

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN NUTRICIÓN



**“HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE
BOVINA EN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CON ALFALFA
DORMANTE, REGIÓN PUNO”**

Presentada por:

ANNY GABRIELA LERMO VALLE

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO

MAGISTER SCIENTIAE EN NUTRICIÓN

Lima – Perú

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN NUTRICIÓN**

**“HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE
BOVINA EN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CON ALFALFA
DORMANTE, REGIÓN PUNO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ANNY GABRIELA LERMO VALLE

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg. Sc. Alejandrina Sotelo Méndez
PRESIDENTE

Mg. Sc. Víctor Hidalgo Lozano
ASESOR

Ph. D. Carlos Gómez Bravo
MIEMBRO

Ph. D. Víctor Guevara Carrasco
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres María Valle y Benito Lermo, por inculcarme valores que hoy
en día me hacen la persona que soy.

A mi hermana Elizabeth y sobrinos Valentina y Vicente, por alegrar mis
días.

A Luis Castro, por su amor, paciencia y motivación.

A mis tías y abuelita, al ser mis segundas madres.

A Luana, por su amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al programa CIENCIACTIVA CONCYTEC, Convenio de Gestión N° 183-2015 FONDECYT por la subvención de estudios de Maestría en Nutrición de la UNALM y colaboración en la investigación.

Al Ing. Mg. Sc. Víctor Hidalgo Lozano asesor de la presente tesis por la confianza, la paciencia y el apoyo.

Al Ph.D. Carlos Gómez Bravo por la guía y orientación al plantear la investigación.

A la plana de docentes del Programa de Nutrición, por brindarme conocimientos para mi desarrollo profesional y personal.

A los jefes de las Oficinas de Desarrollo Agropecuario de las Municipalidades de los distritos de Acora, Paucarcolla, Taraco, Pucará y Ayaviri, por su disposición a brindar facilidades para la investigación.

A los ganaderos de los distritos de Caritamaya-Acora, Moro-Paucarcolla, Taraco y Ayaviri por confiar en mi persona y por su apoyo valioso al brindar la información requerida.

A mis padres Benito y María por su apoyo incondicional.

A Luis Castro por ser mi soporte en momentos difíciles.

A mi alma mater la Universidad Nacional Agraria la Molina.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1	GANADERÍA LECHERA EN PUNO.....	3
2.2	CAMBIO CLIMÁTICO A TRAVÉS DE LA GANADERÍA.....	4
2.2.1	Emisiones de los GEI en el Perú.....	7
2.3	PRODUCCIÓN DE LECHE EN UN SISTEMA CON ALFALFA DORMANTE.....	8
2.3.1	Caracterización de sistemas de producción con alfalfa dormante en Puno.....	9
2.4	HUELLA DE CARBONO.....	12
2.4.1	Generalidades.....	12
2.4.2	Análisis de ciclo de vida.....	12
2.5	HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS.....	13
2.6	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR GANADERO	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1	LOCALIZACIÓN.....	20
3.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	21
3.3	HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE.....	23
3.4	DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA CUANTIFICAR LOS GEI.....	25
3.4.1	Inventario del ciclo de vida.....	26
3.5	CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	30
3.5.1	Emisiones de metano por fermentación entérica.....	30
3.5.2	Emisiones de metano por manejo de estiércol.....	31
3.5.3	Emisiones de óxido nitroso por manejo de estiércol	32
3.5.4	Emisiones de óxido nitroso indirectas por manejo de estiércol.....	33
3.5.5	Emisiones por producción de forrajes y concentrado.....	34
3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	35
3.6.1	Correlación.....	35
3.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	35
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36

4.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS HATOS LECHEROS EN LA REGIÓN PUNO.....	36
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	37
4.3	HUELLA DE CARBONO.....	39
4.3.1	Ingesta de alimento ajustada.....	39
4.3.2	Emisiones de GEI en los diferentes procesos.....	42
4.3.3	Huella de carbono de acuerdo a la unidad funcional.....	46
4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	49
4.4.1	Correlación.....	49
4.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	50
V.	CONCLUSIONES.....	52
VI.	RECOMENDACIONES.....	53
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
VIII.	ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Porcentaje de uso de diferentes insumos alimenticios.....	10
Cuadro 2: Resumen de las características de las explotaciones y de sus ACV de estudios realizados anteriormente en 3 países diferentes.....	15
Cuadro 3: Resumen de las características de las explotaciones y de sus ACV de estudios realizados recientemente en 3 países diferentes.....	17
Cuadro 4: Características generales de las granjas lecheras en Puno.....	37
Cuadro 5: Suministro de forraje según la estación de las granjas lecheras en Puno.....	37
Cuadro 6: Valores medios, máximos y mínimos de las principales variables de los distritos analizados.....	38
Cuadro 7: Ingesta de forrajes después del ajuste por requerimientos de EN.....	40
Cuadro 8: Ingesta de alimento total después del ajuste por requerimientos de EN.....	40
Cuadro 9: Resumen de los valores medios, máximos y mínimos sobre la alimentación ajustada de los hatos lecheros estudiados.....	41
Cuadro 10: Emisiones de los procesos en los distritos de la región Puno, sistemas con alfalfa dormante. PCG: CH ₄ =28, N ₂ O=265 de acuerdo al IPCC (2013).....	43
Cuadro 11: Impacto ambiental por kg LCGP de las emisiones. Asignación de co-productos de 96% de leche: 4% de carne.....	47
Cuadro 12: Coeficiente de correlación de Pearson y significancia para variables de interés del estudio.....	50
Cuadro 13: Resumen de los escenarios posibles sobre el aumento de inclusión de alfalfa dormante en la dieta para el distrito de Ayaviri, región Puno.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones de dióxido de carbono y metano, cuando aumentan (izquierda), cuando permanecen constante (centro) y cuando disminuyen (derecha).....	6
Figura 2: Emisiones totales de GEI en el Perú, Gg CO ₂ eq.....	7
Figura 3: Departamento de Puno y provincias.....	20
Figura 4: Descripción del modelo a estudiar.....	26
Figura 5: Proporción de las emisiones provenientes de los procesos en los distritos de la región Puno, sistemas con alfalfa dormante.....	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Información recolectada sobre la estructura del hato lechero.....	62
Anexos 2: Pesos de los animales en estudio, pesaje con cinta bovinométrica.....	62
Anexo 3: Cuadro resumen para obtener leche corregida por grasa y proteína.....	63
Anexo 4: Fórmulas para calcular los requerimientos de EN de una vaca.....	63
Anexo 5: Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Ayaviri en estudio.....	64
Anexo 6: Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Taraco en estudio.....	65
Anexo 7: Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Paucarcolla en estudio.....	65
Anexo 8: Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Acora en estudio.....	65
Anexo 9: Composición química y energía digestible de las dietas del ganado lechero en estudio por distrito.....	66
Anexo 10: Ecuaciones necesarias para estimar GEI por manejo de estiércol.....	67
Anexo 11: Encuesta hecha a los ganaderos basada en el cuestionario de Van (2014)...	69
Anexo 12: Emisiones de GEI por fermentación entérica y por gestión de estiércol del ganado lechero en estudio por distrito.....	72
Anexo 13: Emisiones de GEI por producción de forrajes del ganado lechero en estudio por distrito.....	73
Anexo 14. Emisiones de GEI por la compra de concentrado del ganado lechero en estudio por distrito.....	74
Anexo 15: Análisis de sensibilidad para el distrito de Ayaviri.....	75

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para convertir la producción de leche en kg de leche corregida en grasas y proteínas (FPCM).....	24
Ecuación 2. Relación de ingesta de forraje Xi.....	27
Ecuación 3: Energía neta total de forrajes (MJ/día) en la ración de acuerdo a su proporción.....	28
Ecuación 4: Ingesta total en kg de MS de forrajes para cumplir con las necesidades de EN.....	28
Ecuación 5: Energía digerible total de los alimentos (Mcal/día) en la ración de acuerdo a su proporción.....	29
Ecuación 6: Estimación de energía digestible de los alimentos (NRC 2001).....	29
Ecuación 7: Estimación de Nutrientes Digestibles Totales (NRC 1989).....	30
Ecuación 8: Estimación de energía bruta de los alimentos.....	30
Ecuación 9: Factores de emisión de CH ₄ por fermentación entérica.....	30
Ecuación 10: Factor de emisión de CH ₄ de la gestión de estiércol.....	31
Ecuación 11: Emisiones directas de N ₂ O de la gestión de estiércol.....	32
Ecuación 12: Emisiones indirectas de N ₂ O debidas a la volatilización de N de la gestión del estiércol.....	33
Ecuación 13: Emisiones indirectas de N ₂ O debidas a la lixiviación de N de la gestión del estiércol.....	34
Ecuación 10-1. Tasa de ingesta de N para vacunos.....	67
Ecuación 10-2. Tasa de excreción anual de N.....	67
Ecuación 10-3. Tasa de retención anual de N.....	67
Ecuación 10-4. Pérdidas de N debidas a la volatilización de la gestión del estiércol....	68
Ecuación 10-5. Pérdidas de N debidas a la lixiviación de la gestión del estiércol.....	68

