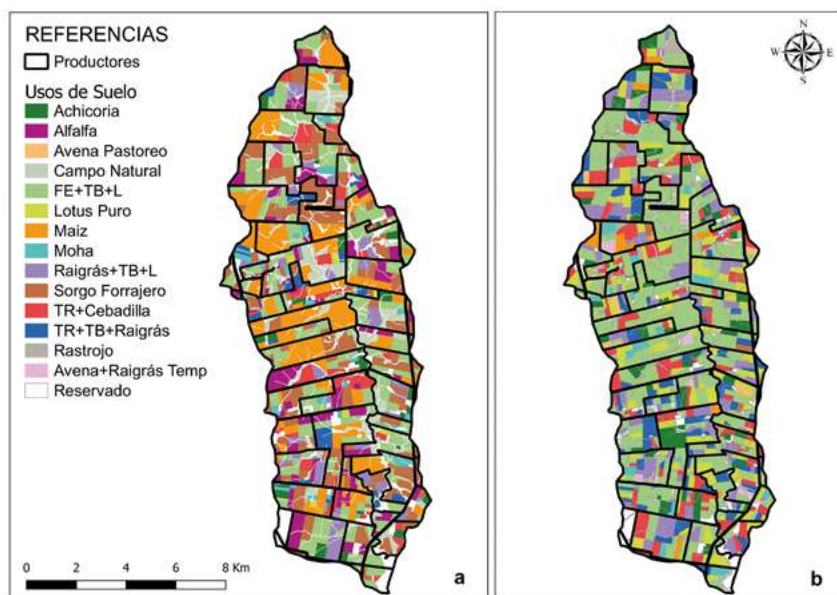
El otro componente de información es el que provee los datos de referencia para los cálculos de los flujos del sistema. Aquí, se consideran tablas que asignan los valores de exportación de nutrientes según uso del suelo, información de productividad de los diferentes cultivos forrajeros, información nutricional de forrajes y suplementos e información de costos. Estas tablas de datos resultan en el menú de opciones de asignación

de usos de suelo disponibles, lo que se complementa con datos sobre las posibles secuencias de cultivos, fechas de siembra y estacionalidad.

### 3.4 Ejemplo de las salidas del modelo extendido

El resultado del modelo es una solución espacialmente explícita (un mapa) de los usos de suelo en cada parcela, por estación del año durante los años que se analicen, que es posible ajustar entre uno y varios años (Figura 1).

**FIGURA 1.** MAPA DE PRODUCTORES Y DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS DE SUELOS PRESENTES EN LA MICROCUENCA AL INICIO DE LA OPTIMIZACIÓN (A) Y EN EL ÚLTIMO VERANO DE LA PLANIFICACIÓN (B).



*Nota: Los márgenes negros indican el predio de cada productor y los colores indican los potreros bajo diferentes cultivos.*

*FE: festuca, TB: trébol blanco, L: lotus, TR: trébol rojo. Reservado: representa coberturas que no pueden ser reemplazadas por cultivos, como bosque nativo, zonas inundables y zonas buffer restringidas por la normativa en la cuenca.*

*Fuente: Elaboración propia.*

El modelo también genera una serie de resultados numéricos importantes en forma de tablas para cada una de las unidades de manejo. Estos indican los valores de producción primaria en forma de materia seca (MS) y también en proteína cruda (PC) y energía neta de lactancia (ENL); cantidades de fósforo exportado por hectárea y eventuales necesidades de compra de raciones. Estos resultados están expresados para toda la cuenca, por productor y por potrero, o parcela.

En las Tablas 2 y 3 se presenta un ejemplo de los resultados de la optimización para toda la cuenca, en la cual el modelo generó 18 secuencias de cultivos posibles para cumplir los objetivos productivos establecidos y la minimización de exportación de fósforo. Las secuencias de cultivos representan la sucesión estacional de cultivos que puede tomar cada potrero, para que cada productor de la cuenca minimice la exportación de P y satisfaga los requerimientos productivos. La sumatoria de los cultivos en el período de estudio obtiene valores para diferentes atributos como carga de P exportada por ha, aporte de proteína por ha y por unidad de P, así como costo por ha.

