

# **Impacto potencial de la Convocatoria Cuenca de Santa Lucía en la calidad del agua**

Juan Baraldo<sup>1</sup>

Víctor Emmer<sup>2</sup>

Nicolas Costa<sup>3</sup>

---

*En este artículo se utiliza un modelo biofísico de emisiones de gases de efecto invernadero y eutrofizantes de agua de los efluentes de lechería para estimar el impacto potencial del proyecto de gestión de efluentes y restitución de la calidad de agua, conocido como "Convocatoria Cuenca de Santa Lucía". El modelo se construye a partir de la información de los Planes de Lechería Sostenible y la información administrativa de actividades y metas propuestas para cada establecimiento participante del proyecto. Los resultados muestran que el proyecto disminuiría en un 51% la contribución de los establecimientos participantes en la contaminación del agua en la cuenca.*

## **1. Introducción**

El objetivo de este trabajo es realizar una estimación ex-ante de la contribución potencial de la Convocatoria de la Cuenca de Santa Lucía (CCSL) a la restitución de la calidad del agua en la cuenca y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del cambio en la gestión de los efluentes de la actividad lechera. Dicha convocatoria financió 375 proyectos en establecimientos lecheros individuales con el objetivo de construir sistemas que solucionen la gestión de los efluentes de tambo.

Para la medición de los indicadores escogidos, contaminantes de agua en términos de PO4 equivalente, y GEI en términos de CO2 equivalente, se explotó un modelo biofísico de emisiones producidas por la gestión de los efluentes de tambo desarrollado por el proyecto Biovalor (Emmer, 2020).

Los antecedentes más relevantes son Sena (2016) en donde se analiza el efecto en la calidad de agua y en las emisiones de GEI de una potencial adopción generalizada de tecnología de biodigestores en los sistemas lecheros de la cuenca. Aguirre et al. (2018), en el marco de la evaluación costo-beneficio del financiamiento adicional del proyecto Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático, valoraron los co-beneficios ambientales de la mejora de la calidad de agua de una versión temprana del proyecto CCSL.

---

<sup>1</sup> *Ec. Especialista en Evaluación en OPYPA, jbaraldo@mgap.gub.uy*

<sup>2</sup> *Ing. Quím. Especialista en tecnologías de valorización de residuos del Proyecto Biovalor-MIEM/MA/MVOTMA, victor.emmer@miem.gub.uy*

<sup>3</sup> *Ing. Agr. Técnico de Unidad Agropecuaria de Sostenibilidad y Cambio Climático en OPYPA, ncosta@mgap.gub.uy*

Para este artículo se adapta un modelo que logra mapear la información de Planes de Lechería Sostenible (PLS) presentados a la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN), de cada uno de los tambos participantes, así como la información de las actividades a desarrollar en el proyecto, y tomarla como los insumos de entrada del modelo.

Para cada uno de los proyectos se estimaron ambas dimensiones de impacto tanto en la situación “sin proyecto”, a partir de los PLS; como “con proyecto”, incorporando a la situación de línea de base los cambios y modificaciones al sistema de gestión proyectados en la CCSL. Bajo ciertos supuestos que se explicitan en este artículo, el incremento o variación entre ambas situaciones, puede ser interpretado como la contribución potencial del proyecto sobre ambos aspectos ambientales.

Los resultados muestran que el proyecto sería exitoso en la consecución de su objetivo de disminuir la contaminación de agua. Por otro lado, el proyecto genera un aumento no deseado en las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, en un ejercicio de costo-beneficio, se concluye que el beneficio de disminuir la contaminación más que contrarresta al perjuicio provocado por el aumento de emisiones GEI y al costo de las inversiones del proyecto; sin embargo, esta conclusión es sensible a la valoración social de la calidad de agua.

El artículo presenta el problema ambiental y económico que fundamenta la investigación en la sección 2. En la sección 3 se describe brevemente en qué consiste el proyecto de tratamiento de efluentes de la Convocatoria de la Cuenca de Santa Lucía y se introducen los Planes de Lechería Sostenible; por su parte la sección 4 introduce el modelo de estimación de contaminantes y emisiones. La sección 5 es una aplicación de los datos de los PLS para informar el avance en las medidas de mitigación referentes a lechería, incluidas en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas. En la sección 6 se presenta la aplicación del modelo para la estimación ex-ante del impacto potencial del proyecto. Finalmente, en la sección 7 se cierra el trabajo con algunos comentarios finales.

## ***2. El problema ambiental y el problema económico***

En la última década, el problema de la calidad del agua en particular, y de los servicios ecosistémicos provistos por los recursos hídricos en general, ha cobrado gran relevancia, convirtiéndose en una preocupación genuina de la sociedad uruguaya. Tal es así, que esta preocupación, en este caso, de carácter local, se incorpora a la política pública de estado a través de un conjunto de normativas y políticas estratégicas nacionales armonizadas, entre las que se destacan la Política Nacional de Aguas y el Plan Nacional de Aguas, que propone una gestión planificada e integral de los recursos hídricos para el desarrollo sostenible de las diversas actividades económicas, sociales, y culturales vinculadas al agua; la estrategia Uruguay Agointeligente del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) que pone

al agua en una posición central como elemento de adaptación y de intensificación productiva ambientalmente sostenible; la normativa de Planes de Uso y Manejo de Suelo y de Planes de Lechería Sostenible; y la propia Política Nacional de Cambio Climático, que consagra la gestión integrada del recurso para asegurar su disponibilidad y calidad. Se desprende del anterior listado no exhaustivo de políticas, que la dimensión de los recursos hídricos está muy integrada en los marcos de política ambiental y productiva del país.

