

HUELLA DE CARBONO DE LA LECHE: UN CASO PILOTO

Rodolfo Bongiovanni,^{1,2*} María Paz Tieri³ y Noelia Nardi¹

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Manfredi

² Universidad Católica de Córdoba

³ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela

*E-mail: bongiovanni.rodolfo@inta.gob.ar

Recibido: 30/12/2023
Aceptado: 27/05/2024

RESUMEN

La huella de carbono (HC) de un producto como la leche representa la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y remociones de GEI en un sistema de producción, expresadas como dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) y basadas en un análisis de ciclo de vida (ACV), utilizando la categoría de impacto único de cambio climático. La HC es una medida de los impactos que provocan las actividades del hombre sobre el ambiente. El objetivo general de este estudio fue estimar la HC de la leche producida en la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) durante la campaña 2020-2021. La unidad declarada fue: 1 kg leche cruda a la salida del tambo (masa corregida por grasa y proteína; FPCM). Los objetivos específicos fueron: (i) estimar la HC de la leche FPCM, (ii) comparar los valores de HC de la leche con otros trabajos publicados y (iii) establecer una línea de base para implementar estrategias de mejora en búsqueda de la reducción y eventual neutralidad de emisiones. El estudio fue de tipo exploratorio y descriptivo y siguió los métodos de las normas ISO del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), de la International Dairy Federation, el modelo LEAP de FAO y de las Reglas de Categorías de Productos (PCR) de Environdec. La HC resultó en $0,89 \text{ kg de } \text{CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ leche cruda a la salida del tambo (FPCM). Este valor se encuentra en un rango bajo en relación con los valores reportados por la bibliografía.

Palabras clave: cambio climático, impacto ambiental, potencial total de calentamiento global, producción y consumo responsable, valor agregado ambiental.

CARBON FOOTPRINT OF MILK: A CASE STUDY

ABSTRACT

The Carbon Footprint (CF) of a product, such as milk, represents the sum of greenhouse gas (GHG) emissions and GHG removals in a production system, expressed as carbon dioxide equivalent (CO_2eq) and based on a Life Cycle Assessment (LCA), using the single climate change impact category. It is the measure of one of the impacts caused by human activities on the environment. The general objective of this study was to carry out a CF of the milk produced at the Manfredi Agricultural Experimental Station of the National Institute of Agricultural Technology (INTA) during the 2020-2021 season. The declared unit was: 1 kg of raw milk at the gate of the dairy farm (fat and protein corrected mass; FPCM). The specific objectives were (i) to estimate de CF of milk FPCM, (ii) to compare the values of the CF of milk with the literature, and (iii) to establish a baseline to implement strategies in search of the reduction and eventual neutrality of emissions. The study is exploratory and descriptive. This work follows the methods of ISO standards, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the International Dairy Federation, the FAO LEAP model and the Environdec Product Category Rules (PCR). The carbon footprint resulted in $0.89 \text{ kg of } \text{CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ raw milk at the exit of the dairy (FPCM). This value is below the average of the results published in the literature.

Key words: climate change, environmental impact, total global warming potential, responsible production and consumption, environmental added value.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, un problema que afecta a todos los países del mundo, se debe principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de diversas fuentes, incluyendo los desastres naturales y las actividades humanas como la industria, la producción agropecuaria y el uso de combustibles fósiles. En este sentido, un indicador de sostenibilidad son las emisiones de GEI, que en la Argentina se vienen incrementando lenta, pero sostenidamente, siendo los sectores de energía y de producción agropecuaria los que más contribuyen a estas emisiones (MAyDS, 2023).

Las emisiones de GEI de una cadena de valor se pueden estudiar mediante la huella de carbono de producto (HC), que representa la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y remociones de GEI en un sistema de producción, expresadas como dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) (IRAM-ISO 14067, 2019). Se denomina HC porque todos los GEI distintos del CO_2 son convertidos a su valor de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) a través de multiplicar la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global. Conocer la cantidad de GEI (emisiones, remociones) que se emiten durante la generación de un producto sirve como punto de partida para una diversidad de acciones. Puede contribuir a la mitigación del cambio climático, mejorar la forma en que se utilizan los recursos naturales y/o aumentar el valor agregado de los productos a través de la implementación de ecoetiquetas.

Por lo tanto, los impactos ambientales de la producción de leche se pueden estimar a través del ACV, "desde la cuna hasta la tumba". Este método es útil también para hacer análisis parciales, "desde la cuna hasta la puerta", es decir, hasta un punto intermedio determinado. En definitiva, el ACV permite identificar puntos críticos de altas emisiones de GEI lo cual es clave para intervenir con estrategias de mejora de la eficiencia ambiental de la producción.

Si bien la Argentina es responsable de un bajo porcentaje de las emisiones globales de GEI (0,76%), se ubica en el puesto 23 entre los países emisores (Ritchie *et al.*, 2020). Al ratificar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el país asumió la obligación de presentar periódicamente sus inventarios nacionales. Según el inventario nacional del año 2020, el sector agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra contribuyó con el 45% del total de las emisiones. El ganado es responsable del 34% de estas emisiones, principalmente a través de

metano (CH_4) entérico seguido por el óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) (MAyDS, 2023). Al mismo tiempo, a través de la Resolución 51/2019, la Argentina adhirió a la "Declaración de Rotterdam", documento que impulsa al desarrollo sostenible del sector lechero. Esta declaración fue formulada en 2016 por la FAO y la Federación Internacional de Lechería.

El sector lácteo argentino está compuesto por una cadena de valor que cuenta con una alta complejidad, con un eslabón primario atomizado, actualmente constituido por 10076 tambos, los cuales presentan heterogeneidades en cuanto a la distribución geográfica y al modelo productivo. Según el Observatorio de la Cadena Láctea Argentina (OCLA, 2023), el 98% de los establecimientos están ubicados en las provincias de Santa Fe (34,6%), seguido por Córdoba (29,1%), Buenos Aires (20,8%), Entre Ríos (7,9%), Misiones (2,7%), Santiago del Estero (2%) y La Pampa (1,4%).

A nivel global, se espera que la demanda de proteína de origen animal se incremente de manera constante debido al aumento de la población mundial y a los procesos de mejora económica y urbanización en Asia. Por lo tanto, si bien el incremento de demanda puede ser favorable para países como la Argentina, la producción animal transita una situación compleja dada por el desafío de atender una demanda creciente de productos de origen animal y el compromiso de disminuir el impacto ambiental de la producción primaria. Esto último requiere mejorar la eficiencia productiva ya que se cuenta con pocas posibilidades de aumentar las superficies manteniendo un compromiso de sostenibilidad ambiental.

En la Argentina existe escasa documentación sobre el impacto "potencial de calentamiento global" de la leche, o HC, usando metodologías consensuadas a nivel mundial, que sean certificables o verificables con ecoetiquetas de Tipo III, como la Declaración Ambiental de Producto (EPD), basada en ACV, la norma ISO 14025 y las Reglas de Categoría de Producto (PCR).