**TABLA 2.** FRECUENCIA DE USO Y ÁREA TOTAL OCUPADA POR SECUENCIAS DE CULTIVO A NIVEL DE CUENCA. CADA SECUENCIA IMPLICA UNA SUCESIÓN DE CULTIVOS Y ROTACIONES EN EL TIEMPO EN LA MISMA PARCELA

		Parcelas ocupadas		Área ocupada [ha]	
Secuencia	a	3	0,38%	26,69	0,27%
	b	4	0,51%	39,24	0,39%
	c	11	1,39%	71,15	0,71%
	d	1	0,13%	1,24	0,01%
	e	1	0,13%	4,84	0,05%
	f	495	62,50%	7.314,12	73,20%
	g	2	0,25%	21,34	0,21%
	h	2	0,25%	3,34	0,03%
	i	1	0,13%	22,05	0,22%
	j	40	5,05%	145,73	1,46%
	k	28	3,54%	179,72	1,80%
	l	16	2,02%	82,94	0,83%
	m	1	0,13%	1,92	0,02%
	n	162	20,45%	1.923,02	19,25%
	o	8	1,01%	83,52	0,84%
	p	3	0,38%	5,81	0,06%
	q	12	1,52%	58,02	0,58%
	r	2	0,25%	7,52	0,08%

Fuente: *Elaboración propia.*

**TABLA 3.** ATRIBUTOS DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS SELECCIONADAS POR EL MODELO

Secuencia de cultivos	Kg P / ha	Kg prot / ha	Costo US\$ /ha
a	6,20	5.288	530,65
b	6,88	5.942	497,65
c	7,96	6.712	666
d	6,88	5.942	497,65
e	5,94	4.568	556
f	6,20	5.428	492,3
g	6,17	4.571	1.113
h	6,51	4.721	742,65
i	6,85	5.225	1.080
j	6,68	3.516	247,65
k	6,85	5.148	1.071,65
l	6,22	4.011	514,65
m	5,83	4.207	737,3
n	6,17	4.711	1.074,65
o	5,54	3.574	517,65
p	5,85	2.790	759,65
q	6,19	3.294	1.097
r	5,56	2.157	540

*Nota: los costos, kg de proteína y fósforo exportado incluyen las reservas forrajeras y ración para cubrir déficits temporales.*

*Fuente: Elaboración propia.*

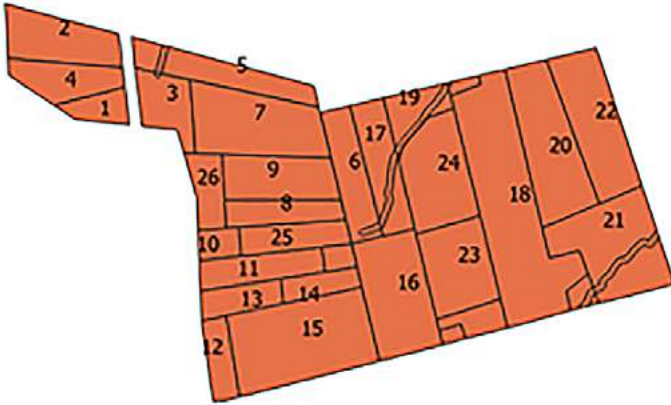
Para ejemplificar, se muestran los resultados tipo para un productor X dentro de la cuenca (Tabla 4 y Figuras 2, 3 y 4).

**TABLA 4.** CUADRO RESUMEN PARA PRODUCTOR X

Cantidad de parcelas	27
Superficie total	146,14 ha
Exportación total de fósforo	1.216,20 kg
Exportación por unidad de área	8,32 kg/ha
Productividad primaria media (MS)	8181,33 kg ha/año
Costo por unidad de área	1.924,03 US\$/ha

Fuente: *Elaboración propia.*

**FIGURA 2.** MAPA PARCELARIO DE PRODUCTOR X. CADA POTRERO ESTÁ IDENTIFICADO POR UN NÚMERO



Fuente: *Elaboración propia.*

**FIGURA 3.** ROTACIÓN DE CULTIVOS PRODUCTOR X. LAS FILAS REPRESENTAN CADA PARCELA DEL PRODUCTOR X EN LA FIGURA 2.

		Estaciones															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Parcelas	1	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Moha		Raigrás+TB+L								
	2	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	3	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	4	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	5	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	6	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	7	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	8	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	9	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	10	TR+TB+Raigrás			Avena+Raigrás Temp.						Rastrojo						
	11	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	12	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	13	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	14	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	15	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	16	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	17	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	18	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	19	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	20	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	21	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	22	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	23	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	24	TR+TB+Raigrás			Raigrás+TB+L												
	25	Avena pastoreo			Rastrojo			Alfalfa						Raigrás+TB+L			
	26	Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			Maíz		Raigrás+TB+L								
	27	Raigrás+TB+L			Rastrojo												

