UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE VETERINARIA

Programa de Posgrados

Emisiones de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono en predios ganaderos sobre campo natural con diferente proporción de mejoramientos: estudio de casos.

IBRAHIM M. GONZÁLEZ LOZANO

TESIS DE MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN ANIMAL

URUGUAY
2021

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE VETERINARIA

Programa de Posgrados

Emisiones de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono en predios ganaderos sobre campo natural con diferente proporción de mejoramientos: estudio de casos.

IBRAHIM M. GONZÁLEZ LOZANO

_____	_____
Ing. Agr. PhD Verónica S. Ciganda	**DMV PhD Cecilia Cajarville**
Director de Tesis	**Co-director**

2021

INTEGRACIÓN DEL TRIBUNAL DE

DEFENSA DE TESIS

Francisco Dieguez - Presidente; Ing. Agr., Ph.D.,

Facultad de Veterinaria UdelaR

Instituto del Producción Animal – Uruguay

Alejandro La Manna; Ing. Agr., Ph.D.
Investigador principal referente
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA – Uruguay

Gonzalo Becoña; Ing. Agr. M.S.
Coordinador Nacional de Técnicos Sectoriales
Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA – Uruguay

2021

UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY
FACULTAD DE VETERINARIA
PROGRAMA DE POSGRADO

ACTA DE TESIS DE MAESTRÍA

ORIENTACIÓN: Maestría en Producción Animal

LUGAR Y FECHA DE LA DEFENSA: PLATAFORMA ZOOM, Jueves 02 de Setiembre de 2021

TRIBUNAL: Francisco Dieguez, Presidente
Alejandro Lamanna
Gonzalo Becoña

CI	NOMBRE	CALIFICACIÓN	NOTA
6.148.649 - 7	Ibrahim González	11	S S MB

PRESENTADOS	NO PRESENTADOS	APROBADOS	APLAZADOS	INSCRIPTOS
1	0	1	0	1

TRIBUNAL **FIRMA**

Francisco Dieguez.....

Alejandro La Manna.....

Gonzalo Becoña ....

NOTA: La calificación mínima para aprobar la defensa es B.B.B (6)

FIRMAS, TÍTULO (Actas) y COPYRIGHT

Al inicio, antes del texto, no paginadas

DEDICATORIAS

Este trabajo va dedicado a quienes marcaron profunda huella en mí, durante su desarrollo.

- A Dios y a la Virgen como ofrenda de trabajo.
- A mi tierra natal por inspirarme a seguir aprendiendo para algún día colaborar con un resurgimiento productivo sustentable.
- A Uruguay país chiquito pero de grandes personas por brindarme oportunidades.
- Al querido Diego Armand Ugon quien debe estar contribuyendo con su inteligencia en el cielo, Dios te tenga en su santa Gloria.
- A mis padres y hermana quienes me han apoyado a la distancia.
- A mi amada compañera de vida y a mi hijo quienes me dieron y me dan el amor e inspiración para seguir adelante en cada proyecto que afronto… y los que faltan.. ¡Amén!

AGRADECIMIENTOS

Quiero hacer este acto de gracia a quienes de una u otra forma aportaron para el diseño, planificación, desarrollo y conclusión de este trabajo.

- A Dios y a la Virgen por haberme brindado tantas bendiciones y abrirme el camino al trabajo humilde y relevante de la investigación.
- A Verónica Ciganda por alentarme a incursionar en el proyecto, por brindarme su confianza y amistad al igual que su dirección y asesoría. Dios te bendiga a ti y a tu familia. Además por haber sido un ejemplo de profesionalismo, perfección académica y humildad.
- A Cecilia Cajarville y esposo por brindarme su amistad y respeto, además de sus acertados consejos académicos.
- A INAC por financiar tan relevante y oportuno proyecto para el Uruguay.
- A INIA en especial a las personas de las estaciones Estanzuela y Tacuarembó quienes desde el principio me hicieron sentir como uno más de su gran familia motivando el despertar de la llama investigativa.
- Al equipo de lechería por prestarme la oficina donde pasé gran parte de la maestría planificando, diseñando, y llevando adelante todo el trabajo.
- A Francisco Dieguez y Alejandro Mendoza, por sus valiosos aportes en los seminarios.
- A Martín Jaurena por compartir productivas conversaciones conmigo.
- A Fernando Latanzzi y Virginia Pravia por su apoyo en cuanto al secuestro de carbono.
- A José “Chema” Arroyo, por su apoyo desinteresado en el ensayo de degradabilidad de la fibra. Y por compartir sus consejos, su partícular sentido del humor y por bridarme su amistad.
- A Luciana Torres, Laura Assandri, por su colaboración en el laboratorio de nutrición animal de La Estanzuela.
- A Julieta Mariotta por su eterna buena onda y colaboración logística y por compartir parte de su experiencia en la toma de muestras.
- A Roberto Nollenberger por su apoyo en los traslados durante gran parte de la investigación.
- A Alejandra Díaz y Anabella Domeniguini por su eficaz busqueda de las referencias solicitadas, unas verdaderas ¡cra’!
- Al pesonal de limpieza de La Estanzuela por sorprenderme con las tazas de café siempre limpias, espectaculares chicas.
- A Leonidas Carrasco, Mauricio Bustamante por compartir su conocimiento y experiencias conmigo en la metodología LCA.
- A Alejandro La Manna por su apoyo en los análisis, por compartir amenas y productivas conversaciones.
- A Oscar Blumetto por compartir conmigo un poco del interior uruguayo.

- A mis compañeros de maestría Gabriela Silva, Bernardo Lockhart, Victoria “Pitty” Urioste con quienes se hizo mucho más amena la maestría y con quienes compartimos horas de cursos y todos los demás compañeros con quienes compartimos pasillo en LE. ¡éxito muchachos! Nos vemos en el camino.
- Y a todas las personas que olvido nombrar pero que de una u otra forma contribuyeron día a día con mi desempeño durante la maestría…

… Sinceramente ¡Gracias!

INDICE

DEDICATORIAS 7
AGRADECIMIENTOS 8
RESUMEN 14
SUMMARY 15
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Emisiones del sector agrícola junto al sector combustibles e industria en el mundo 1
1.2. Sistema de producción ganadera de pastoreo extensivo y su relevancia a nivel mundial y en Uruguay. 2
1.2.1. Sistema ganadero extensivo. 2
1.3. Caracterización de la ganadería en Uruguay 5
1.4. Situación nacional de emisiones globales de GEI 6
1.5. Guías para la evaluación del impacto ambiental 8
2. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS 9
2.1. Análisis de Ciclo de Vida 10
2.2. Emisiones de metano y óxido nitroso 12
2.2.1. Metano entérico 12
2.2.2. Óxido nitroso 14
2.3. Secuestro de carbono 15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, Y OBJETIVOS 17
3.1. Hipótesis 18
3.2. Objetivo 18
3.3. Objetivos específicos 18
4. MATERIALES Y MÉTODOS 19
4.1. Selección de predios y sitios de estudio 19
4.2. Límites del estudio y unidad funcional 21
4.3. Recopilación de Inventario 22
4.4. Estimación de Emisiones 24
4.5. Estimación del contenido de carbono en el campo natural 26
5. RESULTADOS 27
5.1. Existencias y distribución ganadera de los predios. 27
5.2. Características de las pasturas. 28
5.3. Características de las pasturas por predio 29
5.4. Emisiones GEI 30
5.5. Contribución de las distintas fuentes a las emisiones totales 31

5.6. Contribución de las distintas fuentes a las emisiones totales por predio..... 32
5.7. Contribución por categoría a las emisiones totales 33
5.7.1. Contribución por categoría a las emisiones totales por predio..... 34
5.8. Intensidad de emisiones..... 35
5.9. Secuestro de Carbono 37
6. DISCUSIÓN..... 37
6.1. Emisiones totales. 37
6.2. Disponibilidad de MS, carga animal e intensidad de emisiones GEI. 39
6.3. Contenido de carbono en el suelo. 41
7. CONSIDERACIONES FINALES..... 43
7.1. Optimización productiva 43
7.1.1. Manejo de las pasturas 43
7.1.3. Manejo de la dotación animal..... 44
8. CONCLUSIONES 45
ANEXOS 46
Anexo 1. Cuestionario aplicado en el estudio 46
Anexo 2. Tabla 6.2 guía IPCC,2019..... 51
Anexo 3. Detalle de resultado por predio 52
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

INDICE DE CUADROS

Cuadro I. Faena promedio de bovinos por categoría (2010-2019). 5
Cuadro II. Peso promedio de haciendas bovinas (2010-2019) 5
Cuadro III. Criterios de selección de predios ganaderos 19
Cuadro IV. Características generales de los predios seleccionados 21
Cuadro V. Factores de conversión para un GWP100 22
Cuadro VI. Referencias metodológicas para los análisis químicos efectuados a las muestras 23
Cuadro VII. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de metano. 24
Cuadro VIII. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de óxido nitroso 25
Cuadro IX. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de dióxido de carbono 26
Cuadro X. Ecuaciones utilizadas para la estimación del stock de carbono 27
Cuadro XI. Stock ganadero bovino de los predios según categoría, peso promedio y carga animal. 28
Cuadro XII. Composición química de las pasturas según tipo de sistema productivo 29
Cuadro XIII. Resultados del análisis de las pasturas por predio 29
Cuadro XIV. Emisiones totales promedio de gases de efecto invernadero de los predios de sistemas productivos CN y CNm. 30
Cuadro XV. Emisiones totales de GEI por predio y fuente de emisión 33
Cuadro XVI. Contribución a las emisiones por categoría y predio 35
Cuadro XVII. Intensidad de emisiones GEI según sistema productivo 36
Cuadro XVIII. Intensidad de emisiones GEI para cada predio 36
Cuadro XIX. Contenido de carbono en el suelo sistemas productivos CN y CNm ... 37
Cuadro XX. Balance de Carbono de los predios y capacidad de mitigación. 37
Cuadro. XXI. Escenario imaginario de Balance de Carbono 42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inventario Mundial de emisiones GEI (2009 – 2018). 2
Figura 2. Regiones agrupadas por actividades de producción agropecuaria 4
Figura 3. Participación global de UY en las emisiones de GEI 8
Figura 4. Distribución de emisiones nacionales por sector y categoría con métrica GWP100, 2014 7
Figura 5. Principales etapas de un análisis de ciclo de vida (ACV). 12
Figura 6. Ubicación geográfica de los predios seleccionados. 20
Figura 7. Límites espaciales y temporales de los sistemas en estudio 22
Figura 8. Proporción relativa de las emisiones de GEI (% de las emisiones totales) de la producción ganadera sobre CN con límite temporal de un año 31
Figura 9. Proporción relativa de las emisiones de GEI (% de las emisiones totales) de la producción ganadera sobre CNm con límite temporal de un año 31
Figura 10. Emisiones totales por fuente de emisión en cada predio 32
Figura 11. Contribución de CH_4 por categoría a las emisiones GEI totales..... 33
(Sistema Productivo CN) 33
Figura 12. Contribución de CH_4 por categoría en las emisiones GEI totales..... 34
(Sistema Productivo CNm) 34
Figura 13. Distribución porcentual de emisiones totales por predio según categoría35

RESUMEN

En el Uruguay, el sector agropecuario contribuye con más del 75% a la generación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) totales del país, siendo el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) los principales gases emitidos por el sector. El ganado bovino constituye la fuente más relevante de emisión de CH_4, a causa de la fermentación entérica, y de N_2O, originado por el nitrógeno depositado en el suelo a través de la orina y heces. Si bien en nuestro país han existido trabajos puntuales de cuantificación de las emisiones de CH_4 y de N_2O en los sistemas agropecuarios, aún no se dispone de un análisis holístico a nivel predial en los distintos sistemas ganaderos del país que contribuyan a lograr los compromisos internacionales asumidos en el Acuerdo Climático de Paris en el año 2015. Por lo tanto, existe la necesidad de conocer en forma integrada las emisiones de todos los procesos y actividades a nivel de predio ganadero e identificar las características productivas que contribuyan a su mitigación. En tal sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar la sustentabilidad ambiental en los sistemas ganaderos sobre campo natural y con mejoramientos de pasturas e identificar oportunidades que contribuyan a mejorar o reducir su impacto ambiental y contribuir a la neutralidad de las emisiones GEI para el año 2030. La hipótesis de este trabajo de investigación fue que el aumento de la intensidad de producción en predios ganaderos pastoriles a través del mejoramiento agronómico de las pasturas naturales contribuye a la mitigación de las emisiones de GEI y al aumento de la captura de carbono. Esta hipótesis se verificó a través de los siguientes objetivos específicos: 1. Estimar las emisiones anuales de GEI y la capacidad de secuestro de carbono en predios de producción de carne con distinto porcentaje de mejoras en sus pasturas naturales; 2. Validar la guía LEAP (FAO) de indicadores ambientales (específica para sistemas de producción de grandes rumiantes) para su aplicación en Uruguay y 3. Identificar aquellas variables en el sistema de producción que permitan mitigar las emisiones y/o aumentar el contenido de carbono en el suelo. El cumplimiento de estos objetivos se llevó adelante en seis predios de producción ganadera basados en campo natural seleccionados según la proporción del área de campo natural con mejoramientos. Este criterio fue utilizado como indicador de intensidad de producción y los predios fueron agrupados en aquellos con áreas de campo natural con mejoramientos <10% (sistemas de producción CN) y con áreas de campo natural con mejoramientos >30% (sistemas de producción CNm). Se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida y se incluyeron todos los procesos desde la boca del animal hasta la portera del predio tomando en cuenta el suelo como reservorio de carbono. La intensidad de emisión de GEI en los sistemas CN y CNm fue 0,027 y 0,013 ton CO_2-eq kg PV^{-1}, respectivamente. Los resultados sugieren como buenas prácticas de mitigación en los predios estudiados: la implantación de gramíneas y leguminosas en el campo natural, el manejo adecuado de la pastura y el ajuste óptimo de la dotación animal.

Palabras claves: metano, natural, carbono, GEI, pastoreo.

SUMMARY

In Uruguay, the agricultural sector contributes with more than 75% of total greenhouse gas (GHG) emissions of the country, being methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) the main gases emitted by the sector. Bovine cattle constitute the most relevant source of both the emission of CH_4, due to enteric fermentation, and N_2O caused by the nitrogen deposited in the soil through the urine and dung. Although in our country there have been specific research to quantify CH_4 and N_2O emissions in agricultural systems, there is still no holistic analysis at the farm level in the different livestock systems of the country that contribute accomplishing international commitments assumed in the Paris Climate Agreement in 2015. Therefore, there is a need of knowledge in an integrated way the emissions of all processes and activities at the farm level to identify the productive characteristics that contribute to their mitigation. In this sense, the objective of this work was to evaluate environmental sustainability in livestock systems on native grasslands with pasture improvements, to identify agronomic management opportunities to improve or reduce their environmental impact, and to contribute to the neutrality of GHG emissions by the year 2030. The hypothesis of this research work was that increasing production intensity in pastoral livestock farms through the agronomic improvements of natural pastures contributes to the mitigation of GHG emissions and the increase in carbon sequestration. This hypothesis was verified through the following specific objectives: 1. to estimate the annual GHG emissions and the carbon sequestration capacity in meat production farms of contrasting production intensities; 2. Identify those variables in the production system that allow mitigating emissions and/or increasing carbon sequestration and 3. Validate the LEAP guide (FAO) of environmental indicators (specific for large ruminant production systems) for natural field farms (CN) and improved natural field farms (CNm). The fulfillment of these objectives was carried out through the selection of six livestock production farms according to their distribution of land use (improvements of their native pastures in %) as an indicator of production intensity, grouping them into 2 groups: One group with <10% improvements in their native pastures called “production systems CN” and another group with >30% improvements in their native pastures called “production system CNm”. The life cycle analysis methodology was used and the processes from the animal's mouth to the gate of the farm were included, considering the soil carbon sequestration. The GHG emission intensity in systems CN and CNm was 0,027 and 0,013 tones CO_2-eq kg LW^{-1} respectively. The results suggest as good mitigation practices in the studied farms: the implantation of grasses and legumes in the natural field, the adequate management of the pasture and the optimal increase in the carbon? stock.

Keywords: methane, native, grassland, carbon, GHG, grazing.

1.INTRODUCCIÓN

La agricultura global enfrenta grandes desafíos en los próximos 50 años. Se estima que la población mundial aumentará a nueve mil millones de personas a mediados de siglo (Godfray et al., 2010a). Si bien en el siglo pasado se han logrado importantes aumentos en la producción de alimentos, se proyecta que habrá que producir entre 70 - 100% más alimento para satisfacer la demanda de la población en crecimiento (Godfray et al., 2010b).

El desafío de producir más alimentos dependiendo de los mismos recursos se intensifica aún más por la crisis del cambio climático. La reducción del área de tierras agrícolas productivas debido, ya sea, a la desertificación, urbanización o a la erosión del suelo, incrementada por los efectos del cambio climático, ha aumentado aún más la presión para producir más con menos recursos (Godfray et al., 2010b). Ya desde el año 2010a, Godfray et al., planteaban que un cambio de paradigma hacia la intensificación sostenible de la agricultura podría convertirse en la única opción viable.

El impacto ambiental de la ganadería es un asunto que está siendo abordado globalmente por las comunidades y sectores relacionados al tema como la comunidad científica, los productores, los tomadores de decisiones y los consumidores. La ganadería contribuye en muchos aspectos al impacto ambiental, incluyendo aspectos que afectan al aire, al cambio climático, al suelo, al agua y a la biodiversidad (Steinfeld and Wassenaar, 2007). Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector pecuario se sustentan en el elevado número de rumiantes domésticos existentes en la tierra (2.9 billones de cabezas, incluye: búfalos 0.2 billones, bovinos 1.5 billones y lanares 1.2 billones) (FAOSTAT, 2017). Además, la proyección del aumento demográfico mundial para el año 2050 demandará una producción de carne de 465 millones de toneladas como fuente de proteína de origen animal (línea base 1990/2001) (FAO, 2006) lo cual contribuiría al aumento del rodeo mundial de rumiantes.

1.1. Emisiones del sector agrícola junto al sector combustibles e industria en el mundo

El dióxido de carbono (CO_2) es el gas de efecto invernadero más importante para el cambio climático inducido por la actividad humana, es decir de origen antropogénico. Existen otros gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera que poseen moléculas con mayor capacidad de retención del calor que el CO_2.

La cantidad de CO_2 de origen antropogénico y el hecho de que otras emisiones permanezcan en la atmósfera por cientos o por miles de años hacen del CO_2 el foco del desafío para mitigar el cambio climático. Las emisiones antropogénicas de CO_2 más relevantes son generadas por la quema de combustibles fósiles (carbón, hidrocarburos, incluyendo el gas natural) generando el 90% de todas las emisiones

de CO_2 (Friedlingstein et al., 2019). En el período comprendido entre 2009 y 2018 el CO_2 proveniente de motores de combustión interna y los gases desechados por la industria contribuyeron en 86% al total de emisiones de GEI, mientras que el sector cambio de uso del suelo que incluye la producción agropecuaria, agricultura, etc., aportó 14% (Figura 1).

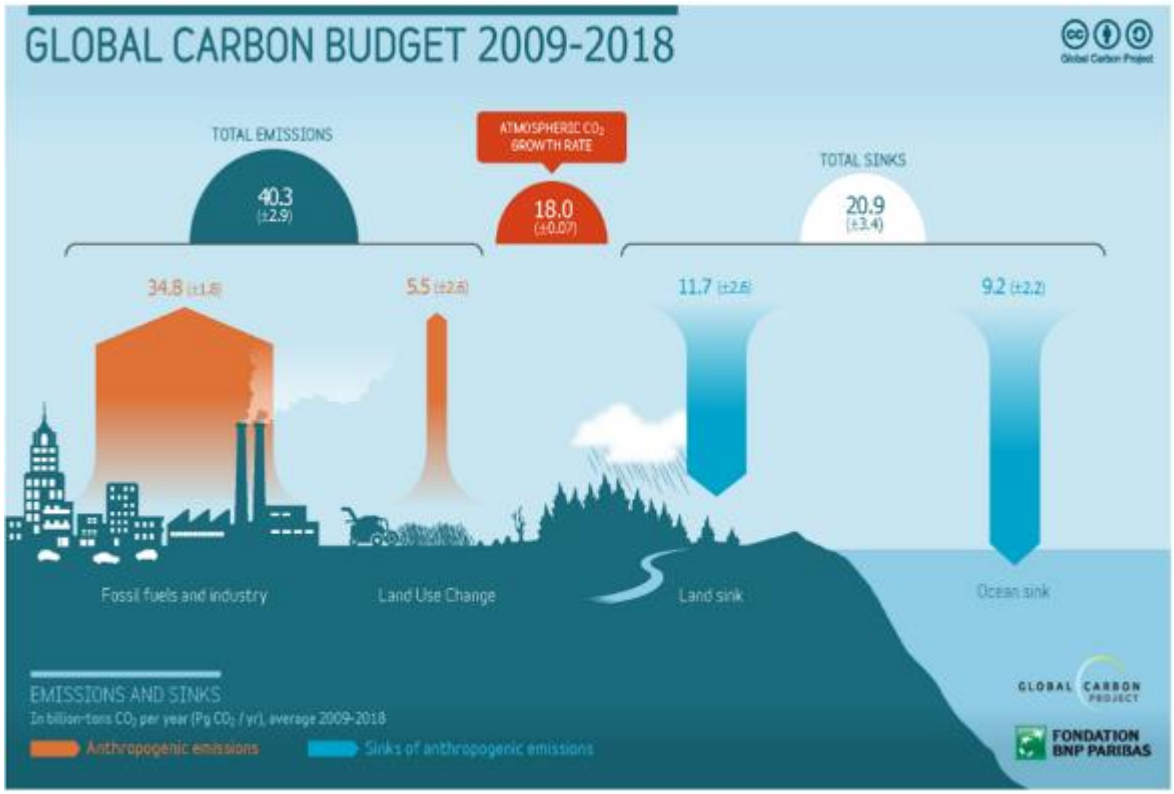

Figura 1. Inventario Mundial de emisiones GEI (2009 – 2018).
Fuente: Global Carbon Atlas.com

1.2. Sistema de producción ganadera de pastoreo extensivo y su relevancia a nivel mundial y en Uruguay.

La demanda de alimentos de origen animal, principalmente carne, leche y huevos para la población mundial ejerce una importante presión sobre los sistemas de producción ganadera existentes en el mundo, más aún al considerar la población proyectada para el 2050. Entre los principales sistemas de producción ganadera se encuentran: el sistema de pastoreo extensivo, el sistema mixto (agrícola – ganadero) donde se combinan la producción ganadera con la agricultura y el sistema intensivo industrial. En el marco de este trabajo sólo se abordará el sistema de pastoreo extensivo.