La actividad agropecuaria se presenta como uno de los principales factores de riesgo que pueden amenazar la integridad de los ecosistemas, los recursos naturales y los sistemas hidrológicos. Los impactos de la actividad agropecuaria sobre la calidad del agua son diversos, incluyendo: efectos sobre la química del agua (generando el fenómeno de eutrofización), modificación de la red trófica, lavado de biocidas, aumento de la carga orgánica por erosión del suelo y vertido de efluentes, alteración de los ciclos hidrológicos entre otros (Moss, 2007). La eutrofización es un proceso de enriquecimiento de nutrientes en los cuerpos de agua, ya sea natural o artificial, principalmente por fósforo y nitrógeno (National academy of Science, 1969). Este aumento de nutrientes provoca cambios en las poblaciones de microorganismos en el agua (cianobacterias y otros descomponedores) que disminuyen la disponibilidad de oxígeno provocando la muerte de peces y otros organismos que necesitan oxígeno libre, deteriorando tanto la cadena trófica del ecosistema acuático (Murphy, 2002) como la calidad del agua para consumo humano, aumentando los costos de potabilización (Arocena et al., 2008). La cuenca del Río Santa Lucía presenta problemas de eutrofización de sus embalses y arroyos y se ha identificado al uso del suelo para actividades agropecuarias entre las principales fuentes de aporte de nutrientes (Arocena et al., 2008; Chalar et al., 2013; Chalar et al., 2017).

Por otra parte, Uruguay está embarcado en el esfuerzo mundial ante los desafíos provocados por el cambio climático. En particular, está comprometido con un conjunto de metas y medidas de mitigación y adaptación a 2025, enmarcadas en la Contribución Determinada Nacional (CDN) ante el acuerdo de París de la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMNUCC). Estos compromisos están refrendados y articulados en la Política Nacional de Cambio Climático que es el marco estratégico articulador de la política climática (otro instrumento alineado en este marco, y relevante en el contexto de estudio es el Plan Nacional de Adaptación para el Sector Agropecuario).

La producción lechera puede traer como resultado emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) de los sistemas de tratamiento de efluentes. Las emisiones más significativas se asocian al manejo del estiércol por medio de sistemas basados en líquidos. Las emisiones de N<sub>2</sub>O resultantes de la gestión del estiércol varían significativamente entre los tipos de sistemas de tratamiento de efluentes utilizados y, además, pueden provocar emisiones indirectas debidas a otras formas de pérdida de nitrógeno del sistema. Cuando el estiércol se almacena o se procesa como líquido (p. ej., en lagunas, estanques, tanques o pozos), se descompone anaeróbicamente y puede producir una cantidad significativa de CH<sub>4</sub>,

mientras que cuando se maneja como sólido o cuando se deposita en pasturas, tiende a descomponerse bajo condiciones más aeróbicas y se produce menos CH<sub>4</sub> (IPCC, 2006).

Entonces, la gestión de los efluentes de la actividad lechera adquiere una doble relevancia ya que afecta a la misma vez, tanto a la contribución de contaminantes del agua, como a las emisiones de GEI. Esto podría manifestarse como una tensión entre los objetivos locales y objetivos globales, que no necesariamente se mueven en el mismo sentido: una mejor gestión de efluentes puede implicar una mejora en la calidad de agua de una cuenca hidrográfica, mientras que, al mismo tiempo, dependiendo del sistema que se aplique, podría significar un incremento en las emisiones de metano de los propios sistemas de gestión de efluentes.

Este problema ambiental tiene su correlato, y posiblemente una de sus causas principales, en un típico problema económico de externalidades negativas: tanto las emisiones de GEI, como el aporte de contaminantes del agua, son efectos provocados por las decisiones económicas privadas sobre el conjunto de la sociedad; el problema surge del hecho de que las emisiones y sus efectos negativos son “externos” a la ecuación económica de los agentes privados que las producen y no se resuelven por ningún mecanismo de mercado o de contratos existente. La presencia de externalidades legitima la intervención del ministerio para la gestión de efluentes con la Convocatoria de la Cuenca de Santa Lucía.

### ***3. Los Planes de Lechería Sostenible y la Convocatoria de la Cuenca de Santa Lucía***

En marco de las políticas antes referidas, el MGAP ha apoyado a la restitución de la calidad de agua en las principales cuencas prioritarias del país, poniendo en práctica varias líneas de trabajo.