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra, para cada parcela o potrero, el uso de suelo (cultivo) presente a medida que transcurre el tiempo desde la primera hasta la decimosexta estación modelada. La Figura 4 complementa la información mostrando la productividad esperada de cada cultivo, sumando toda la superficie que ocupa en el establecimiento, incorporando además los momentos de producción y consumos de otras fuentes de alimentos que no son de pastoreo directo (fardos, silo y ración).

**FIGURA 4.** PRODUCTIVIDAD PLANIFICADA PARA EL PRODUCTOR X EN KG DE MATERIA SECA (MS) DE LOS CULTIVOS EN CONSUMO DIRECTO Y DIFERENTES FORMAS DE RESERVAS

Estación	Cultivo	Cultivo	X [kg MS]	CD [kg MS]	F [kg MS]	CF [kg MS]	S [kg MS]	CS [kg MS]	CR [kg]
1	4	TR+TB+Raigrás	69.010,92	69.010,92					46.825
	6	Raigrás+TB+L	1.393,38	1.393,38					
	11	Avenas+Raigrás Temp.	38.510,98	38.510,78	0,20				
2	4	TR+TB+Raigrás	131.483,34	131.483,34					
	6	Raigrás+TB+L	3.256,02	2.386,74	869,27				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	40.877,48		40.877,48				
3	4	TR+TB+Raigrás	223.973,42	122.243,41	101.730,01				
	6	Raigrás+TB+L	5.679,60		5.679,60	869,27			
	11	Avenas+Raigrás Temp.	50.565,31		50.565,31	40.877,68			
4	4	TR+TB+Raigrás	88.150,90		88.150,90	98.933,21			
	6	Raigrás+TB+L	1.467,09		1.467,09	5.679,60			
	11	Avenas+Raigrás Temp.				50.565,31			
5	4	TR+TB+Raigrás	129.343,46	63.628,99	65.714,47	89.476,07			
	6	Raigrás+TB+L	3.308,15	3.308,15		1.467,09			
6	4	TR+TB+Raigrás	105.804,86	105.804,86		28.887,29			
	6	Raigrás+TB+L	3.144,54	3.144,54					
7	4	TR+TB+Raigrás	207.746,05	119.950,82	87.795,23	38.298,80			
	6	Raigrás+TB+L	6.008,62	6.008,62					
8	4	TR+TB+Raigrás	88.150,90	73.783,64	14.367,25	87.795,23			
	6	Raigrás+TB+L	2.454,15	2.454,15					
	8	Moha	9.791,60	9.791,60					
	12	Maíz	212.938,30				212.938,30		
9	4	TR+TB+Raigrás	3.801,03		3.801,03	14.367,25			
	6	Raigrás+TB+L	58.709,75	41.688,68	17.021,07				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	4.079,18	4.079,18					
	12	Maíz						212.938,30	
10	4	TR+TB+Raigrás	7.241,93		7.241,93				
	6	Raigrás+TB+L	133.968,01	133.870,08	97,93				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	4.329,85		4.329,85				
11	4	TR+TB+Raigrás	12.336,17		12.336,17	11.042,97			
	6	Raigrás+TB+L	234.185,67	132.217,56	101.968,11	17.119,00			
	11	Avenas+Raigrás Temp.	5.356,01		5.356,01	4.329,85			
12	4	TR+TB+Raigrás	4.855,24		4.855,24	12.336,17			
	6	Raigrás+TB+L	61.116,79	44.954,70	16.162,09	101.968,11			
	11	Avenas+Raigrás Temp.				5.356,01			
13	4	TR+TB+Raigrás	7.124,07	7.124,07		3.817,10			
	6	Raigrás+TB+L	133.762,31	133.762,31		16.162,09			
14	4	TR+TB+Raigrás	5.827,60	5.827,60		1.038,14			
	6	Raigrás+TB+L	127.146,90	127.146,90					
15	4	TR+TB+Raigrás	11.442,39	11.442,39					
	6	Raigrás+TB+L	242.953,07	170.011,71	72.941,37				
16	4	TR+TB+Raigrás	4.855,24	4.855,24					
	6	Raigrás+TB+L	99.231,28	99.231,28		72.941,37			
			<b>2.585.381,56</b>	<b>1.669.115,64</b>	<b>703.327,61</b>	<b>703.327,61</b>	<b>212.938,30</b>	<b>212.938,30</b>	<b>46.825,25</b>

Nota: X = total, CD = consumo directo, F = producción de fardo, CF = consumo de fardo, S = producción de silo, CS = consumo de silo, CR = consumo de ración.