1.2.1. Sistema ganadero extensivo.

Los sistemas ganaderos extensivos son aquellos donde más del 90% de la materia seca suministrada al rodeo proviene de las pasturas o de forrajes anuales producidos en el predio y que mantienen una dotación animal anual

promedio menor a 10 LU (unidad ganadera, siglas en inglés) por hectárea de tierra agropecuaria (Seré et al., 1996a). La ganadería sobre pasturas naturales en Centro y Sudamérica junto a los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD) generan más del 75% de la producción de carne mundial (Seré et al., 1996). En los sistemas pastoriles, principalmente en Latinoamérica y Asia, el incremento de la producción se basa frecuentemente en el aumento del número de animales por superficie.

El área de pasturas naturales con fines de producción ganadera está disminuyendo a nivel mundial. Su disponibilidad se ve efectada por varias razones, entre las cuales está la competencia con la agricultura, lo que limita el incremento del número de rebaños en estos sistemas (Bruinsma, 2003).

Adicionalmente, la degradación de los suelos y la pérdida de especies gramíneas debido a factores productivos, tales como el pastoreo contínuo y alta dotación animal afectan la producción ganadera en pasturas naturales. Algunos signos de degradación son el aumento de especies herbáceas pequeñas y gramíneas estoloníferas y el incremento de gramíneas de manojos, así como la reducción en el número de especies. Estos cambios en la composición botánica resultan en una reducción en la producción anual de forraje del 12% (Berretta, 1998).

Uruguay cuenta con una superficie de 176.196 km^2 (Lazo Pritsch, 2012) y destina el 93% (16,4 millones de ha.) de la superficie del territorio a la producción agropecuaria, siendo la ganadería bovina el sector que ocupa mayor área de tierra con 6,5 millones de hectáreas (40% de las regiones agropecuaria del país) (DIEA, 2019). La principal fuente de energía del rodeo nacional proviene de pasturas, abarcando 14,1 millones de hectáreas. El 82% de estas pasturas (11,5 millones de hectáreas) corresponden a pasturas nativas, o también conocido como campo natural, y el 18% corresponden a campo natural con pasturas mejoradas (DIEA, 2018),convirtiendo al sistema ganadero extensivo como el principal sistema ganadero del país (DIEA, 2018) (Figura 2).

En estos sistemas ganaderos extensivos los animales se alimentan libremente durante todo el año mediante el pastoreo continuo de gramíneas de muy alta heterogeneidad y frecuentemente, de baja calidad (Ciganda et al., 2016), las cuales además, son afectadas por las variaciones climáticas. También se puede observar proliferación de montículos y en ocasiones degradación de los suelos por la erosión debido a la poca cobertura de gramíneas y en donde la selectividad del ganado promueve la acumulación de especies menos palatables (Dick et al., 2015).

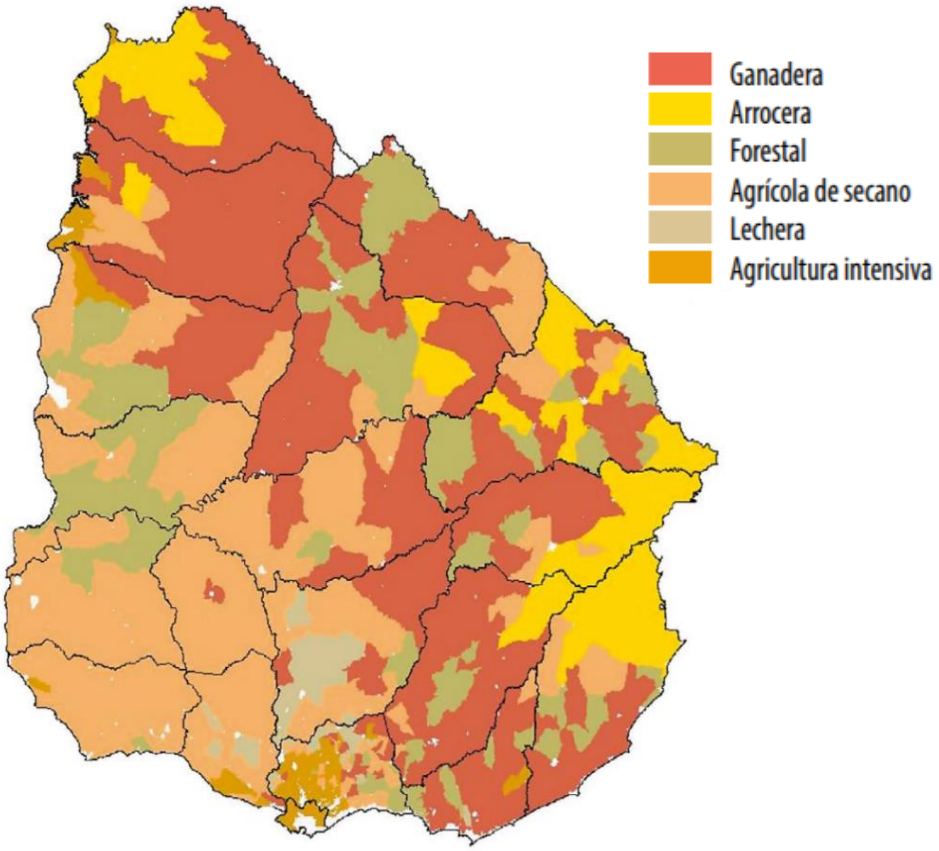

Figura 2. Regiones agrupadas por actividades de producción agropecuaria.
Fuente: (DIEA, 2018)

Algunos estudios sobre campo natural en diferentes comunidades herbáceas y estaciones del año han mostrado un predominio de especies estivales (Berretta, 1997, 1996, 1990; Formoso, 1990; Olmos, 1992). Por su parte, la mitad de las especies de invierno son gramíneas gruesas y de baja digestibilidad, mientras que la presencia de las especies finas de mejor digestibilidad es escasa.

La mayor cantidad de especies estivales explica la alta producción de forraje durante los meses de primavera y verano, adicionalmente la presencia de leguminosas nativas es baja (Berretta et al., 2000). La productividad forrajera varia entre 2500, 3500 y más de 5000 kg materia seca por hectárea (MS ha^{-1}) para suelos superficiales y de baja fertilidad, para suelos intermedios y para suelos profundos y fertiles, respectivamente (Berretta and Bemhaja, 1997; Formoso, 1990).

En los suelos superficiales existe una marcada presencia de especies gramíneas de baja digestibilidad y palatibilidad, mientras que en suelos más profundos y con mejor fertilidad aumenta la frecuencia de especies con mejores características (Berretta et al., 2000).

1.3.Caracterización de la ganadería en Uruguay

Uruguay es uno de los principales productores de carne del mundo. El ganado de carne es criado a cielo abierto sobre pasturas que en su gran mayoría son gramíneas nativas, dispone de un clima templado y de abundante fuentes naturales de agua lo que junto a la gestión de manejo de los animales en el campo le aseguran al ganado su bienestar (INAC, n.d.). El rodeo bovino nacional cuenta con poco más de 11,3 millones de cabezas (OPYPA, 2019) con predominio de razas *Bos Taurus*, dentro de las cuales figuran Aberdeen Angus y Hereford (Gómez Miller, 2006; INAC, 2020).

Según las características de los campos descritos anteriormente (punto 1.2.1) y asociados al pastoreo continuo, la producción ganadera extensiva en Uruguay tiene varias limitaciones, ligadas principalmente a factores nutricionales, algunas de las más importantes son: apareamiento en edades avanzadas en vaquillonas (3 años aprox.); baja tasa de partos (65%); baja ganancia de peso vivo de los terneros, con un consecuente, bajo peso al destete (130-140 kg); edad avanzada para la faena (4 años aprox.); y bajas tasas de extracción (18-20%). En tales condiciones, la producción de carne bovina en los sistemas extensivos tradicionales es de aproximadamente 65 kg ha^{-1} $año^{-1}$ (Berretta et al., 2000).

La distribución promedio de la faena bovina según categoría, desde 2010 a 2019, ha estado dominada por los novillos (49%), las vacas (38%), las vaquillonas (11%), y en menor importancia los terneros (0,6%) y toros (1,5%) (INAC, 2019) (Cuadro I).

Cuadro I. Faena promedio de bovinos por categoría (2010-2019).

NOVILLOS	VAQUILLONAS	VACAS	TERNEROS	TOROS	TOTAL
		Cabezas			
1.068.937	240.177	822.319	13.554	31.674	2.176.661

Fuente: INAC 2019

La distribución del peso promedio de los animales en edad de faena fue para la categoría novillos 514 kg y la categoría vaca 456 kg, con un rendimiento en 4ta balanza de 54% y 50%, respectivamente (INAC, 2019) (Cuadro II).

Cuadro II. Peso promedio de haciendas bovinas (2010-2019).

NOVILLOS			VACAS	
en pie	4° balanza		en pie	4° balanza
		kg		
513,8	276,8		456,0	229,8

Fuente: INAC, 2019

La carne bovina es el principal producto de exportación del Uruguay, con una participación del 23% en las ventas al extranjero, seguida por la celulosa y en tercer lugar se encuentran los productos lácteos con una participación del 10% en las exportaciones (URUGUAY XXI, 2019). Esta relevancia económica y la demanda de los consumidores cada vez más preocupados por consumir productos amigables con el medio ambiente, coloca al rodeo nacional en una posición susceptible de ser estudiado y optimizado.

1.4.Situación nacional de emisiones globales de GEI

La importancia económica, social y ambiental del sector ganadero cárnico en el Uruguay, las señales desde los consumidores en relación con la calidad de los productos y los impactos ambientales relacionados a su producción y distribución (MGAP, 2013) y el paradigma de intensificación sostenible de los sistemas de producción de carne, requieren el estudio detallado del impacto ambiental de éstos a nivel nacional.

Desde la ratificación por parte de Uruguay, en julio 1994 de la convención marco de las naciones unidas en cambio climático (CMNUCC) y del protocolo de kioto en noviembre 2000, la unidad de cambio climático de la dirección nacional de medio ambiente (DINAMA-MVOTMA), ha tenido entre sus cometidos facilitar la aplicación de la convención en el país y realizar el inventario nacional de emisiones netas de gases de efecto invernadero (INGEI), (MGAP, 2013).

Según el INGEI 2017, en el país las emisiones generadas por el sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de Suelo, conocido por sus siglas en inglés como AFOLU (*Agriculture Forestry and Other Land Use)*, son responsables del 75% de las emisiones nacionales, seguidas por el sector Energía con un 20%, siendo ambos sectores los generadores de GEI más importantes del país. La emisión de CH_4 entérico, representa el 45% del 75% de las emisiones totales provenientes del sector AFOLU, seguido por las emisiones directas e indirectas de N_2O de suelos gestionados responsables del 22% y del 5%, respectivamente (MVOTMA, 2017) (Figura 3).

A nivel mundial, las emisiones GEI de Uruguay contribuyen con el 0.05% a las emisiones totales globales (FCCC, 2015) (Figura 4).

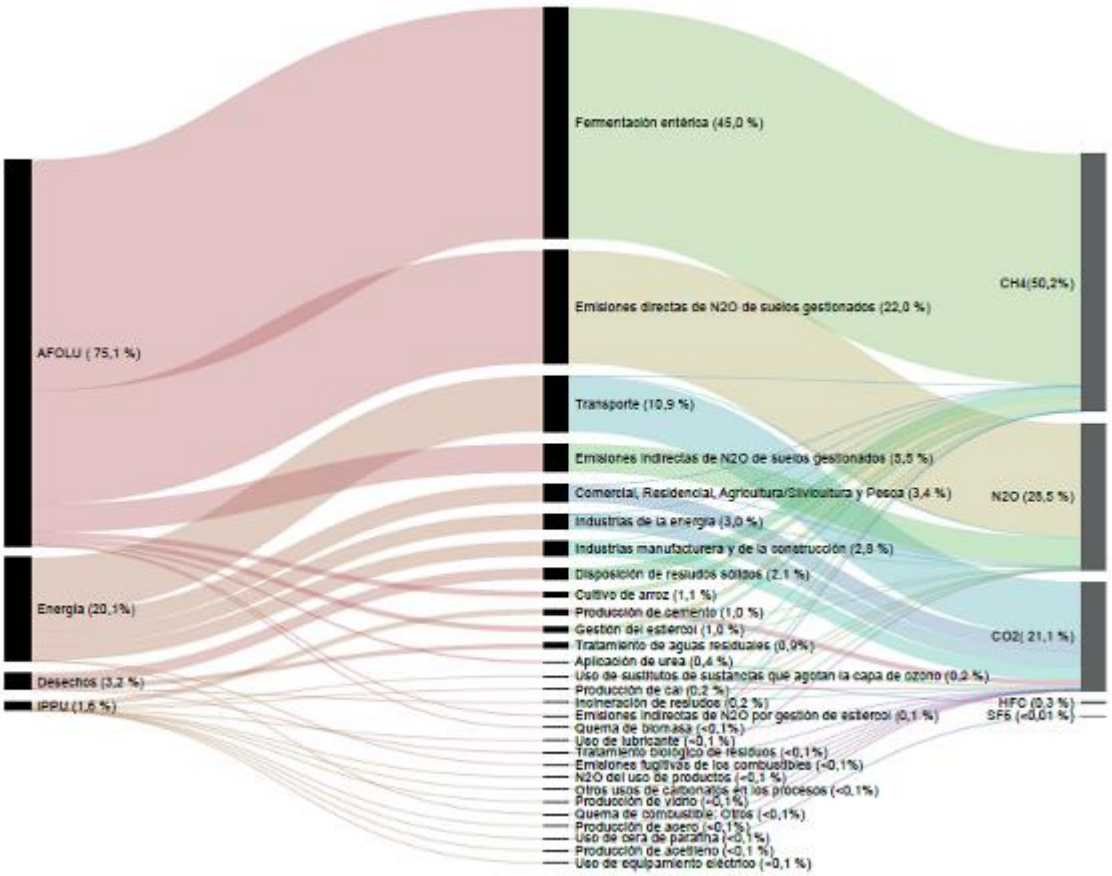

Figura 3. Distribución de emisiones nacionales por sector y categoría con métrica GWP100, 2014

Fuente: MVOTMA, Inventario Nacional de GEI, 2017

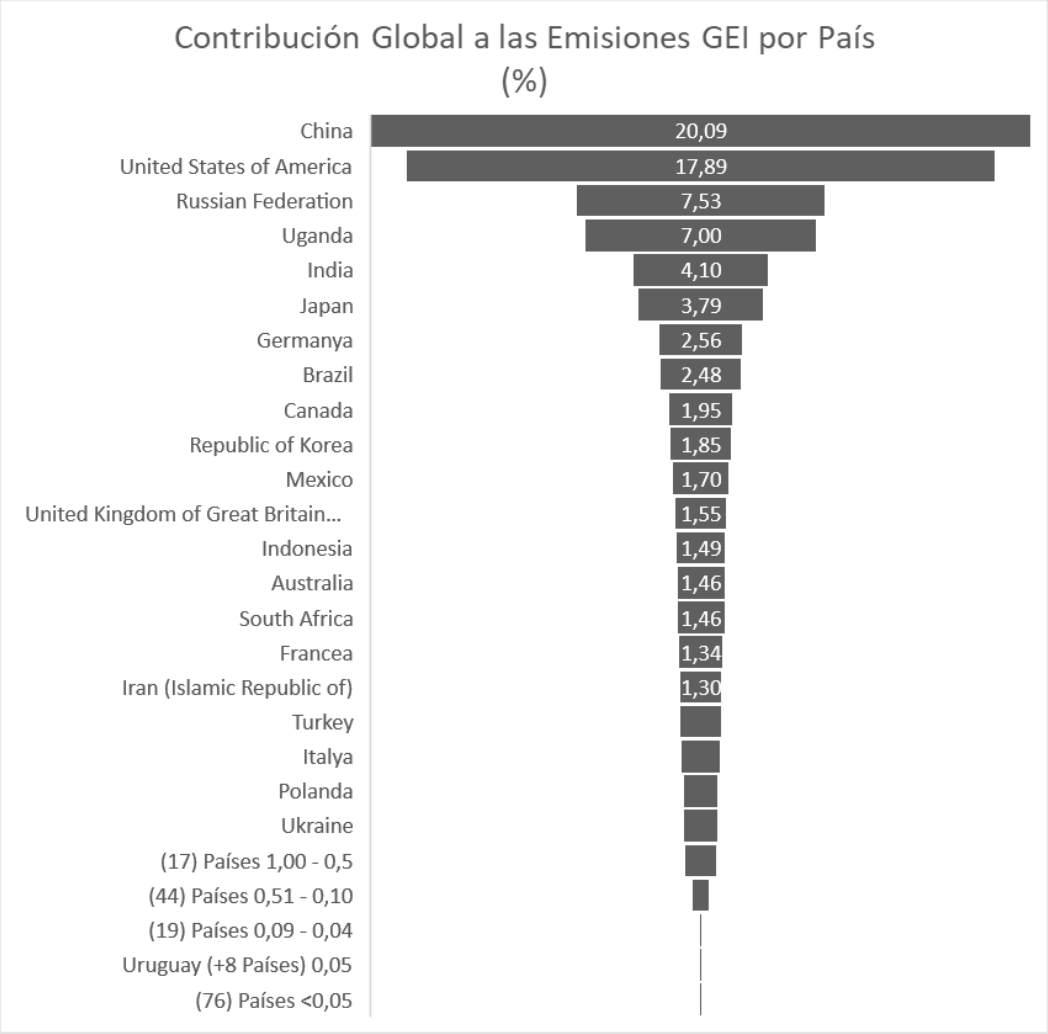

Figura 4. Participación global de UY en las emisiones de GEI
Fuente: Reporte de la Conferencia de las Partes, Paris 2015.

1.5.Guías para la evaluación del impacto ambiental

La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO, 2016) reunió a científicos e investigadores del mundo, quienes diseñaron las guías LEAP, por sus siglas en inglés, *Livestock Environmental Assessment and Performance.* Estas guías proponen las directrices para la evaluación del impacto ambiental de los distintos sistemas productivos agropecuarios en cada país. La adecuación del procedimiento sugerido por las guías a las características de cada nación está siendo evaluada por los países comprometidos, tal es el caso de Uruguay, que asumió el compromiso de evaluar un grupo de estas guías en sus sistemas productivos ganaderos.

En el presente trabajo se utiliza la guía LEAP para la evaluación del desempeño ambiental de la cadena de suministro de grandes rumiantes en Uruguay. Esta guía propone el uso de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como herramienta metodológica para la estimación de los impactos ambientales de los sistemas productivos agropecuarios, a través de la utilización de bases de datos.

2. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

Los principales GEI en la producción agropecuaria son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). En general, la ganadería emite a la atmósfera 18% del total de las emisiones antropogénicas de GEI, es decir, todas las emisiones derivadas de la actividad agropecuaria realizadas directa o indirectamente por el humano, que incluyen la combustión de combustible fósil, deforestación, cambio de uso de la tierra, ganadería y fertilización (FAO, 2006).

Las emisiones de CH_4 como subproducto de la fermentación entérica, derivada de la degradación del alimento fibroso en el rumen, representan el 43% de las emisiones totales de GEI de la cadena de suministro en la ganadería a nivel global (FAO, 2016). Esto contribuye con el calentamiento de la atmósfera terráquea, cuya temperatura está proyectada a ascender en 1,8°C en los próximos 35 años (Blackburn, 2003). Al mismo tiempo, la ganadería es una importante fuente proteica, aportando un tercio de la proteína consumida por la población mundial y además es una solución para combatir la desnutrición en el planeta (FAO, 2006).

En el año 2017 la producción de carne mundial fue de 61,4 millones de toneladas, de las cuales Uruguay participó con el 4% (OPYPA, 2017), figurando como uno de los principales exportadores de carne del mundo. A nivel nacional el sector agropecuario es el que participa con mayores volúmenes en la generación de emisiones GEI siendo el ganado de carne la fuente más relevante de CH_4 y N_2O debido principalmente al tamaño del rodeo nacional (Ciganda, 2017).

La producción ganadera se ubica principalmente en las regiones norte, centro – norte y este del país, donde el sistema de producción predominante es el extensivo sobre pasturas nativas o campo natural (CN). La calidad del pasto del CN es variable según la ubicación geográfica, la estación del año y su manejo. Frecuentemente, el campo natural es asociado a pasturas de bajo valor nutritivo, baja digestibilidad y calidad (Ciganda et al., 2016). Este dato es importante, ya que, a mayor contenido de lignina en los pastos y menor digestibilidad, mayor será la producción de CH_4 durante la fermentación entérica (Jaurena y Cantet, 2016).

Con el fin de asegurar que todos los sistemas de producción de grandes rumiantes puedan ser evaluados en cuanto a su impacto al medio ambiente, la guía LEAP, utilizada en este trabajo, ha definido cinco sistemas de producción (FAO, 2016):

1) Sistemas intensivo mixto (agrícola-ganadero), donde animales son mantenidos estabulados permanentemente o durante la mayor parte del año.
2) Sistemas intensivo con animales criados predominantemente sobre pasturas en predios de confinamiento.
3) Sistemas extensivos con animales manejados a pastoreo comunal y alimentados con pastos autóctonos y residuos de cultivos o forestales.

4) Sistemas donde la producción de grandes rumiantes está integrado a la silvicultura y a la agrícultura.
5) Sistemas intensivos de gran escala

El presente trabajo se enfocará en el sistema de producción tipo tres que corresponde a “Sistemas extensivos con animales manejados a pastoreo comunal y alimentados con pastos autóctonos y residuos de cultivos o forestales” siendo el reglón que más se adapta a nuestras condiciones.

2.1.Análisis de Ciclo de Vida

Según Thoma et al. (2015) el análisis de ciclo de vida (ACV) se define como un enfoque sistemático para una estimación preliminar del impacto ambiental de un sistema, haciendo un análisis a escala de cualquier producto o servicio.

Específicamente, el ACV divide la cadena de suministro de los sistemas productivos en etapas, donde cada una de esas etapas tiene procesos con flujo de materiales y energía, entradas y salidas del proceso que pueden ser o no de otros elementos del sistema u otros sistemas, así como entradas y salidas de y hacia la naturaleza, como por ejemplo emisiones al suelo, al agua o al aire. Por lo tanto, la metodología del ACV estudia todos los procesos y actividades productivas desde la cuna hasta la tumba; esto implica que el método toma en cuenta el impacto ambiental de los procesos desde la extracción de las materias primas para la elaboración de insumos, que luego se utilizaran en la transformación de algún bien, hasta la deposición final luego de reciclado.

El ACV es un método en extremo versátil desde la perspectiva de su adaptabilidad a los procesos productivos (Bjørn et al., 2018), lo cual permite que sea empleado para evaluar el impacto ambiental de la fabricación tanto de aeronaves como de la producción de un kilogramo de carne vacuna sobre pasturas (producto primario). Por lo tanto, el ACV es un método reconocido para la comparación del desempeño ambiental de sistemas productivos de bienes o servicios (Tichenor et al., 2017).