Los Planes de Lechería Sostenible aplicados dentro de la política de suelos y agua de la DGRN, son una importante herramienta para identificar el riesgo ambiental potencial en la cuenca, así como para conocer la situación actual de cada establecimiento lechero. Todos los productores de la cuenca del río Santa Lucía están obligados a presentar un plan que incluye el manejo agrícola, el plan de fertilizaciones y una declaración del manejo de efluentes. Según informes de Delgado (2019) para DGRN, el 50% de los establecimientos lecheros en la cuenca del río Santa Lucía cuenta con un PLS; en términos de área, la cobertura de los planes alcanza al 55% de la superficie lechera.

En complemento a esta herramienta, la Convocatoria de la Cuenca del Río Santa Lucía ejecutada por la Dirección de Desarrollo Rural y financiado por el Banco Mundial a través del proyecto Desarrollo y Adaptación al Cambio Climático, apoyó entre los años 2017 y 2020 a 375 productores lecheros de la cuenca para llevar adelante inversiones cuyo objetivo es

establecer soluciones para la gestión de los efluentes de la actividad<sup>4</sup>. En términos de montos, el apoyo ascendió a 6.390.000 dólares, destinados principalmente a inversiones y prácticas de gestión, incluyendo también apoyo en forma de asistencia técnica. En el cuadro 1 se muestran las principales actividades presentadas.

Una exigencia de la convocatoria, fue que todos los proyectos aprobados debían tener un PLS presentado, de este modo las propuestas partirían de un diagnóstico técnico validado por la DGRN, de esta forma las soluciones propuestas guardarían una relación coherente con la situación de partida.

**Cuadro 1. Frecuencia de actividades en los proyectos de la convocatoria**

Actividades	Frecuencia
Cantidad de proyectos	375
Distribución	335
Construcción o reparación de piletas	181
Desarenadores	32
Separador de sólidos	128
Biodigestores	10
Aumento número de órganos	47
Recirculación de efluentes	26
Desvío de pluviales	100

Si bien, tal como surge del cuadro 1, las opciones técnicas disponibles en la convocatoria muestran cierto grado de diversidad y amplitud, puede describirse, al menos en grandes rasgos, una configuración estilizada, consistente en alguna forma de separador de sólidos, presencia de una o dos piletas de acumulación de efluentes clarificados, y reutilización o disposición final del efluente líquido a campo, evitando la descarga a los cursos de agua. Esta propuesta tecnológica fue discutida y acordada entre el MGAP, el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, y el Instituto Nacional de la Leche; por lo tanto, cuenta con una amplia validación interinstitucional.

#### **4. Herramienta de cálculo de emisiones asociadas a los sistemas de gestión de efluentes en tambos**

La herramienta desarrollada para el cálculo de las emisiones de los establecimientos lecheros permite modelar la diversidad de posibles alternativas de gestión de efluentes, a través de la selección de las unidades que los componen, y cuantificar las emisiones e impactos ambientales asociadas<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Se presentaron 452 propuestas, finalmente firmaron contrato y comenzaron ejecución 375 de ellas.

<sup>5</sup> Disponible en: <https://biovalor.gub.uy/descarga/estimacion-de-emisiones-en-los-sistemas-de-gestion-de-efluentes-de-establecimiento-lecheros/>

Los impactos seleccionados para la evaluación de los sistemas son el Calentamiento Global y la Eutrofización, dado que estos son los que reflejan los efectos ambientales de mayor significancia vinculados a estos establecimientos. La cuantificación de estos impactos ambientales se realiza por la determinación de los indicadores de categoría, a partir de los correspondientes factores de caracterización para Potencial de Calentamiento Global (IPCC, 1996) y para Potencial de Eutrofización (Heijungs et al., 1992), a través de los cuales se cuantifica la contribución de cada contaminante.

**Cuadro 2. Factores de caracterización.**

Contaminante	Potencial de Calentamiento Global (kgCO <sub>2</sub> eq/kg)	Potencial de Eutrofización (kgPO <sub>4</sub> eq/kg)
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	1	
Metano (CH <sub>4</sub> )	21	
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	310	
Nitrógeno (N)		0,42
Fósforo (P)		3,06
Demanda Química de Oxígeno (DQO)		0,022

Por su parte, la cantidad efectiva de estiércol generado en las instalaciones, el cual debe ser recolectado y gestionado, queda definido por las características del sistema productivo, ya sea por su influencia en las excretas diarias de los animales, como por el tiempo que estas permanecen en las instalaciones (Gutiérrez y Cabrera, 2006). La caracterización de los efluentes generados en este tipo de establecimiento se basa en investigaciones realizadas (Gutiérrez y Cabrera, 2012), además de la experiencia de trabajo con este sector y aportes de expertos vinculados.

La diversidad de sistemas posibles para la gestión de los efluentes de tambos, hace necesario que la herramienta cuente con suficiente flexibilidad para modelar estas diferentes alternativas tecnológicas y sus posibles configuraciones. Los procesos unitarios deben abarcar desde la separación de sólidos y su acopio en pilas o compostaje, hasta las lagunas de acumulación del efluente, la digestión anaerobia; mientras que el destino del efluente final debe incluir el vertido, la recirculación o la aplicación a campo.

Una vez definido el sistema de gestión de los efluentes, la herramienta determina la distribución de los flujos a partir de la información de desempeño para cada unidad, y las emisiones de contaminantes resultantes. Para ello se basa en los mecanismos de liberación de contaminantes que se detalla en el cuadro 3.