Este trabajo analizó la producción de leche de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del INTA (Córdoba, Argentina), que cuenta con un tambo confinado de vacas en ordeño raza Holando cruza por Jersey. En este tambo se producen en promedio $34 \text{ l día}^{-1} \text{ vaca}^{-1}$ en ordeño, es decir, que la producción mensual rondó los 300 mil l de leche. A su vez, el tambo cuenta con una guachera de crianza colectiva con carro distribuidor, dos galpones con "cama de compost" de 3000 m^2 cada uno, con capacidad máxima para 180 vacas. Estos galpones permiten intensificar la producción de leche en

condiciones confortables para las vacas en ordeño y están diseñados para un correcto manejo de los efluentes. Las camas de compost, también conocidas como "bedded-packs" o "compost barns", son camas elaboradas con materiales orgánicos o inorgánicos ubicadas en espacios abiertos donde habitan las reses productoras de leche. Todos los animales están monitoreados por collares que miden actividad, rumia y producción, lo que permite detectar celo y enfermedades, y hacer más eficiente el uso de los recursos según los requerimientos de cada animal.

El objetivo general fue estimar la HC de la leche producida, tomando como caso piloto al tambo de INTA Manfredi durante la campaña 2020-2021. Los objetivos específicos fueron: (i) estimar la HC de la leche (expresada como masa corregida por grasa y proteína; FPCM por sus siglas en inglés), (ii) comparar los valores de HC de la leche con otros trabajos publicados y (iii) establecer una línea de base para implementar estrategias de mejora en búsqueda de la reducción y eventual neutralidad de emisiones.

METODOLOGÍA

El tambo bajo estudio pertenece a la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del INTA (latitud: 31°51'57,63"S, longitud: 63°44'58,96" O), Departamento Río Segundo, Córdoba, con una elevación de 292 m s.n.m. Se encuentra entre áreas que por sus deficiencias hídricas se ubican dentro de la región semiárida. Posee un clima seco subhúmedo, mesotérmico, sin exceso de agua y una baja deficiencia hídrica (menos de 100 mm). Los suelos predominantes son de la serie Oncativo, grupo Haplustol éntico, familia limosa gruesa, mixta, térmica (Ministerio de Agricultura y Ganadería del Gobierno de Córdoba, 2018).

Estimación de la huella de carbono (HC). Un caso piloto

El método utilizado para estimar la HC de la leche fue el ACV que trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la obtención de la materia prima o insumos, pasando por la producción, utilización, consumo, tratamiento final y reciclado, hasta su disposición final (*i.e.* "de la cuna a la tumba") (ISO 14044, 2006).

La unidad declarada fue 1 kg leche cruda a la salida del tambo (masa corregida por grasa y proteína; FPCM por sus siglas en inglés), siguiendo las Reglas de Categoría de Producto y de la Federación Internacional de Productos

Lácteos (2015). Es decir, este trabajo se propuso calcular la contribución potencial de la leche al calentamiento global o HC de la leche, expresada como CO₂eq, cuantificando todas las emisiones y remociones significativas de GEI durante el ciclo de vida, desde la cuna hasta la puerta de salida del tambo, durante un período de 12 meses.

Relevamiento de información para estimar la HC

La información recopilada corresponde a un límite temporal de 12 meses (desde el 30 junio 2020 al 1 julio 2021). La Figura 1 muestra en línea punteada los límites del sistema analizado.

Para estimar la HC de la leche, se relevaron, por un lado, datos generales del tambo, de la ocupación del suelo y de la producción anual de leche (Cuadro 1). Por otro lado, se registró información sobre la hacienda (*i.e.* las existencias totales por categoría, los movimientos de animales desde y hacia el sistema) y sobre aquellas variables que, junto con la sección de producción de leche, alimentación y gestión de excretas, definen las emisiones de CH₄ entérico y el N₂O y CH₄ desde las excretas (Cuadro 2). También se relevó información de indicadores productivos necesarios para la evaluación de la HC, como peso promedio (kg), ganancia diaria de peso vivo (GDPV), mortandad (cabezas), peso vivo adulto (kg), duración de cada etapa (días), porcentaje de preñez de las vacas (%), edad del primer servicio de las vaquillonas, porcentaje de preñez de las vaquillonas (%), peso de los terneros al nacer (kg), días de alimentación a base de leche de las terneras, días de alimentación a base de leche de los terneros, datos de alimentación y del sistema de gestión de las excretas, etc.

Para analizar la información de la alimentación animal y del sistema de gestión de las excretas, en primer lugar, se clasificaron alimentos, según su origen (*i.e.* producidos dentro del tambo o comprados/incorporados desde otro establecimiento) (Cuadro 3). A su vez, se establecieron las siguientes categorías: (i) granos propios (granos producidos en el tambo), (ii) henos propios (henos/rollos producidos en el tambo); (iii) silajes propios (silajes producidos en el tambo); (iv) pasturas, verdeos propios y cultivos de cobertura consumidos; (v) alimentos de terceros (alimentos comprados o ingresados al tambo desde otro establecimiento). Para las distintas categorías se determinó la cantidad de cada alimento consumido de forma diaria, en kg MS animal⁻¹. Además, se relevó el total de excretas por cada categoría y la proporción que queda en cada uno de los sectores

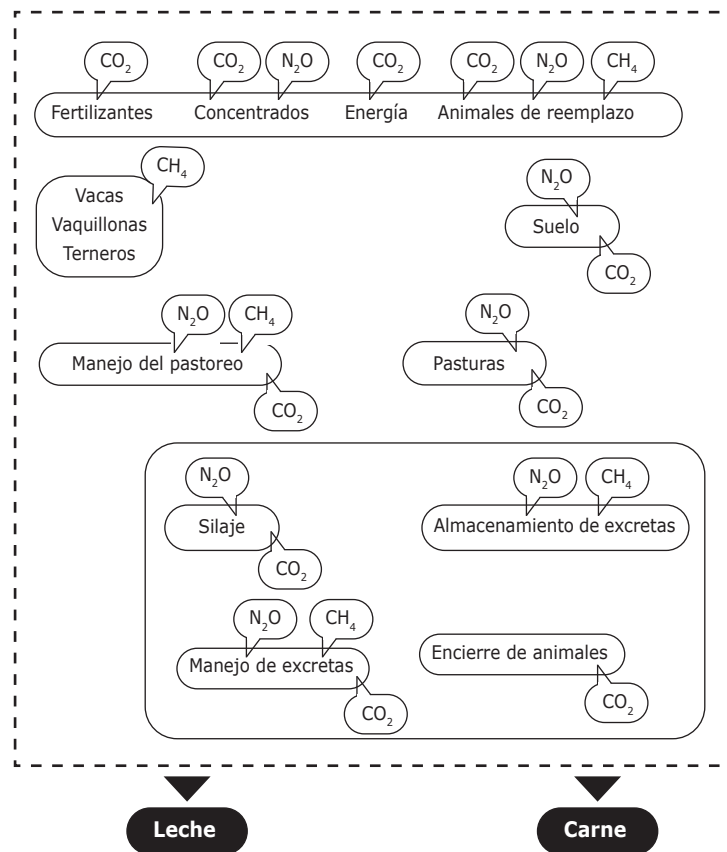


Figura 1. Límites del sistema analizado (línea punteada) de 1 kg leche cruda a la salida del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021.

del tambo (e.g. pastura, corral de alimentación, tambo, etc.) (Cuadro 3). A su vez, dentro de cada uno de esos sectores, se registró el manejo que se realizan de las excretas y si son aplicadas o no en el campo, como fertilizante. Dicha información se utilizó para definir, junto con la información de la cantidad o "stock" de hacienda, producción de leche y producción de alimentos, las emisiones de N_2O y CH_4 desde las excretas y sus manejos, y el secuestro de carbono potencial. Además, en el período analizado se generaron 5110 m^3 de purines de tambo que se destinaron a una planta de tratamiento aeróbico.