Fuente: Elaboración propia.

## 4. Alcance y desafíos

### 4.1. Uso en política pública

A nivel de política pública, la utilidad del modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) consiste en poder simular escenarios con objetivos antagónicos entre necesidades productivas y ambientales, con restricciones y exigencias variables. A modo de ejemplo, podemos pensar en una situación en la que una autoridad o un decisor público pretende asegurar la calidad del agua en una cuenca determinada, pero, a su vez, contemplar las necesidades socioeconómicas de los habitantes de una zona. Para este caso, el modelo deberá asegurarse de que la exportación de fósforo hacia los cursos de agua (principal causa de eutrofización) sea la mínima posible y que garantice niveles de productividad admisibles. Incluso, se puede avanzar aún más y establecer umbrales para la exportación de fósforo en la cuenca. Es decir que la producción que se realice en la cuenca no pueda superar determinado umbral de exportación total de dicho nutriente, que asegure que se mantenga la calidad del agua admitida. Esto podría significar que algunos usos de suelo en promedio en la cuenca (aquellos con mayor exportación de fósforo) no podrán superar determinadas superficies. Esta es una condición que está en proceso de ser incorporada al modelo, la que fue hasta ahora explorada en Rodríguez-Gallego *et al.* (2019) y Mauttone *et al.* (2018) para la cuenca de la laguna de Rocha.

Por otra parte, podemos imaginar que la cuenca está ocupada por productores lecheros de pequeña escala, como sucede en el caso de estudio, los que necesitan alcanzar una productividad mínima para ser económicamente viables, y si es posible que la productividad se alcance optimizando costos y minimizando impactos ambientales. En este planteo, la simulación podría resultar en que todos los objetivos sean alcanzables para cada productor y, por tanto, obtendríamos la planificación de usos del suelo recomendada para toda la cuenca. También puede suceder que para los requerimientos mínimos de productividad no se logre alcanzar los objetivos ambientales, es decir, no hay solución posible con las alternativas con las que se cuenta para algunos productores.

En esta situación, el modelo podrá calcular de cuánto es la diferencia económica entre el mínimo requerido y el alcanzable por cada productor, con las restricciones ambientales. De esta manera, se contará con una base para calcular los costos que requeriría el apoyo a este sector,



para que pueda satisfacer los requerimientos económicos y ambientales. Asimismo, se puede pensar en transacciones de restricciones ambientales, donde un productor pueda “ceder” a otro su “cuota de fósforo” no utilizada, de manera que la exportación total de la cuenca no sobrepase el umbral establecido. También podrían buscarse otras soluciones de compromiso, como la búsqueda de otras alternativas a la lechería que cumplan con las metas económicas y ambientales.

## 4.2. Uso en gestión predial

El modelo arroja una solución para cada productor, proponiendo una serie de rotaciones forrajeras para alcanzar los objetivos productivos y las respectivas restricciones ambientales. Por esta razón puede ser utilizado en la gestión de la producción, para tener una presupuestación forrajera a largo plazo, estimación de reservas, necesidades de ración y cálculo de costos, además de atenuar los impactos ambientales. Esto podría ser implementado por productores y asesores técnicos, pudiéndose incluso cambiar objetivos y/o restricciones, así como aumentar el menú de opciones y actualizar costos de insumos.

## 4.3. Accesibilidad a la herramienta

El modelo y las herramientas de *software* para su uso están en continuo proceso de renovación y mejora, por lo cual no existe disponibilidad como plataforma de libre descarga. Para aquellos interesados en su uso o en participar en el desarrollo, los autores acuerdan designar como contacto referente al Dr. Antonio Mauttone, de la Facultad de Ingeniería.<sup>1</sup>

## 5. Aportes a la transición agroecológica

En la producción agroecológica se busca como base conceptual la sostenibilidad de la actividad productiva, lo cual implica la consideración de los aspectos económicos, sociales y ambientales de los predios agropecuarios, pero también del entorno territorial en el cual están inmersos.