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

HC	Huella de carbono
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
IDF	Federación Internacional de Lechería
LCGP	Leche corregida con grasa y proteína
PCG	Potencial de calentamiento global
GEI	Gases de efecto invernadero
FE	Fermentación entérica

RESUMEN

La producción animal ha recibido una mayor atención debido a las importantes contribuciones a los problemas ambientales global. La huella de carbono es un indicador de alta relevancia para estimar el impacto de un producto al cambio climático. La introducción de alfalfa dormante en zonas altas, ha incrementado la producción de leche por su valor nutricional. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo determinar la HC de la producción de leche bovina en un sistema con alfalfa dormante en la región Puno. Este estudio se desarrolla siguiendo las pautas de la IDF y la Norma Internacional ISO 14040 y 14044, se calculó en kg de equivalentes de CO₂ por kg de leche corregida con grasa y proteína (LCGP) como unidad funcional. El trabajo de investigación exploratorio y descriptivo se llevó a cabo en el departamento de Puno con 16 ganaderos, pertenecientes a los distritos de Ácora, Paucarcolla, Taraco y Ayaviri. La producción anual de leche por vaca fue de 3366.27 ± 976.22 kg LCGP (CV=29%), consumo de alfalfa dormante 1.59 ± 0.4 kg MS/vaca/día (CV=27.9%) y la HC promedio para la base de datos analizada 1.03 ± 0.14 kg CO₂-eq/ LCGP (CV=13.7%). Ayaviri presento una HC de 0.92 kg CO₂-eq/ LCGP y la mayor producción de leche (11.34 kg LCGP/vaca/día) con un $r = -0,580$ $p < 0.05$. El mayor impacto de los sistemas extensivos en el medio ambiente es debido a la fermentación entérica del ganado ($78.2 \pm 3.7\%$) (97.64 ± 8.7 kg CH₄/vaca/año). Puno se caracterizó por tener una dieta basada en forrajes (+90%), de un bajo valor nutricional (ED, 2430.97 ± 26.98 Kcal). Se sugiere mejorar la calidad de la dieta, en consecuencia, la productividad del animal, siendo posible reducir la huella de carbono de leche y al mismo tiempo mejorar los ingresos económicos del ganadero.

Palabras claves: huella de carbono, GEI, alfalfa dormante, ACV, LCGP, producción de leche, Puno.

ABSTRACT

Animal production has received increased attention due to important contributions to global environmental problems. The carbon footprint is a highly relevant indicator to estimate the impact of a product on climate change. The introduction of dormant alfalfa in high areas has increased milk production due to its nutritional value. Therefore, the present investigation aims to determine the HC of bovine milk production in a system with dormant alfalfa in the Puno region. This study is developed following the guidelines of the IDF and the International Standard ISO 14040 and 14044, it was calculated in kg of CO₂ equivalents per-kg of milk corrected with fat and protein (LCGP) as a functional unit. The exploratory and descriptive research work was carried out in the department of Puno with 16 livestock ranchers, belonging to the districts of Ácora, Paucarcolla, Taraco and Ayaviri. Annual milk production per cow was 3366.27 ± 976.22 kg LCGP (CV = 29%), dormant alfalfa consumption 1.59 ± 0.4 kg DM/cow/day (CV = 27.9%) and the average HC for the analyzed database 1.03 ± 0.14 kg CO₂-eq/LCGP (CV = 13.7%). Ayaviri presented a HC of 0.92 kg CO₂-eq/LCGP and the highest milk production (11.34 kg LCGP /cow/day) with a $r = -0.580$ $p < 0.05$. The greatest impact of extensive systems on the environment is due to enteric fermentation of livestock ($78.2 \pm 3.7\%$) (97.64 ± 8.7 kg CH₄/cow/year). Puno was characterized by having a diet based on forages (+ 90%), with a low nutritional value (ED, 2430.97 ± 26.98 Kcal). It is suggested to improve the quality of the diet, consequently, the productivity of the animal, being possible to reduce the carbon footprint of milk and at the same time improve the economic income of the farmer.

Keywords: carbon footprint, GHG, dormant alfalfa, LCA, LCGP, milk production, Puno.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, la producción animal ha recibido una mayor atención debido a las importantes contribuciones a los problemas ambientales globales (Steinfeld *et al.* 2006). La degradación de la tierra, la contaminación del agua, las pérdidas de biodiversidad, las pérdidas de los recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son algunos de los problemas ambientales que preocupan, al contribuir significativamente con el cambio climático ya sea directamente (fermentación entérica o el estiércol) o indirectamente (actividades desarrolladas durante la producción de piensos y la conversión de bosques en pastizales). Las emisiones de GEI del sector ganadero a nivel global ocurren bajo las formas de metano 44%, óxido nitroso 29% y dióxido de carbono 27% (Haro y Gómez 2018). El ganado vacuno es el principal generador de emisiones del sector con alrededor de 4,6 gigatoneladas de CO₂-eq, que representan el 65% de las emisiones provenientes de las actividades pecuarias (Gerber *et al.* 2013). Al respecto, la producción lechera está asociada con impactos ambientales tales como la acidificación, la eutrofización de suelos y el calentamiento global causado por la emisión de gases de efecto invernadero (De Vries y Boer 2010).

En la región de Puno, la ganadería es una de las actividades que ha jugado un rol importante en las diversas estrategias de supervivencia de la población en el área rural, siendo esta su principal actividad económica, los mayores productores de leche y de sus productos derivados, son las provincias de Melgar, Azángaro, Huancané y Puno, permitiendo tener potencial para un desarrollo sostenible (Paredes y Escobar-Mamani 2018). Por ello, Cáritas del Perú y la red de Cáritas Diocesanas en el 2011 desarrollaron proyectos potenciando los recursos locales para mejorar los ingresos y disminuir las condiciones de pobreza de esta parte del país. Uno de los proyectos fue la introducción de la alfalfa dormante W350 (Dormancia 3.8), siendo ideal para áreas de secano ubicadas entre los 2600 y 4200 m.s.n.m. (AGROBANCO 2012). Actualmente, Puno es considerado como la principal cuenca lechera emergente del país, contando con 67,000 productores que ordeñan 100,000 vacas con una producción anual de 99,000 toneladas de leche (DRA-Puno 2018).

Para la sostenibilidad de esta actividad ganadera, este proyecto del cultivo no solo pudo cumplir un objetivo socioeconómico sino también ambiental, porque además la introducción de leguminosas en praderas de gramíneas puede ofrecer una estrategia de mitigación de GEI. Por otro lado, a pesar de que existe una mayor cantidad de investigaciones de los factores que tienen el mayor impacto ambiental en los sistemas agrícolas, aún es necesario investigar de manera más precisa y cuantificada el impacto ambiental de los todos sistemas que se dan en nuestro país, en específico en este reciente sistema agropecuario.

Una de las herramientas para calcular la carga ambiental de un producto es a través de la Huella de Carbono (HC) que es una evaluación específica del ciclo de vida (ACV) relacionada con el cambio climático, que cuantifica las emisiones de los gases de efecto invernadero. La evaluación del ciclo de vida (LCA) es un método desarrollado para evaluar los aspectos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto y proporciona una visión generalizada de las cargas ambientales asociadas con un producto o actividad humana (ISO 2006b). Por lo que, esta herramienta permitirá cuantificar, identificar y reducir el impacto ambiental total de los productos y sistemas de producción (Van 2014).

Por lo tanto, se necesita proponer estrategias que contribuyan con la reducción de diferentes impactos ambientales sin afectar aspectos productivos, sin embargo, para ello es necesario tener información cuantificada de dichos impactos. Al respecto, si bien se han estudiado sistemas productivos lecheros de la costa y sierra peruana, la alimentación de las vacas en los sistemas extensivos consistió principalmente en pastos permanentes, no existiendo información sobre la carga ambiental de los sistemas altoandinos donde se ha introducido la leguminosa, alfalfa dormante.

En base a lo expuesto, la presente investigación tiene como objetivo determinar la huella de carbono de la producción de leche bovina en un sistema de alimentación con alfalfa dormante mediante un análisis de ciclo de vida en los distritos de Ácora y Paucarcolla en la provincia de Puno, Taraco en Huancané y Ayaviri en Melgar, de la región Puno.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GANADERÍA LECHERA EN PUNO

De acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario del año 2012 (INEI 2012), la población de ganado bovino totalizó 5,2 millones de cabezas, de las cuales 2,0 millones corresponden a vacas, que representan un 39,8% del total de la población bovina. El IV CENAGRO en el 2012 también reportó que, las unidades agropecuarias con ganado vacuno ascienden a 881 mil 920, donde el 85,9% es representado por los pequeños productores, contando con el 50,6% del total de vacas en ordeño, abarcando el 39,4% de la producción total de leche.