En el estudio específico de la cadena de producción de grandes rumiantes una evaluación total se puede sintetizar en tres módulos: Producción de alimento para animales, Producción animal y Procesamiento primario.

El primer módulo abarca desde la cuna hasta la boca del animal, contemplando el cultivo del alimento (granos, cultivos forrajeros, pasturas, arbustos hasta árboles), su procesamiento, molienda y almacenaje. El módulo de producción animal cubre desde la cuna hasta la portera del predio, en este caso los productos generados principalmente son carne en peso vivo (PV), leche fresca, queso (kg), fuerza de tiro, etc. Y el último módulo, procesamiento primario, abarca desde la cuna hasta la

portera del frigorífico (FAO, 2016). Sin embargo, su adaptabilidad radica en que incluso los módulos mencionados anteriormente son divisibles para luego sumar cuidadosamente, evitando solapamiento o doble conteo de datos, todas las salidas del sistema que causan impacto al medio ambiente.

Las etapas del método ACV son principalmente cuatro:
1. Definición de objetivos y alcance del estudio: quizá la más importante de las etapas del método, ya que en esta se definen los objetivos del estudio, se describen los límites del sistema y se define la unidad funcional, es decir, como será expresado el resultado de los cálculos y finalmente se establecen las categorías de impacto a evaluar.

2. Recopilación de inventario: es un análisis cualitativo y cuantitativo de los recursos utilizados y las emisiones generadas en el ciclo de vida estudiado. Si el inventario es cuantitativo, por ejemplo, la masa y la energía son medidos en cada paso del sistema objeto de estudio (Andersson et al., 1994)

3. Análisis de impacto: esta etapa puede dividirse en: a) Clasificación, que comprende la agrupación de los datos del inventario en categorías de impacto o efectos ambientales (cambio climático, eutroficación, suelo, etc.), b) Caracterización, es el agregado dentro de las categorías de impacto por factores de equivalencia, por ejemplo: dióxido de carbono equivalente o nitrógeno en suelo o kilómetros cuadrados, etc. y c) Valoración, la cual puede ser cualitativa o cuantitativa (Andersson et al., 1994).

4. Interpretación de resultados: representa las conclusiones basadas en la evaluación realizada y las sugerencias para mejorar el proceso (Arvanitoyannis, 2008).

Una característica del método ACV es la iteratividad, dado que una vez que se establecen fallas o debilidades en cualquier etapa los esfuerzos se trasladan a la etapa pertinente para realizar los ajustes necesarios con el objeto de optimizar el análisis y obtener un diagnostico lo más próximo posible a la realidad del sistema estudiado (Figura 5).

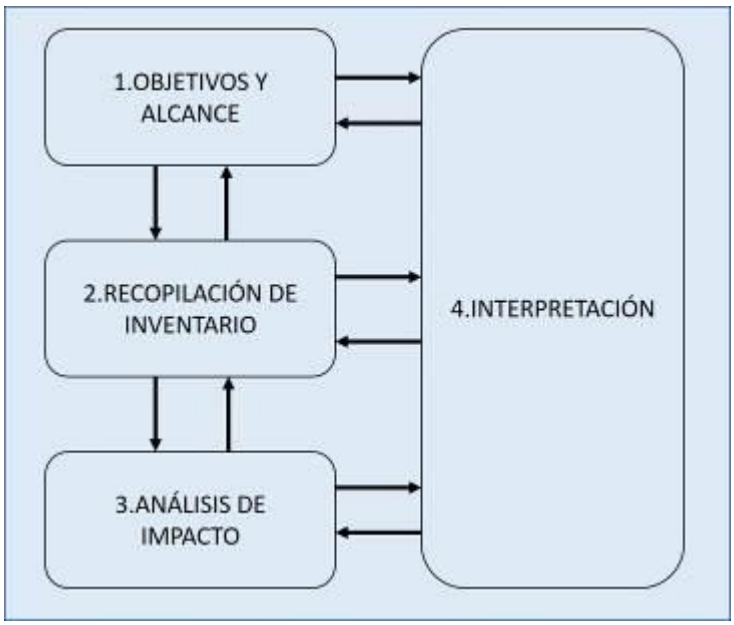

Figura 5. Principales etapas de un análisis de ciclo de vida (ACV).

Los resultados derivados de un ACV se expresan en distintas unidades de medida según la categoría de impacto ambiental seleccionado. Para la categoría de impacto al cambio climático la unidad estándar es el CO_2 equivalente (CO_2-eq). El CO_2-eq es la cantidad de CO_2 que podría causar el mismo forzamiento radiativo que una cantidad de un gas de efecto invernadero o una mezcla de los mismos en un lapso de tiempo dado (IPCC, 2014), lo cual se realiza con fines comparativos.

El forzamiento radiativo es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio (Shindell et al., 2013) y se calcula en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera (IPCC, 2014).

La aplicación de un ACV a nivel de sistema de producción predial permitiría identificar actividades, procesos biológicos, procesos químicos, manejos o momentos del sistema de producción que contribuyan a las emisiones de GEI y sean susceptibles de ser modificados con el objeto de lograr su mitigación.

2.2. Emisiones de metano y óxido nitroso

2.2.1.Metano entérico

El metano (CH_4) es un subproducto de la fermentación entérica generada en los rumiantes, y aproximadamente entre el 2-12% de la energía bruta ingerida por los rumiantes se pierde como CH_4 (Vlaming, 2008). La fermentación entérica es el proceso digestivo que sucede en el rumen de los herbívoros, el cual es una cámara expansiva, en la parte delantera de su tracto digestivo (IPCC, 2006).

Esta fermentación les permite a los rumiantes digerir celulosa gracias a los microorganismos presentes en el rumen, los cuales descomponen los carbohidratos estructurales de las gramíneas (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Vargas Romero, 2016) en moléculas simples para su absorción por el flujo sanguíneo y su posterior aprovechamiento energético.

La cantidad de metano que se libera depende del tipo de tracto digestivo, la edad y el peso del animal, así como de la calidad y la cantidad del alimento consumido. La estructura intestinal de los rumiantes favorece la fermentación entérica de su dieta (IPCC, 2006).

Los principales animales rumiantes son los bovinos, búfalos, caprinos, ovinos, cérvidos y camélidos. El ganado no rumiante (caballos, mulas, asnos) y el monogástrico (porcinos) tienen emisiones de metano relativamente menores porque la fermentación productora de metano que tiene lugar en sus sistemas digestivos es mucho menor (IPCC, 2006).

Por lo general, cuanto mayor es la ingesta alimenticia, mayor es la emisión de CH_4. No obstante, la magnitud de la producción de CH_4 también puede verse afectada por la composición de la dieta. La ingesta alimentaria tiene relación directa con el tamaño del animal, su tasa de crecimiento y su producción (leche, ganancia de peso, producción de lana, o preñez) (IPCC, 2006).
Generalmente, cuando la digestibilidad de la dieta se incrementa, la perdida de energética a través del CH_4 desciende (Johnson y Johnson, 1995a). Existen dos mecanismos principales que afectan esta variación en la producción de CH_4. Uno es la cantidad de carbohidratos de la dieta fermentada en el rumen, este mecanismo posee muchas interacciones animal-dieta que afectan el balance entre la tasa de fermentación y el pasaje del alimento por el rumen. El segundo mecanismo regula el suministro de hidrógeno disponible y subsecuentemente la producción de CH_4 a través de la tasa de producción de ácidos grasos volátiles producidos. Principalmente, la fracción de ácido propiónico producido relativo al ácido acético posee un impacto relevante en la producción de CH_4. Si la relación ácido acético:ácido propiónico es 0,5, las pérdidas de energía a través de CH_4 serían 0%. Si todo el carbohidrato fuera fermentado como ácido acético y no se produjera ácido propiónico las pérdidas de energía por CH_4 podrían ser del 33% (Wolin et al., 1997).

Han sido publicados estudios que describen otros factores que presentan efecto sobre la producción de CH_4 a través de estos mecanismos, algunos de ellos son el consumo de alimento, el tipo hidrato de carbono, la adición de lípidos a la dieta, el procesamiento del forraje, y la manipulación de la microflora ruminal incluyendo la utilización de ionóforos (Johnson y Johnson, 1995b).

2.2.2.Óxido nitroso

Las emisiones de N_2O generadas por el estiércol animal en el sistema pasturas naturales se producen directa e indirectamente desde el suelo (IPCC, 2006e). El término “estiércol” se utiliza en este estudio para incluir las heces y orina producidos por el ganado.

Además, el N_2O se produce, directa o indirectamente, durante el almacenamiento y el tratamiento del estiércol antes de que se lo aplique a la tierra como abono orgánico o se lo utilice de otra manera como combustible, para la construcción o incluso con fines alimenticios (IPCC, 2006).

Las emisiones directas de N_2O se producen a través de la nitrificación y desnitrificación combinadas del nitrógeno contenido en el estiércol. La nitrificación es la oxidación microbiana aeróbica del amonio (NH_4^+) en nitrato (NO_3-), el cual es un prerrequisito necesario para la emisión de N_2O del estiércol animal almacenado. Es factible que la nitrificación se produzca en el estiércol animal almacenado siempre que haya un suministro de oxígeno suficiente. La nitrificación no se produce bajo condiciones anaeróbicas. Los nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) se transforman en N_2O y en dinitrógeno (N_2) durante el proceso de desnitrificación que se produce naturalmente, el cual es la reducción microbiana anaeróbica del nitrato a gas de nitrógeno (N_2) (IPCC, 2006)

Es importante resaltar, por lo tanto, que la producción y emisión de N_2O del estiércol gestionado requiere la presencia de nitritos o de nitratos en un ambiente anaeróbico, precedida por las condiciones aeróbicas necesarias para la formación de estas formas oxidadas del nitrógeno. Además, se deben dar las condiciones de bajo pH o una humedad limitada que impiden que el N_2O se reduzca a N_2 (IPCC, 2006).

Por su parte, las emisiones indirectas son el resultado de pérdidas de nitrógeno volátil que se producen fundamentalmente en forma de amoniaco y NOx. La fracción de nitrógeno orgánico excretado que se mineraliza a nitrógeno amoniacal durante la recolección y el almacenamiento del estiércol depende fundamentalmente del tiempo y, en menor grado, de la temperatura (IPCC, 2006).

Las formas simples de nitrógeno orgánico, como la urea (en mamíferos) y el ácido úrico (en las aves) se mineralizan rápidamente para formar nitrógeno amoniacal; éste es muy volátil y se esparce fácilmente en el aire circundante (Asman et al., 1998; Monteny y Erisman, 1998). También se pierde nitrógeno durante el escurrimiento y la lixiviación a los suelos del almacenamiento de sólidos de estiércol a la intemperie, en corrales de engorde y donde pastan los animales en las pasturas (IPCC, 2006).

2.3.Secuestro de carbono

El secuestro de carbono (C) es el proceso de remoción de dióxido de carbono de la atmósfera a través del proceso fotosintético de las plantas para su posterior almacenaje en reservorios terráqueos por distintos lapsos de tiempo.

La cantidad secuestrada de C es el resultado del balance global de la fotosíntesis y las pérdidas a través de la respiración de los ecosistemas y los flujos laterales de carbono (cosechas, producción: carne, leche lana, etc.), en particular el carbono orgánico e inorgánico (Chapin et al., 2006). El secuestro de C de los ecosistemas terrestres es responsable de la mitigación parcial del CO_2 atmosférico en poco más del 51%, a través de reservorios naturales en los suelos del planeta y los océanos (Global Carbon Atlas, 2017).

La materia orgánica del suelo es el sumidero de carbono más grande del planeta tierra (Post et al., 1990) y afecta el contenido atmosférico de gases como el CO_2, CH_4, N_2O entre otros (Bouwman, 1989). Como el carbono y el nitrógeno son componentes principales de la materia orgánica, su emisión en forma gaseosa como resultado de su mineralización contribuye a la acumulación atmosférica de GEI. Sin embargo, su captura en los tejidos vegetales y animales junto a su posterior evolución a materia orgánica coadyuva a mitigar la emisión de GEI hacia la atmósfera. Por lo tanto, el suelo actúa como emisor de gases pero también cumple una importante función como sumidero de C y puede contribuir de forma significativa al secuestro del mismo reduciendo la acumulación de los GEI en la atmósfera y finalmente ayudando a reducir el impacto del cambio climático global (Johnson y Kern, 1991).

El sector agropecuario tiene un gran potencial para reducir las emisiones de GEI. Se conoce que posee una gran reserva de C (Griggs y Noguer, 2002) principalmente en forma de carbono orgánico en los suelos (Soussana et al., 2010) y debido a esto en comparación a otros sectores productivos tiene grandes oportunidades de contribuir a contrarrestar los efectos de las emisiones GEI debido principalmente a la posibilidad de secuestro de C.

Se estima también que el secuestro de carbono orgánico a través de las pasturas permanentes del planeta podría compensar cerca del 4% de las emisiones mundiales (Soussana et al., 2010).

En los sistemas productivos agropecuarios esta contribución es alcanzable a través de medidas efectivas y económicamente viables. Incluso, el sector agropecuario tiene un mayor alcance para mayores reducciones debido a que el sector podría compartir gran parte de las cargas a la atmosfera con la industria.

Cerca del 32% de la vegetación nativa de la superficie terrestre corresponde a las pasturas templadas (Adams et al., 1990). Estos ecosistemas contribuyen de forma

significativa al ciclo global del carbono ya que se ha estimado que las pasturas templadas poseen el 12% de la materia orgánica del suelo del planeta (Schlesinger, 1977). Su ambiente relativamente estable favorece la acumulación de materia orgánica debido a la lenta rotación del ciclo del C debajo del suelo en ese ecosistema. Como consecuencia de esto, el suelo de las pasturas templadas posee grandes reservorios de C en forma de materia orgánica que se ha acumulado a lo largo del tiempo en las comunidades de pasturas (Jones et al., 2010).

Los principales factores que intervienen en la acumulación y en el secuestro de C son los cambios en el uso del suelo que ocurrieron en el pasado y están ocurriendo en el presente, como ejemplos de estos factores encontramos la gestión en la agricultura, incluyendo la transferencia horizontal como el ensilaje, la preparación de fardos, la deposición y aplicación de estiércol en los campos, así como la composición botánica, la textura del suelo y el clima.

El C se encuentra presente en el suelo en complejas asociaciones con otras partículas y la naturaleza de estas asociaciones determina el tiempo que el C permanece en el suelo y por ende el potencial de secuestro de C de los mismos (Jones et al., 2010). Mucha de la materia orgánica se incorpora al suelo en forma de restos de planta que luego se mineraliza en cuestión de meses (Christensen, 1996). Sin embargo, una pequeña parte de estos restos puede estabilizarse para formar agregados a través de la interacción con superficies minerales. A su vez, éstos agregados se forman por exudados de las raíces, restos micóticos y plantas. La descomposición reduce el tamaño de los exudados mezclándose y encapsulándose en las partículas de arcilla, la cual se mantiene fijada al suelo gracias a que las partículas de suelo forman una barrera contra los microbios protegiendo físicamente al C haciendo que éste perdure estable en el suelo por períodos de hasta miles de años (Lehmann et al., 2007; Six et al., 2004).

Asimismo, el C se encuentra en los suelos en forma orgánica e inorgánica. El reservorio de C que se ve más afectado frecuentemente por el uso y la gestión del suelo es la forma orgánica (IPCC, 2006). Adicionalmente, los efectos del uso y gestión de los suelos sobre el C orgánico entre los suelos de tipo orgánico y suelos de tipo mineral son muy variables. Los suelos considerados minerales (<12% materia orgánica) constituyen un reservorio de C que pueden verse afectados por actividades de uso y gestión de los suelos, entre los que encontramos la conversión de pastizales y tierras forestales en tierras de cultivo, pudiendo perder entre un 20 y 40% de las existencias originales de C del suelo (Davidson y Ackerman, 1993; Mann, 1986; Ogle et al., 2005).

Sin embargo, existe una cantidad de prácticas con gran impacto significativo sobre el almacenamiento de C orgánico en el suelo, en especial en tierras de cultivo y forestales (Conant et al., 2001; Ogle et al., 2005, 2004; Paustian et al., 1997). Estas prácticas pueden ser la fertilización o el riego para mejora del crecimiento de cultivos, aplicación directa de C en abonos orgánicos y la cantidad de carbono

dejado en el campo después de actividades de remoción de biomasa (cosecha de cultivos, corte de madera, fuegos o pastoreo).

En principio, el contenido de C puede variar con la gestión o perturbación del suelo si el balance neto entre las entradas y las salidas de C del suelo es alterado. Por su parte, la descomposición controla de cierta forma la perdida de C y puede estar afectada por cambios en los regímenes de humedad y temperatura, así como por los niveles de perturbación de los suelos como resultado de su gestión. La erosión es otro factor que puede afectar al contenido de C orgánico en los suelos (IPCC, 2006). Parte del C transportado de un lugar a otro se descompone y como consecuencia CO_2 es devuelto a la atmósfera mientras que los remanentes de C son depositados en otros sitios más bajos como sedimentos en humedales, lagos, deltas y zonas costeras (Smith et al., 2001) .

En el caso de nuestro país existen trabajos puntuales de cuantificación de las emisiones de CH_4 y N_2O en los sistemas agropecuarios, sin embargo, aún no se dispone de un análisis holístico o sistémico a nivel de predio en los distintos sistemas ganaderos del país. Esto nos permitiría conocer las emisiones a nivel predial y buscar alternativas de mitigación, así como conocer su capacidad de secuestro de C.

3.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, Y OBJETIVOS

En el marco del compromiso asumido por Uruguay y otros 193 países de cuantificar, reportar y buscar la neutralidad de las emisiones de GEI para el año 2030, la FAO ha propuesto una guía metodológica a realizar en cada país, basada en el análisis de ciclo de vida, denominada Guía "*Livestock Environmental Assessment and Performance*" (LEAP, por su sigla en inglés). Al mismo tiempo, Uruguay ha dado un paso adelante con su aporte informativo y de validación de protocolos derivado de trabajos de investigación realizados a nivel nacional por equipos multidisciplinarios e interinstitucionales.

En sintonía con este plan, el presente trabajo plantea implementar la guía LEAP a un conjunto de predios seleccionados para determinar las emisiones de GEI en sistemas de producción de ganado de carne basados en campo natural (CN), y contrastarlas con las emisiones de sistemas de producción basados en campo natural con implementación de mejoras (CNm)

Los resultados esperados de este estudio son relevantes ya que estos sistemas productivos constituyen una importante proporción de la producción nacional del Uruguay. Los resultados servirán, además, para identificar variables que puedan ser consideradas para mitigar las emisiones GEI de los sistemas.

Desde el punto de vista económico, la sustentabilidad del proceso productivo de la carne, expresada a través de la intensidad de emisión de GEI por kg carne, otorga una característica atractiva a los productos cárnicos del Uruguay para mercados internacionales exigentes. Esto es un factor relevante para la decisión de compra e incluso para la potencial obtención de precios preferenciales. La inclusión de esta información a los datos de trazabilidad de la carne exportada por Uruguay podría mejorar el posicionamiento de nuestro país en esos mercados o incluso abrir otros nuevos.

3.1.Hipótesis

El aumento de la intensidad de producción en predios ganaderos pastoriles a través de prácticas de manejo e incorporación de especies a las pasturas naturales contribuye a la mitigación de emisiones de GEI por unidad de producto y al aumento de la captura de carbono.

3.2.Objetivo

Evaluar las emisiones en los sistemas ganaderos sobre campo natural y con mejoramientos de pasturas e identificar oportunidades que contribuyan a mejorar o reducir su impacto ambiental y contribuir a la neutralidad de las emisiones GEI para el año 2030.

3.3.Objetivos específicos

3.3.1.Estimar las emisiones anuales de GEI y la capacidad de secuestro de carbono en predios de producción de carne con distinta proporción de área mejorada en sus pasturas naturales.

3.3.2.Validar la guía LEAP (FAO) de indicadores ambientales (específica para sistemas de producción de grandes rumiantes) para su aplicación en Uruguay.

3.3.3.Identificar aquellas variables en el sistema de producción que permitan mitigar las emisiones y/o aumentar el contenido de carbono en el suelo.

4.MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue llevado a cabo en Uruguay que posee un clima templado y se ubica entre los paralelos 30° y 35° latitud sur y meridianos 53° y 58° longitud oeste con temperatura promedio anual de 17°C y 12°C de temperatura promedio invernal entre los meses de junio y agosto (UdelaR, 2008).

El estudio consistió en una comparación del desempeño ambiental de seis predios ganaderos sobre campo natural localizados en regiones ganaderas características del Uruguay, tomando en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero en cada sistema productivo.

4.1.Selección de predios y sitios de estudio

Los predios fueron seleccionados a partir de la información compilada en una base de datos de predios ganaderos ubicados en las regiones representativas del Uruguay proporcionada por FUCREA. La selección fue realizada en función de distintos criterios como el sistema principal de producción del predio, la superficie total y la superficie de campo natural con mejoras (Cuadro III).

Cuadro III. Criterios de selección de predios ganaderos.

Variable	Criterio
Sistema principal de producción	Ganadero pastoril
Superficie	>2000 has
Principal tipo de pasturas	Campo Natural
Superficie de campo natural con mejoras	<10% ó >30%

El campo natural con “mejoras” se refiere en este estudio al incremento de la calidad y cantidad de las especies gramíneas disponibles por hectárea con el fin de aumentar la productividad de carne por unidad de superficie, mediante el cultivo de especies de gramíneas exóticas (*Lolium multiflorum, Festuca arundinacea,* etc.) o leguminosas (*Lotus corniculatus*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense*, *Medicago sativa*, etc.), y/o realizando fertilización del CN con fosforo (P) y/o nitrógeno (N), y/o implementando algún tipo de manejo del pastoreo (Berretta et al., 2000). De esta forma, la proporción del área del campo natural ocupada con mejoras fue utilizada como indicador de intensidad de producción.

A través de la aplicación de los criterios descritos, se llegó a la selección de un total de seis predios para ser incluidos como estudios de caso en este trabajo. Los mismos estaban ubicados en los Departamentos de Salto, Rivera, Durazno y Flores (Figura 6).