**Cuadro 3. Mecanismos de liberación de contaminantes.**

		<b>Mecanismo de liberación de contaminantes</b>	<b>Parámetros en la determinación</b>
<b>Potencial Calentamiento Global</b>	<b>de</b>	Emisiones CO2 por consumo de combustibles / energía eléctrica	Tiempo de funcionamiento y rendimiento en el consumo de combustible / energía eléctrica  Factor de emisión del combustible / energía eléctrica
		Emisiones CH4 por anaerobiosis en sistema de gestión	Factor de conversión de metano por sistema de gestión
		Emisiones directas de N2O en sistema de gestión	Factor de emisión directa por sistema de gestión
		Emisiones indirectas de N2O en sistema de gestión	Nivel de pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviación por sistema de gestión  Factor de emisión de óxido nitroso por volatilización y lixiviación
		Emisiones evitadas por sustitución de fertilizantes	Factor de emisión del fertilizante sustituido
		Emisiones evitadas por sustitución de energía eléctrica	Factor de emisión de la energía eléctrica sustituida
		Emisiones evitadas por sustitución de combustibles	Factor de emisión del combustible sustituido
<b>Potencial Eutrofización</b>	<b>de</b>	Emisiones de N, P y DQO	Nivel pérdidas de N, P y DQO por sistema de gestión
		Emisiones evitadas por sustitución de fertilizantes	Factor de emisión del fertilizante sustituido

De esta manera, la aplicación de la herramienta arroja los resultados de ambos indicadores de impacto tanto totales como para cada proceso, además del diagrama de flujo con las distintas corrientes de efluentes y el balance de los distintos contaminantes considerados.

La herramienta desarrollada es de muy fácil uso, solo se requiere el ingreso de las principales características productivas de los establecimientos modelados, en el anexo 1 se listan dichos parámetros. Si bien se requiere ingresar algunos parámetros técnicos respecto al desempeño de las unidades, se cuenta con valores por defecto que sirven como base para el cálculo, que pueden ser modificadas a medida que se obtenga información más precisa.

## **5. Contribución al monitoreo de la implementación de las medidas de mitigación de la CDN**

En la sección 2 se introdujeron brevemente los principales lineamientos estratégicos de la política climática seguidos por el país; para este trabajo, la CDN es de particular relevancia. La CDN tiene como principales objetivos de mitigación la disminución de la intensidad de emisiones GEI (en términos de emisiones por punto del PIB o por unidad de alimentos) y presenta a su vez una serie de medidas concretas de mitigación y adaptación a través de las cuales se busca cumplir con los objetivos globales del compromiso.

Las emisiones de gases de efecto invernadero del país tienen la particularidad de que están dominadas en gran medida por las emisiones provenientes de la actividad agropecuaria. Según el último Inventario Nacional de GEI (2017), las emisiones agropecuarias dan cuenta del 75% del total nacional, así como el 100% del secuestro de carbono. Este particular perfil de emisiones ha determinado que la CDN tenga un fuerte énfasis en medidas y objetivos específicos del sector, dentro de los cuales se incluye la mejora de los sistemas de tratamiento de efluentes de los tambos como medida para mitigar emisiones de CH<sub>4</sub>:

*“Utilización de tecnologías de cero descarga a ríos y arroyos y/o aplicación de buenas prácticas de tratamiento de efluentes y/o recuperación de los nutrientes y minimización de las emisiones de metano en al menos 40% de los establecimientos lecheros”.*

Con el objetivo de dar seguimiento al avance de la implementación de las metas y medidas comprometidas en la CDN, Uruguay ha desarrollado un sistema de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de la CDN que cuenta con un visualizador web para garantizar el acceso a la información a la ciudadanía<sup>6</sup>. En el marco del sistema MRV, el MGAP ha desarrollado indicadores de cumplimiento para cada uno de los objetivos y medidas de la CDN para el sector agropecuario. En particular para el seguimiento de la medida de mitigación referente a los establecimientos lecheros se optó por usar la información generada por los planes de lechería sostenible como fuente de datos, combinada con la aplicación del modelo arriba descrito con el fin de clasificar con criterios cuantitativos los sistemas de tratamientos de efluentes en términos de emisiones de GEI y descarga a cursos de agua.

A partir de la aplicación del modelo para los planes lecheros que declararon tener los sistemas propuestos en el plan como construidos, se logró clasificar los establecimientos según si minimizan emisiones de GEI y/o evitan la descarga a ríos y arroyos con un soporte metodológico robusto que permitió cuantificar las emisiones GEI globales de los sistemas y particulares de cada unidad dentro de los sistemas. Una vez identificadas aquellas unidades de los sistemas de tratamiento que aseguran mínimas emisiones y cero descargas, se

---

<sup>6</sup> Enlace: <http://monitorcdn.mvotma.gub.uy/medidas-adaptacion>



elaboró un árbol de clasificación en función de la presencia o ausencia de éstas. Las principales unidades que deben tener los sistemas para ser considerados en el cumplimiento de la medida son:

- *Separador de sólidos.* la presencia de un separador de sólidos previo a la entrada del material a las piletas, reduce la cantidad de sólidos (carga orgánica) que llega a las piletas, disminuyendo considerablemente las emisiones de CH<sub>4</sub> resultantes de la digestión anaeróbica de la materia orgánica.
- *Biodigestor.* Esta unidad permite capturar el CH<sub>4</sub> emitido en las piletas y transformarlo tanto en energía eléctrica como térmica. En una configuración ideal, sería deseable contar con esta unidad para la minimización de emisiones GEI.
- *Fertirriego o reutilización del efluente clarificado.* Si bien el impacto en términos de emisiones de GEI no es tan significativo, se incluye en la medida de la CDN como forma de explicitar los compromisos que se presentan entre los impactos ambientales globales vs los locales. En definitiva, se pretende mitigar las emisiones de GEI promoviendo sistemas que al mismo tiempo minimicen otros impactos ambientales.

Los resultados se presentan en el cuadro 4 y su lectura es bastante directa. De manera operativa, se definió que los productores en cuyo PLS declaran expresamente que el destino del efluente es distinto a cursos de agua y simultáneamente declaran hacer fertirriego de efluentes o reutilización del agua, tienen prácticas de cero descargas; según esta primera aproximación más laxa, el 80,8% de los establecimientos con plan presentado cumple con esta buena práctica. A medida que la definición de buenas prácticas se torna más estricta, la frecuencia de adoptantes empieza a caer; cuando se exige adicionalmente que el sistema cuente con pileta de acumulación, la frecuencia pasa al 46,7%. Lo mismo sucede cuando se exige adicionalmente que el sistema cuente con un separador de sólidos, así definida la práctica, la frecuencia es apenas un 6,9%. Recuérdese de la sección 3 que justamente esta es una de las actividades más frecuentes entre las propuestas proyectadas en la CCSL, por lo que esta sería una importante contribución de la convocatoria.

**Cuadro 4. Incidencia de buenas prácticas de gestión de efluentes.**

Definición	PLS que cumplen definición	Proporción PLS
cero descarga	400	80,8%
cero descarga + pileta	231	46,7%
cero descarga + pileta +(desarenador o separador de sólidos)	91	18,4%
cero descarga + pileta + separador de sólidos	34	6,9%
cero descarga + biodigestor	2	0,4%
<b>total planes válidos presentados</b>	<b>495</b>	

Si bien esta información es parcial y se limita sólo al universo de productores que han presentado planes de lechería sostenible, permite tener una primera noción acerca del grado de implementación de la medida y dar soporte metodológico al indicador propuesto, ya que se logró cuantificar caso a caso las emisiones de los sistemas de tratamiento de efluentes de los planes, apoyando el abordaje de clasificación cualitativo propuesto para el seguimiento. Si bien hasta el momento el área de influencia de los planes se limita a la cuenca del Río Santa Lucía, se espera que la política se extienda en un futuro a todo el territorio nacional.

## **6. El impacto de la convocatoria**

El modelo descrito en sección 4 está diseñado para representar un tambo representativo a partir de un conjunto de parámetros de entrada; mientras que el objetivo de esta investigación implicaba hacerlo para cada uno de los tambos con proyectos en la convocatoria. Por otro lado, si bien la información contenida en los PLS y en los propios proyectos, es suficiente para alimentar los parámetros de entrada del modelo, no tienen exactamente el mismo desglose y alcance. Por estas razones fue necesario un intenso trabajo de adaptación del modelo y de desarrollo de un conjunto de funciones para mapear y conformar los datos de entrada desde ambas fuentes de información hacia el modelo adaptado. El cuadro 7 en el anexo 1 detalla el conjunto de parámetros de entrada del modelo.

Antes de entrar directamente a los resultados, resulta procedente presentar los supuestos realizados en la aplicación.

Solo se consideraron los efectos directamente ligados a la gestión de los efluentes, por consiguiente, se suponen constantes el rodeo de ordeño y la producción lechera. En el marco de esta intervención, esto no constituye una limitación importante dado que los objetivos de la misma, apuntaban casi exclusivamente a la gestión de efluentes; en otras intervenciones en lechería, deberá considerarse la integralidad del sistema, especialmente en aquellas en las que se afecte la producción y la productividad.

El cambio en algunas prácticas y características de la infraestructura de ordeño afectan el tiempo que el ganado permanece en la sala, y de esta manera, la cantidad de efluentes generados. Si bien el modelo permite acomodar estos efectos, y la información está disponible en los PLS para la línea de base; no todas estas características están disponibles entre la información de las actividades del proyecto; por tanto, la cantidad de ordeños diarios y el número de lotes de ordeño se asumen iguales tanto en la situación sin proyecto como en la situación con proyecto. Por el contrario, sí son tenidos en cuenta el aumento del número de órganos de ordeño, las actividades de desvío de pluviales y las actividades de reutilización del agua productos del proyecto, que disminuyen el tiempo de estadía animal en la sala o la cantidad de agua que entra en los sistemas.

La digestibilidad de la dieta de las vacas en ordeño es otro factor que afecta los resultados, sin embargo, no se dispone de estimaciones a nivel de establecimiento para permitir la variación individual de dicho parámetro, en consecuencia, también se lo supuso constante entre productores.