La productividad de leche fresca de vaca ha mostrado una tasa de crecimiento del 2006 al 2015 de 1.8%, siendo la mayor comparándolo con otros productos pecuarios (MINAGRI 2017). Asimismo, MINAGRI en el 2018 comunicó que la producción nacional de leche ha presentado un incremento sostenido desde el año 2016 con 1'959,229 toneladas, en la cual intervinieron aproximadamente 500,000 familias, con 893,769 vacas en ordeño.

Según las estadísticas del INEI (2015), Puno es la quinta región más poblada del Perú, que se localiza en el altiplano peruano entre 3,800 y 4,500 metros de altitud sobre el nivel del mar, abarca una superficie total de 7'238,244 hectáreas (incluido el 6.9% de la superficie de Lago Titicaca, lado peruano) que representa el 5.63% de la superficie del país. En la región de Puno, la ganadería es una de las actividades que ha jugado un rol importante en las diversas estrategias de supervivencia de la población en el área rural, siendo su principal actividad económica. En las provincias de Melgar, Azángaro, Huancané y Puno, se encuentran los mayores productores de leche y de sus productos derivados, permitiendo tener potencial para un desarrollo sostenible (Paredes y Escobar-Mamani 2018).

Según el IV Censo Nacional Agropecuario del año 2012 (SEIA 2018), la población de ganado bovino es de 617 mil 163 cabezas, de los cuales 286 mil 231 cabezas corresponden a vacas representando el 46,4% de la población bovina de Puno. Por otro lado, reportó que las unidades agropecuarias del departamento de Puno son de 215 mil 170 unidades,

de las cuales el 60% corresponden a ganado vacuno y el 50 % en lo que respecta a vacas, dentro de las cuales el 62% son unidades agropecuarias que producen leche. Asimismo, el 89,4% de las unidades agropecuarias con ganado vacuno corresponden a los pequeños productores, un poco más del 10% a los medianos productores y en un menor porcentaje (0.22%) a los grandes productores.

En el 2016, Pablo Quijandría, viceministro de Políticas Agrarias del MINAGRI, señaló que se está dando un cambio importante en los productores de leche del interior del país, especialmente de Puno y Cusco, debido que, existen regiones donde se registra una gran expansión de las áreas sembradas con alfalfa dormante, lo que está acompañado por la reconversión de sectores tradicionalmente agrícolas en ganaderos (Ramos 2016).

La DRA de Puno (2018) indica que Puno es considerado como la principal cuenca lechera emergente del país, contando con 67,000 productores que ordeñan 100,000 vacas con una producción anual de 99,000 toneladas de leche.

2.2 CAMBIO CLIMÁTICO A TRAVÉS DE LA GANADERÍA

Para Agrónomos y Veterinarios Sin Fronteras (2010) el cambio climático global es un fenómeno ampliamente reconocido por la comunidad científica, donde es atribuible principalmente al hombre, entre otras causas por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Gerber *et al.* (2013) indicaron que el sector ganadero mundial contribuye con una parte importante de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) antropógenas, con emisiones estimadas en 7,1 gigatoneladas (GT) de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) por año, que representan el 14,5% de las emisiones de GEI inducidas por el ser humano, incidiendo de manera importante en el cambio climático, pero que también puede colaborar de manera importante con los esfuerzos de mitigación necesarios. Según Steinfeld *et al.* (2006), las principales fuentes de gas de efecto invernadero asociadas con la ganadería son las siguientes: cambios en el uso de los suelos (36%), gestión del estiércol (31%), producción animal (25%), producción de alimentos (7%). Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. El dióxido de carbono procede de la combustión de energía fósil para la producción de alimentos, fabricación de máquinas, fertilizantes, plásticos utilizados para el ensilado, etc. El metano se produce fisiológicamente durante la fermentación de los alimentos en el rumen. El óxido nitroso se genera por el manejo del estiércol, la

fertilización química y los procesos de nitrificación y desnitrificación del suelo. El potencial de calentamiento global es diferente entre ellos y está en constante actualización, actualmente el metano tiene un potencial 28 veces mayor que el dióxido de carbono y el del óxido nitroso 265 veces más que el CO₂ (IPCC 2013).

El ganado vacuno es el principal generador de emisiones del sector con alrededor de 4,6 gigatoneladas de CO₂-eq, que representan el 65% de las emisiones provenientes de las actividades pecuarias. La producción de carne de vacuno contribuye con 2,9 gigatoneladas o el 41% del total de las emisiones del sector, mientras que las emisiones provenientes de la producción de leche ascienden a 1,4 gigatoneladas o el 20% del total de las emisiones del sector. Las fuentes principales de emisión de estos rumiantes son la fermentación entérica y la producción de piensos, cabe resaltar que, en regiones con baja productividad, la fermentación entérica es la fuente principal de emisiones, un mayor rendimiento lechero supone un cambio en el metabolismo de las vacas a favor de la leche y la reproducción (Gerber *et al.* 2013).

En consecuencia, Thornton y Gerber (2010) reportan varios impactos directos e indirectos que el cambio climático tendrá sobre los sistemas de producción ganadera al pastoreo. Entre los impactos directos se mencionan a las sequías e inundaciones, los eventos climáticos extremos, las pérdidas de productividad debido al aumento de la temperatura y la disminución en la disponibilidad de agua. Entre los impactos indirectos mencionan a la disminución de la cantidad y calidad de forraje, la aparición de epidemias y los cambios en la interacción huésped-patógeno. Los cambios de temperatura, régimen de lluvias y niveles de CO₂ afectarán a la productividad de pastizales y la composición y dinámica de las especies, lo que resulta en cambios en la dieta de los animales y posiblemente, una menor disponibilidad de nutrientes para los animales (McKeon *et al.* 2009). Por ejemplo, la alta presión de la ganadería origina fundamentalmente erosión por el sobrepastoreo y su desarrollo en terrenos no aptos; la compactación que se genera en el suelo se relaciona directamente con la pérdida de la estructura y la disminución en la capacidad de retención de humedad; éstos, entre otros factores, ocasionan un bajo rendimiento en la producción de forrajes (Mahecha 2002).

En contraste, Del Prado y Manzano (2020), indican que al medir las estimaciones de GEI frente la medición del impacto climático de la ganadería se debe tener en consideración las limitaciones de las metodologías actuales. Por lo que, recomiendan implementar

sistemas que contabilicen adecuadamente las emisiones derivadas de la actividad ganadera y sus diferentes impactos a nivel climático: tanto los negativos que ahora no se contabilizan (no incluidos en inventarios nacionales), como positivos (fijación de carbono en tierras de pastos o efecto positivo en el albedo) o neutros (el metano biogénico que no se acumula en la atmósfera o las emisiones naturales de la ganadería).

Asimismo, Mitloehner dice que si bien el metano es uno de varios gases responsables de acumularse sobre la Tierra y crear lo que se conoce como efecto invernadero, no todos los GEI se generan por igual, si se los mira individualmente, descubrimos que no todos se comportan o se calientan de la misma manera, a pesar de que se ha cuantificado como si lo hicieran. El metano fósil, es el gas que proviene de los combustibles fósiles de la corteza terrestre, es un metano nuevo, mientras que el metano biogénico (proveniente de los rumiantes) es un gas de flujo hecho de carbono atmosférico que ha estado circulando por la atmósfera desde que comenzó la vida, es un metano reciclado, después de aproximadamente 12 años, el metano se convierte nuevamente en dióxido de carbono a través de la oxidación de hidroxilo, una reacción química en la atmósfera. Por lo que, mantener constantes las emisiones de metano de la agricultura y producción animal a lo largo del tiempo pone a la agricultura y la producción animal en el camino hacia la neutralidad climática y la reducción de estos hacia un enfriamiento global (CLEAR CENTER 2020).