El Cuadro 4 contiene la información del uso de energía (i.e. combustibles, electricidad, gas) utilizada en la producción de los cultivos anuales y perennes, y en el manejo de los animales (i.e. alimentación, ordeño, manejo de excretas, traslados, etc.). Para cada fuente de energía se registró la cantidad utilizada durante el período de 12 meses analizado. También se incluyó la información de insumos utilizados para la limpieza y para el mantenimiento de las diferentes instalaciones del establecimiento durante ese período. Para evaluar

las emisiones de GEI generadas en el transporte de insumos/animales hacia el establecimiento se incluyó información de transporte hacia el establecimiento. Se trasladaron 386 t de harina de soja desde una distancia de 300 km, 997 t de heno de alfalfa desde 997 km y 39 t de suplementos alimenticios desde 39 km. Se transportaron 243 t de insumos y 45 t de combustibles durante la campaña 2020-2021.

El relevamiento también incluyó los planteos técnicos de la producción de cultivos anuales dentro del establecimiento, los que se corresponden con los consumos de alimentos informados en el Cuadro 3. El objetivo de esta sección fue organizar la información necesaria para evaluar las emisiones de GEI generadas en la producción de los alimentos, a través de la fertilización, la aplicación de pesticidas, la generación de residuos, el uso de maquinaria para diferentes tareas, el uso de otros insumos y el transporte de insumos/animales hacia el establecimiento. Al mismo tiempo, la información de esta sección se utilizó para la estimación del potencial de secuestro de carbono, por parte de los cultivos anuales. De igual forma, se recopiló la información necesaria

Cuadro 1. Datos del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021.

Datos del establecimiento	
Nombre	Manfredi
Provincia	Córdoba
Departamento	Río Segundo
Año/ciclo	2020-2021
Precipitaciones (mm año ⁻¹)	800
Evapotranspiración potencial (mm año ⁻¹)	1400
Temperatura (°C)	22
Clima	Templado y seco
Suelo - contenido arcilla (g kg ⁻¹)	250
Ocupación del suelo	
	Superficie (ha)
Dedicación superficie tambo (total)	140
Superficie p/vaca total (vacas en ordeño + vacas secas)	101
Superficie vaquillonas parto	12
Superficie p/recría (hembras)	5
Superficie p/mejoras	20
Superficie forestal	0,5
Superficie no útil	1,5
Superficie total	140
Producción	
Venta anual de leche (l año ⁻¹)	3404586
Contenido graso (%)	3,30
Contenido proteico cruda (% proteína)	3,15
Uso de leche anual en guachera (l año ⁻¹)	362839

Cuadro 2. Datos del plantel del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021.

EXISTENCIAS	Vacas en ordeño	Vacas secas	Terneritas (0-6 m)	Terneros (0-6 m)	Vaquillonas (6-12 m)	Vaquillonas (12-24 m)	Vaquillonas (24-36 m)	Vaquillonas parto
Cantidad anual	253	50	80	4	80	58	14	40
Peso promedio (kg)	650	650	70	120	170	300	400	500
Ganancia diaria de peso vivo (GDPV)	0	0	1	1	1	1	1	1
Mortandad (cabezas)	3	1	20	20	1	1	1	1
Peso vivo adulto (kg)	700	700	700	700	700	700	700	700
Duración etapa (días)	305	365	180	60	180	365	365	60
VENTAS/SALIDAS	Vacas en ordeño	Vacas secas	Terneritas (0-6 m)	Terneros (0-6 m)	Vaquillonas (6-12 m)	Vaquillonas (12-24 m)	Vaquillonas (24-36 m)	Vaquillonas parto
Cantidad anual		73	8	124	8	8		
Edad (meses)		60	2	1	13	22		
Peso vivo (kg)		620	70	50	300	380		

**INDICADORES PRODUCTIVOS**

Preñez de las vacas (%)	50
Edad primer servicio vaquillonas (meses)	14
Preñez vaquillona (%)	25
Peso terneros al nacer (kg)	40
Días de alimentación a base de leche a terneras	60
Días de alimentación a base de leche a terneros	60
Cruza Holando por Jersey (%)	100

Cuadro 3. Alimentación (kg MS animal⁻¹ día⁻¹) y sistema de gestión de las excretas del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021.

kg MS animal ⁻¹ día ⁻¹								
Granos propios	Vacas en ordeño	Vacas secas	Terneras (0-6 m)	Terneros (0-6 m)	Vaquillonas (6-12 m)	Vaquillonas (12-24 m)	Vaquillonas (24-36 m)	Vaquillonas parto
Maíz grano húmedo	5,00	1,00			6,00	2,00	2,00	2,00
Heno propio								
Heno de pastura, mezcla gramíneas y tréboles		4,00						1,80
Silaje propio								
Silaje cereales de invierno	4,00	2,00			1,50	1,50	1,50	1,50
Silaje maíz planta entera	4,00	2,00			1,00	1,00	1,00	1,00
Alimento de terceros								
Harina de soja	4,00	1,50		1,00	1,00	1,20	1,20	1,50
Heno pastura base alfalfa	10,00		1,00	1,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Sales, vitamínicas y minerales	0,45	0,25						
TOTAL	27,45	10,75	1,00	2,00	14,50	10,70	10,70	12,80
Sistema de gestión de las excretas								Valor
Duración de cada ordeño (h día ⁻¹)								1,50
N° ordeños día ⁻¹								3
¿Separa sólidos de líquidos?								Sí
En caso de que separe sólidos de líquidos, indique que tipo de separación tiene.								Media
Sistema de manejo líquidos o sólidos y líquidos								Distribución diaria
Aplicación a campo								Sí
Sistema de manejo sólidos								30
Aplicación a campo								Distribución diaria
Periodicidad (días)								1

Cuadro 4. Insumos de la producción del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021.

Energía y vectores energéticos	
Energía eléctrica (kWh año ⁻¹)	108000
Gas natural (m ³ año ⁻¹)	15
Gasoil (l año ⁻¹)	45000
Limpieza y mantenimiento del tambo (cantidad anual)	
Detergente alcalino (m ³)	1
Detergente ácido (m ³)	1
Aceite lubricante (kg)	20
Grasa como lubricante (kg)	10

para evaluar las emisiones generadas en la producción de las pasturas y pastizales y estimar su potencial de secuestro de carbono. Se excluyeron del inventario los flujos de procesos menores debido a la dificultad de asignarlos a un flujo de referencia particular, tales como (i) fabricación y mantenimiento de las instalaciones y las máquinas de ordeño y refrigeración, (ii) construcción y mantenimiento de la infraestructura y (iii) flujos de la administración y de la gestión del tambo.

Cuantificación de la HC

Para el cálculo de emisiones de GEI, las normas ISO se complementaron con las guías del IPCC (2006) y su actualización (IPCC, 2019) (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>) en los siguientes puntos: (i) Volumen 4, Capítulo 10: Emisión por fermentación entérica y gestión del estiércol; (ii) Volumen 4, Capítulo 11: Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cal y urea; (iii) Volumen 5, Capítulo 6: Tratamiento y descargas de aguas residuales. Las emisiones totales de GEI se expresaron en unidades de CO₂eq teniendo en cuenta el potencial de calentamiento global (PCG) de cada gas (IPCC, 2014) y asumiendo un horizonte temporal de 100 años. Para ello se siguieron los métodos estandarizados propuestos por las normas ISO y por la guía de la International Dairy Federation (IDF, 2015). Los PCG fueron 25, 298 y 1 para el CH₄, N₂O y CO₂, respectivamente.