La idea central de la metodología consiste en comparar la estimación de las emisiones, tanto en la situación de los productores antes de la intervención (línea de base, o situación sin proyecto), como en la situación hipotética en que todos los proyectos fueron ejecutados (escenario post proyecto, o situación con proyecto).

Se estimó el modelo para todos los proyectos de la convocatoria de la cuenca de Santa Lucía a partir de la información de prácticas y componentes de gestión de efluentes de los Planes de Lechería Sostenible como forma de estimar una línea de base<sup>7</sup>. Con la información de seguimiento de la convocatoria, relativa a las actividades y soluciones en gestión de efluentes propuestas en esos proyectos, se estimó la situación potencial post proyecto.

Finalmente, con la diferencia entre las dos situaciones estimadas, agregada para todos los productores participantes, se calculó el impacto o la contribución del proyecto CCSL en ambos indicadores ambientales.

Los supuestos que permiten interpretar los resultados en clave de impacto, son, en primer lugar, que la situación de línea de base sería la situación tendencial que efectivamente se presentaría sin la presencia de la CCSL; en segundo lugar, la situación luego del proyecto supone que se ejecutan las metas completamente y en forma correcta. El segundo supuesto es habitual en ejercicios con perspectiva a priori o ex-ante (además de que es revisable una vez que sea posible incorporar una perspectiva a posteriori o ex-post, al incluir la información del grado de cumplimiento efectivo de metas); el primero de ambos supuestos se relaciona con el problema central de la evaluación de impactos atribuidos y no es contrastable, pero en el escenario específico de esta intervención, es razonable que la situación en cuanto a la gestión de los efluentes se mantenga; en primer lugar porque se trata de inversiones relativamente importantes en obras y prácticas que no tienen una conexión (al menos en forma directa) con un aumento de ingresos o reducción de costos; en segundo lugar, en el contexto crítico por el que atraviesa el sector, no es esperable que este tipo de inversiones sean priorizadas por los productores en el corto plazo.

---

<sup>7</sup> Se estimó el modelo para los proyectos con PLS válidos; del total de 375 proyectos, existen 76 casos cuyos planes todavía estaban en proceso de validación al momento de escribir este artículo.

**Cuadro 5. Resultados del proyecto. Eutrofización cursos agua y emisiones GEI.**

	Cantidad de proyectos	Eutrofización agua (kg PO4 eq./año)	Emisiones GEI (kg CO2 eq./año)
Situación post proyecto	299	165.841	8.008.597
Situación línea de base	299	337.920	7.810.048
Cambio incremental (PP-LB)	299	<b>-172.080</b>	<b>198.549</b>
Como % de nivel de LB		<b>-51%</b>	<b>2.5%</b>

Los resultados reportados en el cuadro 5 muestran que gracias a la ejecución del proyecto Convocatoria de la Cuenca del Santa Lucía se logra una fuerte disminución del potencial de eutrofización del agua, de 172.080 kg de PO4 equivalente al año, que en relación al nivel de línea de base implica una disminución del 51% de los contaminantes que terminan llegando a cursos de agua. En este sentido, el proyecto sería exitoso en cuanto a la consecución de su objetivo de contribuir a mejorar la calidad del agua en la cuenca.

Por otra parte, como se adelantó en la sección segunda, la gestión de los efluentes también tiene implicancias en cuanto a las emisiones de GEI, por lo tanto, es de interés observar que sucede con el indicador respectivo; como se desprende del cuadro 5, la ejecución del proyecto implica un aumento de emisiones de GEI, respecto a situación tendencial, de unos 198.549 kg de CO2 equivalente por año, lo que constituye un efecto indeseado del programa. En términos relativos a las emisiones estimadas en línea de base, este cambio incremental representa un aumento del 2,5%. Según el INGEI (2017), las emisiones netas del sector agropecuario se estimaron en 11.809 Gg de CO2 equivalente; en relación a esta magnitud, el incremento de emisiones del proyecto significa un 0,0017%, o sea, menos de quinientas partes de un 1%.

Ambos hallazgos están alineados con los reportados por Sena (2016), aunque en el caso del indicador de potencial de calentamiento, los resultados de aquel trabajo son varias veces mayores; dicha diferencia podría surgir de la forma de construir la situación de línea de base, que en la presente investigación es la situación actual efectiva declarada por cada productor.

El objetivo del proyecto es la contribución a mejorar la calidad de agua en la cuenca y es en base a este indicador que debe ser evaluado. Sin embargo, tampoco debe soslayarse que en un marco complejo de objetivos y herramientas como lo es la política ambiental (considerada como un conjunto más o menos armonizado), pueden surgir tensiones entre múltiples objetivos perseguidos.

Para comparar correctamente estos movimientos en sentido opuesto (emisiones GEI en aumento, contaminantes de agua en descenso), y considerando que se trata de magnitudes diferentes, se propuso un análisis costo-beneficio a nivel de bosquejo. Ambos productos de la intervención fueron valorizados en términos monetarios (en un horizonte de 10 años) y

descontados a una tasa adecuada que refleje preferencias sociales entre presente y futuro (y que en este ejercicio se fijó en 5,5%). La inversión inicial considerada es la suma de las inversiones de cada uno de los 299 proyectos bajo consideración, la cual asciende a 5.142.703 US\$. Se incluyeron en el análisis gastos anuales de mantenimiento y reinversión iguales al 7,5% del monto de las inversiones.