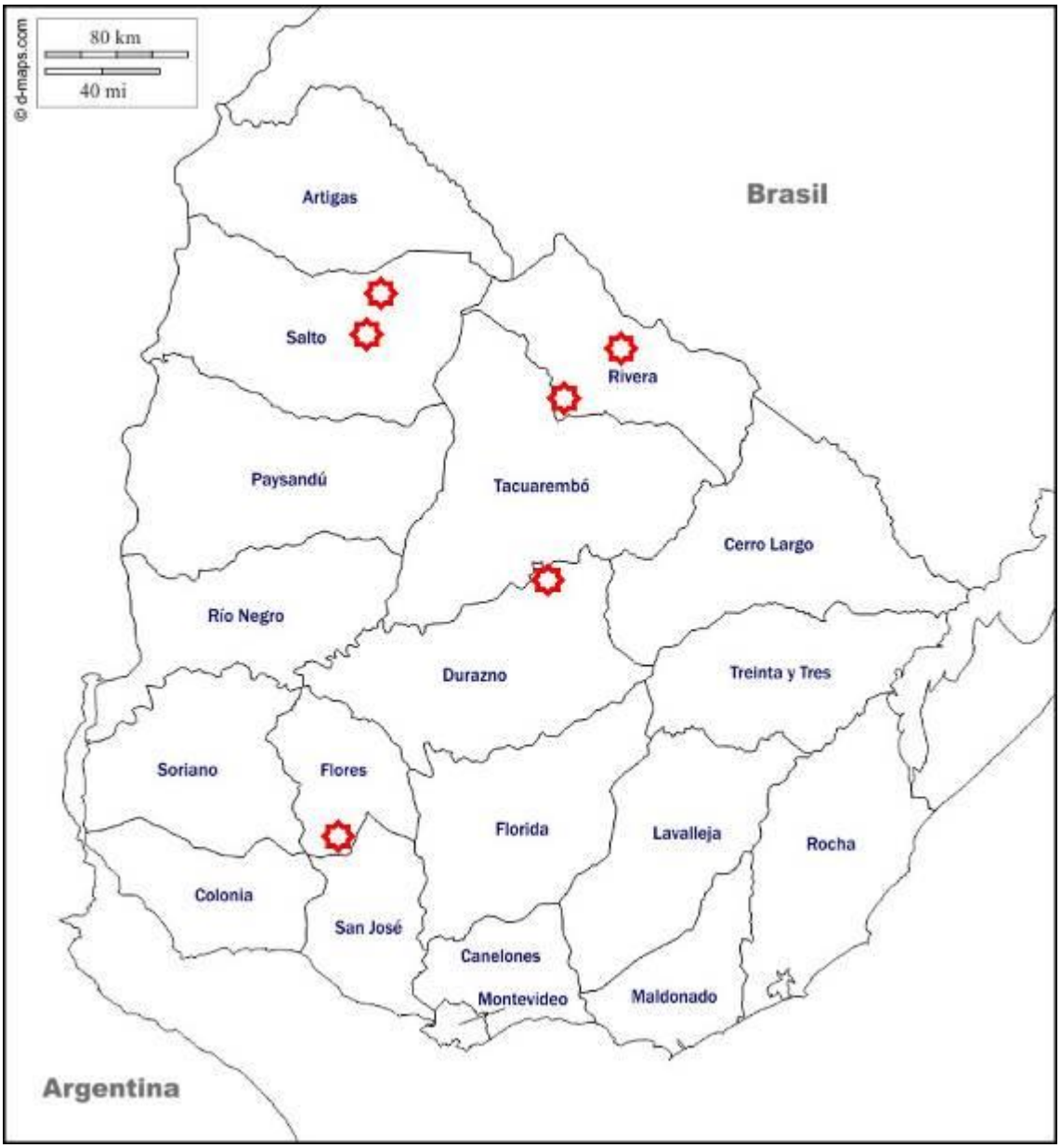

Figura 6. Ubicación geográfica de los predios seleccionados.

En tres de los predios seleccionados el sistema productivo ganadero estaba basado en pasturas de campo natural con un área de mejoras inferior al 10% de su superficie total, y la suplementación alimenticia era poca, nula o se limitaba a ciertas categorías. Por ejemplo, en dos de estos predios se utilizaba suplementación alimenticia invernal a los terneros para compensar la escasa oferta forrajera. Sin embargo, esto no se tomó en cuenta para los cálculos de estos predios. Este grupo de tres predios fue denominado “Sistema Productivo CN”, ubicándose dos de ellos en el departamento de Salto y uno en el departamento de Rivera (Cuadro IV).

En el caso de los otros tres predios seleccionados el sistema productivo ganadero estaba también basado en pasturas de campo natural, pero con un área de mejoras superior al 30% de la superficie total. Este grupo de tres predios fue denominado “Sistema Productivo CNm”, ubicándose en los departamentos de Durazno, Flores y Rivera (Cuadro IV).

Cuadro IV. Características generales de los predios seleccionados.

ID	Sist. Prod.	Dpto.	Superficie						Stock Ganadero	
			Total	CN	CNm	CNm/ST	Otros Usos		Rodeo	Bov:Ovi
			- - - - - has - - - - -			%	Tipo de uso	ha	- N° de cabezas -	
1		Salto	2022	1862	160	8%	Monte exótico	5	1153	0,23:1
2	CN	Rivera	2770	2110	160	6%	Monte nativo	500	1822	0,87:1
3		Salto	4700	4400	300	6%	Monte nativo	625	3404	1,6:1
4		Flores	2555	1512	952	37%	Monte exótico	88	1948	4:1
5	CNm	Durazno	3203	1778	1425	44%	Monte exótico	23	3889	4:1
6		Rivera	2424	1438	897	37%	Monte exótico	49	1914	3:1

4.2.Límites del estudio y unidad funcional

La metodología utilizada para la evaluación del impacto ambiental en los predios ganaderos de este estudio fue el análisis de ciclo de vida (ACV). La aplicación del ACV ha sido reportada en estudios similares por otros investigadores (Koneswaran et al., 2008; Beauchemin et al., 2011; Zamagni, 2012; Ruviaro et al., 2016). La evaluación se delimitó espacialmente desde la boca del animal hasta la portera de cada predio y temporalmente se consideraron los procesos productivos de un año (Figura 7).

Las fuentes de emisión tomadas en cuenta para los cálculos fueron el CH_4 entérico, el CH_4 generado en el estiércol, el N_2O emitido por volatilización de las deyecciones animales, el CO_2 derivado del transporte dentro del sistema productivo y emisiones de CO_2 derivadas del uso de energía eléctrica para el bombeo de agua para consumo animal. Además, se estimó el contenido de C del suelo para los sistemas productivos definidos en este trabajo.

El estudio tomó en cuenta las categorías animales “Machos maduros” (Toros), “Machos castrados” (Novillos), Lactantes (Vacas de cría) y No lactantes (Vaquillonas y Vacas de invernada). Para estos cálculos no se incluyó la categoría terneros.

Las emisiones fueron normalizadas y expresadas en dióxido de carbono equivalente (CO_2-eq) tomando en cuenta el potencial de calentamiento global (GWP100) de cada gas. La intensidad de las emisiones se expresó en toneladas de dióxido de carbono equivalente por kilogramo de peso vivo animal (CO_2 eq ton^{-1} kg PV^{-1}) (Cuadro V).

Además, las emisiones también se expresaron en términos de producción de carne por área y por producción de carne en canal peso en 4^{ta} balanza. En este último caso no se consideraron las emisiones del transporte hasta el frigorífico ni las generadas en el proceso de transformación.

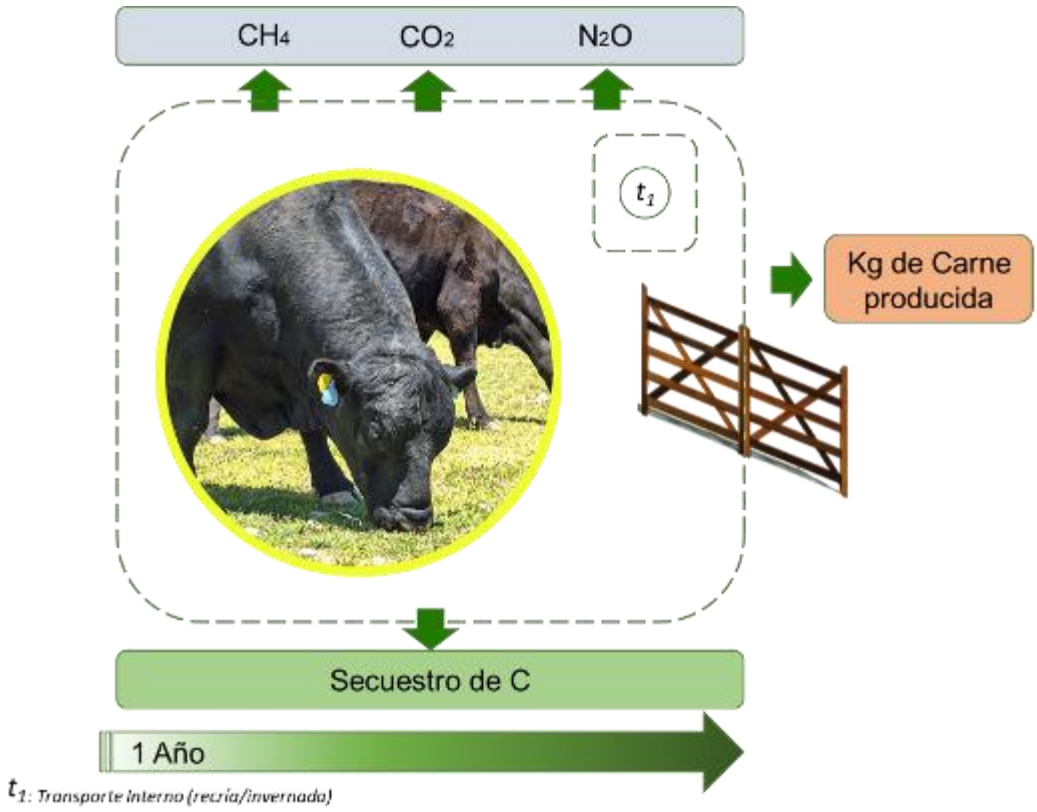

Figura 7. Límites espaciales y temporales de los sistemas en estudio.

Cuadro V. Factores de conversión para un GWP100, (1).

Gas	Factor de Conversión
CO_2 kg	1
CH_4 kg	28
N_2O kg	265

4.3.Recopilación de Inventario

La información requerida para la estimación de las emisiones se obtuvo a través de tres vías:

1. Revisión de una base de datos conteniendo la información general de los predios la cual fue proporcionada por FUCREA.

2. Aplicación de una encuesta como herramienta de obtención de información en base al método de investigación analítico observacional (Anguita et al., 2003). Esta encuesta permitió recolectar información detallada en cada predio. La misma consistió en un cuestionario dividido en 5 Secciones (Datos del Predio, Datos del Rodeo, Datos del Campo Natural, Datos de Energía y Datos de Transporte Interno) (Anexo 1). La misma se aplicó *in situ*, luego de coordinar la visita a cada predio con los propietarios o responsables de los mismos. Los predios fueron visitados entre febrero y mayo 2019.

3. Realización de muestreos y análisis de las pasturas en cada predio para cuantificar cantidad y calidad de las mismas.

En el muestreo de pasturas se involucró a los productores solicitándoles la selección de los potreros representativos para cada tipo de pasturas. En todos los predios fueron seleccionados dos potreros. En el caso de los predios con áreas de campo natural con mejoras >30%, uno de los potreros seleccionados fue de CN y el otro de CNm.

Las pasturas de los potreros seleccionados en cada predio fueron muestreadas para conocer su composición nutricional. Para esto, los cortes de las muestras se realizaron con tijera manual y una cuadrícula de 0,2 m^2 (0,4 x 0,5 m) a lo largo de una transecta en zig – zag de seis puntos de muestreo con ubicación aleatoria del punto de inicio y separación entre puntos de corte de 25 m. Los cortes se realizaron a 5 cm del suelo, limpiando manualmente el área de elementos extraños y restos evidentes de suelo que pudieran afectar los resultados de laboratorio.

Las muestras fueron secadas a 60°C por 48h y se realizaron distintos análisis de laboratorio: análisis químico, análisis calorimétrico y ensayo de degradabilidad *in situ* de la fibra.

El análisis químico de las pasturas se realizó en el laboratorio de nutrición de la estación experimental de INIA La Estanzuela, siguiendo los métodos de protocolos aceptados (Cuadro VI) para la determinación de materia seca (MSA), proteína cruda (PC), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), cenizas (CEN) y Lignina (LIG).

Cuadro VI. Referencias metodológicas para los análisis químicos efectuados a las muestras.

Elemento	**Método**
MSA	A.O.A.C.(*), 1990, N° 130.15.
PC	A.O.A.C., 1991, N° 967.03
FDA y FDN	ANKOM Technology Method
CEN	A.O.A.C., 1990, N° 942.05
LIG	Georing, H.K. y P.J. Van Soest, 1970

(*) Antes “The Association of Official Analytical Chemists”

El análisis calorimétrico fue realizado en el laboratorio de nutrición y evaluación de alimentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (UdelaR) en Montevideo, Uruguay, utilizando bomba calorimétrica. Las pasturas fueron analizadas para cuantificar la energía digerible (ED) como porcentaje de la energía bruta (EB) de la pastura y la digestibilidad de la fibra (DFDN) para el momento del estudio.

El estudio de la digestibilidad de la fibra *in situ* se llevó a cabo en el Instituto de Producción Animal de la Facultad de Veterinaria, (IPAV) en Libertad, Uruguay. Allí se utilizaron tres vacas fistuladas dentro de las cuales se colocaron bolsas con 3g de cada muestra con una réplica en cada vaca y con una repetición a las 48h. Dichas muestras, una vez extraídas de las vacas se lavaron con agua limpia y se procesaron para determinar la digestibilidad de los distintos componentes en el remanente de las bolsas y realizar el cálculo para la obtención de la ED. Dicho dato se utilizó dentro de las fórmulas de estimación de los GEI para cada sistema productivo.

4.4.Estimación de Emisiones

El método de cálculo usado fue el nivel 2 (Tier 2, en inglés) del protocolo sugerido por el IPCC (2006) para la estimación de las emisiones de GEI en la producción ganadera, el cual ha sido utilizado en otros estudios nacionales (Becoña, 2012). En esta línea y siguiendo las ecuaciones indicadas en el protocolo IPCC (2006), la estimación de las emisiones de CH_4 generadas en la fermentación ruminal se obtuvo a través de la ecuación 10.21, la emisión de CH_4 proveniente de la gestión del estiércol se calculó a través de la ecuación 10.23 y la ecuación 10.24 permitió estimar la excreción de sólidos volátiles, cuyo valor es necesario en la ecuación 10.23 (Cuadro VII). Adicionalmente, fue necesario la caracterización detallada del rodeo de forma particular, discriminando las emisiones por categoría y peso animal, calidad del alimento consumido en términos de energía digerible (ED) y cantidad de materia seca (MS) consumida.

Cuadro VII. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de metano.

Fuente	Ecuación
Ec. 10.21 - Factor de emisión CH_4 para fermentación entérica (+)	$EF= [((GE * ((Ym /100) * 365))/55,65)]$
Ec. 10.23 - Factor de emisión CH_4 de la gestión del estiércol (+)	$EF_{(T)}= ((VS_{(T)}*365)*(Bo_{(T)}*0,67*(Suma(MCF_{(S,k)}/100)*MS_{(T,S,k)})$
Ec. 10.24 - Tasa de Excreción de Sólidos Volátiles (+)	$VS= (GE*((1-(DE\%/100))+(UE*GE))*((1-ASH)/18,45)))$

Ecuación 10.21. EF = factor de emisión, Kg CH_4 cabeza^{-1} año^{-1}; GE = consumo de energía bruta, MJ cabeza^{-1} año^{-1}; Ym = factor de conversión de metano, porcentaje de la energía bruta convertida en metano; El factor 55.65 (MJ/Kg CH_4) es la energía contenida en el metano.
Ecuación 10.23. $EF_{(T)}$ = factor de emisión anual de metano por categoría (T), Kg CH_4 animal^{-1} año^{-1} ; $VS_{(T)}$ = solidos volátiles excretados diariamente por categoría (T), Kg materia seca animal^{-1} año^{-1}; 365 = base de cálculo de la producción de sólidos volátiles anual, días año^{-1} ; $Bo_{(T)}$ = capacidad máxima

de producción de metano producido por categoría (T), m^3 CH_4 $animal^{-1}$ kg^{-1} de sólidos volátiles; 0,67 = factor de conversión de m^3 CH_4 a kg de CH_4; $MC_{FS,k}$ = factor de conversión de metano para cada sistema de manejo del estiércol (S) por región climática (k), %; $MS_{T,S,k}$ = fracción del estiércol de la categoría (T), manejado usando el sistema de gestión (S) en una región climatológica (k), sin unidad (sin dimensión).
Ecuación 10.24. VS = excreción de sólidos volátiles por día, basado en materia orgánica seca, Kg VS $día^{-1}$; GE = energía bruta consumida, MJ $día^{-1}$; DE% = digestibilidad del alimento en porciento (ej.60%); (UE*GE) = energía urinaria expresada como fracción de la energía bruta. Normalmente, para la mayoría de los rumiantes 0,04GE puede ser considerada como la energía urinaria excretada (0,02 para rumiantes alimentados con 85% o más de granos en el alimento o para suínos); ASH = contenido de ceniza del estiércol, calculado como una fracción de la materia seca del consumo de alimento (ej. 0,08 para ganado), utilizar datos propios del país cuando si están disponibles; 18,45 = factor de conversión para la energía bruta de la dieta por kg de materia seca (MJ kg^{-1}). Este valor es relativamente constante a través de un amplio rango de forrajes y alimentos basados en granos consumidos por el ganado.
(+) IPCC, 2006.

Las emisiones directas causadas por la volatilización del nitrógeno en forma de N_2O procedente de las deposiciones animales y las emisiones directas provenientes de suelos gestionados se calcularon utilizando la ecuación 11.2 (Cuadro VIII).

Cuadro VIII. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de óxido nitroso.

Fuente	Ecuación
Ec. 11.2 - Emisiones directas de N_2O de suelos gestionados (+)	$N_2O_{Directas}\text{-}N = Suma_i((F_{SN}+F_{ON})*EF_{1i}+(F_{CR}+F_{SOM})*EF_1+N_2O\text{-}N_{OS}+N_2O\text{-}N_{PRP})$

Ecuación 11.2. $N_2O_{Directas}$–N= emisiones directas anuales de N_2O-N producidas a partir de suelos gestionados, kg N_2O-O $año^{-1}$; F_{SN}= cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N $año^{-1}$; F_{ON} = cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales y otros aportes de N aplicada a los suelos, kg N $año^{-1}$; EF_1= factor de emisión para emisiones de N_2O de aportes de N, kg N_2O–N (kg aporte de N)$^{-1}$; F_{CR}= cantidad anual de N en los residuos agrícolas, incluye cultivos fijadores de N y la renovación de forraje/pastura, que se regresan a los suelos, kg N $año^{-1}$; F_{SOM}= cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N $año^{-1}$; N_2O–N_{OS}= emisiones directas anuales de N_2O–N de suelos orgánicos gestionados, kg N_2O–N $año^{-1}$; N_2O–N_{PRP}= emisiones directas anuales de N_2O–N de aportes de orina y estiércol a tierras de pastoreo, kg N_2O–N $año^{-1}$.
(+) IPCC, 2006.

Las emisiones de CO_2 generadas por la utilización de motores de combustión interna en vehículos para el transporte de ganado dentro del sistema (por ejemplo, traslado de animales a otro predio en propiedad o arrendado) se estimaron utilizando la ecuación 3.2.1. (Cuadro IX). A su vez, los datos utilizados para el consumo de combustible fueron los que por defecto propone el IPCC en su protocolo de cálculo.

La estimación de emisiones de CO_2 por la utilización de energía eléctrica en el bombeo de agua para el rodeo se obtuvo de la ecuación “factor de emisión de generación de energía eléctrica en Uruguay” (Cuadro IX).

Cuadro IX. Referencia de las ecuaciones utilizadas para la estimación de emisiones de dióxido de carbono.

Fuente	Ecuación
Ec. 3.2.1. - Emisión CO2 del Transporte Terrestre (+)	$Emisión = Suma_a (Combustible_a * EF_a)$
Factor de Emisión Generación de Energía Eléctrica en Uruguay (++)	0,575 (t CO2 MW^{-1} hr^{-1})

Ecuación 3.2.1. Emisión= Emisiones de CO_2 (kg); $Combustible_a$= combustible vendido (TJ); EF_a= factor de emisión (kg/TJ). Es igual al contenido de carbono del combustible multiplicado por 44/12; a= tipo de combustible (p. ej., gasolina, diesel, gas natural, GLP, etc.)
(+) IPCC, 2006; (++) UTE, 2008.

4.5.Estimación del contenido de carbono en el campo natural

La estimación del reservorio de carbono en las pasturas de CN fue calculado según el método sugerido por el IPCC en sus publicaciones del 2019, el cual se fundamenta en dos principios: (i) con el tiempo, el C orgánico del suelo alcanza un valor estable y es específico para el suelo, el clima, el uso de la tierra y las prácticas de gestión del suelo; es decir, el contenido de C orgánico tiende al equilibrio; (ii) las variaciones en el contenido de C orgánico en el suelo durante la transición a un nuevo carbono orgánico del suelo en equilibrio se producen de manera lineal.

La estimación del contenido de carbono en los suelos se obtuvo mediante el nivel 1 (Tier 1 en inglés) del método elegido que se basa en los cambios del contenido de C durante un período finito (20 años). Se realizó la estimación aplicando la ecuación 2.25, la cual, toma en cuenta el C orgánico del suelo por defecto presentado en la guía del IPCC, 2019 (Cuadro X).

El contenido de carbono orgánico en los suelos minerales se obtuvo sustituyendo los distintos factores en la ecuación por los valores por defecto presentados en la tabla 6.2 de la guía del IPCC según las características de los sistemas productivos (Anexo 2). Los factores diferenciadores entre los sistemas productivos fueron las de gestión e incorporación de mejoras en las pasturas (F_{MG} y F_I, respectivamente).

El C de la biomasa superficial de cada sistema productivo (vegetación herbácea) no fue tomado en cuenta debido a que es considerado efímero por el método elegido, ya que se deteriora y regenera anualmente o cada cierta cantidad de años. Por lo tanto, las emisiones derivadas de la descomposición de la biomasa

se compensan por el rebrote de las pasturas formando un balance general neto de C bastante estable en el tiempo.

Del mismo modo, tampoco se consideró el potencial de secuestro de carbono orgánico de los bosques nativos y plantaciones comerciales presente en la mayoría de los predios.

Cuadro X. Ecuaciones utilizadas para la estimación del stock de carbono.