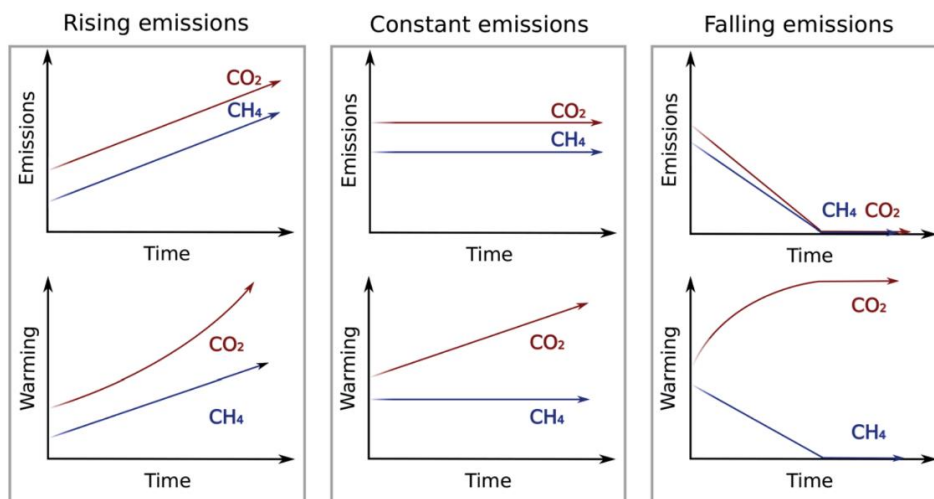


Figura 1: Emisiones de dióxido de carbono y metano, cuando aumentan (izquierda), cuando permanecen constante (centro) y cuando disminuyen (derecha)

Fuente: CLEAR CENTER (2020)

Cuando aumenta, el CO₂ se produce a un ritmo mucho más rápido porque se suman a las emisiones ya existentes (aumento exponencial del calentamiento); mientras que cuando aumenta el CH₄, el calentamiento sigue de forma lineal, porque lo hace a la tasa de emisión, ya que el metano de antaño se ha ido haciendo mucho tiempo, habiendo sido reciclado, el calentamiento proviene del nuevo CH₄ incremental en el aire. Cuando se mantienen constantes, el calentamiento del CH₄ es neutral, debido que, se destruye al mismo ritmo que se emite, mientras que el calentamiento del CO₂ continúa aumentando, porque se agrega a la atmósfera sin que el CO₂ anterior sea secuestrado o destruido. Cuando disminuyen, el CH₄ crea inmediatamente un efecto refrescante, mientras que el CO₂ sigue aumentando, aunque sea en una cantidad menor (CLEAR CENTER 2020).

2.2.1 Emisiones de GEI en el Perú

Según el último Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, del año 2016, preparado por el Ministerio del Ambiente MINAM, el total de emisiones/absorciones de GEI fue de 205,294.17 Gg de CO₂ equivalente (Gg CO_{2eq}), donde la fuente principal fue el sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra representando un 65.71% del INGEI. Dentro de este sector la principal fuente de emisión es la subcategoría Tierras de cultivo con 51,450.82 Gg CO_{2eq}, asimismo, la subcategoría Agricultura emite un 12.62% con 25,910.29 Gg CO_{2eq}. La contribución de las emisiones de GEI de las diferentes categorías se muestra en la Figura 2.

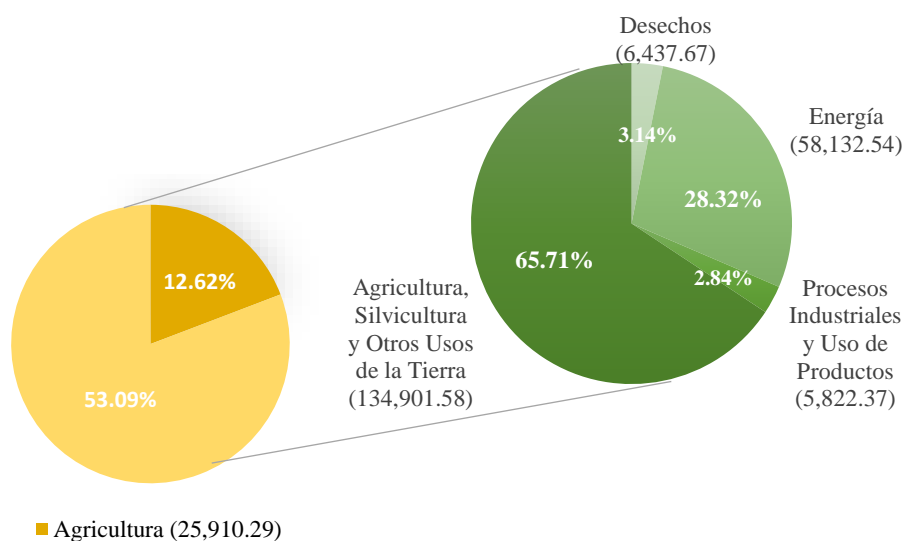


Figura 2: Emisiones totales de GEI en el Perú, Gg CO_{2eq}

Fuente: Inforcarbono-MINAM (2016)

Dentro de la subcategoría Agricultura, la subcategoría sectorial Ganado emite 12,084.69 Gg CO₂.eq, donde la fermentación entérica emite 11,462.85 Gg CO₂.eq. El manejo de estiércol emite 621.84 Gg CO₂.eq.

2.3 PRODUCCIÓN DE LECHE EN UN SISTEMA CON ALFALFA DORMANTE

Según Torres (2011), las alfalfas dormantes pueden cultivarse en secano con un régimen de lluvias que alcance de 300 mm a 1,200 mm por año y que por su fisiología resisten temperaturas menores de cero grados y sequías prolongadas. Argote (2004), menciona que la alfalfa es una especie que se adapta a una gran diversidad de climas, en nuestro país se adapta muy bien a la sierra bajo condiciones de riego desde 3000 hasta 4400 m.s.n.m. Durante los meses fríos del invierno la alfalfa detiene su crecimiento, hasta que se inicie la elevación de las temperaturas propias de la primavera empieza la planta a rebrotar (Del Pozo 1983). Las temperaturas altas afectarán las reservas y acumulación de energía que el cultivo de alfalfa requiere para el rebrote, crecimiento y desarrollo (Malpartida 2000).

El pH ideal de la alfalfa dormante es de 5.5 a 6.8 (AGROBANCO 2012). Choque (2002), menciona que el factor limitante en el cultivo de la alfalfa es la acidez, excepto a la germinación, pudiendo ser de hasta 4. Por otro lado, la alfalfa es sensible a la salinidad en algunos casos, cuyos síntomas comienzan con la palidez de algunos tejidos, la disminución del tamaño de las hojas y finalmente la parada vegetativa con el consiguiente achaparrado (INFOAGRO 2004).

El periodo de permanencia en el terreno una vez instalada y con un manejo adecuado es de entre 15 a 20 años (AGROBANCO 2012). La alfalfa dormante permite proteger los suelos de la erosión y a su vez contribuye a la liberación de oxígeno. También, al ser fijadores de nitrógeno, el cultivo de la alfalfa enriquece los suelos durante su período de vida, lo cual facilita un cambio de cultivo sin la necesidad de fertilizantes químicos (Cheng 2017).

La introducción de las alfalfas dormantes al Perú fue realizada por el Ministerio de Alimentación en el año 1976 hasta 1980 con la cooperación de la misión de Nueva Zelanda, sin embargo, no se continuo el trabajo hasta que fue retomada por Cáritas del Perú en 1992 (Torres 2011). Cáritas del Perú y la red de Cáritas Diocesanas ubicadas en

zonas altoandinas, desarrollaron estos proyectos potenciando los recursos locales para mejorar los ingresos y disminuir las condiciones de pobreza de esta parte del país (AGROBANCO 2012). El representante de la Gerencia de Proyectos de Desarrollo Productivo de Cáritas del Perú, Edison Ramos, indicó que más de 90,000 hectáreas se han instalaron en regiones altoandinas como Puno, Cusco, Ayacucho, Huancavelica, Ancash, Pasco y Amazonas (León 2017).

Torres (2011) calcula que en el Altiplano de Puno, se han instalado 52,000 Ha de alfalfa, de las cuales alrededor de 24,220 Ha provienen de las tres Cáritas Diocesanas de Puno, Juli y Ayaviri con el financiamiento de Fondoempleo y la contraparte de los campesinos y los Municipios en los nueve años anteriores a la fecha, otras 12,000 Ha a través de proyectos financiados por otras organizaciones como Foncodes, Fondo Italo Peruano, Caritas Suiza, Caritas Francia, Conacs y recursos propios de Cáritas del Perú y la diferencia fue instalado por algunas ONGs y productores.

Cáritas del Perú reportó según una investigación que las alfalfas dormantes tienen un excelente comportamiento en las zonas altas y que contribuyen con el desarrollo de la ganadería, especialmente del ganado lechero, incrementando su producción de leche, generando mayores ingresos para los más necesitados (Silva 2014). La producción de leche de una vaca criolla que produce 3 litros/día, cuando se alimenta con alfalfa dormante se ha comprobado que incrementa su producción entre 3 a 5 litros/vaca/día. Asimismo, también se ha comprobado que el periodo de lactancia se amplía de 150 a 220 días, incrementando los ingresos en un 65 % (AGROBANCO 2012).