El problema con esta aproximación es que en general no existen los mercados de estos bienes (o males) económicos, y por lo tanto no hay un precio obvio con el que hacer la cuantificación monetaria. La problemática de la valoración y costeo ambiental y de servicios ecosistémicos ha generado una profusa literatura cuya discusión excede largamente el alcance de este artículo; sin embargo, a los efectos de ilustrar los resultados en clave de costo-beneficio, se consideró válido tomar como referencia los antecedentes más directos. Es por ello que se decidió utilizar el mismo precio para contaminación de agua considerado en Sena (2016), tomado a su vez de Hernandez Sancho et al. (2009); en donde los autores estiman el precio sombra de los contaminantes como el beneficio ambiental por costos evitados asociado a la disminución de nutrientes; el precio resultante es de 30,94 dólares por kg de fósforo. Adicionalmente, se consideraron disminuciones arbitrarias de dicho precio para analizar la sensibilidad de los resultados a este factor.

Por último, dado que los precios referidos están en términos de dólares por kilo de fósforo, fue necesario transformar la cantidad de nutrientes evitados, expresados en términos de kilos de fosfatos equivalentes, y llevarlos a kilos de fósforo<sup>89</sup>.

Utilizar referencias de precios contexto-específicas y trasladarlas a un ejercicio de valoración fundamentalmente local, constituye una limitación adicional que debe ser tenida en consideración al interpretar los resultados.

En cuanto a la valuación de las emisiones de GEI se siguieron las conclusiones del *“Reporte de la comisión de alto nivel sobre los precios del carbono”* (Stiglitz et al., 2017). El informe presenta un espectro amplio de valores que considera estimaciones de precios compatibles con los objetivos de calentamiento del acuerdo de París. Este gradiente, que va desde 40 a 100 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, refleja la incertidumbre y diversidad de

---

<sup>8</sup> Para dicha transformación se utilizó un factor de 0,33 kg de fósforo por kg de PO<sub>4</sub>. El factor responde a la razón de masas de los átomos en la molécula de PO<sub>4</sub>.

<sup>9</sup> En rigor cada uno de los nutrientes debería valorarse con un precio particular, al valorarlos todos en términos de fósforo se está haciendo una simplificación adicional. No obstante, los precios de nitrógeno encontrados en el mismo artículo de referencia, son muy similares a los del fósforo (Hernandez Sancho et al., 2009).

puntos de vista presentes en el debate respecto a la valuación del carbono para lograr los objetivos respecto al calentamiento global.

**Cuadro 6. Sensibilidad del VAN ante cambios en los precios, en miles de dólares.**

<u>Contaminación de agua</u> <u>en US\$/kg PO4 eq.</u>	<u>Emissiones GEI en US\$/kg CO2 eq.</u>			
			0,020	0,060
50%	15,47	- 1.566	- 1.655	
80%	21,66	1.052	962	
<b>100%</b>	<b>30,94</b>	<b>4.979</b>	<b>4.889</b>	

Nota: Horizonte temporal 10 años, tasa de descuento 5,5%. Inversión 5.142.703 US\$. reinversiones 7,5% anual.

Finalmente, el cuadro 6 muestra el análisis de sensibilidad del valor actual neto ante variaciones de los precios de ambos productos. Observando la última línea, que presenta el VAN para el precio de referencia de la contaminación de agua, se concluye que el proyecto es favorable para la sociedad, en cuanto el beneficio neto del proyecto en disminución del potencial de eutrofización de agua es mayor que la suma de las inversiones del proyecto y de los costos ambientales monetizados producto del aumento de emisiones de gases de calentamiento. Si se consideran valores ambientales menores para la calidad de agua, esto es, las líneas 1 y 2 del cuadro 6, el valor económico que el proyecto implica para la sociedad empieza a disminuir; en el caso en que el verdadero precio de la calidad del agua para la sociedad fuese la mitad del precio de referencia, independientemente de la valoración de los efectos sobre los gases de calentamiento, las conclusiones se revertirán y el proyecto no sería conveniente. Esto no hace más que resaltar la importancia de acumular conocimiento y evidencia en estas áreas de investigación.

## **7. Comentarios finales**

Este artículo realiza una contribución empírica relevante en un problema de interés para la sociedad y la política pública en donde la acumulación de trabajos cuantitativos basados en aplicaciones concretas todavía no es suficiente. Se aplicaron datos administrativos reales a nivel de establecimiento proveniente de declaraciones de sistemas de tratamiento de efluentes y de actividades proyectadas en tambos para calcular la contribución en la disminución de contaminantes de agua en la cuenca del río Santa Lucía. Para ese propósito, se utilizó una adaptación del modelo de emisiones recientemente desarrollado por el proyecto Biovalor.