Fuente	Ecuación
Ec. 2.25 - Cambio Anual en la Existencia de Carbono Orgánico en Suelos Minerales	$\Delta C_{minerales} = (SOC_0 - SOC_{(0-T)})/D$
	$SOC_{Mineral} = Suma\ (SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A) / D$

Ecuación 2.25. $\Delta C_{Minerales}$ = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales, ton C año^{-1}; SOC_0 = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, ton C; $SOC_{(0-T)}$ = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, ton C; D = Dependencia temporal de los factores de cambio de existencias, que es el lapso por defecto para la transición entre los valores de equilibrio del SOC, año. Habitualmente 20 años, pero depende de las hipótesis que se apliquen en el cálculo de los factores F_{LU}, F_{MG} y F_I. Si T es mayor que D, úsese el valor de T para obtener la tasa anual de cambio durante el tiempo de inventario (0 – T años); T = cantidad de años de un período de inventario dado, año. - $SOC_{MINERAL}$= total de carbono orgánico en el suelo en un período definido de tiempo ton C ha^{-1}; SOC_{REF} = contenido de carbono orgánico en suelo mineral en condiciones de referencia, ton C ha^{-1}; F_{LU} = factor de cambio de contenido de carbono orgánico en suelos minerales en sistemas de uso particular de suelo, sin dimensión; F_{MG} = factor de cambio de contenido de carbono orgánico en suelos minerales para un régimen particular de manejo, sin dimensión; F_I = factor de cambio de contenido de carbono orgánico en suelos minerales para introducción de enmiendas al suelo, sin dimensión; A = área de tierra en donde se realiza la estimación, ha.

5.RESULTADOS

5.1. Existencias y distribución ganadera de los predios.

La aplicación de la encuesta permitió conocer el stock ganadero presente en los predios en el período 2018 – 2019 (Cuadro XI). En todos los predios se registró la existencia de stocks ganaderos bovinos y ovinos. Sin embargo, para el cálculo de los resultados se consideró solamente el ganado bovino, debido principalmente a la falta de disponibilidad de ejemplares ovinos fistulados para la realización del ensayo de degradabilidad *in situ*. Por tal motivo, se sustrajo un porcentaje de la superficie ocupada por los ovinos ajustando los resultados al stock bovino.

Cuadro XI. Stock ganadero bovino de los predios según categoría, peso promedio y carga animal.

		Categorías Bovinas*									
		Toros		Novillos		Vacas de cría		Vaq./Vac. Invernada		Total	Carga Animal
ID	Sistema Productivo	N° cab.	kg	N° cab.	kg	N° cab.	kg	N° cab.	kg	N° cab.	UG ha-1
1	CN	15	600	145	206	423	430	215	294	798	0,42
2	CN	112	600	10	180	800	400	450	347	1372	0,51
3	CN	73	580	471	293	997	400	988	314	2529	0,55
4	CNm	29	650	71	360	850	420	382	340	1332	0,53
5	CNm	170	650	396	397	1008	450	1380	334	2954	0,94
6	CNm	15	800	432	307	464	440	653	359	1564	0,65

(*) No incluye terneros; N° cab.= Número de cabezas; UG= Unidad Ganadera

Es importante destacar que la distribución de las categorías entre los predios CN y CNm presentó algunas diferencias. En los predios CN, la categoría con mayor número de cabezas en los tres predios fue “vacas de cría”, seguida de “vaquillonas/vacas de invernada” y luego la categoría “novillos”. Por otro lado, en los predios CNm la distribución de las categorías varió entre predios, siendo en un solo caso las “vacas de cría” la categoría dominante, mientras que en los otros dos predios se registró el mayor número de cabezas en la categoría “vaquillonas/vacas de invernada”. Adicionalmente, la categoría “novillos” presentó el menor número de cabezas.

El peso promedio registrado en los seis predios para la categoría “toros” fue el más alto con respecto a las demás con peso promedio máximo de 800kg animal^{-1}. Las “vacas de cría” fue la categoría con el segundo peso promedio más alto respecto a las demás categorías, alcanzando valores de 450 kg animal^{-1}. Por otro lado, los animales pertenecientes a las categorías “vaquillonas/vacas de invernada” y “novillos” no superaron los 360 kg y 397 kg, respectivamente.

La carga animal, expresada en kg de PV por unidad de superficie, fue en promedio 34% inferior en los predios CN respecto a los predios CNm. En este sentido, en los predios CN no se superaron los 201 kg PV ha^{-1}, mientras que en los predios CNm los valores variaron entre 209 y 372 kg PV ha^{-1}.

5.2. Características de las pasturas.

Los predios del sistema productivo CNm mostraron en promedio una disponibilidad de la materia seca 54,6% mayor que los predios del sistema productivo CN (Cuadro XII). La lignina resultó 41% mayor en los predios CN que en CNm. El porcentaje de proteína cruda fue 30 % mayor en los predios de CNm. La fibra detergente neutro promedio en los predios de ambos sistemas productivos no mostró diferencias.

La digestibilidad de la materia seca fue 1,7% mayor en el CN que en los predios CNm, Con la misma tendencia, la digestibilidad de la fibra detergente neutro fue 2,8% mayor en el CN que en los predios CNm. Y la energía digestible fue en promedio 3% mayor en el CN respecto a los predios CNm. La energía digerible fue 5% mayor en los predios CN con respecto al CNm.

Cuadro XII. Composición química de las pasturas según tipo de sistema productivo.

Sist. Prod.	Disponibilidad MS	LIG	MSA	PC	FDN	DMS	DFDN	ED
	kg MS ha^{-1}	- - - - - - - - - - - - - - - - - % - - - - - - - - - - - - - - - - -						
CN	1333,0	14,1	94,8	6,6	65,8	54,0	54,2	60,6
CNm	2060,5	10,0	91,8	8,6	65,8	53,1	52,7	57,8

MS: materia seca; LIG: lignina; MSA: materia seca analítica; FDN: fibra detergente neutro;
DMS: digestibilidad de la materia seca; DFDN: digestibilidad de la fibra detergente neutro;
ED: energía digerible

5.3.Características de las pasturas por predio

A nivel predial, la disponibilidad de MS en los predios CNm fue en todos superior a los 1650 kg ha^{-1}, presentando el predio N° 4 la mayor disponibilidad de materia seca siendo 35% y 55% superior a los predios N° 5 y 6, respectivamente (Cuadro XIII). En el grupo sistemas productivos CN, dos de ellos presentaron valores de disponibilidad de materia seca bajos e inferiores a 782 kg MS ha^{-1}. Sin embargo, en el predio CN N° 2 se midió una disponibilidad de MS similar a los predios CNm alcanzando un valor promedio de 2487 kg MS ha^{-1}.

Cuadro XIII. Resultados del análisis de las pasturas por predio

Predio	Sist. Prod.	Disponibilidad MS	LIG	MSA	FDN	PC	Dig MS	Dig FDN	ED
		kg MS ha^{-1}	---------- % ----------						
1		781,8	8,7	95,2	61,8	8,0	51,8	51,0	54,6
2	CN	2486,7	18,1	95,6	66,9	5,9	55,3	55,3	64,4
3		764,5	15,5	93,6	68,0	6,0	55,0	56,2	62,8
4		2567,4	12,8	89,9	61,7	10,7	53,6	51,2	57,9
5	CNm	1652,0	10,5	89,4	67,2	8,4	54,6	55,6	55,9
6		1899,8	6,7	96,0	67,8	6,8	51,0	51,4	59,6

MS: materia seca; LIG: lignina; MSA: materia seca analítica; FDN: fibra detergente neutro;
DMS: digestibilidad de la materia seca; DFDN: digestibilidad de la fibra detergente neutro;
ED: energía digerible

La composición química de las pasturas de los predios mostró variación en algunas de las variables analizadas. El contenido de lignina mostró valores

superiores en los predios CN respecto a los CNm, los cuales variaron entre 8,7% y 18,1% y entre 6,7% a 12,8%, respectivamente. La fibra detergente neutro presentó un rango de variación muy similar entre los predios CN y CNm, mostrando en ambos casos valores entre 61,7% y 68%.

Los valores de proteína cruda de las pasturas de 5,9 % en el predio N°2 sobre CN a 10,7 en el predio N° 4 sobre CNm. La digestibilidad de la materia seca en las pasturas fue similar entre ambos grupos, mostrando valores entre 51,8 % y 55,3% en los predios CN y entre 51 % y 54,6% en los predios CNm. De la misma forma, se obtuvo una variación similar de los valores de la digestibilidad de la fibra detergente neutro entre los predios de ambos grupos: el grupo CN varió entre 51% y 56,2% y el grupo CNm entre 51,2% y 55,6%.

Los valores de la energía digerible de las pasturas de los predios del grupo CN mostraron valores promedio superiores a CNm, siendo los mismos 54,6%, 64% y 62,8 para el predio N° 1, 2 y 3, respectivamente. Por el contrario, los predios CNm mostraron en todos los casos valores inferiores a 59.6%.

5.4.Emisiones GEI

La emisión total promedio de GEI expresada en toneladas de CO_2-eq $año^{-1}$ fue en promedio 22% mayor en los predios del Sistema Productivo CNm que en los predios del Sistema Productivo CN (5.389,3 y 4.423,9 ton CO_2-eq $año^{-1}$, respectivamente) (Cuadro XIV).

Cuadro XIV. Emisiones totales promedio de gases de efecto invernadero de los predios de sistemas productivos CN y CNm.

Item	Sistema Productivo			
	CN		CNm	
	media	DS +/-	media	DS +/-
Emisiones (ton CO_2 -eq $año^{-1}$)				
Emisiones GEI Totales	4.423,9	2.735,0	5.389,3	3.126,5
CH_4 Entérico	4.342,0	2.679,7	5.194,1	2.962,6
CH_4 Estiércol	80,2	56,6	100,4	61,9
N_2O Totales	0,2	0,1	85,9	111,0
CO_2 Combustión Móvil Endógena	4,2	-	-	-
CO_2 Consumo E. Eléctrica	-	-	8,9	13,4

5.5.Contribución de las distintas fuentes a las emisiones totales

El gas metano proveniente de la fermentación entérica constituyó el 98,1% de las emisiones totales en los predios pertenecientes al CN. El CH_4 emitido por el estiércol depositado sobre las pasturas en el CN participó con 1,8%, mientras las emisiones de CO_2 derivadas del transporte endógeno de semovientes constituyeron el 0,09% y las emisiones totales de N_2O fueron responsables del 0,005% (Figura 8).

Una contribución similar se observó en las emisiones GEI en el sistema productivo CNm donde el CH_4 entérico contribuyó con 96% a las emisiones totales, el CH_4 del estiércol con 1,8%, las emisiones de CO_2 por el bombeo eléctrico de agua a los bebederos para el rodeo con 0,2% y las emisiones totales por la volatilización del nitrógeno en forma de N_2O participó con un 1,5% (Figura 9).

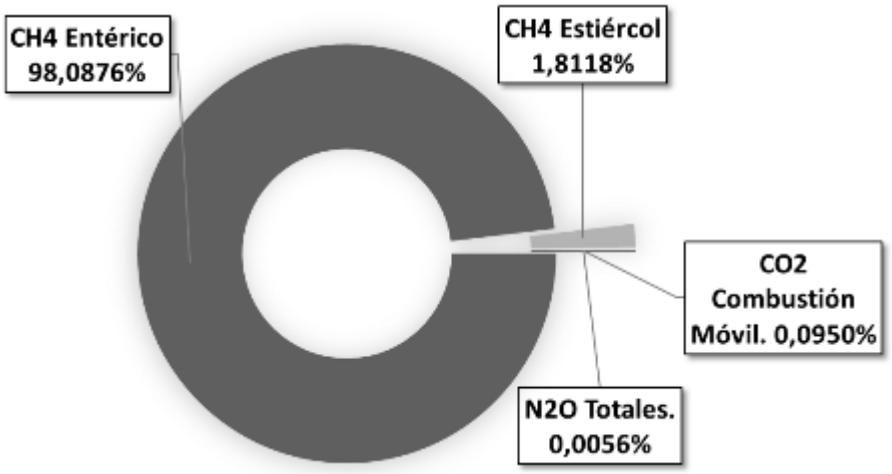

Figura 8. Proporción relativa de las emisiones de GEI (% de las emisiones totales) de la producción ganadera sobre CN con límite temporal de un año.

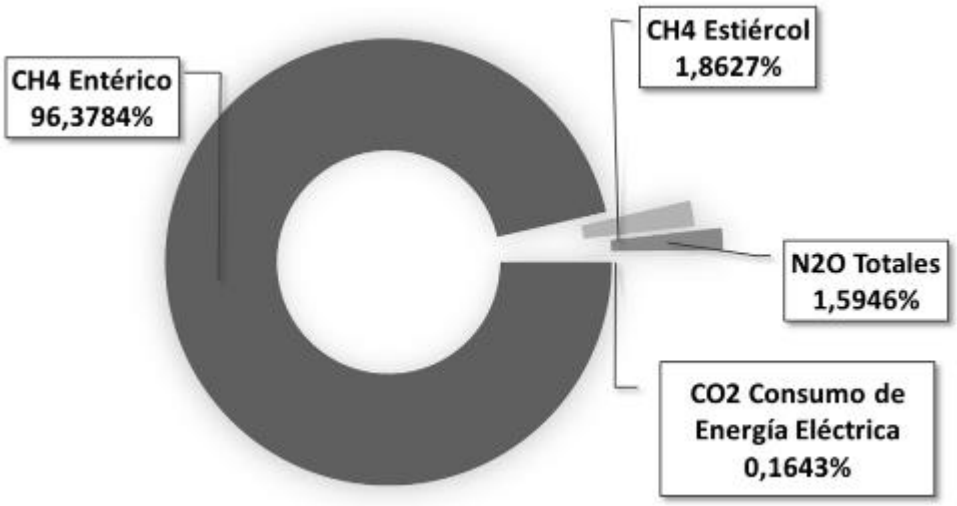

Figura 9. Proporción relativa de las emisiones de GEI (% de las emisiones totales) de la producción ganadera sobre CNm con límite temporal de un año.

5.6.Contribución de las distintas fuentes a las emisiones totales por predio.

En todos los predios se observó, independientemente del número de cabezas de ganado o de la superficie del predio, que la emisión de metano entérico es la de mayor contribución a las emisiones totales de GEI, variando entre 95,7% y 98,4% del total de GEI predial (Figura 10).

A nivel predial se observó la misma tendencia porcentual con respecto a las emisiones de CH_4. Las emisiones N_2O totales fueron significativamente mayores en los predios N° 4 y 5 (46 y 211 4,2 ton CO_2 $año^{-1}$ respectivamente). Sin embargo, el CO_2 generado por el traslado de los animales sólo se observó en el predio N° 2 perteneciente al grupo CN (4,2 ton CO_2 $año^{-1}$). El CO_2 generado por el bombeo de agua a los bebederos se observó en los predios N° 4 y 6 (22,8 y 3,8 ton CO_2 $año^{-1}$, respectivamente), ambos del grupo CNm (Cuadro XV).

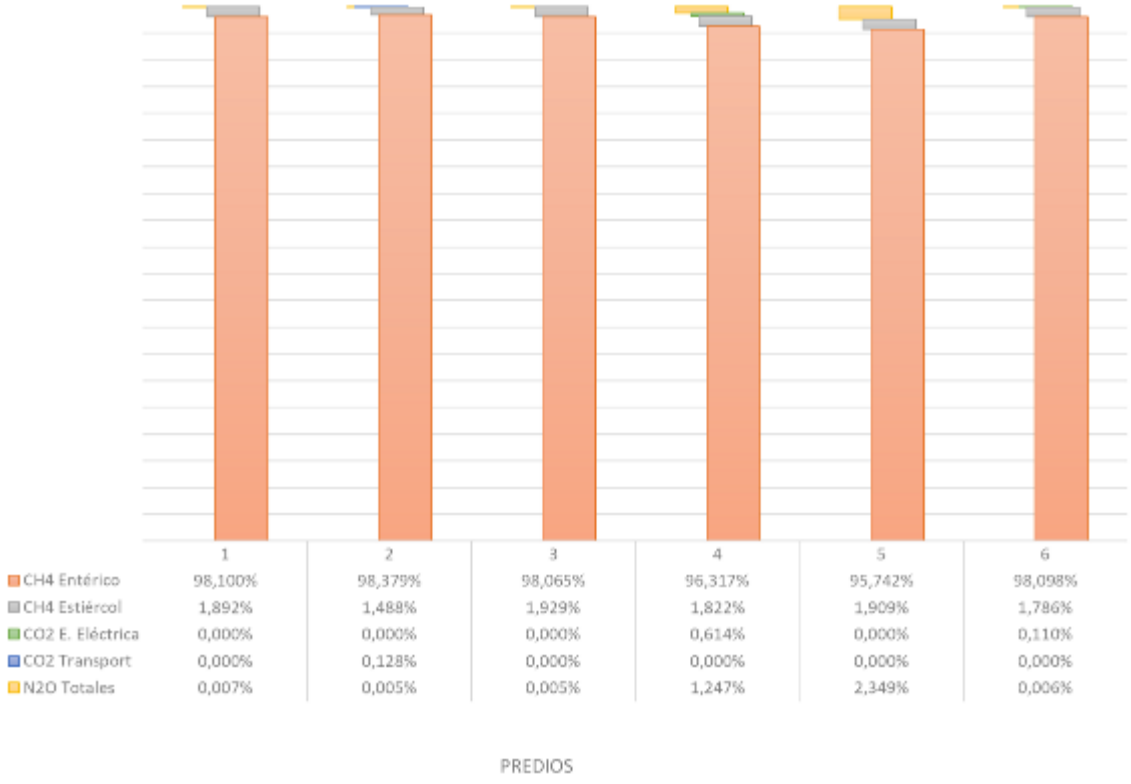

Figura 10. Emisiones totales por fuente de emisión en cada predio

Cuadro XV. Emisiones totales de GEI por predio y fuente de emisión.

ID	Sist. Prod.	Emisiones Totales					
		GEI Totales	CH_4 Entérico	CH_4 Estiércol	N_2O Totales	CO_2 Transport	CO_2 E. Eléctrica
		- - - - - - - - - - - - tonCO2-eq año-1 - - - - - - - - - -					
1	CN	2.430,2	2.384,1	46,0	0,17	0,0	0,0
2		3.299,5	3.246,0	49,1	0,17	4,2	0,0
3		7.541,9	7.396,0	145,5	0,40	0,0	0,0
4	CNm	3.709,2	3.572,6	67,6	46,25	0,0	22,8
5		8.996,6	8.613,6	171,7	211,34	0,0	0,0
6		3.462,1	3.396,3	61,8	0,22	0,0	3,8

5.7. Contribución por categoría a las emisiones totales

En ambos sistemas productivos, las emisiones de CH_4 de las hembras tuvieron mayor impacto en el total de emisión GEI aportando juntas 85% en el CN y 83% en el CNm. Por su parte, las emisiones de CH_4 totales de las categorías Novillos y Toros, contribuyeron en el CN con 10% y 5%, respectivamente y en el CNm con 12% y 5%, respectivamente. (Figura 11 y Figura 12).

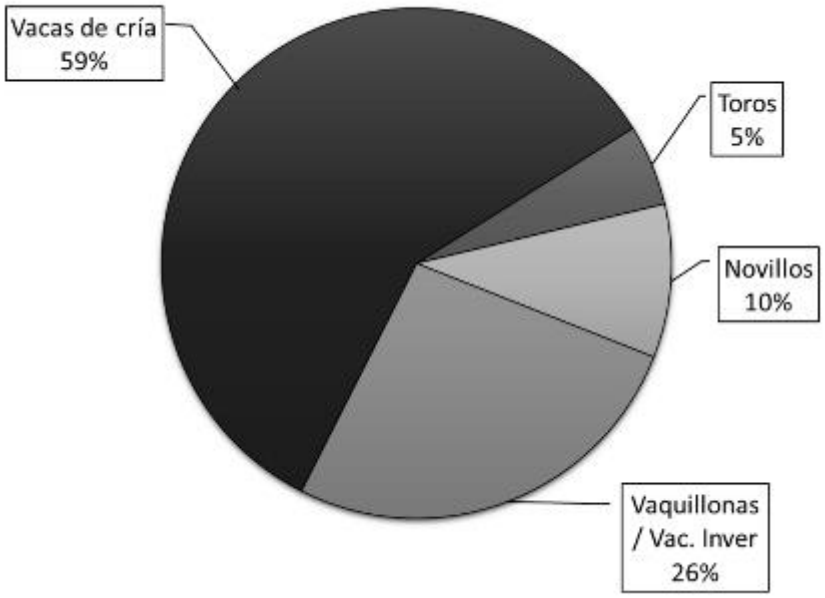

Figura 11. Contribución de CH_4 por categoría a las emisiones GEI totales (Sistema Productivo CN)

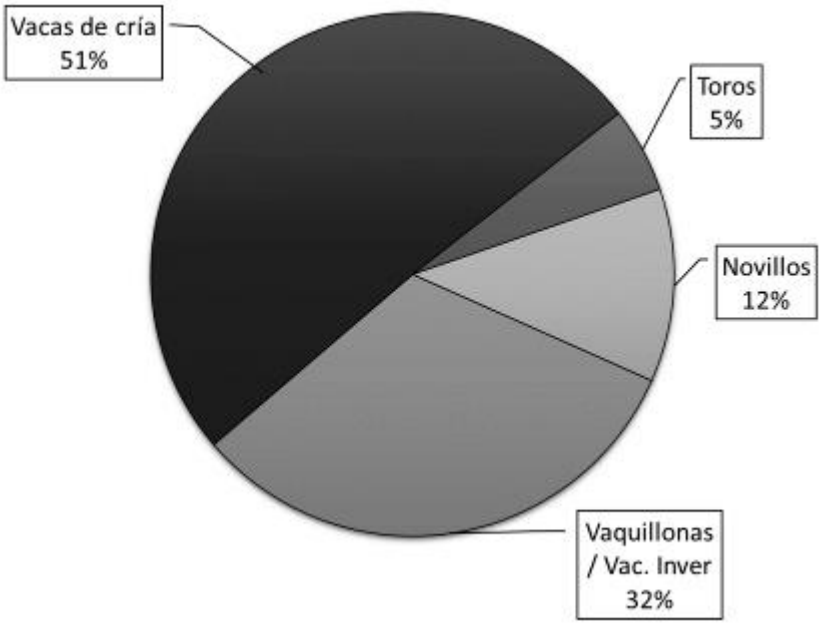

Figura 12. Contribución de CH_4 por categoría en las emisiones GEI totales (Sistema Productivo CNm)

La categoría “Vacas de cría” es la responsable del mayor aporte de GEI respecto al total de emisiones totales de los predios.

5.7.1.Contribución por categoría a las emisiones totales por predio

La categoría Vacas de cría es la que presentó la mayor contribución a las emisiones GEI en todos los predios de ambos sistemas productivos, seguida por la categoría Vaquillonas/Vacas de Invernada, manteniendo la tendencia observada globalmente (Figura 13).