2.3.1 Caracterización agropecuaria de un sistema con alfalfa dormante en Puno

La actividad agropecuaria es la base fundamental de la economía de la Región de Puno, donde el ganado es visto como una fuente de alimento que provee proteína para dietas humanas, ingresos, empleo, generación de divisas, generación abono orgánico para los cultivos, y transporte. Según el Censo Agropecuario 2012, del ganado vacuno en la región Puno, el 63.47% es de raza criollo, el 34.07% de raza Brown Swiss, y menos del 3% son de raza Cebú, Holstein y otras razas provenientes de cruces entre ganado criollo y razas mejoradas.

Según la Dirección regional de agricultura en Puno, los pastos naturales con aptitud pecuaria corresponden el 52,12% de la superficie total de la región de Puno, mientras que los pastos cultivados casi un 5 %. Dentro de las variedades forrajeras que conforman la pastura natural se tienen diversas gramíneas como la *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu*, *Muhlenbergia fastigiata* junto con otras familias botánicas que permiten una oferta variable dependiendo de la etapa de desarrollo (Olarate y Olarte 2013). Por su parte, Torres (2011) reporta que de las 4'000,000 de Ha de pasturas naturales que posee el Altiplano de Puno un 30% son tierras aptas para recibir alfalfares dormantes en secano. Una parcela de 4 Ha de pastos naturales alimenta a una sola vaca, con 3 litros de leche durante 150 días de lactación, mientras que una parcela de 4 Ha de alfalfa dormante soporta 16 vacas, con 6 litros de leche durante 220 días de lactación, obteniendo ingresos mayores (AGROBANCO 2012).

La alimentación de los vacunos de leche en Puno se realiza en base a forrajes, que en su mayoría se cultivan en secano, como avena forrajera, alfalfa dormante y cebada. Asimismo, el pasto natural es el predominante en la zona y son precisamente las áreas con pasto natural las más empleadas durante la temporada de estiaje, ocasionando bajas producciones de leche si la dieta no es equilibrada con fuentes proteicas como la alfalfa y energéticas como avena en cantidades adecuadas. En cuanto a los productores progresistas incluyen además la inclusión de granos y pastos conservados como henos y ensilajes (Rivera 2016).

Cuadro 1: Porcentaje de uso de diferentes insumos alimenticios

Insumos alimenticios	Porcentaje de uso
Alfalfa dormante	100,0
Avena forrajera (al corte fresco o heno)	100,0
Cebada forrajera (al corte fresco o heno)	37,5
Pasto natural (pastorea)	75,0
Usa concentrado (en época seca o lluviosa)	50,0
No usa concentrado (en época seca o lluviosa)	50,0
Heno de alfalfa (en época seca)	62,5
Silaje de avena (en época seca)	33,3

Fuente: Rivera (2016)

Rivera (2016), reporta que la ganadería lechera es una actividad económica que es exclusivamente realizada por el núcleo familiar, los hijos y/o abuelos para el caso de los pequeños y la mayoría de medianos productores, encargándose de acompañar a los animales a los potreros en los que el ganado pastorea. Por ello, el 62,5% de los ganaderos emplea mano de obra familiar y el 37,5% restante cuenta con mano de obra local, diferente a la familiar.

Por otro lado, Rivera (2016) reporta que la mayoría de los ganaderos cría su ganado bajo un sistema semi intensivo, que involucra pastoreo durante el día y lo resguarda en sus corrales o cobertizos para la suplementación con concentrados, mientras muy pocos crían de forma estabulada, 62.5% y 4.17% respectivamente. El porcentaje restante alterna su ganado de forma exclusiva, al pastoreo durante la época seca y estabulado durante la época lluviosa.

En el mismo estudio, se clasificó a los ganaderos de acuerdo a su tamaño de producción, donde los pequeños ganaderos producen un promedio de 7,98 litros/vaca/día, considerándolo pequeño al tener 12 vacunos por productor, asimismo, los medianos productores con un número promedio de 39 vacunos por productor, tienen una producción en promedio de 9,87 litros/vaca/día, mientras que los grandes productores con 59 vacunos en promedio producen 10,20 litros/vaca/día (Rivera 2016).

En relación con la técnica reproductiva que emplean, se identificó que un 58,33% emplea de forma exclusiva la inseminación artificial en sus vacas; mientras que un 12,5% emplea la monta natural y un 29,17% de los ganaderos emplea como principal método reproductivo en sus hatos la inseminación artificial y el uso de reproductores locales (Rivera 2016).

En cuanto a la mecanización del campo, CENAGRO (2012) indica que esta ha aumentado, a través del uso de tractores para la actividad agrícola en un 22,70 por ciento de productores. De igual manera, Rivera (2016) informa que en el sector ganadero en Puno ha incrementado su mecanización, lo cual se ve reflejado en que la mayoría de los ganaderos paga por las horas de servicio de tractores agrícolas que preparan la tierra para sembrar alfalfa, avena o cebada.

2.4 HUELLA DE CARBONO

2.4.1. Generalidades

La huella de carbono del producto es la suma de los gases de efecto invernadero emitidos a lo largo del ciclo de vida de un producto dentro de un conjunto de límites del sistema, en una aplicación específica y en relación con una cantidad definida de un producto específico (IDF 2015). Según la EOI (2016), es un análisis de las contribuciones a la categoría de impacto de Calentamiento Global a lo largo del ciclo de vida de un producto, siendo un análisis de ciclo de vida simplificado, puesto que sólo se considera una categoría de impacto de todas las posibles.

La huella del carbono expresada en CO₂ equivalente es básicamente lo mismo que el indicador potencial de calentamiento global (PCG) usado en la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), donde varios GEI son expresados en una unidad común, CO₂ equivalente. El PCG representa la capacidad de absorción de calor de un gas individual (CH₄, N₂O, CO₂) con relación al CO₂ sobre un tiempo de referencia de 100 años (Fong *et al.* 2020).

2.4.2. Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo (EOI 2016). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos (IHOBE S.A 2009). Los ACV se utilizaron originalmente para estimar cadenas de procesos industriales, pero se han adaptado durante los últimos 20 años para evaluar los impactos ambientales de la agricultura, incluida la producción láctea (IDF 2015).

Un ACV se calcula utilizando una unidad funcional (UF). "Esta unidad funcional define lo que se está estudiando. Todos los análisis posteriores deben expresarse en relación con esa unidad funcional " (ISO 2006). En la mayoría de los ACV de productos agrícolas, la UF se ha definido como la masa del producto que sale de la granja, por ejemplo, kg de leche corregida con grasa y proteína (Cederberg y Mattsson 2000).

Cuando se calcula el ACV de un sistema de producción de leche, se pueden incluir categorías de impacto ambiental como la acidificación, eutrofización, calentamiento global, toxicidad y uso de recursos (De Boer 2003).

Etapas del análisis del Ciclo de Vida

Según la Sociedad Pública de Gestión Ambiental (IHOBE S.A 2009), de acuerdo a la estandarización realizada, ISO 14.040 (ISO 2006a) y ISO 14.044 (ISO 2006b), se distinguen cuatro fases en un estudio de ACV:

Definición de Objetivos y Alcance: Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.

Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV): Es la fase del ACV en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV): Es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es trasladado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales.

Interpretación: Es la fase del ACV en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones. Asimismo, hacer recomendaciones para las limitaciones identificadas (Guinée *et al.* 2001).

2.5 HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS

El sector lácteo mundial ha estado a la vanguardia en la alineación de los cálculos de la huella de carbono. La mayoría de las industrias se enfrentan al desafío de cuantificar y reducir sus emisiones de GEI a la atmósfera. Tanto los procesadores de alimentos como las organizaciones agrícolas dentro de la industria láctea internacional han reconocido la

necesidad de calcular las emisiones de gases de efecto invernadero para los sistemas y productos de producción, es decir, la huella de carbono (IDF 2015).

En los sistemas agropecuarios, se debe cubrir el total de emisiones producidas durante el ciclo de vida del producto. En este análisis se calculan todas las emisiones de GEI tanto por los insumos que se utilizan (fertilizantes, concentrados, combustibles, electricidad) como por el propio proceso productivo. Inclusive, para productos ya manufacturados como puede ser el queso, se calculan también las emisiones por la industrialización, por el empaquetado y por el transporte antes de llegar a las manos del consumidor (Carbon Trust 2013).

Uno de los desafíos de la huella de carbono de la leche y los productos lácteos es que está dominada por la etapa agrícola, donde se producen tres cuartas partes o más de las emisiones de GEI. Por tal razón, es crucial considerar las variables en la producción de leche primaria que pueden afectar el resultado de la huella de carbono y desarrollar un enfoque común para distribuir la carga ambiental de la producción de leche cruda entre productos como la leche, la crema, el queso y la mantequilla, independientemente de la finca, el sistema, el país o incluso la región (IDF 2015).