Para el cálculo de las emisiones directas se usaron las ecuaciones del Capítulo 11 de las Guías IPCC (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>), tales como la ecuación 11.2 (N₂O Directo), ecuación 11.6 (cultivo). Para las emisiones por escorrentía y lixiviación se aplicó la ecuación 11.10. Para las emisio-

nes por aplicación de fertilizante nitrogenado se usó la ecuación 11.2 (N₂O Directo) y la ecuación 11.11 para las emisiones indirectas o volatilización. Para las emisiones directas por uso de urea (CO₂ que se toma en la producción y que se libera durante su uso) se usó la ecuación 11.13.

El inventario de ciclo de vida y su evaluación tuvieron como referencia los lineamientos de las reglas de categorías de productos (PCR) estudiados. En este caso, se tomaron en cuenta la PCR 2021:08 Dairy products, PCR 2020:07 (Arable and vegetable crops) y PCR 2016:03 (Preparations used in animal feeding for food-producing animals) (The International EPD® System, 2021). Por último, se utilizaron como referencias específicas del sector lácteo los criterios TDSF (The Dairy Sustainability Framework, 2023), las guías de FAO (2019) y las recomendaciones de la International Dairy Federation (IDF, 2015).

Dentro de las herramientas que se utilizaron para la aplicación de los métodos propuestos se encuentran bases de datos y programas de cálculo indispensables para abordar de manera más completa los inventarios de ciclo de vida. Las bases de datos fueron Ecoinvent (versión 3.8) y Agri-footprint (versión 5.0) (acceso a través del software Simapro, 2023). También se consideró la remoción de carbono atmosférico a través de la incorporación de carbono en el suelo, dependiendo de la interacción entre los aportes de residuos orgánicos, el clima y el tipo de suelo. Se tuvo como guía el Protocolo MRV de FAO (2020), el modelo LEAP de FAO (2019), el modelo Nivel 1 de IPCC y el modelo Nivel 2 (Petersen *et al.*, 2013). El método Nivel 2 (Tier 2) del IPCC se basa en el modelo de simulación de carbono AMG que fue calibrado y validado en diferentes situaciones edafoclimáticas de la Argentina, Chile, Uruguay, México y Europa (Andriulo

et al., 1999). El modelo AMG es un modelo simple de paso anual y considera tres compartimentos de carbono: (i) carbono del aporte de los residuos (*i.e.* aéreos, raíces y rizodepósitos), (ii) carbono activo del suelo (*i.e.* modificable por el sistema de cultivos que se realiza) y (iii) carbono estable del suelo (*i.e.* no se modifica con el uso y/o manejo del suelo). Se tuvieron en cuenta el tipo de laboreo y las variables asociadas al clima para estimar el coeficiente de mineralización según la metodología de Clivot *et al.* (2019), así como las variables asociadas a las características del suelo. El modelo AMG permitió estimar el cambio en la existencia de carbono para la campaña analizada.

Inventario del ciclo de vida

En el Cuadro 5 se puede observar el inventario de ciclo de vida de la unidad funcional 1 kg de leche cruda FPCM, donde se detalla la emisión de los diferentes GEI, como así también la remoción por parte de las pasturas, pastizales y árboles. Los tipos de GEI informados son: dióxido de carbono total, dióxido de carbono fósil, dióxido de carbono por cambio de uso de suelo, óxido nitrroso, metano total, metano fósil, metano biogénico, metano por cambio de uso de suelo, y hexafluoruro de azufre. El inventario muestra las principales fuentes de emisión por tipo de GEI, como ser la fermentación entérica, el estiércol en pasturas, la gestión del estiércol, la emisión de residuos de cultivos, la aplicación de fertilizantes, el consumo de combustible, la limpieza y mantenimiento, los alimentos, la energía consumida, los fertilizantes (producción y uso), otros insumos, transporte de bienes, excretas, residuos y árboles.

Asignación

En los estudios de ACV, la asignación de la carga ambiental se definió según las normas ISO, como la distribución de la carga ambiental de los insumos o productos de un proceso bajo estudio para asignársele al producto en particular que se está estudiando. La asignación se requiere cuando un sistema produce más de un producto, y es necesario establecer proporcionalmente el impacto ambiental que le corresponde a cada uno de los productos o subproductos bajo estudio. La ISO recomienda usar métodos que reflejen la relación física, por ejemplo, la masa, el contenido energético u otras variables relevantes para asignar la carga, tales como el valor económico de los productos, que es similar a la asignación de costos que se hace en contabilidad. En este caso, se usó la asignación física por masa,

siguiendo las Reglas de Categoría de Producto (The International EPD® System, 2021) y Federación Internacional de Productos Lácteos (IDF, 2015) en los productos carne y leche:

- Tambo: asignación para la fracción de carne y leche.

$$\text{Factor de asignación (AF)} = 1 - 6,04 \times \text{BMR}$$

donde, BMR: Beef to milk ratio = Mcarne / Mleche; Mcarne: es la masa de peso vivo de todos los animales vendidos, incluidos los terneros de toro y los animales maduros sacrificados por año; Mleche: es la masa de leche corregida de grasa y proteína (FPCM) vendida por año, la cual se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{FPCM (kg año}^{-1}\text{)} = \text{Producción (kg año}^{-1}\text{)} \times [0,1226 \times \text{grasa}\% + 0,0776 \times \text{proteína}\% + 0,2534]$$

Comparación de valores de HC de la leche en varios países

Se realizó una búsqueda bibliográfica para comparar qué sucede en diferentes países. Para ello se usaron las bases de datos bibliográficos disponibles a través del sistema de bibliotecas de la Universidad Católica de Córdoba.

RESULTADOS

Huella de carbono (HC)

Los resultados de la HC de la leche cruda se muestran en el Cuadro 5, que contiene el inventario de ciclo de vida y en el Cuadro 6, que muestra las emisiones y las remociones de GEI referidas a la unidad funcional. La HC resultó en 0,89 kg de CO₂eq kg⁻¹ leche cruda a la salida del tambo (FPCM). Los aportes más significativos fueron: (i) producción de alimentos (aguas arriba), con 0,42 kg CO₂eq kg⁻¹ (representando un 45,7% de la emisión total); (ii) fermentación entérica, con 0,33 kg CO₂eq kg⁻¹ (36,6% del total); (iii) combustible, con 0,06 kg CO₂eq kg⁻¹ (6,7% del total); (iv) aplicación de fertilizantes, con 0,04 kg CO₂eq kg⁻¹ (4,5% del total); (v) gestión de estiércol con 0,02 kg CO₂eq kg⁻¹ (1,7% del total).

En el Cuadro 6 de resultados de la HC de la leche cruda, se expresan por separado las emisiones de GEI y las remociones de GEI, indicando para ambos la contribución de cada categoría de elementos de emisión y secuestro. A su vez, se diferenció el origen de las emisiones en: (i) fósil, (ii) biogénicos y (iii) cambio de uso del suelo. Del Cuadro 6 se desprende la contribución del

Cuadro 5. Inventario de ciclo de vida de la unidad funcional 1 kg de leche cruda producida en el tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021. Valores positivos indican emisión de GEI; valores negativos indican remoción de GEI. AA: aguas arribas. PCG: potencial de calentamiento global; CO₂: dióxido de carbono; HC: huella de carbono; FPCM: masa corregida por grasa y proteína.