---

<sup>1</sup> Contacto: mauttone@fing.edu.uy.

El MOPUS es una herramienta útil para la visualización de posibles escenarios de uso del suelo en pos de planificar el proceso de transición desde la situación actual (producción convencional) a otra, de producción con objetivos productivos con las salvaguardas ambientales correspondientes. En este sentido, la herramienta permite planificar objetivos productivos de base, a los cuales se le impongan restricciones ambientales en materia de sus exportaciones de nutrientes, y verificar que son alcanzables con las alternativas tecnológicas disponibles. Esto implica tanto los objetivos individuales como los de una cuenca o porción de territorio determinada, lo cual aporta a la sostenibilidad predial y de su entorno.

También permitiría realizar estimaciones de cuánto sería el beneficio ambiental si toda una cuenca o una proporción de productores en ella realizara esta transición a producción agroecológica, lo cual impulsaría incentivos de política pública a esa transformación si los resultados mostrasen que la exportación de nutrientes se reduce de manera significativa en escenarios donde la producción agroecológica ocupa parte del territorio.

En la escala de la planificación predial, permitirá estimar retornos en materia productiva con las restricciones ambientales planificadas, con la posibilidad de analizar la trayectoria con un horizonte de varios años y, por tanto, disponer de un análisis de la factibilidad de la producción agroecológica.

## Referencias

**Ackerman, M. N., Barboza, N. y Cortelezzi A.**

(2017), "Caracterización socioeconómica de la actividad agropecuaria de la cuenca del río Santa Lucía", en Souto, G., Tamber, A. y Bermejillo, J. (eds.), *Anuario 2017*, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca-OPYPA (Oficina de Programación Y Políticas Agropecuarias), Montevideo, pp. 591-602.

**Alonso, J., Quintans, F., Taks, J., Conde, D., Chalar, G., Bonilla, S., Arocena, R., Haakonsson, S., Aubriot, L., Goyenola, G., Muniz, P., Marrero, A., Hutton, M., Venturini, N., Pita, A. L., Iglesias, K., Rios, M., Zaldúa, N., Teixeira de Mello, F., Soutullo, A., Eguren, G., Victoria, M., López Tort, F., Maya, L., Castells, M., Benitez, M. J., Lizasoain, A., Bertoni, E., Bortagaray, V., Salvo, M., Colina, R., Azuriz, K., Casagnet, N., Evia, V., Fernández, A., Lagos, X., Marrero, L., Milans, F., Piaggio, M., Rezzano, N., López, J., Rodríguez, L., Garat, S., Pintos, M., Irburo, A., Brena, B. y Méndez, H.**

(2019), "Water Quality in Uruguay: current status and challenges", en Roldán, G., Tundisi, J., Jiménez, B., Vammen, K., Vaux, H., González, E. y Doria, M.

(eds.), *Water quality in the Americas*, Inter-American network of Academies of Sciences (IANAS-IAP), México, pp. 592-631.

**Araujo, A., Mancebo, S., Moncalvo, V. y Parrilla, A.**

(2020), *Optimización de usos del suelo en el contexto de rotación de cultivos considerando aspectos productivos y medioambientales*, Proyecto de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo.

**Aristide, P., Cittadini, E., Blumetto, O., Giobellina, B., Ledesma, S., Ovale, C., Marchao, R., Caballero, P. J., Osman, A. y Tiftonell, P.**

(2020), *Variables claves para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. Hacia un sistema de indicadores de Intensificación Sostenible en el Cono Sur*. PROCISUR. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

**Arocena, R., Chalar, G., Fabián, D., De León, L., Brugnoli, E., Silva, M., Rodó, E., Machado, I., Pacheco, J. P., Castiglioni, R. y Gabito, L.**

(2008), *Evaluación ecológica de cursos de agua y biomonitorio, Informe final*, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente-Universidad de la República-Facultad de Ciencias, Montevideo.

**Arocena, R., Chalar, G., Perdomo, C., Fabián, D., Pacheco, J. P., González, M., Olivero, V., Silva, M., García, P. y Etchebarne, V.**

(2013), "Impacto de la producción lechera en la calidad de los cuerpos de agua", *Augm Domus*, 5(I), pp. 42-63.