En contraste a otros sectores, como energía y transporte, la huella de carbono de productos derivados de la agricultura no tiene como GEI principal el CO₂. Las emisiones de CO₂ provocadas por el ganado no se estiman porque se supone que las emisiones anuales netas de CO₂ equivalen a cero —el CO₂ de la fotosíntesis de los vegetales retorna a la atmósfera como CO₂ respirado. Los gases que producen el mayor aporte son el N₂O y el CH₄. Ello deriva de procesos biológicos complejos que aumentan la incertidumbre en los cálculos (Flysjö *et al.* 2011, IPCC 2019).

2.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR GANADERO

Hasta la fecha, gran parte de las investigaciones se han centrado en evaluar ACV de productos lácteos para identificar y proponer estrategias para reducir el impacto ambiental. Sin embargo, las metodologías utilizadas para estimar un ACV completo, o parcial como la huella de carbono de un producto requieren que los aspectos metodológicos estén estandarizados para posibilitar comparaciones entre sistema de producción y entre países en estudios de ACV. Los enfoques metodológicos que varían

según los estudios son: límite del sistema, unidad funcional, método de asignación, factores de emisión. Por lo tanto, no se recomienda realizar comparaciones numéricas entre diferentes estudios ambientales utilizando el método ACV. La calidad de un estudio de ACV depende de los datos disponibles y de las suposiciones que se hayan hecho. Por tanto, cualquier conclusión debe tomarse con cautela (Thomassen *et al.* 2008). A continuación, se muestra dos cuadros de información de diferentes trabajos realizados anteriormente que calculan la ACV por litro de leche, en sistemas lácteos intensivos y extensivos, pero utilizando diferentes criterios (Cuadro 2 y 3).

Cuadro 2: Resumen de las características de las explotaciones y de sus ACV de estudios realizados anteriormente en 3 países diferentes.

	Uruguay (Lizarralde 2013)	Perú (Bartl et al. 2011)		Australia (Gollnow et al. 2014)
Granja	Extensivo	Extensivo	Intensivo	Extensivo
Pastos	Si	si	no	Si
Forrajes	maíz, silaje de maíz	raígras, trebol	maíz	trebol, maíz silaje, pasto silaje
Concentrados	Si	no	Si	Si
Límite	px de alimentos a la puerta granja	cuna a la puerta granja		cuna a la puerta granja
Unidad funcional	kg LCGP	kg LCE		kg LCGP
Unidad emisión	kg CO ₂ -eq/ kg LCGP	kg CO ₂ -eq/ kg LCE, kg CO ₂ -eq/animal		kg CO ₂ -eq/ kg LCGP
Factor de caracterización PCG	kg CO ₂ -eq CH ₄ =72, kg CO ₂ -eq, N ₂ O=289, (IPCC 2007), 100 años de horizonte	kg CO ₂ -eq, CH ₄ =72, kg CO ₂ -eq, N ₂ O=289, (IPCC 2007), horizonte temporal de 20 años		kg CO ₂ -eq, CH ₄ =25, kg CO ₂ -eq, N ₂ O=289, (IPCC 2007), horizonte temporal de 100 años

ECM: leche corregida por energía (kg/día) = leche (kg/día) x [0.038 x grasa(g/kg) + 0.024 x proteína(g/kg) + 0.017 x lactosa (g/kg)]/3.14; LCGP: leche corregida por grasa y proteína (kg/año) = producción leche(kg/año) x (0,2534+0,116 x grasa(%) + 0,0776 x proteína (%)) (IDF 2015)

En el Cuadro 2, se observa que la comparación de los resultados entre los estudios no es recomendable debido a las diferencias en las UF, los límites del ACV y/o la caracterización del GWP. Por lo tanto, los estudios se analizan por separado.

El estudio de ACV realizado por Bartl *et al.* (2011) desde la cuna hasta la puerta de la granja evaluó el impacto ambiental de la producción de leche de dos sistemas de pequeños productores en Perú. Se comparó sistemas de producción extensivos en las tierras altas andinas con los sistemas de pequeños propietarios más intensivos en la costa de Lima. La alimentación de las vacas en el sistema extensivo consistió en pastos permanentes con trébol y raígras. En la costa, las vacas lecheras fueron alimentadas con maíz forrajero y

adquirieron concentrado. El nivel de producción de leche de las vacas se consideró muy bajo (2,57 kg de leche/vaca/día) en comparación con el ganado en la costa (19,54 kg de leche/vaca/día) que fueron alimentados con maíz forrajero y concentrados. Se utilizó la unidad funcional de 1 kg de leche corregida con energía (MEC), por lo que 1 kg de leche se ajusta a la leche estándar. Concluyó que, en las tierras altoandinas, el sistema extensivo emite constantemente más que el sistema intensivo cuando se expresa por kg de ECM (debido a las emisiones del ganado). Mientras que las granjas lecheras extensas emitieron un 85% menos que la agricultura intensiva cuando se expresan por animal. El mayor impacto de los sistemas extensos en el medio ambiente se debió a la fermentación entérica del ganado expresada en metano por kg de ECM. “Las actividades principalmente responsables de la acidificación y la eutrofización en la costa son el cultivo y procesamiento de los forrajes y los ingredientes concentrados”. Asimismo, sus soluciones para reducir la carga por kg de ECM incluían un aumento de la productividad del animal o una menor emisión de metano debido a la fermentación entérica (por ejemplo, una mayor digestibilidad) y para reducir el impacto ambiental de los sistemas intensivos en la costa, se sugirió cambiar la fuente de proteínas del concentrado (es decir, principalmente la soja) porque el mayor impacto en el potencial de calentamiento global se debió a la producción de concentrados.

Lizarralde (2013) reportó que la producción de alimentos hasta la puerta sigue normas internacionales para cuantificar la HC de la leche producida en 24 tambos de Uruguay, en un sistema silvopastoril, donde las vacas pastorean todo el año y son suplementadas con concentrados. Asimismo, los tambos con similares producciones y manejo nutricional fueron categorizados en conglomerados. Los predios lecheros variaron en productividad 4075 ± 1360 kg leche corregida por grasa y proteína (LCGP) por ha, producción de leche por vaca 5672 ± 1245 kg LCGP/año, carga animal $0,71 \pm 0,12$ vaca masa por ha y porcentaje de concentrado en la dieta 36 ± 12 % materia seca, siendo el promedio de su HC de $0,99$ kg CO₂ equivalente/kg LCGP $\pm 10\%$. Concluyó que, la productividad de leche y la producción de leche por vaca fueron las variables que explicaron mejor la variación en la huella de carbono. Identifico que estrategias enfocadas en la productividad, en alta producción de leche por vaca, alta eficiencia del rodeo serían las prácticas de manejo más prometedoras para reducir la huella de carbono de la leche hasta la portera del predio.

El estudio de HC reportado por Gollnow *et al.* 2014, sobre las vacas lecheras en Australia, siguió las Directrices sobre el enfoque común de la huella de carbono de la Federación

Internacional de Lechería (IDF) y la Estándar para la evaluación del ciclo de vida. Se recopilaron y analizaron datos primarios de 139 granjas en representación de las principales regiones lecheras de Australia. El alcance del estudio cubre todas las entradas y salidas desde la cuna hasta la puerta de la granja. La huella de carbono de la leche australiana promedio se calculó en 1,11 kg de dióxido de carbono. equivalentes kg 1 de leche corregida en grasas y proteínas. Concluyó que, las diferencias en la emisión de GEI por kg de leche producida podría remontarse a las diferencias en las prácticas de producción y de manejo de estiércol. Asimismo, identificó que la eficiencia de conversión alimenticia podría ser el impulsor más importante para la reducción de las emisiones de metano entérico.