Las categorías Novillos y Toros ocupan el tercer y cuarto lugar respectivamente en todos los predios, excepto en el predio N° 2, en donde la categoría Novillos es la categoría con la contribución más baja (10,8 ton CO_2-eq $año^{-1}$) (Cuadro XVI).

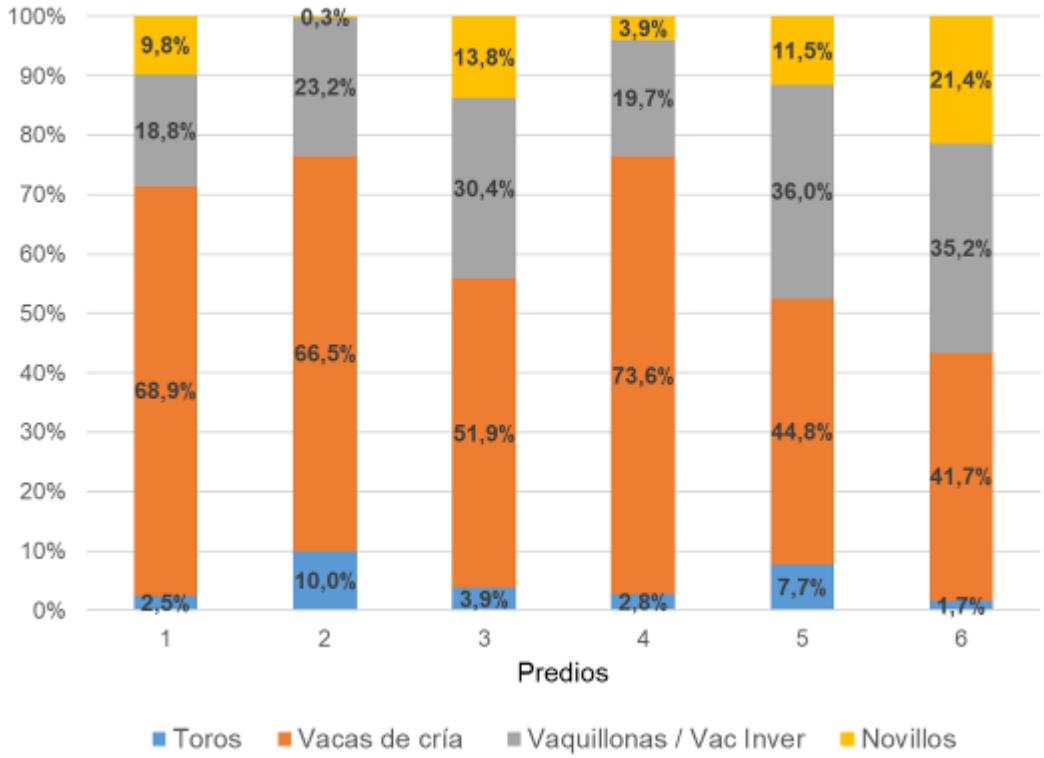

Figura 13. Distribución porcentual de emisiones totales por predio según categoría

Cuadro XVI. Contribución a las emisiones por categoría y predio.

ID	Sist. Prod.	Emisiones Totales según Categoría			
		Toros	Vacas de cría	Vaquillonas / Vac. Inver	Novillos
		- - - - - - - - - ton CO2-eq año-1 - - - - - - - -			
1	CN	59,9	1.675,4	457,2	237,7
2		329,0	2.192,7	766,9	10,8
3		294,1	3.912,7	2.293,7	1.041,3
4	CNm	102,2	2.723,0	732,8	146,8
5		690,4	3.997,5	3.251,8	1.037,2
6		58,4	1.443,2	1.219,2	741,3

5.8.Intensidad de emisiones

Los valores obtenidos para la emisión GEI por kilogramo de peso vivo (PV) fueron 52% menores en el sistema productivo CNm que la emisión observada en el sistema productivo CN. La misma diferencia porcentual se observó en las emisiones por kilogramo de carne en canal (PCnl) (CNm <52% CN). Una tendencia similar se observó al expresar la intensidad de emisión en términos de toneladas de CO_2 equivalente por animal por año (promedio ponderado): 2,810 y

2,678 ton CO_2-eq cabeza^{-1} año^{-1} para los sistemas productivos CN y CNm, respectivamente.

La emisión por área de pastoreo ganadero efectivo fue 1,695 y 1,982 ton CO_2-eq ha^{-1} para los predios del grupo CN y CNm, respectivamente. Por lo tanto, el CN generó 0,3 ton CO_2-eq ha^{-1} menos (14,5%) respecto a CNm (Cuadro XVII).

Cuadro XVII. Intensidad de emisiones GEI según sistema productivo.

Intensidad de Emisión	Sistema Productivo CN		CNm		Dif
	media	DS +/-	media	DS +/-	
ton CO_2 -eq kg PV^{-1} (*)	0,027	4,9	0,013	3,4	-0,014
ton CO_2 -eq kg PCnl^{-1} (**)	0,050	9,2	0,024	6,4	-0,026
ton CO_2 -eq ha^{-1} (***)	1,695	353,7	1,982	753,0	0,286
ton CO_2 cabeza^{-1} año^{-1} (+)	2,810	354,7	2,678	422,3	-0,132

(*)Peso Vivo; (**)Peso en Canal, Rendimiento 53% en 4ta Balanza, INAC 2do trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo; (+) Cabeza

En el Cuadro XVIII se muestran los resultados en las diferentes intensidades de emisión de GEI por predio. Se observó que, para las intensidades expresadas en kg PV, kg Cnl y por unidad animal, los predios pertenecientes al CN tuvieron emisiones en promedio más altas que los predios del CNm. Sin embargo, con respecto a la intensidad de emisión por superficie, los predios del CN mostraron en promedio menores emisiones que los predios CNm.

El predio N° 6 perteneciente al sistema CNm se destaca por mostrar las menores emisiones por kgPV, kgCnl y por animal. Mientras que el predio N° 1, perteneciente al sistema CN mostró la menor intensidad de emisión por unidad de superficie.

Cuadro XVIII. Intensidad de emisiones GEI para cada predio.

ID	Sist. Prod.	ton CO_2-eq kgPV^{-1} (*)	ton CO_2-eq kgCnl^{-1} (**)	ton CO_2-eq ha^{-1} (***)	ton CO_2-eq animal^{-1} año^{-1}
1		0,0233	0,0440	1,2877	3,0454
2	CN	0,0322	0,0608	1,9218	2,4018
3		0,0243	0,0459	1,8764	2,9821
4		0,0115	0,0216	1,5691	2,7814
5	CNm	0,0168	0,0316	2,8504	3,0389
6		0,0105	0,0198	1,5253	2,2136

(*)Peso Vivo, (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte nativo

5.9.Secuestro de Carbono

En cuanto al carbono orgánico del suelo, se estimó que los predios del Sistema Productivo CN tenían unas reservas aproximadas de 11,6 ton CO_2-eq ha^{-1}, y los predios del Sistema Productivo CNm mostraron unas reservas de 12,81 ton CO_2-eq ha^{-1}. La diferencia entre ambas estimaciones fue de 1,25 ton CO_2-eq ha^{-1}, es decir, 11% mayor en los predios CNm (Cuadro XIX).

Cuadro XIX. Contenido de carbono en el suelo sistemas productivos CN y CNm

Carbono Orgánico	**Sistema Productivo**	
	CN	**CNm**
	- - - - ton CO_2-eq ha^{-1} - - - - -	
Carbono orgánico en suelo	11,56	12,81
∆ C orgánico en suelo	0,00	1,25

El balance de carbono de cada predio, teniendo en cuenta el carbono orgánico del suelo y la superficie de campo natural mejorado, se presenta en el cuadro XX. La proporción del C secuestrado respecto al emitido se expresa como capacidad de mitigación. En los predios CN, la capacidad de mitigación calculada no superó el 8 % mientras que para los predios CNm se obtuvieron valores de entre 20 % y 32%.

Cuadro XX. Balance de Carbono de los predios y capacidad de mitigación.

Predio	**Sist. Prod.**	**Sup. Campo Natural**	**Sup. Campo Natural c/mejoras**	**Tasa de secuestro por mejoras**	**Emisiones $GEI_{Totales}$**	**Secuestro Carbono**	**Balance C (Secuestrado - Emitido)**	**Capacidad de mitigación**
				tonCO_2-eq ha^{-1} $año^{-1}$	**- - - - - - - - tonCO_2-eq $año^{-1}$ - - - - - - - -**			%
1		1.862	160	1,25	2.430	200	-2.230	8,2%
2	CN	2.110	160	1,25	3.299	200	-3.099	6,1%
3		4.400	300	1,25	7.542	375	-7.167	5,0%
4		1.512	952	1,25	3.663	1.190	-2.473	**32,5%**
5	CNm	1.778	1.425	1,25	8.786	1.781	-7.005	**20,3%**
6		1.438	897	1,25	3.462	1.121	-2.341	**32,4%**

6.DISCUSIÓN

6.1.Emisiones totales.

La diferencia entre los sistemas productivos CN y CNm en cuanto a las emisiones GEI en términos absolutos estaría explicada por el mayor número de cabezas bovinas presentes en el sistema productivo CNm (24,5% más que el CN). Claramente, cuanto mayor es el número de bovinos presentes en un establecimiento mayor es la cantidad de emisión de CH_4 entérico total del establecimiento, originada

en cada animal de cada categoría presente. Esto se debe a que los rumiantes realizan la degradación de la fibra en el rumen a través de la fermentación entérica realizada por los microorganismos presentes en éste, como son el grupo de bacterias metanogénicas conocidas como *Archeas sp.* (Ochoa et al., 2014; Morgavi et al., 2010).

Los resultados obtenidos en nuestro estudio mostraron que el aporte del gas CH_4 a las emisiones GEI totales fue del 98 % en los predios de ambos grupos. Dicho porcentaje se ubica dentro de los rangos reportados anteriormente en varios trabajos. Por ejemplo, en el primer estudio uruguayo de la huella de carbono del sector “carne vacuna” (MGAP, 2013), en el que se evaluaron los sistemas de cría, recría e invernada en distintos sub-sistemas productivos, se reportaron porcentajes similares de la emisión entérica y del estiércol para el caso de la invernada sobre campo natural, destacándose también la ausencia de fertilizante sintético en dichos sistemas.). Ruviaro et al. (2015) estudiaron la huella de carbono en sistemas de producción ganadera del sur de Brasil utilizando el enfoque de análisis de ciclo de vida sobre siete escenarios de sistemas productivos, dos de los cuales fueron campo natural y campo natural con mejoras. En el estudio la huella de carbono fue afectada principalmente por el CH_4 reportando porcentajes de aporte para éste entre 86 % y 98 %. Por su parte, Dick et al. (2015), modelaron dos sistemas de producción cárnica bajo pastoreo del sur de Brasil y evaluaron el impacto ambiental de un sistema extensivo y un sistema mejorado con límite temporal de 12 años, utilizando la metodología de ACV. Los autores identificaron que los componentes que producían mayor impacto al medio ambiente fueron las emisiones de metano entérico con un rango aún más estrecho entre los sistemas estudiados (97,27 % – 97,35 %) respecto a los encontrados en el presente estudio.

Las características digestivas del forraje ingerido por los rumiantes es un factor clave y determinante en la producción de metano entérico (Harper et al., 1999; Waghorn et al., 2006). En este sentido, las características nutricionales de las pasturas presentes en el campo natural y en el campo natural mejorado de los predios del presente estudio, representadas por la energía digerible, fue baja y muy similar entre predios (CN 56,6% ED y CNm 57,4% ED) por lo que la ED no habría contribuido a generar las diferencias de emisiones entéricas entre ambos sistemas de producción.la característica

Las categorías “Vacas de cría” y “Vaquillonas / Vacas_invernada” fueron las responsables del mayor aporte de CH_4 entérico, tanto a nivel de predio como en promedio por sistema productivo. Estos resultados son concordantes con las características de los predios estudiados sobre los cuales se identificó un ciclo ganadero productivo completo en el cual estas categorías son las predominantes. Dichos ciclos tienen el objetivo de obtener terneros para criarlos y prepararlos para la faena como machos gordos y a la vez obtener vientres para el reemplazo de las vacas de cría. Además, en estos ciclos productivos las vacas que no logran quedar preñadas, conocidas como vacas de refugo, pasan al proceso de engorde

(invernada) para su posterior venta (Franco, 2015; Gómez Miller, 2006), incrementando así el número de cabezas de esta categoría. Este funcionamiento de los sistemas productivos bovinos de ciclo completo y sus variantes, se caracterizan por contar con un elevado número de hembras en los predios. Por tal motivo, lograr la optimización de la recría acortando o acelerando los ciclos de desarrollo con mejora en la genética del rodeo, procurar mayor calidad en la alimentación y manteniendo un alto porcentaje de destetes, por mencionar sólo algunas medidas, podrían coadyuvar positivamente a la mitigación de emisiones de GEI en estas categorías.

6.2.Disponibilidad de MS, carga animal e intensidad de emisiones GEI.

La mayor disponibilidad de materia seca en los predios CNm se vio reflejada en una mayor dotación animal respecto a los predios CN. En promedio, tanto la disponibilidad de MS como la dotación animal fueron 55% mayores en CNm respecto a CN. En consecuencia, la intensidad de emisión expresada por unidad de producto animal, ya sea en términos de PV o de PCnl, se vio reducida significativamente en el CNm. Resultados similares se observaron en el trabajo de (Bogaerts et al., 2017), donde estudiaron 40 predios ganaderos sobre pastoreo extensivo y con cierta intensificación a través de mejoras en las pasturas nativas utilizando el enfoque de ACV. Adicionalmente, clasificaron los predios que habían participado en programas de producción sustentable a través del manejo de las pasturas y otras técnicas para lograr aumentar la dotación por superficie. Sus resultados indicaron que los predios con alguna área de intensificación mostraban menores emisiones que los predios extensivos. Y adicionalmente, los predios que habían participado por al menos dos años en programas de producción sustentable reportaron aún menores emisiones de GEI que las que habían participado por menor tiempo en los programas.

La magnitud de los valores de intensidad de emisión encontrados en este trabajo se mantiene dentro del rango de los resultados reportados en otras publicaciones a nivel mundial y regional. Por ejemplo, Beauchemin et al. (2011) tras el estudio de un predio ganadero hipotético caracterizando la producción ganadera del oeste de Canadá, que combina la cría a pastoreo y el engorde en feedlot, reportaron emisiones de 0,022 ton CO_2-eq kg $PCnl^{-1}$, el cual es similar a nuestro resultado para el sistema productivo CNm. El trabajo citado reportó, además, que el sistema de cría en praderas nativas aportaba el 80% a las emisiones totales y el sistema de engorde estabulado (feedlot) aportaba el 20%. Estos resultados estarían mostrando que la incorporación de concentrado en la dieta del rodeo favorece la mitigación de las emisiones GEI.

Ruviaro et al. (2015) también reportaron valores de 0,043 y 0,020 ton CO_2-eq kg PV^{-1} para el escenario de pasturas naturales y pasturas naturales mejoradas respectivamente. Al compararlos con nuestros resultados resalta una diferencia de

0,016 y 0,008 ton CO_2-eq kg PV^{-1} para el grupo CN y CNm respectivamente. A pesar de que su estudio fue llevado a cabo al sur de Brasil con una cercanía geográfica importante a nuestra zona de estudio, los límites del estudio de Ruviaro et al. (2015) tomaron en consideración los procesos de fabricación de los insumos utilizados en la producción ganadera, lo cual asumimos como la razón de las diferencias con nuestro trabajo.

Por otro lado, cuando la intensidad de emisiones GEI es expresada por unidad de superficie, el sistema productivo CN mostró una intensidad promedio 18% inferior a la obtenida en el sistema productivo CNm (0,3 ton CO_2-eq ha^{-1}). Es importante destacar que no se observaron diferencias entre la superficie de pastoreo efectivo promedio de los sistemas, por lo que el factor responsable de la diferencia en emisiones por unidad de superficie sería el menor número de cabezas de ganado en CN, el cual fue en promedio 20% inferior respecto a CNm.

La intensidad de emisiones expresada por animal y por año resultaron similares entre ambos sistemas. La calidad de la dieta, tanto por el valor de EB como por su digestibilidad, son factores que afectan la fermentación entérica y por lo tanto las emisiones de CH_4 por animal (Dini et al, 2017). En este mismo sentido, la ecuación 10.21 del IPCC 2006 (Cuadro VII), utiliza el valor de EB de la dieta como factor determinante del cálculo de emisión de CH_4 entérico.

En este estudio, las variables de calidad de las pasturas entre los diferentes predios y sistemas fueron muy similares y en consecuencia las emisiones por animal calculadas a partir de la ecuación 10.21 (IPCC, 2006) no resultaron diferentes. Por el contrario, en este estudio se hubiese esperado una composición nutricional favorable en los predios CNm debido a la introducción de mejoramientos en más del 30% de su área, ya que la digestibilidad de las pasturas del campo natural en Uruguay es en general bajo, pudiendo llegar a menos del 50% (Carámbula y Santiñaque, 2008). Sin embargo, en este estudio la digestibilidad de los predios CN fue en promedio 2% superior a los CNm.

La similitud en la calidad nutricional encontrada entre los predios de CN y CNm puede atribuirse a los distintos momentos en que se realizaron los muestreos de pasturas en cada predio, así como a las condiciones agroclimáticas (Cruz, 2014; Bettolli, 2010; Chiara, 1982). En este sentido, es importante aclarar que las pasturas de la mitad de los predios se muestrearon a mediados de febrero, otros dos fueron muestreados a mediados de marzo y tres meses después se realizó el muestreo del último predio. Por lo tanto, la realización de muestreos diferidos en el tiempo puede haber contribuido a que la calidad nutricional de pasturas muestreadas en verano y otoño no sean realmente comparables con la calidad de pasturas muestreadas en invierno. Esto afectaría la representatividad de la calidad promedio de cada predio, y que principalmente se haya subestimado la calidad nutricional de CNm. Además, en algunos casos se observaron potreros con sobrepastoreo y otros con remanentes de pasturas de baja calidad.

El contenido de lignina se observó mayor en las pasturas del CN con respecto al CNm. Sin embargo, esto no se reflejó en los cálculos de emisiones totales, las cuales fueron menores en el CN. Esto contrasta con lo reportado en algunos estudios, donde se acuerda que a mayor contenido de lignina y menor digestibilidad, mayor será la producción de CH_4 (Jaurena y Cantet, 2016). Sin embargo, esto pudiera ser explicado por la menor cantidad de animales por superficie efectivamente pastoreada presente en los sistemas ganaderos extensivos, comparados con los sistemas con algún tipo de mejora en sus pasturas, lo cual permite mantener mayor número de animales por superficie efectivamente productiva, generando mayor emisión de CH_4.

Adicionalmente, el % ED fue 5 % mayor en el CN que en el CNm lo que se tradujo en una leve reducción en la emisión de GEI en el CN cuando los resultados se expresaron en emisiones de GEI totales.

Por último, otro factor que pudo haber influenciado los resultados es la elevada heterogeneidad de especies de gramíneas nativas presentes en el CN (Jaurena, 2014; Paruelo et al., 2006; Millot, 1988) y la diversidad de estados fisiológicos de las pasturas al momento de los muestreos, debido a la libertad de selección que poseen los bovinos en los sistemas extensivos.

6.3.Contenido de carbono en el suelo.

Los resultados obtenidos de las estimaciones indican que aplicando ciertas mejoras a las pasturas del campo natural se podría lograr un incremento en la incorporación de carbono en el suelo (Baethgen y Martino, 2000). En este sentido se estimó que la incorporación de mejoras en el campo natural con pasturas lograría un almacenamiento de carbono orgánico de 1,25 ton CO_2-eq ha^{-1} $año^{-1}$ durante un período de 20 años. Si bien estos valores de captura de carbono son favorables a la realización de mejoramientos, los mismos resultaron inferiores a las emisiones GEI totales estimadas para los predios CNm resultando en un balance de carbono positivo, tanto para los predios CN como los CNm. Sin embargo, es importante destacar que la inclusión de áreas mejoradas en los predios CNm mostró un posible incremento de la capacidad de mitigación de estos predios pudiendo lograr una remoción de al menos un 20% de lo emitido y alcanzando un 32% en dos de los predios.

Paustian (1997) reporta que en regiones templadas existen ciertas prácticas que podrían ser claves para estimular el incremento del contenido de C en los suelos agrícolas como por ejemplo incrementando la frecuencia de cultivos, evitando el suelo desnudo, incrementando la utilización de forrajes perennes incluso leguminosas en las rotaciones de cultivo, reteniendo los residuos de cultivos y

reduciendo o eliminando la labranza. Todas estas prácticas proporcionan oportunidades para la retención o secuestro de carbono en los suelos.

Las estimaciones históricas de pérdidas de carbono en tierras agrícolas proporcionan una referencia del nivel del potencial de secuestro de C. En la mayoría de los casos los niveles de C en los suelos agrícolas aún con mejoras en su gestión no tienden a exceder las condiciones originales antes de los cultivos. Para efectos prácticos será como el potencial máximo de secuestro de carbono. Sin embargo, existen excepciones como las pasturas mejoradas en Australia donde la fertilización con fosforo estimuló en gran medida la productividad forrajera, mostrando niveles mucho más altos de la materia orgánica del suelo que en las condiciones prístinas (Russell, 1960)

En este sentido, se estudió la posibilidad de lograr balances de carbono neutros o negativos en los predios CN de este estudio. Para ellos, se calculó cuál sería la capacidad potencial de secuestrar carbono a través de la implementación de mejoras en la totalidad de la superficie de sus pasturas y cómo sería el balance de C manteniendo las mismas emisiones totales calculadas (Cuadro XXI). Utilizando el incremento del COS de 1,25 se observa que en dos de los predios sería posible lograr un balance negativo mientras que en uno de ellos la mejora total del área no sería suficiente para lograr la remoción de los gases emitidos. La capacidad de mitigación por el secuestro de carbono orgánico en el suelo fue de 4 % para el predio N°1, 5 % para el predio N°2 y 22 % para predio N°3. Además, es importante tener en cuenta que el mejoramiento de las pasturas se asocia a una mayor emisión total del predio debido al incremento de la carga animal, lo cual haría aún más difícil el logro de un balance neutro de Carbono.

Cuadro. XXI. Escenario de Balance de Carbono

ID	Sist. Prod.	Sup. Total	Tasa de secuestro por mejoras	Emisiones $GEI_{Totales}$	Secuestro Carbono	Δ C
		ha	$tonCO_2$-eq ha^{-1} $año^{-1}$	- - - - - - - $tonCO_2$-eq $año^{-1}$ - - - - - - -		
1		2.022	1,25	2.430	2.527,5	-97,3
2	CN	2.770	1,25	3.299	3.462,5	-163,1
3		4.700	1,25	7.542	5.875,0	1.666,8

En virtud de que la selección de los predios no fue al azar, nuestros resultados no son necesariamente representativos de la producción ganadera extensiva sobre campo natural del país, sin embargo, son una buena aproximación a la realidad.