Los resultados encontrados son promisorios en cuanto al objetivo del proyecto: la Convocatoria de la Cuenca de Santa Lucía tendría un impacto en la disminución del potencial de eutrofización de agua del orden del 51% de la estimación de esa magnitud en la situación de línea de base. El proyecto tiene un resultado colateral negativo respecto a las emisiones de GEI que aumentan un 2,5% respecto a su nivel estimado de línea de base; sin embargo,

se mostró que en relación costo-beneficio el proyecto genera una mejora agregada. Las conclusiones son sensibles al valor que se asigne a la calidad de agua.

La investigación tiene algunas limitaciones propias de trabajar con datos administrativos: la periodicidad de las declaraciones, que en algunos casos se solapó con la ejecución de los proyectos, podría implicar la posibilidad de confundir acciones del proyecto con características previas de línea de base; por otro lado, algunos parámetros interesantes y con potencial impacto, no pudieron ser tenidos en cuenta (o se consideraron como supuesto) por falta de información específica. Levantar estas restricciones puede abrir futuras líneas de trabajo de investigación en la temática.

Por último, la presente es una estimación desde una perspectiva *ex ante*; una vez ejecutados los proyectos, se puede enriquecer el análisis estimando nuevamente la situación “con proyecto” desde una perspectiva *ex post* con los datos efectivos de actividades realizadas.

## Referencias

- Aguirre, E., Baraldo, J., Durán, V. (2018). Evaluación costo beneficio *ex-ante* del proyecto DACC Adicional. Anuario OPYP 2018.
- Arocena R, Chalar G, Fabián D, De León L, Brugnoli E, Silva M, Rodó E, Machado I, Pacheco JP, Castiglioni R, Gabito L. (2008). Estado Trófico de Embalses P. Severino y Canelón Grande. Informe final del convenio DINAMA- Facultad de Ciencias. Evaluación ecológica de cursos de agua y biomonitorio.
- Chalar, G., Delbene, L., González-Bergonzoni, I., & Arocena, R., 2013. Fish assemblage changes along a trophic gradient induced by agricultural activities (Santa Lucía, Uruguay).
- Chalar, G. Gracia-Pesenti, P., Silva-Pablo, M. Perdomo, C., Olivero, V. & Arocena, R., 2017. Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production. *Limnologia*. 65, 76-84.
- Delgado, S. 2019. Informe Planes de Uso para cultivos agrícolas y forrajeros en Sistemas Lecheros (PLS) y Análisis Riesgo Ambiental Tambos. Montevideo. DGRN, documento de trabajo.
- Emmer, V. (2020). Estimación de los potenciales de Calentamiento Global y Eutrofización en los sistemas de gestión de efluentes de establecimientos lecheros. Desarrollo de una herramienta de cálculo. Proyecto Biovalor. Uruguay. En elaboración
- Gutiérrez, S. y Cabrera, N. (2006). Estimación de los parámetros nacionales y básicos para el procesamiento y utilización de los residuos sólidos y líquidos de tambos. Proyecto INIA\_FPTA nº 138.
- Gutiérrez, S. y Cabrera, N. (2012). Estimación de los parámetros nacionales y básicos para el procesamiento y utilización de los residuos sólidos y líquidos de tambos. Parte 1: Caracterización de la descarga. Ingeniería Química. Publicación técnica e informativa de la Asociación de Ingenieros Químicos del Uruguay. Cuarta época - Número 41.
- IPCC 1996. Second Assessment Report of the IPCC, 1996.

IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K.

Heijungs et al, (1992). Environmental Life Cycle Assessment of products. Backgrounds. Centre of Environmental Science - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research - Fuels and Raw Materials Bureau.

Hernandez-Sancho, F., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R. (2009). "Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain". Science of the total environment, 408 (2010), pp. 953-957.

MVOTMA, SNRCC. (2019). "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2017". Montevideo.

Murphy, S. 2002. General information on phosphorus. Boulder. USGS Water Quality Monitoring.

Sena, G. (2016). "An evaluation of externalities of using dairy effluent as biofertilizer". Tesis de maestría. University of Hertfordshire. Hertfordshire.

SNRCC, 2017. Tercer Informe Bienal de Actualización a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Uruguay.

Stiglitz, J.E. et al., 2017: Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC), 68 pp.

## Anexo 1

**Cuadro 7. Parámetros de entrada del modelo y origen de los datos**

Variable de entrada	fuelle dato LB	Fuente dato PP
Cantidad de vacas ordeñe	PLS	supuesto constante
Número de órganos	PLS	CCSL
Producción media leche	SNIG	supuesto constante
Cantidad de ordeñes	PLS	supuesto constante
Lotes de ordeñe	PLS	supuesto constante
Tiempo ordeñe por vaca	PLS	PLS
Uso de agua	PLS	supuesto constante
Superficie de pluviales	PLS	CCSL
Desarenador	PLS	CCSL
Laguna efluente bruto	PLS	CCSL
Separador sólidos	PLS	CCSL
Acopio sólido separado	PLS	CCSL
Compostaje sólido separado	PLS	CCSL
Laguna efluente clarificado	PLS	CCSL
Vertido no controlado efluente	PLS	CCSL
Fertirriego controlado efluente	PLS	CCSL
Reutilización efluente	PLS	CCSL
Biodigestor	PLS	CCSL
Disposición efluente digerido	PLS	CCSL