Vacas en producción	PCG (kg CO ₂ eq año ⁻¹)	PCG fósil (kg CO ₂ eq año ⁻¹)							PCG biogénico (kg CO ₂ eq año ⁻¹)	PCG transformación del suelo (kg CO ₂ eq año ⁻¹)		Remoción	
		Sustancias remanentes	CO ₂	CO ₂ , fósil	Óxido nítrico	Metano	Metano, fósil	Hexa-fluoruro de azufre		Metano, biogénico	CO ₂ , cambio de uso de suelo	Me-tano, cambio de uso de suelo	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ FPCM
Fermentación entérica	1171621	0	0	0	0	0	0	0	1171621	0	0	0,33	36,6
Estiércol en pasturas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,0
Gestión del estiércol	54640	0	0	0	51859	0	0	0	2781	0	0	0,02	1,7
Emisión de residuos de cultivos	64227	0	0	0	64227	0	0	0	0	0	0	0,02	2,0
Aplicación de fertilizantes	142711	0	11953	0	130758	0	0	0	0	0	0	0,04	4,5
Energía (combustible)	213074	121	591	205568	856	134	5601	103	101	93	1	0,06	6,7
AA - limpieza y mantenimiento	42	0	0	38	0	0	4	0	0	0	0	0,00	0,0
AA - animales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,0
AA - alimentos	1463472	731289	87	408999	291490	0	28954	32	2621	621	5	0,42	45,7
AA - energía	59168	29596	11	0	28661	176	0	709	14	9	15	0,02	1,8
AA - fertilizantes	1670	0	4	1368	112	0	185	1	1	0	0	0,00	0,1
AA - otros insumos	134	0	0	118	1	0	14	0	0	0	0	0,00	0,0
AA - transporte de bienes	29581	11	0	28661	176	0	709	14	9	15	0	0,01	0,9
Total emisiones	3200342	761017	12646	644752	568141	310	35468	860	1177149	738	20	0,91	100,0
Secuestro de carbono	-109597									-109597		-0,03	-3,4
Excretas	-9057									-9057		0,00	-0,3
Residuos	-100540									-100540		-0,03	-3,1
<i>Asignación por masa</i>													
HC	0,89												
KG LECHE VENDIDA	3127740												
KG CARNE VENDIDA	57460												

establecimiento tambo a la HC de la leche cruda, es decir, el porcentaje de emisiones que se generaron dentro del tambo en la campaña analizada. En este caso se visualiza que el 73% de las emisiones ocurrieron dentro del tambo y el 27%, aguas arriba fuera del tambo. De la emisión total, el 63% correspondió a emisiones de origen fósil y el 37%, a emisiones biogénicas. Las emisiones de GEI por transformación del suelo no fueron significativas. La remoción o secuestro de carbono fue de $-0,03 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$, proveniente un 91,7% de la fijación por los cultivos y un 8,3% por la distribución del estiércol en los lotes de producción.

El principal punto crítico a trabajar está en la producción de alimentos para los animales, representando un 45,7% de las emisiones de GEI, seguido por la fermentación entérica, con el 36,6% (Cuadro 6). Con menor importancia le siguen la producción y consumo de combustibles (6,7%), la aplicación de fertilizantes (4,5%), la emisión de los residuos de cultivos (2%), el consumo de energía (1,8%) y la gestión del estiércol (1,7%).

Revisión bibliográfica

La publicación más reciente de la Argentina fue un análisis de puntos críticos en el sector alimentos y bebidas que determinó una HC de la leche cruda de $1,95 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ (FPCM) (Arena *et al.*, 2021). Asimismo, la Asociación Argentina de Producción Animal publicó el análisis de la HC de la leche en tambos del oeste de la provincia de Buenos Aires. Allí se compararon los resultados obtenidos mediante tres calculadores desarrollados por diferentes instituciones: el Calculador de Emisiones para Tambo (CET) de CREA (2019), el Calculador de Huella de Carbono Animal Producto a Puerto (HCAPAP) desarrollado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (INIA) y el Cool Farm Tool (CFT) (Coolfarmtool, 2022). Los resultados promedio obtenidos fueron de 0,85, 0,75 y 0,78 $\text{kg CO}_2\text{eq l}^{-1}$ de leche, respectivamente (Herrero *et al.*, 2014).

En esta misma línea, en el 2018 se publicó una comparación de HC en tambos de la región pampeana con cuatro niveles de intensificación: (i) alta carga y alta suplementación, (ii) alta carga y baja suplementación,

Cuadro 6. Resultados de la huella de carbono (HC) de 1 kg de leche cruda del tambo de la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), campaña 2020-2021. AA: aguas arriba; GEI: gases de efecto invernadero.

	Emisiones de GEI			Remociones de GEI	
	kg CO ₂ eq	%		kg CO ₂ eq	%
Fermentación entérica	0,33	36,6	Excretas	0,00	8,3
Estiércol en pasturas	0,00	0,0	Cultivos	-0,03	91,7
Gestión del estiércol	0,02	1,7	Árboles	0,00	0,0
Emisión de residuos de cultivos	0,02	2,0			
Aplicación de fertilizantes	0,04	4,5			
Energía (combustible)	0,06	6,7			
AA - limpieza y mantenimiento	0,00	0,0			
AA - animales	0,00	0,0			
AA - alimentos	0,42	45,7			
AA - energía	0,02	1,8			
AA - fertilizantes	0,00	0,1			
AA - otros insumos	0,00	0,0			
AA - transporte de bienes	0,01	0,9			
EMISIONES GEI	0,91	100	SECUESTRO GEI	-0,03	100
<i>Fósil</i>	0,58	63	<i>Fósil</i>		
<i>Biogénico</i>	0,33	37	<i>Biogénico</i>		
<i>Cambio de uso de suelo</i>	0,00	0	<i>Transformación del suelo</i>	-0,03	-3

(iii) baja carga y alta suplementación y (iv) baja carga y baja suplementación (Gimenez *et al.*, 2018). Los autores usaron el CET de CREA y obtuvieron resultados variables: 0,98, 0,85, 0,99 y 0,95 kg CO₂eq l⁻¹ de leche, respectivamente. Giménez *et al.* (2018) y Herrero *et al.* (2014), que también usaron el CET de CREA, obtuvieron resultados relativamente más altos que el presente estudio. Si bien el calculador CET de CREA se basa en

el IPCC, una posible explicación es que en ambos casos se tomaron tambos de baja eficiencia productiva. Otra posible causa sería una sobreestimación de impactos en alguna de las etapas, lo que queda planteado como tema para futuras investigaciones. La unidad funcional que reportan no es compatible con los estándares para certificación.

El Cuadro 7 muestra la HC de la leche en diferentes

Cuadro 7. Huella de carbono (HC) de la leche en diferentes países. Los trabajos están ordenados según la unidad funcional (1 kg de FPCM, 1 kg ECM, 1 kg de leche o 1 l de leche), mientras que la HC está ordenada de mayor a menor. Adaptado de Tamilselvan y Tyagi (2024). Los valores de distinta unidad funcional no son comparables.