7.CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de este estudio identifican los puntos claves en el impacto al cambio climático de la producción ganadera sobre campo natural en los predios estudiados. No obstante, éstos no deben ser utilizados para representar el total de emisiones por kilogramos de producto cárnico en el Uruguay, toda vez que los límites del trabajo no incluyen ni el proceso primario de extracción de materias primas, ni posteriores transformaciones de la carne y mucho menos sus procesos de empaquetado, almacenamiento, distribución y venta. Para ello se sugiere realizar un estudio más profundo con límites más amplios y compiladores que coadyuven de analizar al detalle la totalidad de los procesos involucrados en la elaboración del producto final.

Sin embargo, podríamos mencionar que los esfuerzos para mitigar las emisiones totales de GEI en los predios productivos estudiados deben estar enfocados en la reducción de la emisión de CH_4 entérico.

Visto la relevancia de la producción cárnica para el país, una buena práctica nacional podría ser la implementación de estrategias de manejo simples y económicamente viables, enmarcadas en planes de políticas públicas enfocadas en la adecuación de cada una a las características de los sistemas productivos ganaderos presentes en la nación. Un ejemplo pudiera ser la implementación y promoción de la optimización productiva.

Durante la investigación queda claro que la medición y la estimación sobre el campo natural representa un gran desafío y por lo tanto se requiere la adaptación de las mediciones a cada predio.

Algunas prácticas identificadas en el estudio que podrían ser aplicadas u optimizadas para contribuir a la neutralidad de las emisiones en la cadena cárnica son las siguientes:

7.1.Optimización productiva

El estudio de los casos mostró que la optimización productiva de los predios ganaderos favorece la reducción de la intensidad de emisión de GEI por kg de carne producido. Sin embargo, la reducción en emisiones totales de metano sólo funcionará si se logra mantener la producción animal (kg carne) reduciendo el número de animales (Moss et al., 2000).

7.1.1.Manejo de las pasturas.

Una buena práctica podría ser maximizar el consumo forrajero con la más alta calidad posible de las pasturas nativas, mediante el control de las alturas del pasto de entrada y salida de los potreros. Se ha demostrado que es necesario

el estudio de la relación calidad forrajera – altura de las pasturas nativas, ya que como lo reportan (Benvenutti et al., 2016) los mayores aportes proteicos y mejor digestibilidad están desde la altura máxima promedio de cada especie hasta una altura mínima antes de consumir tallo y hojas muertas, las cuales contienen alto grado de lignificación lo que promueve la metanogénesis en el rumen, (Moe y Tyrrell, 1979; Johnson y Johnson, 1995a; Van Soest, 1995)

7.1.2. Manejo de la dotación animal

En este estudio también se observó que el aumento de la dotación animal (0,57 y 1,12 UG/ha en sistema productivo CN vs. CNm, respectivamente) fue efectivo como medida para reducir de manera relativa la intensidad de emisión de CH_4 por kg de carne en PV. En tal sentido, ese aumento de dotación se manifestó en el grupo CNm, con lo cual, sería una buena práctica, realizar mejoras a los pastizales nativos de modo de optimizar la dotación animal adecuada a la oferta forrajera en función de la MS disponible, como lo mostró (Savian et al., 2014). Sin embargo, la optimización de la dotación animal aprovechando el potencial ofrecido por el campo natural podría ser u alternativa.

Adicionalmente, el presente trabajo estimó el contenido de carbono en suelos minerales de dos sistemas productivos (CN y CNm) con datos por defecto sugeridos por el IPCC, lo que permitió estimar la capacidad de aumentar la cantidad de carbono orgánico en los suelos de los predios del CN si pasaran a CNm con ciertas mejoras culturales y de manejo. Sin embargo, sería necesario realizar ensayos de largo plazo realizando mediciones periódicas *in situ* para obtener datos de escenarios prístinos y mejorados que permitan proyectar el stock de C.

Para finalizar, la incorporación del potencial de secuestro de carbono de los montes nativos y cultivos forestales podrían ser incluidos en el cálculo de los predios ganaderos en el Uruguay, lo cual se aproximaría más al verdadero potencial de secuestro de C de la cadena cárnica sobre campo natural en Uruguay.

8.CONCLUSIONES

- La evaluación y conocimiento de la magnitud de las emisiones de GEI a nivel predial es de gran relevancia para identificar los procesos susceptibles de optimización en nuestros sistemas productivos ganaderos sobre campo natural, lo cual, podría contribuir significativamente al compromiso de Uruguay de neutralizar las emisiones GEI para el año 2030.

- La emisión de GEI totales en los predios ganaderos estudiados se ve afectada principalmente por el CH_4 entérico, el cual, es la fuente más relevante de los GEI emitidos por nuestro rodeo. Adicionalmente, en los sistemas ganaderos de ciclo completo incluyendo sus variantes, son las categorías vacas de cría y vaquillonas/vacas de invernada las que aportan mayor proporción de CH_4 a las emisiones totales. Sin embargo, resalta el potencial del campo natural por ofrecer la oportunidad de incorporar al suelo un porcentaje altamente significativo del C mediante la transformación fotosintética de las pasturas y ciertas prácticas de manejo.

- La guía LEAP para grandes rumiantes ofrece un protocolo adaptable a nuestras condiciones agroclimáticas y sugiere ciertas prácticas metodológicas que permiten su adaptación a nuestras características agro-productivas.

- El estudio de los casos demostró que existe oportunidad de optimización de ciertas variables de manejo en nuestros sistemas productivos que permitirían mitigar las emisiones GEI, entre las que se identificaron encontramos el manejo adecuado de las pasturas, la optimización de la dotación animal en el campo natural, la incorporación de especies gramíneas perennes y leguminosas al campo natural lo que promueve, por un lado, la reducción de la intensidad de emisión por unidad de producto y por otro, permite también incrementar el secuestro de carbono al suelo de nuestro campo natural.

- Es necesario continuar con los estudios en este tema, ampliando los límites de análisis para definir el impacto total de la cadena cárnica en Uruguay para poder obtener ventajas competitivas en los mercados más exigentes.

ANEXOS

Anexo 1. Cuestionario aplicado en el estudio

Sustentabilidad y eficiencia global en predios ganaderos

1. Datos del predio ganadero

Lugar y Fecha: _____ Nombre del Predio: _____
Padrón del Predio: _____ Dpto: _____
Ruta y Km: _____ Área Total: _____ Correo electrónico: _____

2. Datos del rebaño

Ganado bovino Razas: _____

Cantidad en cabezas y Peso promedio por categorías

Vaquillonas (1-2años)		Vaquillonas (>2años)		Vacas Multíparas			
Peso Promedio		Peso Promedio		Peso Promedio			
Vacas de invernada		Terneros		Toros			
Peso Promedio		Peso Promedio		Peso Promedio			
Novillo (1-2años)		Novillos (2-3años)		Novillos (>3años)			
Peso Promedio		Peso Promedio		Peso Promedio			

Ganancia de peso diario (Kg/día):

Terneros		Edad de faena	
Novillos		Peso a faena	
Toros		Edad al destete	
Vacas lax			

Producción diaria de leche (Kg/día):

Kg/día	
% de grasa	

Porcentaje de vacas que paren al año (%)		% Preñez	
Cantidad de terneros/año		% Destete	

Causas de mortalidad del rebaño/categoría: _____

Peso Maduro

Edad de Madurez

Ganado Ovino ó Lanar

Razas:_____

Cantidad en cabezas y Peso promedio por categorías

Ovejas de Cría Peso Promedio		Ovejas Descarte Peso Promedio		Carneros Peso Promedio			
Capones Peso Promedio		Borregas (2-4dientes) Peso Promedio		Corderos Dientes Leche Peso Promedio			
Corderas Dientes Leche Peso Promedio		Corderos Mamones Peso Promedio		Borregos (2-4dientes) Peso Promedio			

Peso al nacer | Peso al destete

Peso al año | Ganancia de peso/día

3. Datos del Campo Natural CN

Intensidad de producción: Extensivo CN ☐ Extensivo CN con Mejora ☐ Extensivo con Suplemento ☐

Tipo de suplemento y cantidad/animal: _____

Tipo de Ciclo productivo: _____

Consulta de área (ha):

CN		CN Mejorado*		Pradera/Verdeos**	
CN Fertilizado***		Cultivos Forrajeros		Tierra Labrada	
Monte Artificial		Huerta/Frutales/Viñas		Otros	

(*) Mejoras (%): _____

4. Datos de energía

Suministro de agua a los animales:

Gravedad desde tanques	☐
Gravedad de fuentes naturales	☐
Bombeo	☐
Directamente de fuentes naturales	☐

¿Qué tipo de bombas usa usted en su predio para hacer llegar el agua a los tanques (solo para animales) y/o bebederos de los animales?

Bombas eléctricas	☐
Motobombas	☐
Ambos	☐

Consulta de cantidades:

Bombas eléctricas usadas para llevar agua a los animales	
Motobombas usadas para llevar agua a los animales	
Potreros producción animal	
Potreros con bebederos naturales	
Potreros con bebederos artificiales	
Animales por bebedero (promedio)	
Bebederos ocupados/día	
Bebederos que llena con cada bomba (Unidades específicas):	

Potencia de cada bomba (Hp ó Kw): | | | | |

Capacidad promedio de los bebederos llenados por bombeo de agua (litros): |

(**) Especies sembradas (%):_____

(***) Cantidad en Kg/ha/año por tipo de fertilizante utilizado por año sobre **CN**:

7-40-0		18-46-0		46-0-0-6		0-0-60	
0-21-0		10-50-0		Fosforita		46-0-0	
15-15-15		0-46-0		Urea		Estiércol	
Quema						Otro:	

Otros (Aplicaciones/año): _____

Cantidad en Kg/ha/año por tipo de fertilizante utilizado al año sobre **Praderas/Verdeos**:

7-40-0		18-46-0		46-0-0-6		0-0-60	
0-21-0		10-50-0		Fosforita		46-0-0	
15-15-15		0-46-0		Urea		Otro:	

Otros (Aplicaciones/año): _____

Digestibilidad del CN del predio (%): ☐

Digestibilidad de las mejoras del predio (%): ☐

Rendimiento en fresco del cultivo en el predio (Kg/ha): _____

Carga animal: ☐

5. Datos de Transporte interno

Distancia del traslado (Km)	
Cantidad de animales trasladados (cabezas)	
Peso promedio de los animales Kg/categoría	
Capacidad de carga del camión (cabezas ó ton)	
Tipo de combustible	

6. Datos Adicionales

Anexo 2. Tabla 6.2 guía IPCC,2019

TABLE 6.2 (UPDATED)
RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS FOR GRASSLAND MANAGEMENT

Factor	Level	Climate regime	IPCC default	Error [1,2]	Definition
Land use (F_{LU})	All	All	1.0	NA	All native and/or permanent grassland in a nominal condition is assigned a land-use factor of 1.
Management (F_{MG})	Nominally managed (non – degraded)	All	1.0	NA	Represents low or medium intensity grazing regimes, in addition to periodic cutting and removal of above-ground vegetation, without significant management improvements.
Management (F_{MG})	High Intensity Grazing[3]	All	0.90	±8%	Represents high intensity grazing systems (or cutting and removal of vegetation) with shifts in vegetation composition and possibly productivity but is not severely degraded[4].
Management (F_{MG})	Severely degraded	All	0.7	±40%	Implies major long-term loss of productivity and vegetation cover, due to severe mechanical damage to the vegetation and/or severe soil erosion.
Management (F_{MG})	Improved grassland	Temperate/ Boreal	1.14	±11%	Represents grassland which is sustainably managed with light to moderate grazing pressure (or cutting and removal of vegetation) and that receive at least one improvement (e.g., fertilization, species improvement, irrigation).
		Tropical	1.17	±9%	
		Tropical Montane[5]	1.16	±40%	
Input (applied only to improved grassland) (F_I)	Medium	All	1.0	NA	Applies to improved grassland where no additional management inputs have been used.
Input (applied only to improved grassland) (F_I)	High	All	1.11	±7%	Applies to improved grassland where one or more additional management inputs/improvements have been used (beyond that required to be classified as improved grassland).

Management factors were derived using methods and studies provided in Annex 6A1. The basis for the other factors is described in the *2006 IPCC Guidelines*.

Source:

[3] The bibliography for the following references used for management factor can be found in Annex 6A.1:

Cao *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2017; Frank *et al.*, 1995; Franzluebbers and Stuedemann, 2009; Gao *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2007; Gillard, 1969; Han *et al.*, 2008; He *et al.*, 2008; Ingram *et al.*, 2008; Kioko *et al.*, 2012; Kölbl *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012; Manley *et al.*, 1995; Martinsen *et al.*, 2011; Potter *et al.*, 2001; Qi *et al.*, 2010; Rutherford and Powrie, 2011; Schulz *et al.*, 2016; Schuman *et al.*, 1999; Segoli *et al.*, 2015; Smoliak *et al.*, 1972; Sun *et al.*, 2011; Talore *et al.*, 2016; Teague *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2014; Yanfen *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2010; Zou *et al.*, 2015

Notes:

[1] ± two standard deviations, expressed as a percent of the mean; where sufficient studies were not available for a statistical analysis a default, based on expert judgement, of ±40% is used as a measure of the error. NA denotes 'Not Applicable', for factor values that constitute reference values or nominal practices for the input or management classes.

[2] This error range does not include potential systematic error due to small sample sizes that may not be representative of the true impact for all regions of the world.

[4] High intensity grazing may be moderately degraded, but do not represent excessive grazing intensity that leads to severe grassland degradation.

[5] There were not enough studies to estimate stock change factors for mineral soils in the tropical montane climate region. As an approximation, the average stock change between the temperate and tropical regions was used to approximate the stock change for the tropical montane climate.

Tier 2

Estimation of country-specific stock change factors is an important advancement for improving an inventory that can be developed in the Tier 2 approach. Derivation of management factors (F_{MG}) and input factors (F_I) are based on experimental comparisons to nominally-managed grasslands with medium input, respectively, because these

Anexo 3. Detalle de resultado por predio

Predio 1

Ubicado en el departamento de Salto cuenta con una superficie total de 2.022ha. sobre roca basáltica (superficial y profunda). Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 1) con baja proporción de mejoras en sus pasturas, dicha relación (CN:CNm) es 12:1 por lo cual es considerado para este estudio como sistema productivo A. Presenta 5ha. sembradas de monte exótico (posiblemente *Eucalyptus globulus o Eucalyptus grandis)*. La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 798 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por las razas Arbendeen Angus, Hereford y cruzas. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 0,23:1, bajo un sistema productivo bovinos de ciclo incompleto, comercializa novillos de 350kg. La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales. Las mejoras presentes en sus pasturas se realizaron con la implantación de 80ha. de Lotus rincón (*Lotus subbiflorus*) y una fertilización anual de éstas con super triple (0-46-0-9Ca) a razón de 100kg ha^{-1}. La hidratación de los semovientes es a través de fuentes naturales por lo que no utiliza sistema de bombeo hidráulico y no se realiza traslado interno del ganado en vehículos de combustión interna.

PREDIO - 1	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		1	2
Fecha de Toma		20/02/219	20/2/2019
Fecha Ejecución		7/3/2019	7/3/2019
MSA %	%	95.5	94.9
PC %	%	7.1	8.8
FDA %	%	40.4	36.8
FDN %	%	63.1	60.6
CEN %	%	13.1	11.7
MO %	%	82.4	83.3
LIG %	%	8.32	9.2
EB	(Mcal/kg)	4.2	4.3
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	52.3	sd
Dig FDN	%	51.0	sd
Energía Dig	%	54.6	sd

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	2,430,219.6	
CH_4 Entérico	2,384,086.8	98.1%
CH_4 Estiércol	45,991.3	1.9%
N_2O Directas de Estiércol	141.5	0.006%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	0.0	0.0%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	0.0	0.0%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	59,889.6	2.5%
Lactantes	1,675,436.7	68.9%
No Lactantes	457,163.8	18.8%
Castrados	237,729.5	9.8%
Intensidad de Emisión GEI		
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	3,045.4	
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	23.3	
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	44.0	
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	1,204.9	

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

Predio 2

Ubicado en el departamento de Rivera cuenta con una superficie total de 2.770ha. sobre suelo de arenisca (planicie y ladera). Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 2) con baja proporción de mejoras en sus pasturas, dicha relación (CN:CNm) es 13:1 por lo cual es considerado para este estudio como sistema productivo A. Presenta 100ha. de represa artificial y 400ha. de monte nativo especialmente ribereño. La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 1.372 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por las razas Arbendeen Angus y Red poll. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 0,87:1, bajo un sistema productivo bovinos de ciclo incompleto, comercializa terneros de 150kg y vacas de invernada. La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales. Las mejoras presentes en sus pasturas se realizaron con la implantación de 160ha. de Ryegrass y Lotus rincón (*Lolium sp.; Lotus subbiflorus*) con una única fertilización realizada hace tres años (al momento del estudio) con fosforita a razón de 100kg ha^{-1}. La hidratación de los semovientes es a través de fuentes naturales por lo que no utiliza sistema de bombeo hidráulico. Se realiza traslado dentro del sistema en vehículos de combustión interna desde el Dpto. de Rivera hasta el Dpto. de Salto, donde los terneros vendidos son entregados a los compradores y las hembras son llevadas a engordar en potreros hasta el momento su madurez sexual cuando se regresan al Dpto. Rivera son inseminadas o entoradas según sea el caso.

PREDIO - 2	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		3	4
Fecha de Toma		21/2/2019	21/2/2019
Fecha Ejecución		7/3/2019	7/3/2019
MSA %	%	95,7	95,5
PC %	%	4,6	7,3
FDA %	%	38,3	40,2
FDN %	%	67,5	66,3
CEN %	%	7,7	9,3
MO %	%	88,0	86,2
LIG %	%	19,17	16,9
EB	(Mcal/kg)	3,7	3,8
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	51,3	59,5
Dig FDN	%	52,3	58,3
Energía Dig	%	61,3	0,7

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	3.299.440,4	
CH_4 Entérico	3.245.977,9	98,4%
CH_4 Estiércol	49.111,8	1,5%
N_2O Directas de Estiércol	143,8	0,0044%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	4.206,9	0,1%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	0,0	0,0%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	329.045,3	10,0%
Lactantes	2.192.686,5	66,5%
No Lactantes	766.949,7	23,2%
Castrados	10.758,9	0,3%
Intensidad de Emisión GEI		
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	2.401,8	
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	32,2	
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	60,8	
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	1.864,1	

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

Predio 3

Ubicado en el departamento de Salto cuenta con una superficie total de 4.700ha. sobre roca basáltica (superficial y profunda). Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 3) con baja proporción de mejoras en sus pasturas, dicha relación (CN:CNm) es 15:1 por lo cual es considerado para este estudio como sistema productivo A. Presenta 25ha. sembradas de monte exótico (posiblemente *Eucalyptus globulus* o *Eucalyptus grandis*) y 600ha. monte nativo. La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 2.529 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por la raza Hereford. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 1,6:1, bajo un sistema productivo bovinos de ciclo incompleto, comercializa novillos de 350kg (1 a 2 años). La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales. Las mejoras presentes en sus pasturas se realizaron con la implantación de 300ha. con Ryegrass (*Lolium sp.*), Lotus rincón (*Lotus subbiflorus*) y Trébol rojo (*Trifolium pratense*) sin fertilización. La hidratación de los semovientes es a través de fuentes naturales por lo que no utiliza sistema de bombeo hidráulico eléctrico, presenta sistemas de energía eólica y fotovoltaica. No se realiza traslado interno del ganado en vehículos de combustión interna.

PREDIO - 3	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		12	13
Fecha de Toma		20/5/2020	20/5/2020
Fecha Ejecución			
MSA %	%	93.5	93.6
PC %	%	5.9	6.1
FDA %	%	46.2	44.4
FDN %	%	70.4	65.7
CEN %	%	9.9	10.2
MO %	%	83.7	83.4
LIG %	%	15.9	15.1
EB	(Mcal/kg)	4.0	3.6
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	66.4	44.5
Dig FDN	%	67.4	43.4
Energía Dig	%	sd	53.7

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	7,541,782.2	
CH_4 Entérico	7,395,950.8	98.1%
CH_4 Estiércol	145,503.2	1.9%
N_2O Directas de Estiércol	328.1	0.004%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	0.0	0.0%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	0.0	0.0%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	294,135.5	3.9%
Lactantes	3,912,683.0	51.9%
No Lactantes	2,293,654.0	30.4%
Castrados	1,041,309.8	13.8%

Intensidad de Emisión GEI	
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	2,982.1
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	24.3
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	45.9
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	1,850.7

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

Predio 4

Ubicado en el departamento de Flores, cuenta con una superficie total de 2.555ha. sobre suelo cristalino. Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 4) con mejoras en sus pasturas en más 30% de la superficie del predio, dicha relación (CN:CNm) es 2:1 por lo cual es considerado sistema productivo B para esta investigación. Presenta 88ha. sembradas de monte exótico (posiblemente Eucalyptus globulus o Eucalyptus grandis). La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 1.332 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por la raza Arbedeen Angus. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 4:1 bajo un sistema productivo bovino de ciclo incompleto abierto, comercializa novillos de 490kg (<2 años). La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales. Las mejoras realizadas en sus pasturas fueron a base de implantación de 470ha. con Festuca (*Festuca arundinacea*), *Lotus corniculatus*, Trébol blanco (*Trifolium repens*) y Trébol rojo (Trifolium pratense) con fertilización anual sobre parte del CN con 0-10-29-0 y fosforita a razón de 300kg ha^{-1} y sobre las praderas con 7-40-0 a razón de 150kg ha^{-1}. La hidratación de los semovientes se realiza a través de fuentes naturales y mediante bebederos, los cuales son llenados con bombeo eléctrico 1,1kW ha^{-1}. No se realiza traslado interno del ganado en vehículos de combustión interna.