Cuadro 3: Resumen de las características de las explotaciones y de sus ACV de estudios realizados recientemente en 3 países diferentes

	Brasil (Ribeiro-Filho et al. 2020)	Colombia (Gómez 2018)	Perú (Van 2014)	
Granja	Extensivo	Extensiva	Extensivo	Intensivo
Pastos	Si	Si	Si	No
Forrajes	mijo perla, raígras, kikuyo (tropicales)	no específica	raígras, trebol, alfalfa	Maíz
Concentrados	Si	Si	Si	Si
Límite	cuna a la puerta granja	cuna a la puerta granja	cuna a la puerta granja	
Unidad funcional	kg LCE	kg LCGP	kg LCGP	
Unidad emisión	kg CO2-eq/ kg LCE	kg CO2-eq/ kg LCGP	kg CO2-eq/ ton LCGP, kg CO2-eq/animal	
Factor de caracterización PCG	kg CO2-eq, CH4=28, kg CO2-eq, N2O=265, (IPCC 2013), horizonte temporal de 100 años	kg CO2-eq, CH4=28, kg CO2-eq, N2O=265, (IPCC 2013), horizonte temporal de 100 años	kg CO2-eq CH4=25,34; kg CO2-eq, N2O=289; (IPCC 2007, 2013), horizonte temporal de 100 años	

ECM: leche corregida por energía (kg/día) = leche (kg/día) x [0.038 x grasa(g/kg) + 0.024 x proteína(g/kg) + 0.017 x lactosa (g/kg)]/3.14; LCGP: leche corregida por grasa y proteína (kg/año) = producción leche(kg/año) x (0,2534+0,116 x grasa(%) + 0,0776 x proteína (%)) (IDF 2015)

El estudio de HC realizado por Van (2014), compara el impacto ambiental de la leche producida en sistemas lácteos intensivos en Lima con la leche producida en sistemas lácteos extensivos basados en pastos en el Valle del Mantaro en Perú. Los datos se recolectaron interrogando a cada agricultor en cualquiera de los sistemas a través de un cuestionario. Los datos recopilados se procesaron en un modelo HC que cuantifica las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, basándose en un paquete de hoja de cálculo utilizando Microsoft Excel. El modelo se expresa en kg de equivalentes de CO₂ por tonelada de LCGP. Los resultados indican que el sistema lechero intensivo emite un 9,0% más de

emisiones totales de GEI por año a nivel de granja en comparación con el sistema lechero extensivo basado en pasto. Las emisiones de CO₂ y N₂O son, respectivamente, un 262,5% y un 62,6% más altas que en el sistema extensivo basado en pasto. En el sistema intensivo la importación de alimento y la alta proporción de concentrados en la dieta son los más dominantes para la emisión de CO₂, mientras que para las emisiones de N₂O, los animales grandes con altos niveles de ingesta y la presencia de un sistema de manejo de estiércol en lotes secos son en su mayoría responsables. En el sistema extensivo, debido a la baja digestibilidad de la ración y la baja producción de leche (12,5 kg/vaca/día), las emisiones de CH₄ expresadas por tonelada FPCM son un 30,6% más altas que en el sistema lechero intensivo.

El estudio realizado en Brasil por Ribeiro-Filho *et al.* (2020) tuvo como objetivo evaluar la HC de un sistema lechero con pastos anuales tropicales y templados en una región subtropical. El límite del sistema incluía todos los procesos hasta la puerta de la granja de animales. Se evaluaron tres escenarios: ingesta ad libitum de ración total mixta (TMR), 75% y 50% de ingesta ad libitum de TMR con acceso a pastoreo en pastos tropicales o templados durante los períodos de lactancia. Los requisitos individuales de alimentación, así como las respuestas de producción de leche basadas en estrategias de alimentación, se basaron en datos registrados del rebaño descrito anteriormente y en dos experimentos realizados con vacas lactantes del mismo rebaño. La respuesta de la producción de leche como consecuencia de las estrategias de alimentación (escenarios) se basó en los resultados de dos experimentos (estaciones cálidas y frías) con vacas lactantes del mismo rebaño. Para estimar las emisiones del estiércol, se recurrió a valores del IPCC y para la producción de alimentos y electricidad a literatura internacional. La huella de carbono fue similar entre los escenarios, con un promedio de 1.06 kg CO₂-eq/kg ECM, considerando factores de estudios en condiciones subtropicales y insumos reales para la producción de alimento en la granja. Asimismo, la HC disminuyó 0.04 kg CO₂-eq/kg ECM en escenarios que incluyen pastos en comparación con TMR ad libitum. Independientemente de los factores considerados, las emisiones de la producción de piensos disminuyeron a medida que aumentaba la proporción de pastos. En conclusión, la disminución de la ingesta de TMR y la inclusión de pastos en la dieta de las vacas lecheras en condiciones subtropicales tienen el potencial de mantener o reducir la huella de carbono en pequeña medida (Cuadro3).

Gómez (2018) evaluó mediante un ACV, la huella de carbono de la leche en una muestra de 39 fincas lecheras de la provincia de Ubaté, en las que se identificaron las prácticas de manejo asociadas a menores HC. Calculó las emisiones de GEI según las directrices del IPCC, la unidad funcional fue 1 kg de LCGP. La información requerida para el cálculo se recolectó por medio de una encuesta al productor y de mediciones directas en campo. El promedio de HC de la leche a la puerta de la finca fue de $1,43 \pm 0,31$ kg de CO₂-eq por kg de LCGP con variaciones entre 0,86 y 1,98 kg CO₂.eq/kg LCGP. Las principales fuentes de emisión de GEI fueron la fermentación entérica (59%) y la gestión del estiércol en pastoreo (20%). Las estrategias de manejo que conducen a aumentar la producción de leche por vaca (kg LCGP/vaca/año), el consumo de forraje (kg MS/vaca/día), la digestibilidad de la pastura (%) y la eficiencia del hato (% vacas en ordeño) fueron identificadas de mayor impacto para reducir la HC de la leche. El estudio concluye que una reducción de la HC de la leche es posible a partir del uso intensivo de la pastura, el manejo adecuado de la suplementación y la mayor eficiencia del hato.

La FAO (2010), comparó el total de emisiones promedio del ACV de diferentes regiones del mundo, indicando que las emisiones más altas por kg de leche corregida se dan en la región del Sub-Sahara de África con un valor promedio de 7,5 kg CO₂-eq. por kg de leche corregida por grasa y proteína (LCGP) y los valores más bajos se dan en las regiones industrializadas como Norte América y Europa oscilando entre 1 y 2 kg CO₂-eq. por kg de LCGP. El sur de Asia, este de Asia, Norte de África, América Central y América del Sur tuvieron valores intermedios de emisiones, los cuales se estimaron entre 3 y 5 kg CO₂-eq. por kg de LCGP a la portera del predio. Velarde-Guillén *et al.* (2021) indican que, en América Latina la huella de carbono varía de 0,9 a 5,3 kg CO₂eq/kg leche con corrección de grasas y proteínas (FPCM).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el departamento de Puno, en los distritos de Ácora y Paucarcolla en la provincia de Puno, Taraco en Huancané y Ayaviri en Melgar. Estas provincias y distritos de Puno fueron escogidos debido que en ellos se concentra la mayor población de ganado vacuno lechero, cuentan y utilizan cultivos de alfalfa dormante, y existe información sobre una investigación realizada en el 2016 por Rivera sobre la caracterización de dicho sistema.

Puno está ubicado en la parte sureste del territorio peruano entre los 13° 00' y 17° 08' latitud Sur y en los 71° 08' y 68° 50' longitud Oeste del meridiano de Greenwich, localizándose en el altiplano peruano entre 3,800 y 4,500 m.s.n.m., abarca una superficie total de 7'238,244 hectáreas, que representa el 5.63% de la superficie del país. Su clima del altiplano se caracteriza por temperaturas promedio anual que oscilan los 13°C y 3°C y una precipitación pluvial promedio anual de 672mm.



Figura 3: Departamento de Puno y provincias

Fuente: Página web www.depuno.com/mapas/

3.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de información directamente de los pequeños ganaderos y las respectivas muestras de la investigación se realizaron entre el 13 de agosto y 10 de octubre, de mediados a fin de la temporada seca.

Los datos recolectados fueron provenientes de 16 pequeños ganaderos, pertenecientes a comunidades campesinas o a asociaciones, que cumplían con los principales criterios de selección, los cuales fueron que se dedique a la producción de leche bovina y que dentro de la alimentación de sus animales incluya alfalfa dormante. Cabe resaltar que se trabajó con dichos ganaderos, ya que las unidades agropecuarias pequeñas representan más del 80% de las unidades agropecuarias a nivel nacional. Se llegó a ellos por contacto con los jefes de la oficina de Desarrollo Agropecuario de las municipalidades y las plantas queseras de las zonas de cada distrito, se decidió trabajar con plantas queseras por la facilidad de la recolección de la muestra de leche por productor promedio, asimismo, para ganar la confianza del ganadero.

Encuesta

La data se obtuvo interrogando mediante una entrevista abierta a cada ganadero respondiendo un cuestionario que se basó en el cuestionario utilizado por Van (2014) (Anexo 11). El cuestionario incluía temas para obtener información general sobre la granja, por ejemplo, cantidad de hectáreas, nombre del agricultor, ubicación de la granja; características del ganado, como la estructura del ganado, peso vivo del ganado adulto, peso de la ternera; producción promedio de leche por año; sistema de alimentación y ración del rebaño; manejo de estiércol y cultivo de forrajes.