Unidad funcional	Ubicación	HC (kg CO ₂ eq)	Referencia
1 kg FPCM	Mundo	12,00	(Gerber <i>et al.</i> , 2013)
	Sudáfrica	7,50	(FAO, 2006)
	Mundo	3,70	(Clark <i>et al.</i> , 2022)
	Italia	3,60	(Pirlo <i>et al.</i> , 2014)
	Colombia	2,90	(González-Quintero <i>et al.</i> , 2021)
	Kenya	2,50	(Wilkes <i>et al.</i> , 2020)
	Mundo	2,40	(FAO, 2006)
	India	2,30	(Garg <i>et al.</i> , 2016)
	Argentina	1,95	(Arena <i>et al.</i> , 2021)
	Mundo	1,70	(Gerber <i>et al.</i> , 2013)
	EE.UU.	1,45	(Rotz <i>et al.</i> , 2021)
	Australia	1,35	(Sejian <i>et al.</i> , 2018)
	China	1,34	(Wang <i>et al.</i> , 2018)
	Irlanda	1,33	(O'Brien <i>et al.</i> , 2014)
	Italia	1,31	(Berton <i>et al.</i> , 2021)
	EE.UU.	1,23	(Thoma <i>et al.</i> , 2013)
	Irlanda	1,20	(O'Brien <i>et al.</i> , 2014)
	Italia	1,12	(Bacenetti <i>et al.</i> , 2016)
	Australia	1,11	(Gollnow <i>et al.</i> , 2014)
	Canadá	1,09	(Jayasundara <i>et al.</i> , 2019)
	Norteamérica	1,00	(FAO, 2006)
	Canadá	0,95	(McGeough <i>et al.</i> , 2012)
	Argentina	0,89	Este estudio
	Portugal	0,89	(Morais <i>et al.</i> , 2018)
	Italia	0,82	(Lovarelli <i>et al.</i> , 2019)
	Nueva Zelanda	0,78	(Ledgard <i>et al.</i> , 2020)
	Australia	0,64	(Sejian <i>et al.</i> , 2018)
	Australia	0,54	(Sejian <i>et al.</i> , 2018)
Australia	0,39	(Sejian <i>et al.</i> , 2018)	
1 kg ECM	Irlanda	1,22	(Yan <i>et al.</i> , 2013)
	Irlanda	1,50	(Casey <i>et al.</i> , 2005)
	Irlanda	1,30	(Casey <i>et al.</i> , 2005)
	EE.UU.	1,27	(Kristensen <i>et al.</i> , 2011)
	EE.UU.	1,2	(Kristensen <i>et al.</i> , 2011)

1 kg leche	Uruguay	1,17	(Darre <i>et al.</i> , 2021)
	Kenya	1,60	(Weiler <i>et al.</i> , 2014)
	Mundo	3,60	(Capper <i>et al.</i> , 2009)
	Mundo	1,35	(Capper <i>et al.</i> , 2009)
1 l leche	EE.UU.	2,05	(Thoma <i>et al.</i> , 2013)
	Argentina	0,99	(Giménez <i>et al.</i> , 2018)
	Argentina	0,98	(Giménez <i>et al.</i> , 2018)
	Argentina	0,95	(Giménez <i>et al.</i> , 2018)
	Argentina	0,85	(Giménez <i>et al.</i> , 2018)
	Argentina	0,85	(Herrero <i>et al.</i> , 2014)
	Argentina	0,78	(Herrero <i>et al.</i> , 2014)
Argentina	0,75	(Herrero <i>et al.</i> , 2014)	
ECM: energy corrected milk (leche corregida por contenido de energía)			
FPCM: fat and protein corrected milk (leche corregida por contenido de grasa y proteína)			

países en base a trabajos que toman diferentes unidades funcionales (desde 1 kg de FPCM, 1 kg ECM, 1 kg de leche o 1 l de leche), lo que hace que no todos los valores sean comparables. A nivel mundial, el valor de referencia usado por plataformas online como "Our World in Data" para la leche cruda es de 3,70 kg CO₂eq kg⁻¹ FPCM (Clark *et al.*, 2022). Una posible explicación de ese alto valor es que se trata de un promedio de estudios mundiales que, en muchos casos, incluye el efecto del cambio de uso de suelo o deforestación. A su vez, la revisión bibliográfica muestra que muchas de las diferencias se deben a las distintas unidades funcionales consideradas, junto con características específicas de cada tambo analizado, que tienen diferentes niveles de eficiencia.

DISCUSIÓN

La aproximación de este trabajo fue de tipo exploratorio y descriptivo. Por un lado, se caracterizó el impacto ambiental de la producción de leche en la Estación experimental Manfredi del INTA para comunicar los resultados a la comunidad vinculada a la actividad tambora. Se analizaron las emisiones de CO₂eq relacionadas con la producción lechera a nivel de explotación, detallando las diferentes etapas del ACV y todos los insumos que ingresan al sistema. Por otro lado, se analizó la HC hasta la tranquera del tambo, mostrando las emisiones acumuladas en las diversas actividades involucradas.

Si bien hay varios métodos disponibles para evaluar la HC, este análisis se realizó con el método ACV porque es el recomendado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y los estándares internacionales (ISO, EPD, etc.), es certificable y abarca todo el ciclo de vida del producto de manera integral.

Se analizaron las emisiones de CO₂eq relacionadas con la producción lechera a nivel de la explotación, detallando las etapas involucradas en el análisis del ciclo de vida, lo que incluye a todos los insumos que ingresan al sistema. Se analizó la HC hasta la tranquera del tambo, mostrando las emisiones acumuladas asociadas a diversas actividades involucradas en la producción de leche. Este examen exhaustivo condujo a la comprensión del impacto ambiental de la producción lechera y destaca la necesidad de prácticas sostenibles para mitigar la huella de carbono relacionada con la producción de leche.

La HC fue de 0,89 kg de CO₂eq kg⁻¹ leche cruda a la salida del tambo (FPCM), cifra que se encuentra por debajo del valor promedio de 2,06 reportado por la bibliografía en el Cuadro 7. Esto genera algunas dudas sobre los métodos relevados en la bibliografía ya que no hay datos de inventario detallados ni información sobre los cálculos utilizados. De los resultados de este trabajo y de la revisión bibliográfica surge que el tambo analizado se encuentra en séptimo lugar del ranking entre 28 trabajos que publicaron la huella de FPCM, ubicado entre los 0,89 y los 0,95 kg CO₂eq kg⁻¹ FPCM de Portugal y de Canadá, respectivamente.

El análisis de los resultados indican que el presente estudio cumple con los principios de la norma ISO 14067 (2018), Capítulo 5: (i) pertinencia (*i.e.* los datos y metodologías fueron las apropiadas para la evaluación de las emisiones y remociones de GEI derivadas del producto en estudio: 1 kg de leche cruda); (ii) integridad (*i.e.* se incluyeron todas las emisiones y remociones de GEI que proporcionaron una contribución significativa a la HC del sistema producto en estudio); (iii) consistencia (*i.e.* los supuestos, los métodos y los datos se aplicaron

de la misma manera a lo largo del estudio de la HC para llegar a conclusiones de acuerdo con la definición de objetivo y alcance); (iv) coherencia (*i.e.* se aplicaron metodologías, normas y documentos de orientación reconocidos internacionalmente y adoptados para la categoría de productos lácteos); (v) exactitud (*i.e.* la cuantificación fue lo más exacta posible, verificable, reduciendo o documentando de manera adecuada los sesgos e incertidumbres en la medida de lo posible); (vi) transparencia (*i.e.* todas las cuestiones pertinentes se abordaron y documentaron en una presentación abierta, completa y comprensible de la información). Es decir, se dieron a conocer los supuestos pertinentes y se hizo una referencia apropiada a las metodologías y fuentes de datos utilizadas. Todas las estimaciones se explicaron claramente y se evitó el sesgo para que el informe del estudio de la HC resulte representativo del sistema analizado.