PREDIO - 4	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		8	9
Fecha de Toma		8/5/2020	8/5/2020
Fecha Ejecución			
MSA %	%	90,2	89,5
PC %	%	10,0	11,7
FDA %	%	40,9	37,1
FDN %	%	68,2	52,3
CEN %	%	8,4	15,5
MO %	%	81,8	74,1
LIG %	%	12,4	13,4
EB	(Mcal/kg)	4,4	3,8
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	47,8	62,9
Dig FDN	%	48,7	54,8
Energía Dig	%	59,0	41,0

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	3.663.257,9	
CH_4 Entérico	3.572.585,4	97,5%
CH_4 Estiércol	67.597,7	1,8%
N_2O Directas de Estiércol	304,8	0,0%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	0,0	0,0%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	22.770,0	0,6%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	101.314,1	2,8%
Lactantes	2.696.437,2	73,6%
No Lactantes	720.907,3	19,7%
Castrados	144.599,2	3,9%
Intensidad de Emisión GEI		
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	2.750,2	
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	11,3	
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	21,4	
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	1.541,8	

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;
(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

Predio 5

Ubicado en el departamento de Durazno, cuenta con una superficie total de 3.203ha. sobre suelo de arenisca. Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 5) con mejoras en sus pasturas en más de 30% de la superficie del predio, dicha relación (CN:CNm) es 1:1 por lo cual es considerado sistema productivo B para esta investigación. Presenta 23ha. sembradas de monte exótico (posiblemente *Eucalyptus globulus* o *Eucalyptus grandis*). La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 2.954 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por la raza Hereford, Angus rojo y cruzas. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 4:1 bajo un sistema productivo bovino de ciclo completo abierto. Comercializa novillos de 468kg (2 a 3 años) y vacas de invernada. La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales sin suplementación en los meses de escasez forrajera. Las mejoras presentes en sus pasturas se realizaron con la implantación de 1425ha. con Lotus rincón (*Lotus subbiflorus*) en el CN y Ryegrass (Lolium), Festuca (*Festuca arundinacea*), Trébol blanco (*Trifolium repens*), *Lotus corniculatus*, y Lotus maku *(Lotus pedunculatus)* y fertilización en el CN con fosforita 200kg ha^{-1} interanual y el siguiente régimen fertilización en las praderas (Año1: 18-46-0 150kg ha^{-1}; Año2 y 3: Fosforita 200kg ha^{-1}; Año4: Nada; Anual 46-0-0 70kg ha^{-1}). La hidratación de los semovientes es a través de fuentes naturales. No se realiza traslado interno del ganado en vehículos de combustión interna.

PREDIO - 5	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		10	11
Fecha de Toma		26/3/2020	26/3/2020
Fecha Ejecución			
MSA %	%	89,78	88,93
PC %	%	6,85	10,21
FDA %	%	42,63	36,80
FDN %	%	71,30	62,27
CEN %	%	7,35	7,35
MO %	%	82,43	81,58
LIG %	%	11,23	9,63
EB	(Mcal/kg)	4,27	4,33
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	49,4	50,1
Dig FDN	%	53,5	58,2
Energía Dig	%	51,6	61,2

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	8.785.893,5	
CH_4 Entérico	8.613.554,3	98,04%
CH_4 Estiércol	171.739,7	1,95%
N_2O Directas de Estiércol	599,4	0,007%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	0,0	0,0%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	0,0	0,0%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	679.393,3	7,7%
Lactantes	3.932.344,4	44,8%
No Lactantes	3.162.560,3	36,0%
Castrados	1.011.595,5	11,5%
Intensidad de Emisión GEI		
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	2.974,2	
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	16,4	
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	30,9	
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	2.762,9	

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;
(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

Predio 6

Ubicado en el departamento de Rivera, cuenta con una superficie total de 2.424ha. sobre suelo de arenisca. Las pasturas poseen características nutricionales, de digestibilidad y de energía específicas (Anexo 2 – Predio 6) con mejoras en sus pasturas en más de 30% de la superficie del predio, dicha relación (CN:CNm) es 2:1 por lo cual es considerado sistema productivo B (en este estudio). Presenta 47ha. sembradas de monte exótico (posiblemente *Eucalyptus globulus* o *Eucalyptus grandis*) y 2ha. de viñas y frutales. La población total de ganado bovino para el momento del estudio era de 1.564 cabezas (no incluye terneros) representadas principalmente por las razas Hereford y Montana. Mantiene una relación Bovinos:Ovinos de 3:1 bajo un sistema productivo bovino de ciclo completo abierto. Comercializa novillos de 480kg (2 a 3 años) y vacas de invernada. La alimentación de los animales se basa en el pastoreo extensivo de pasturas naturales (Creep feeding no incluído en los cálculos). Las mejoras presentes en sus pasturas se realizaron con la implantación de 897ha. con Festuca (*Festuca arundinacea*), Ryegrass (*Lolium*), Trébol blanco (*Trifolium repens*), *Lotus corniculatus*, y Avena *(Avena sativa)* sin fertilización. La hidratación de los semovientes es a través principalmente de fuentes naturales y a través de un bebedero el cual se llena a través de bombeo eléctrico 1,5kW hr^{-1}. No se realiza traslado interno del ganado en vehículos de combustión interna.

PREDIO - 6	Unid	Muestreo Pasturas	
		1	2
Análisis Químico			
Nº Muestra		5	6
Fecha de Toma		22/2/2019	22/2/2019
Fecha Ejecución		7/3/2019	7/3/2019
MSA %	%	96,38	95,41
PC %	%	6,92	6,58
FDA %	%	37,81	40,25
FDN %	%	66,75	69,28
CEN %	%	7,29	7,43
MO %	%	89,09	87,98
LIG %	%	6,14	7,43
EB	(Mcal/kg)	3,93	3,87
Digestibilidad in situ			
Dig MS	%	52,2	62,0
Dig FDN	%	52,2	54,8
Energía Dig	%	58,5	72,5

ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE GEI

Emisiones Absolutas	**(kg CO_2-eq año^{-1})**	**%**
Emisiones GEI Totales	3.462.105,9	
CH_4 Entérico	3.396.302,3	98,10%
CH_4 Estiércol	61.821,2	1,79%
N_2O Directas de Estiércol	182,5	0,01%
CO_2 Combustión Móvil Endógena	0,0	0,00%
CO_2 Consumo E. Eléctrica	3.800,0	0,11%
Emisiones GEI Totales según Categoría		
Toros	58.411,0	1,7%
Lactantes	1.443.205,8	41,7%
No Lactantes	1.219.217,9	35,2%
Castrados	741.271,2	21,4%
Intensidad de Emisión GEI		
Emisión GEI (kg CO_2-eq animal^{-1} año^{-1})	2.213,6	
Base PV(*) (kg CO_2 -eq kg de PV^{-1})	10,5	
Base PCnl(**) (kg CO_2 -eq kg de Cnl^{-1})	19,8	
Base SPE (***) (kg CO_2 -eq ha^{-1})	1.514,5	

(*)Peso Vivo,nativo; (**)Peso Canal - 53% de rendimiento, 4ta Balanza, INAC, 2°Trimestre 2020;

(***)Superficie Pastoreo Efectivo - Se excluye represas, plantaciones exóticas y monte

9.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adams, J.M., Faure, H., Faure-Denard, L., McGlade, J., Woodward, F., 1990. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present. Nature 348, 711–714.
2. Andersson, K., Ohlsson, T., Olsson, P., 1994. Life cycle assessment (LCA) of food products and production systems. Trends in Food Science & Technology 5, 134–138.
3. Anguita, J.C., Labrador, J.R., Campos, J.D., Casas Anguita, J., Repullo Labrador, J., Donado Campos, J., 2003. La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos (I). Atención primaria 31, 527–538.
4. Arvanitoyannis, I.S., 2008. ISO 14040: life cycle assessment (LCA)–principles and guidelines. Waste management for the food industries 97–132.
5. Asman, W.A., Sutton, M.A., Schjørring, J.K., 1998. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. New phytologist 139, 27–48.
6. Baethgen, W., Martino, D., 2000. Cambio climático, gases de efecto invernadero e implicancias en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay. Resúmenes del Taller sobre el Protocolo de Kyoto. Ministerio de Vivienda, ordenamiento territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Uruguay.
7. Beauchemin, K., Janzen, H., Little, S., McAllister, T., McGinn, S., 2011. Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada–Evaluation using farm-based life cycle assessment. Animal Feed Science and Technology 166, 663–677.
8. Becoña, G., 2012. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SISTEMAS DE CRÍA VACUNA DEL URUGUAY. UdelaR, Uruguay.
9. Benvenutti, M.A., Pavetti, D.R., Poppi, D.P., Gordon, I.J., Cangiano, C.A., 2016. Defoliation patterns and their implications for the management of vegetative tropical pastures to control intake and diet quality by cattle. Grass and Forage Science 71, 424–436.
10. Berretta, E., 1997. Producción de pasturas naturales en el Basalto: producción mensual y estacional de forraje de cuatro comunidades nativas sobre suelos de Basalto. INIA Serie Técnica.
11. Berretta, E., 1996. Campo natural: valor nutritivo y manejo. INIA Serie Técnica.
12. Berretta, E., Bemhaja, M., 1997. Producción de pasturas naturales en el Basalto: producción estacional de forraje de tres comunidades nativas sobre suelo de Basalto. INIA Serie Técnica.
13. Berretta, E., Risso, D., Montossi, F., Pigurina, G., others, 2000. Campos in Uruguay. Grassland ecophysiology and grazing ecology'.(Eds G Lemaire, J Hogdson, A de Moraes, C Nabinger, PC Carvalho) pp 377–394.
14. Berretta, E.J., 1998. Impacto del pastoreo en el ecosistema de la pradera natural. Recuperación y manejo de ecosistemas degradados 55–62.
15. Berretta, E.J., 1990. Técnicas para evaluar la dinámica de pasturas naturales en pastoreo. Reuniao do Grupo Técnico Regional do Cone Sul em Melhoramento e Utilizaçaô dos Recursos Forrageiros das Areas Tropical e Subtropical: Grupo Campos, XI 129–147.
16. Bettolli, M. L., Del Carmen, M. Á. A., Cruz Brasesco, G., Rudorff, F., Martínez Ortiz, A., Arroyo, J., & Armoa, J. (2010). Pastura natural de Salto (Uruguay): relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. Revista Brasileira de Meteorologia, 25, 248-259.

17. Bjørn, A., Owsianiak, M., Molin, C., Laurent, A., 2018. Main characteristics of LCA, in: Life Cycle Assessment. Springer, pp. 9–16.
18. Blackburn, H., 2003. Livestock - Environment Interactions.
19. Bogaerts, M., Cirhigiri, L., Robinson, I., Rodkin, M., Hajjar, R., Junior, C.C., Newton, P., 2017. Climate change mitigation through intensified pasture management: Estimating greenhouse gas emissions on cattle farms in the Brazilian Amazon. Journal of Cleaner Production 162, 1539–1550.
20. Bouwman, A.F., 1989. Soils and greenhouse effects. https://doi.org/10.18174/njas.v37i1.16650
21. Bruinsma, J., 2003. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective. Earthscan.
22. Carámbula, M., Santiñaque, F., 2008. Pasturas naturales mejoradas. Montevideo Hemisferio Sur, 530p.
23. Chapin, F., Woodwell, G., Randerson, J., Rastetter, E., Lovett, G., Baldocchi, D., Clark, D., Harmon, M., Schimel, D., Valentini, R., others, 2006. 455 Howarth. RW, Matson, PA, McGuire, AD, Melillo, JM, Mooney, HA, Neff, JC, Houghton, RA, Pace, ML, Ryan, MG, Running, SW, Sala, OE, Schlesinger, WH, and Schulze, ED: Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods, Ecosystems 9, 1041–1050.
24. Chiara, J.P., 1982. Uso sostenible del campo natural. Interciencia 31, 109–118.
25. Christensen, B.T., 1996. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. Advances in soil science: Structure and organic matter storage in agricultural soils 97–165.
26. Ciganda, A.P.V., Dini, A.Ms.Y., Romero, B.C., Mariotta, B.J., 2016. EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN BOVINOS DE CARNE BAJO CONDICIONES REPRESENTATIVAS DE PASTOREO EN URUGUAY: pasturas implantadas vs. campo natural degradado.
27. Ciganda, V.S., 2017. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los sistemas de producción animal en condiciones de pastoreo en el Uruguay 45–46. https://doi.org/10.1071/AN16803.46
28. Conant, R.T., Paustian, K., Elliott, E.T., 2001. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. Ecological applications 11, 343–355.
29. Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V., & Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. Agrociencia (Uruguay), 18(1), 126-132.
30. Davidson, E.A., Ackerman, I.L., 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. Biogeochemistry 20, 161–193.
31. Dick, M., da Silva, M.A., Dewes, H., 2015. Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. Journal of Cleaner Production 96, 426–434.
32. Dini, Y., Gere, J. I., Cajarville, C., & Ciganda, V. S. (2017). Using highly nutritious pastures to mitigate enteric methane emissions from cattle grazing systems in South America. Animal Production Science, 58(12), 2329-2334.DIEA, M., 2019. Anuario Estadístico Agropecuario. Uruguay.
33. DIEA, M., 2018. Anuario Estadístico Agropecuario. Uruguay.
34. FAO, 2006. Livestock's long shadow - environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations 3, 1–377. https://doi.org/10.1007/s10666-008-9149-3
35. FAOSTAT, 2017. FAOSTAT [WWW Document]. fao.org. URL http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA

36. FCCC, 2015. Reporte de las Coferencias de las Partes en la 21° Sesión (No. FCCC/CP/2015/10).
37. FAO, 2016. Environmental Performance of Large Ruminant Supply Chains 275.
38. Formoso, D., 1990. Pasturas naturales: componentes de la vegetación, producción y manejo de diferentes tipos de campos. III Seminario Técnico de Producción Ovina 225–237.
39. Franco, A.R., 2015. Ganadería intensiva y extensiva en el Uruguay.
40. Friedlingstein, P., Jones, M., O'sullivan, M., Andrew, R., Hauck, J., Peters, G., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., others, 2019. Global carbon budget 2019. Earth System Science Data 11, 1783–1838.
41. *Global Carbon Atlas*, 2017. http://www. globalcarbonatlas. org/en. CO2-emissions.
42. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010a. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. science 327, 812–818.
43. Godfray, H.C.J., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Nisbett, N., Pretty, J., Robinson, S., Toulmin, C., Whiteley, R., 2010b. The future of the global food system. The Royal Society.
44. Gómez Miller, R., 2006. Ganadería en el Uruguay.
45. Griggs, D.J., Noguer, M., 2002. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Weather 57, 267–269.
46. Harper, L., Denmead, O., Freney, J., Byers, F., 1999. Direct measurements of methane emissions from grazing and feedlot cattle. Journal of Animal Science 77, 1392–1401.
47. INAC, 2020. Uruguay beef and sheepmeat Industry.
48. INAC, 2019. Anuario Estadístico 2019.
49. INAC, 2018. GUÍA PRÁCTICA "PROGRAMAS DE CERTIFICACIÓN DE CARNES (PCC)". URL https://www.inac.uy/innovaportal/file/10528/1/guia-practica-v4-revision-18-04.pdf "
50. INAC, n.d. Uruguay, país ganadero. URL https://www.inac.uy/innovaportal/v/3104/17/innova.front/uruguay-pais-ganadero#:~:text=Uruguay%20es%20uno%20de%20los,el%20bienestar%20de%20los%20animales.
51. IPCC, 2014. Annex II: Glossary. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 117–130. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324
52. IPCC, 2006. Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. IGES, Japón.
53. Jaurena, G., Cantet, J.M., 2016. Emisiones de metano y su mitigación: Una mirada desde distintas escalas de trabajo. Arch. Latinoam. de Prod. Anim. 24, 117–122.
54. Jaurena, A. M. M., Franco, A. R., Condón, A. P. F., Tiscornia, B. M. G., Reyno, A. P. R., Beyhaut, A. P. E., ... & de Suelos, L. D. M. (2014). Colecta de especies forrajeras nativas: un proyecto INIA para el futuro. Revista INIA-Nº, 38, 30.
55. Johnson, K.A., Johnson, D.E., 1995a. Methane emissions from cattle. Journal of animal science 73, 2483–2492.
56. Johnson, K.A., Johnson, D.E., 1995b. Methane emissions from cattle. Journal of animal science 73, 2483–2492.

57. Johnson, M.G., Kern, J.S., 1991. Sequestering Carbon in Soil: A Workshop to Explore the Potential for Mitigating Global Climate Change. METI, Incorporated, ERL.
58. Jones, M.B., others, 2010. Potential for carbon sequestration in temperate grassland soils. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics.
59. Koneswaran, Gowri and Nierenberg, Danielle, 2008. Beef production: Koneswaran and Nierenberg respond. Environmental health perspectives 116, A375–A376.
60. Lazo Pritsch, J.M., 2012. Superficies del Uruguay: medirlas, una tarea final.
61. Lehmann, J., Kinyangi, J., Solomon, D., 2007. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms. Biogeochemistry 85, 45–57.
62. Mann, L., 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. Soil Science 142, 279–288.
63. MGAP, 2013. Primer estudio de la huella de carbono de tres cadenas agroexportadoras del Uruguay: Carne vacuna, Láctea y Arrocera
64. Millot, J.C., 1988. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay^ cJ. C. Millot, D. Risso, R. Methol. Revista del Plan Agropecuario.
65. Moe, P., Tyrrell, H., 1979. Methane production in dairy cows. Journal of Dairy Science 62, 1583–1586.
66. Monteny, G., Erisman, J., 1998. Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. NJAS wageningen journal of life sciences 225–247.
67. Morgavi, D., Forano, E., Martin, C., Newbold, C.J., 2010. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. Animal: an international journal of animal bioscience 4, 1024.
68. Moss, A.R., Jouany, J.-P., Newbold, J., 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming, in: Annales de Zootechnie. EDP Sciences, pp. 231–253.
69. MVOTMA, 2017. Inventario Nacional de gases de efecto invernadero.
70. Ochoa, S.P., Noguera, R., 2014. Metanogénesis ruminal y estrategias para su mitigación. CES Medicina Veterinaria y Zootecnia 9, 307–323.
71. Ogle, S.M., Breidt, F.J., Paustian, K., 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry 72, 87–121.
72. Ogle, S.M., Conant, R.T., Paustian, K., 2004. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the intergovernmental panel on climate change. Environmental Management 33, 474–484.
73. Olmos, F., 1992. Aportes para el manejo de campo natural: efecto de la carga animal y el período de descanso en la producción y evolución de un campo natural de Caraguatá (Tacuarembó). INIA Serie Técnica.
74. OPYPA, 2019. Análisis Sectorial y Cadenas Productivas. Temas de Política. MGAP, Uruguay.
75. OPYPA, 2017. Análisis Sectorial y Cadenas Productivas. Temas de Política. MGAP, Uruguay.
76. Paruelo, J. M., Lezama, F., Altesor, A., & León, R. J. (2006). Heterogeneidad de la vegetación en pastizales naturales de la región basáltica de Uruguay. Ecología austral, 16(2), 167-182.

77. Paustian, K., Andren, O., Janzen, H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M., Woomer, P., 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO2 emissions. Soil use and management 13, 230–244.
78. Post, W.M., Peng, T.-H., Emanuel, W.R., King, A.W., Dale, V.H., DeAngelis, D.L., others, 1990. The global carbon cycle. American scientist 78, 310–326.
79. Russell, J.S., 1960. Soil fertility changes in long-term experimental plots at Kybybolite, South Australia. I. Changes in pH, total nitrogen, organic carbon and bulk density., Autralian~oumalofAgriculturalRereanh 11,902-926. ed.
80. Ruviaro, C.F., da Costa, J.S., Florindo, T.J., Rodrigues, W., de Medeiros, G.I.B., Vasconcelos, P.S., 2016. Economic and environmental feasibility of beef production in different feed management systems in the Pampa biome, southern Brazil. Ecological indicators 60, 930–939.
81. Ruviaro, C.F., de Léis, C.M., Lampert, V. do N., Barcellos, J.O.J., Dewes, H., 2015. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. Journal of Cleaner Production 96, 435–443.
82. Savian, J.V., Neto, A.B., de David, D.B., Bremm, C., Schons, R.M.T., Genro, T.C.M., do Amaral, G.A., Gere, J., McManus, C.M., Bayer, C., others, 2014. Grazing intensity and stocking methods on animal production and methane emission by grazing sheep: Implications for integrated crop–livestock system. Agriculture, ecosystems & environment 190, 112–119.
83. Schils, R.L., Olesen, J.E., del Prado, A., Soussana, J.-F., 2007. A review of farm level modelling approaches for mitigating greenhouse gas emissions from ruminant livestock systems. Livestock Science 112, 240–251.
84. Schlesinger, W.H., 1977. Carbon balance in terrestrial detritus. Annual review of ecology and systematics 8, 51–81.
85. Seré, C., Steinfeld, H., Groenewold, J., others, 1996. World livestock production systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
86. Shindell, D., Myhre, G., Boucher, O., Forster, P., Breon, F.-M., Fuglestvedt, J., 2013. Radiative Forcing in the AR5, in: Conference Proceeding in IPCC AR5 Working Group I. pp. 1–11.
87. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research 79, 7–31.
88. Smith, S., Renwick, W., Buddemeier, R., Crossland, C., 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. Global Biogeochemical Cycles 15, 697–707.
89. Soussana, J.-F., Tallec, T., Blanfort, V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. Animal: an international journal of animal bioscience 4, 334.
90. Steinfeld, H., Wassenaar, T., 2007. The role of livestock production in carbon and nitrogen cycles. Annu. Rev. Environ. Resour. 32, 271–294.
91. Thoma, G., Schmidt, D., Mitloehner, F., 2015. URL https://youtu.be/f9cwa9QD7gw
92. Tichenor, N.E., Peters, C.J., Norris, G.A., Thoma, G., Griffin, T.S., 2017. Life cycle environmental consequences of grass-fed and dairy beef production systems in the Northeastern United States. Journal of Cleaner Production 142, 1619–1628. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.138

93. UdelaR, 2008. Generalidades de la República Oriental del Uruguay [WWW Document]. Red Académica Uruguaya. URL https://www.rau.edu.uy/uruguay/generalidades/Uy.general.htm
94. URUGUAY XXI, 2019. Informe Mensual de Comercio Exterior.
95. UTE, 2008. CALCULO DEL FACTOR DE EMISIONES DE CO2 DEL SISTEMA ELÉCTRICO URUGUAYO, 9.
96. Van Nevel, C., Demeyer, D., 1995. 17 Feed additives and other interventions for decreasing methane emissions. Biotechnology in animal feeds and animal feeding 329.
97. Van Soest, P.J., 1995. Nutritional ecology of the ruminant. Cornell university press.
98. Vargas Romero, J.M., 2016. CALIDAD DE LOS FORRAJES PARA RUMIANTES. Entorno Ganadero 78 78.
99. Vlaming J., 2008. Quantifying variation in estimated methane emission from ruminants using the SF_6 tracer technique. Thesis Doctoral. Palmerston North, New Zealand, Massey University. 186 pp.
100. Waghorn, G., Woodward, S., 2006. 12 Ruminant Contributions to Methane and Global Warming—A New Zealand Perspective. Climate change and managed ecosystems 233.
101. Wolin, M., Miller, T., Stewart, C., 1997. Microbe-microbe interactions, in: The Rumen Microbial Ecosystem. Springer, pp. 467–491.
102. Zamagni, A., 2012. Life cycle sustainability assessment. Springer.