**Barreto, P., Dogliotti, S. y Perdomo, C.**

(2017), "Surface Water Quality of Intensive Farming Areas Within the Santa Lucia River Basin of Uruguay", en *Air, Soil and Water Research*, 10, pp. 1-8.

**Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L., De León, L., Brena, B., Pérez, M., Piccino, C., Martínez de la Escalera, G., Chalar, G., González-Piana, M., Martigani, F. y Aubriot, L.**

(2015), "Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay", en *INNOTEC*, 10, pp. 9-22.

**Buytaert, W. y Breuer, L.**

(2013), "Water resources in South America: sources and supply, pollutants and perspectives", en *Proceedings of HO4, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly*, IAHS publications, Gothenburg (Suecia), pp. 106-113.

**Castagna, A.**

(2020), *Modelación del uso de suelo en una cuenca lechera para minimizar la exportación de nutrientes hacia aguas superficiales*, Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad de la República, Montevideo.

**Chalar, G., García-Pesenti, P., Silva-Pablo, M., Perdomo, C., Olivero, V. y Arocena, R.**

(2017), "Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production", en *Limnologica*, 65, pp. 76-84.

**Cornish, P. S., Hallissey, R. y Hollinger, E.**

(2002), "Is a rainfall simulator useful for estimating phosphorus runoff from pastures—a question of scale-dependency?", en *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42(7), pp. 953-959.

**Delgado, S.**

(2017), *Planes para la Producción Lechera Sostenible. Anuario OPYPA* (Oficina de Programación Y Políticas Agropecuarias), MGAP, Montevideo, pp. 291-296.

**De Paula Filho, F. J., de Sá Sampaio, A. D., Menezes, J. M. C., da Costa, C. T. F. y Santiago, M. O.**

(2019), "Land uses, Nitrogen and Phosphorus estimated fluxes in a Brazilian semi-arid watershed", en *Journal of Arid Environments*, 163, pp. 41-49.

**Dolman, A. M., Rücker, J., Pick, F. R., Fastner, J., Rohrlack, T., Mischke, U. y Wiedner, C.**

(2012), "Cyanobacteria and cyanotoxins: the influence of nitrogen versus phosphorus", en *PLoS one*, 7(6), e38757.

**Foley, J. A., De Fries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentic, I. C., Ramankutt, N. y Snyder, P. K.**

(2005), "Global consequences of land use", *Science*, 309 (5734), pp. 570-574.

**Fu, B., Zhang, L., Xu, Z., Zhao, Y., Wei, Y. y Skinner, D.**

(2015), "Ecosystem services in changing land use", en *Journal of Soils and Sediments*, 15(4), pp. 833-843.

**Goyenola, G., Meerhoff, M., Teixeira de Mello, F., González-Bergonzoni, I., Graeber, D., Fosalba, C., Vidal, N., Mazzeo, N., Ovesen, N. B., Jeppesen, E. y Kronvang, B.**

(2015), "Phosphorus dynamics in lowland streams as a response to climatic, hydrological and agricultural land use gradients", en *Hydrology and Earth System Science Discussion*, 12, pp. 3349-3390.

**Groot, J. C., Rossing, W. A., Jellema, A., Stobbelaar, D. J., Renting, H. y Van Ittersum, M. K.**

(2007), "Exploring multi-scale trade-offs between nature conservation, agricultural profits and landscape quality—a methodology to support discussions on land-use perspectives", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(1), pp. 58-69.

**Harper, D.**

(1992), *Eutrophication of Freshwaters*, Springer, Países Bajos.

**Hillier, F. S. y Lieberman, G. J.**

(2009), *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill.

**INALE**

(2015), *Encuesta Lechera INALE 2014*. Disponible en: <<https://www.inale.org/estadisticas/>>.

**Manta, E., Cancela, H., Cristina, J. y García-Prehac, F.**

(2013), *Informe sobre la calidad del agua en la cuenca del Río Santa Lucía: estado de situación y recomendaciones*, UDELAR, Montevideo, 29 pp.

**Matonte, F.**

(2019), *Modelado del problema de Planificación de Rotación de Cultivos utilizando Programación Entera Mixta*, Monografía de Grado de Licenciatura en Computación, Universidad de la República, Montevideo.

**Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G. y Swift, M. J.**

(1997), “Agricultural intensification and ecosystem properties”, en *Science*, 277(5325), pp. 504-509.

**Mauttone, A., Cairelli, L., Paroli, F., y Rodríguez-Gallego, L.**

(2018), “Metaheuristic approach to land use optimization balancing productivity and environmental protection”, en: 19 Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, Lima. *Proceedings*, San Borja, Lima, Sociedad Peruana de Investigación Operativa (SOPIOS), pp. 716-723.

**Mauttone, A., Castagna, A., Matonte, F., Rodríguez-Gallego, L. y Blu-metto, O.**

(2019), “Heuristic optimization of crop rotation for milk production at small farms”, en: Albornoz, V. M. y Mac Cawley, A. (eds), *Proceedings of the III International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture*, pp. 8-11.

**Moss, B.**

(1998), “Shallow lakes, biomanipulation and eutrophication”, en *Scope Newsletter*, 29, pp. 1-44.

— (2010), *Ecology of fresh waters: a view for the twenty-first century*, 4<sup>a</sup> ed., Wiley-Blackwell, Chichester, 470 pp.

**Moss B., Madgewick, J. y Phillips, G.**

(1996), *A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes*, Environment Agency Broads Authority, Norwich (Reino Unido).

**National Academy of Sciences**

(1969), *Eutrophication: causes, consequences, correctives*, NAS, Washington D.C.

**Nha, D. V.**

(2017), “The Role of Land-Use Planning on Socioeconomic Development in Mai Chau District, Vietnam”, en: Thanh, M. V., Vien, T. D., Leisz, S. J. y Shivakoti, G. P. (eds), *Redefining Diversity & Dynamics of Natural Resources Management in Asia*, v. 2, Elsevier, Amsterdam, pp. 87-111.

**Quinlan, R., Filazzola, A., Mahdiyan, O., Shuvo, A., Blaggrave, K., Ewins, C., y Sharma, S.**

(2021), “Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide”, en *Limnology and Oceanography*, 66(2), pp. 392-404.

**Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M. y Conde, D.**

(2012), “Land suitability assessment in the catchment area of four southwestern

Atlantic Coastal Lagoons: multicriteria and optimization modeling”, en *Environmental Management*, 50(1), pp. 140-152.

**Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M., Defeo, O., Vidal, L., Meerhoff, E. y Conde, D.**

(2017), “Effects of land use changes on eutrophication indicators in five coastal lagoons of the Southwestern Atlantic Ocean”, en *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 188, pp 116-126.

**Rodríguez-Gallego, L., Cabrera, A. B.C., Kruk, C., Nin, M. y Mauttone, A.** (2019), “Establishing limits to agriculture and afforestation: A GIS based multi-objective approach to prevent algal blooms in a coastal lagoon”, en *Journal of Dynamics & Games*, 6(2), pp. 159-178.

**Rong, Q., Cai, Y., Chen, B., Yue, W., Yin, X. A. y, Tan, Q.**

(2017), “An enhanced export coefficient-based optimization model for supporting agricultural nonpoint source pollution mitigation under uncertainty”, en *Science of the Total Environment*, 580, pp. 1351-1362.

**Sharpley, A., Daniel, T. C., Sims, J. T. y Pote, D. H.**

(1996), “Determining environmentally sound soil phosphorus levels”, en *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(2), pp. 160-166.

**Smith, P.**

(2018), “Managing the global land resource”. *Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences*, 285(1874): 20172798.

**Steffen, M. e Inda H. (eds)**

(2010), *Bases técnicas para el manejo integrado de Laguna del Sauce y cuenca asociada*, Universidad de la República y South American Institute for Resilience and Sustainability Studies (SARAS), Montevideo, 150 pp.

**Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J. y Svedin, U.**

(2011), “The Anthropocene: From global change to planetary stewardship”, en *Ambio*, 40(7), pp. 739-761.

**Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. y Polasky, S.**

(2002), “Agricultural sustainability and intensive production practices”, en *Nature*, 418(6898), pp. 671-677.

**Withers, P. J. A., Hodgkinson, R. A., Rollett, A., Dyer, C., Dils, R., Collins, A. L., Bilsborrow, P. E., Bailey, G. y Sylvester-Bradley, R.**

(2017), “Reducing soil phosphorus fertility bring potential long-term environmental gains: a UK analysis”, en *Environmental Research Letters*, 12(6): 063001.