Por otro lado, aunque la HC estimada resultó relativamente baja, existen una serie de buenas prácticas ambientales que se pueden aplicar para reducir la HC de la producción de leche, las que se vinculan a la alimentación (*i.e.* estrategias centradas en el manejo de los alimentos y en la alimentación, con énfasis en la fermentación entérica); el manejo del rodeo y la reproducción (*i.e.* estrategias aplicables en la crianza de los animales, incluyendo prácticas y tecnologías de manejo animal y reproductivo); el manejo de excretas y purines (*i.e.* opciones para el manejo de las excretas y el tratamiento de los purines, que incluyen desde el manejo de la dieta hasta las opciones de manejo en el proceso de almacenamiento, la manipulación y la aplicación de las excretas); la producción de alimentos en el tambo (*i.e.* opciones relacionadas con la producción de alimentos, incluyendo el manejo del suelo y uso de insumos); el uso eficiente de los recursos (agua, energía, biodiversidad); y, por último, las buenas prácticas de pasturas y cultivos y usos del suelo para un aumento del secuestro o los sumideros de carbono (Minaglia *et al.*, 2023).

Algunas de las estrategias posibles para reducir la HC de la leche son: (i) utilizar alimentos que garanticen el uso de soja libre de deforestación; (ii) instalar fuentes de agua adicionales; (iii) implementar un sistema de separación de sólidos tipo tamiz; (iv) instalar sistema de lagunas para el manejo de purines líquidos; (v) aumentar la incorporación del carbono al suelo a partir de un mejor manejo de los residuos de los cultivos y el uso de los purines sólidos como fertilizantes; (vi) utilizar energía solar y realizar forestación (Tieri *et al.*, 2024).

Este estudio contribuye a comprender la HC de la producción de leche en la región centro de la Argentina y establece la base para analizar la sostenibilidad de la producción tampera intensificada. Un tambo más eficiente es un tambo con menor HC por unidad de producto. En particular, estudiar la HC de la leche del tambo de INTA Manfredi es de interés por varias razones dentro de las que se destaca el interés por conocer el impacto ambiental de la leche producida por un tambo demostrativo de la cuenca lechera Córdoba Centro. Al cuantificar la HC, se pueden identificar y aplicar prácticas más sostenibles para reducir estas emisiones. Asimismo, evaluar la HC ayuda a entender el uso de recursos como el agua y la tierra, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible. Por otro lado, desde lo económico, conocer las fuentes de emisiones permite optimizar los procesos de producción, reduciendo costos asociados a la energía, fertilizantes y otros insumos. Igualmente, aunque todavía no existen mecanismos de reconocimiento del valor agregado ambiental que brinda la cuantificación de la HC de la leche, los consumidores son cada vez más conscientes del impacto ambiental de los productos, por lo que una HC baja puede mejorar la imagen del producto y abrir nichos de mercados. Desde el punto de vista social, los tambos que demuestran un compromiso con la sostenibilidad pueden mejorar su imagen y sus relaciones con los demás actores de la cadena láctea. En ese sentido, evaluar y reducir la HC se anticipa al cumplimiento de normativas futuras, permite impulsar la innovación en técnicas de producción y manejo de desechos, promoviendo tecnologías más limpias. El INTA Manfredi, como instituto de investigación, puede usar estos estudios para educar y capacitar en prácticas sostenibles, contribuyendo a un sector más resiliente y sostenible. Por lo tanto, este trabajo también representa un aporte a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como la acción por el clima (ODS 13), la producción y consumo responsables (ODS 12) y la vida de ecosistemas terrestres (ODS 15).

CONCLUSIONES

Este estudio condujo a una mayor comprensión del impacto ambiental de la producción lechera y destaca la necesidad de realizar prácticas sostenibles para mitigar la HC relacionada con esta actividad. Por un lado, se cumplieron los objetivos específicos de (i) estimar la HC de la leche FPCM, (ii) comparar los valores de HC de la leche con otros trabajos publicados y (iii) establecer una línea de base para implementar estrategias de mejora

en búsqueda de la reducción y eventual neutralidad de emisiones. Por otro lado, se logró caracterizar el impacto ambiental de la leche producida en el INTA Manfredi. En suma, se destaca la importancia de realizar este tipo de estudios cuyos resultados son de utilidad para aquellos miembros de la comunidad de productores y profesiona-

les vinculados a la actividad tambera que quieran medir su huella y eventualmente, certificar. Estimar la HC de la leche es fundamental para promover una producción más sostenible, mejorar la eficiencia económica, anticiparse las regulaciones ambientales y contribuir a la lucha global contra el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo, A., Mary, B. y Guerif, J. (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie, EDP Sciences*, 19(5), 365-377. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885937>
- Arena, P., Civit, B., Curadelli, S., Mele, F., Piastrellini, R., Rótolo, G. y Schein, L. (2021). Hotspots of the food and beverage sector in Argentina (pp. 99). En: *Proyecto: POW 2019-2021 Sub-programme: Resource Efficiency*. <https://sites.google.com/view/clioporg/investigaci%C3%B3n/proyectos?authuser=0>
- Bacenetti, J., Bava, L., Zucali, M., Lovarelli, D., Sandrucci, A., Tamburini, A. y Fiala, M. (2016). Anaerobic digestion and milking frequency as mitigation strategies of the environmental burden in the milk production system. *Science of the Total Environment*, 539, 450.
- Berton, M., Bovolenta, S., Corazzin, M., Gallo, L., Pinterits, S., Ramanzin, M. y Sturaro, E. (2021). Environmental impacts of milk production and processing in the Eastern Alps: A "cradle-to-dairy gate" LCA approach. <https://air.uniid.it/retrieve/e27ce0c9-8a4b-055e-e053-6605fe0a7873/264%20Berton%20et%20al%20JCP%202021.pdf>
- Capper, J., Cady, R. y Bauman, D. (2009). The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 87(6), 2160-2167.
- Casey, J. y Holden, N. (2005). Quantification of GH emissions from sucklerbeef production in Ireland. *Agricultural Systems*, 90(1-3), 472-482.
- Clark, M., Springmann, M., Rayner, M., Scarborough, P., Hill, J., Tilman, D., Harrington, R. A. et al. (2022). Estimating the environmental impacts of 57,000 food products. *PNAS*, 119, 33. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120584119>
- Clivot, H. et al. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118, 99-113: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Consortios Regionales de Experimentación Agrícola-CREA. (2019). Calculador de huella de carbono en tambo. <https://www.crea.org.ar/calculador-de-huella-de-carbono-en-tambo/>
- Coolfarmtool. (2022). Coolfarmtool. Cool Farm Alliance. <https://app.coolfarmtool.org/>
- Darre, E., Llanos, E., Astigarraga, L., Cadenazzi, M. y 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 Research*, 64(3), 444-462.
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2006). Carbon footprint of dairy. Food and Agriculture Organization (FAO). <https://www.fao.org/3/a0701e/a0701e.pdf>
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO, 170, Roma.
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes - GSOC-MRV Protocol. FAO, Roma. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>
- Garg, M., Phondba, B., Sherasia, P. y Makkar, H. (2016). Carbon footprint of milk production under smallholder dairying in Anand district of Western India: a cradle-to-farm gate life cycle assessment. *Animal Production Science*, 56(3), 423-436.
- Gerber, P., Hristov, A., Henderson, B., Makkar, H., Oh, J., Lee, C., Oosting, S. et al. (2013). Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, 7(2), 220-234.
- Giménez, G. D., Frank, F. C. y Marini, P. R. (2018). Huellas de carbono y de agua en tambos con diferentes estrategias de intensificación. *e-universitas, U.N.R. Journal*, 10, 2. <http://www.e-universitas.edu.ar/index.php/journal/>
- Gollnow, S., Lundie, S., Moore, A., McLaren, J., vanBuuren, N., Stahle, P. y Rehl, T. (2014). Carbon footprint of milk production from dairy cows in Australia. *International Dairy Journal*, 37(1), 31-38.
- González-Quintero, R., Kristensen, T., Sánchez-Pinzón, M., Bolívar-Vergara, D., Chirinda, N., Arango, J. y Knudsen, M. (2021). Carbon footprint, non-renewable energy and land use of dual-purpose cattle systems in Colombia using a life cycle assessment approach. *Livestock Science*, 244, 104330. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104330>
- Herrero, M. A., Salcedo, A. J., Varillas, G., Carbó, L. y Maekawa, M. (2014). Huella de carbono según tres metodologías de cálculo en tambos del oeste bonaerense. *Revista Argentina de Producción Animal*, 34(1), 213-290. https://www.researchgate.net/publication/279538195_Huella_de_Carbono_segun_tres_metodologias_de_calculo_en_tambos_del_oeste_bonaerense_Carbon_footprint_and_intensification_in_dairy_farms_in_the_west_of_Buenos_Aires
- Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- International Dairy Federation-IDF. (2015). A common carbon footprint approach for the dairy sector. The IDF guide to standard life cycle assessment methodology. *Bulletin 459 of the International Dairy Federation*. https://www.fil-idf.org/wp-content/uploads/2016/09/Bulletin479-2015_A-common-carbon-footprint-approachfor-the-dairy-sector.CAT.pdf

- IRAM ISO 14044. (2006). Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices. ISO: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- IRAM ISO 14067. (2019). Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación. Primera edición. 68 p. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/12261>
- IRAM-ISO. 14040. (2006). Gestión ambiental-Análisis del ciclo de vida-Principios y marco de referencia. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Jayasundara, S., Worden, D., Weersink, A., Wright, T., VanderZaag, A., Gordon, R. y Wagner-Riddle, C. (2019). Improving farm profitability also reduces the carbon footprint of milk production in intensive dairy production systems. *Journal of Cleaner Production*, 229, 101.
- Kristensen, T., Mogensen, L., Knudsen, M. y Hermansen, J. (2011). Effect of production system and farming strategy on greenhouse gas emissions from commercial dairy farms in a life cycle approach. *Livestock Science*, 140(1-3), 136-148.
- Ledgard, S., Falconer, S., Abercrombie, R., Philip, G. y Hill, J. (2020). Temporal, spatial, and management variability in the carbon footprint of New Zealand milk. *Journal of Dairy Science*, 103(1), 1031-1046.
- Lovarelli, D., Bava, L., Zucali, M., D'Imporzano, G., Adani, F., Tamburini, A. y Sandrucci, A. (2019). Improvements to dairy farms for environmental sustainability in Grana Padano and Parmigiano Reggiano production systems. *Italian Journal of Animal Science*, 18, 1035-1040.
- McGeough, E., Little, S., Janzen, H., McAllister, T., McGinn, S. y Beauchemin, K. (2012). Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from dairy production in Eastern Canada: a case study. *Journal of Dairy Science*, 95(9), 5164-5175.
- Minaglia, M., Tieri, M. P., Bongiovanni, R., Faverín, C., Beltrán, M. J., Páez, R. y Castels, L. (2023). Manual de Buenas Prácticas Ambientales para el sector Lácteos (Versión: 1.0.). Válido desde: marzo 2023. Mesa sectorial de Lácteos del Programa Argentino de Carbono Neutro (PACN). 100 pp. <https://carbononeutro.com.ar/manuales/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Gobierno de Córdoba. (2018). Carta de Suelos de Córdoba. Hoja 3163-32 Oncativo. v19.12 2018. <https://suelos.cba.gov.ar/ONCATIVO/index.html>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MAyDS. (2023). Quinto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://ciam.ambiente.gov.ar/images/uploaded/recursos/372/BUR5.pdf>
- Morais, T., Teixeira, R., Rodrigues, N. y Domingos, T. (2018). Carbon footprint of milk from pasture-based dairy farms in Azores, Portugal. *Sustainability*, 10(10), 3658. <https://doi.org/10.3390/su10103658>
- O'Brien, D., Brennan, P., Humphreys, J., Ruane, E. y Shalloo, L. (2014). An appraisal of carbon footprint of milk from commercial grass-based dairy farms in Ireland according to a certified life cycle assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1469-1481.
- Observatorio de la Cadena Láctea Argentina-OCLA. (2023). Observatorio de la Cadena Láctea Argentina. <http://www.ocla.org.ar/>
- Organization for Economic Co-operation and Development-OECD-FAO. (2022). Agricultural Outlook 2022-2031. FAO. <https://international-dairy.com/news/home/oecd-fao-agricultural-outlook-2022-2031/>
- Petersen, B., Knudsen, M., Hermansen, J. y Halberg, N. (2013). An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. *J. Clean. Prod.*, 52, 217e224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.007>
- Pirlo, G., Terzano, G., Pacelli, C., Abeni, F. y Care, S. (2014). Carbon footprint of milk produced at Italian buffalo farms. *Livestock science*, 161, 176-184.
- Sejian, V., Prasad, R., Lees, A., Lees, J., Al-Hosni, Y., Sullivan, M. y Gaughan, J. (2018). Assessment of the carbon footprint of four commercial dairy production systems in Australia using an integrated farm system model. *Carbon Management*, 9(1), 57-70.
- Simapro. (2023). PRÉ Consultants. Life Cycle Assessment Software. <http://www.pre-sustainability.com/>
- Tamilselvan, G. y Tyagi, N. (2024). Life Cycle Assessment as an evaluation tool- A critical review on carbon footprint in dairy sector: Carbon footprint of milk. *Letters in Animal Biology*, 4(1), 10-16. <https://doi.org/10.62310/liab.v4i1.131>
- The Dairy Sustainability Framework. (2023). Criterios de sostenibilidad. <https://www.dairysustainabilityframework.org/es/criterios/>
- The International EPD® System. (2021). PCR 2021:08 Dairy products (1.0): UN CPC 022: Raw milk, UN CPC 221: Processed liquid milk, cream and whey y UN CPC 222: Other Dairy products. <https://environdec.com/pcr-library/with-documents>
- Thoma, G., Popp, J., Nutter, D., Shonnard, D. R., Matlock, M. y Adom, F. (2013). Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment. *International Dairy Journal*, 31, S3-S14.
- Tieri, M., Herrera, E., Delbon, M. y Gere, J. (2024). Estrategias de mitigación y su impacto en la huella de carbono en un tambo en la Provincia de Santa Fe, Argentina. Estudio de caso. En: 47° Congreso Argentino de Producción Animal. Reconquista, Santa Fe. AAPA.
- Wang, X., Ledgard, S., Luo, J., Guo, Y., Zhao, Z., Guo, L. y Ma, L. (2018). Environmental impacts and resource use of milk production on the North China Plain, based on life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 625, 486-495.
- Weiler, V., Udo, H., Viets, T., Crane, T. y DeBoer, I. (2014). Handling multi-functionality of livestock in a life cycle assessment: the case of small-holder dairying in Kenya. *Environmental Sustainability*, 8, 29-38.
- Wilkes, A., Wassie, S., Fraval, S. y vanDijk, S. (2020). Variation in the carbon footprint of milk production on smallholder dairy farms in central Kenya. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121780>
- Yan, M., Humphreys, J. y Holden, N. (2013). Life cycle assessment of milk production from commercial dairy farms: the influence of management tactics. *Journal of Dairy Science*, 96(7), 4112-4124.