Para estimar el pesaje se utilizó una cintra métrica para ganado bovino lechero (cinta bovinométrica), se midió una sola vez esta estimación de las vacas adultas en producción y de terneras con 2-7 días de nacida. El pesaje de terneras no fue estimado en el total de los hatos lecheros estudiados, esta data se tomó con el fin de conocer dicho parámetro para la descripción de los hatos lecheros. Para obtener el dato de la producción promedio de leche, se estimó a partir de la información obtenida del ganadero en los meses a lo largo del año, cabe resaltar que la encuesta fue complementada con preguntas abiertas y discutidas con el ganadero para una mayor comprensión.

Muestras

El muestreo se realizó una sola vez en campo para obtener la composición nutricional de la leche y de los alimentos suministrados a los animales, como forraje y concentrado.

Las muestras de leche fueron tomadas de los porongos de leche de los hatos lecheros evaluados, se recolectaron en frascos de plástico estériles de tapa rosca y se le añadió ácido fórmico al 10% para su conservación. Para su transporte y conservación se utilizó una caja de Tecnopor, la cual contenía gel refrigerante para mantener las condiciones más adecuadas posibles. Las muestras de leche, por apoyo del hospedaje se mantuvieron refrigeradas previo a su retorno a Lima, no obstante, para el distrito de Ayaviri no se contó con un refrigerador, por ello, se utilizó una manera artesanal de mantener las muestras frescas utilizando el agua helada de la zona.

Las muestras de los forrajes suministrados como parte de la dieta de los animales fueron obtenidas de la misma granja, es decir, fueron brindadas por los ganaderos, estas fueron colocadas en bolsas de papel, cada forraje fue colocado en su respectiva bolsa de papel rotulada. Los forrajes recolectados en general fueron, heno de alfalfa, heno de avena, heno de cebada y heno de habas. Las muestras de concentrado se obtuvieron de igual manera, brindadas por lo ganaderos, estas se colocaron en bolsas de plástico y de papel.

Para la recolección del pasto se utilizó la técnica de simulación manual (Flores 1993) y se colocaron en bolsas de papel. La simulación manual consistió en observar al animal de cerca durante 1 hora durante el pastoreo, tomando muestras manuales simulando el bocado de la vaca, se tomaron entre 15 y 20 muestras por vaca. Se recolectó un día por ganadero de los cuatro distritos, posteriormente se combinaron para obtener una muestra representativa.

Se decidió realizar los primeros días la encuesta para la recolección de información y la recolección de las muestras de alimento (forrajes y concentrado), y los días ya próximos al retorno a realizar la recolección de las muestras de leche. Asimismo, las muestras de alimento previamente al análisis de laboratorio se agruparon por forraje/pasto/concentrado y distrito, por ejemplo, las cuatro muestras de heno de alfalfa obtenidas en el distrito de Paucarcolla se combinaron, para obtener una muestra representativa por distrito.

Análisis de laboratorio

Las muestras de leche fueron trasladadas a Lima, analizadas principalmente para porcentaje de grasa y proteína, en el Laboratorio de Tecnología e Industrialización de Leche y Carne de la UNALM, mediante el uso del Equipo Milko Scan “FOSS”, tecnología de análisis de leche por rayos infrarrojos. Asimismo, las muestras de los alimentos se analizaron en el Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos de la UNALM para análisis químico proximal y FDN, previa preparación (secado y molienda), servicio adquirido en el mismo laboratorio.

3.3 HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE

La huella de carbono se ejecuta siguiendo las pautas según la Federación Internacional de Lechería (IDF 2015) y la Norma Internacional ISO 14040 y 14044 para la Evaluación del Ciclo de Vida. La IDF se desarrolló a partir de un proceso de consultoría y revisión para hacer frente al problema de la falta de credibilidad y consistencia en el cálculo de la huella de carbono de la leche o productos derivados. La solución fue desarrollar una guía clara en unidad funcional, límites del sistema, cambio en el uso del suelo, co-productos y otros aspectos debatidos de la metodología. De acuerdo con ISO 14044 (ISO 2006b) el estudio analiza las entradas de recursos y las salidas mediante emisiones dentro de un sistema definido atribuido a la producción, incluye una definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados. En esta tesis, la evaluación se aplicó a un sistema lechero semi extensivo promedio. Asimismo, se elige un modelo de HC en lugar de un modelo de ACV completo debido a la falta de datos para realizar la investigación necesaria sobre el impacto de la eutrofización y la acidificación en el medio ambiente.

Definición del objetivo

El objetivo del estudio fue examinar el ciclo de vida de la leche producida en un sistema lechero que utiliza alfalfa dormante, con el fin de cuantificar y analizar los posibles impactos ambientales, para identificar los aspectos con mayor impacto ambiental dentro de este sistema en la región Puno. El enfoque principal se centra en la producción de leche, donde su alimentación incluye la alfalfa dormante en su dieta, asimismo, se podrá

comparar con otros estudios de ACV que presentan sistemas productivos similares sin la inclusión de esta leguminosa.

Unidad funcional

La unidad de referencia que denota la producción útil, es decir, la unidad funcional, en la que se basó el estudio será en un kilogramo de leche corregida con grasa y proteína (LCGP). Para esto se utilizó la siguiente ecuación definida de acuerdo con el IDF (2015).

Ecuación 1: Fórmula para convertir la producción de leche en kg de leche corregida en grasas y proteínas (LCGP)

$$LCGP \left(\frac{kg}{año} \right) = Producción\ leche \left(\frac{kg}{año} \right) * [0.1226 * G\% + 0.0776 * P\% + 0.2534]$$

Se da el uso de LCGP como base para las comparaciones de granjas asegurando una comparación justa entre ellas con diferentes razas o regímenes de alimentación.

Definición del alcance y límite

El límite del sistema incluyó todas las actividades relevantes desde la cuna hasta la puerta de la granja responsables de la carga ambiental, incluidas las actividades en la granja y la producción de insumos de esta. Así como:

- La producción de leche (Metano por fermentación entérica)
- Manejo de estiércol del ganado (Emisiones directas e indirectas de nitrógeno)
- Producción de alimento, que comprende el cultivo de forrajeras en superficie agrícola y las emisiones debidas a la producción y transporte de concentrados

Asignación

En los sistemas de granjas lecheras, donde el enfoque principal es la producción de leche, la carne generada a partir de terneros excedentes y vacas lecheras sacrificadas es un coproducto importante. Por tanto, es necesario determinar las emisiones totales y distribuir las entre la leche y la carne. En el estudio actual, la asignación entre la leche

producida y la carne no se conoce, asimismo, no hubo indicaciones de diferencias entre las 16 granjas ambos en términos de producción de carne frente a producción de leche, se tomó el mismo valor de asignación para todos, que se basó en el sistema de granja lechera extensiva en el estudio de Van (2014), donde se le asigna 96% a la leche y el 4% a la carne.

3.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA CUANTIFICAR LOS GEI

Este estudio utiliza como punto de partida el trabajo de Van (2014), quien conceptualizó un modelo ACV como un paquete de hoja de cálculo con Microsoft Excel según el trabajo de Meul *et al.* (2012). El modelo de huella de carbono cuantifica las emisiones de los gases de efecto invernadero (CO₂, NH₄ y NO₂), expresándose en kilogramos equivalentes de CO₂ permitiendo estimar anualmente el impacto ambiental de la producción de leche a nivel de granja, considerando un enfoque desde la cuna hasta la granja, es decir, que incluye todos los procesos del ciclo de producción de leche hasta el momento en que la leche cruda sale de la granja (Meul *et al.* 2012). Para el modelo se utilizaron datos detallados de las granjas obtenidos mediante el interrogatorio a los ganaderos participantes de cada distrito seleccionado. Siendo este un proceso iterativo, se tomaron decisiones en base a los datos recopilados, asimismo, fue necesario asumir valores para todo el año durante el proceso de desarrollo del modelo de HC. Debido a la falta de datos completos para la emisión de kg de CO₂-eq para los cultivos agrarios y para la producción de concentrado, lo cual incluye entradas para el cultivo, uso de máquinas, procesamiento (energía), transporte y el cambio del uso de la tierra (LUC) se estimó utilizando el programa FeedPrint (Vellinga *et al.* 2013). El programa FeedPrint es una herramienta que calcula la huella de carbono de las materias primas de los piensos durante su ciclo de vida completo, esto abarca desde la producción de cultivos, pasando por el procesamiento de productos agrícolas y animales, la producción de concentrado hasta la utilización por parte del animal, incluido el transporte y el almacenamiento entre todos los pasos de la cadena de producción, la base de datos FeedPrint está desarrollada y es propiedad de Wageningen University & Research y Blonk Milieu Advies.

En el estudio no se disponía de información sobre la producción de medicamentos y minerales aplicados a las vacas lecheras, por lo tanto, no se incluye en la HC, además de su pequeño impacto ambiental según O'Brien *et al.* (2012)

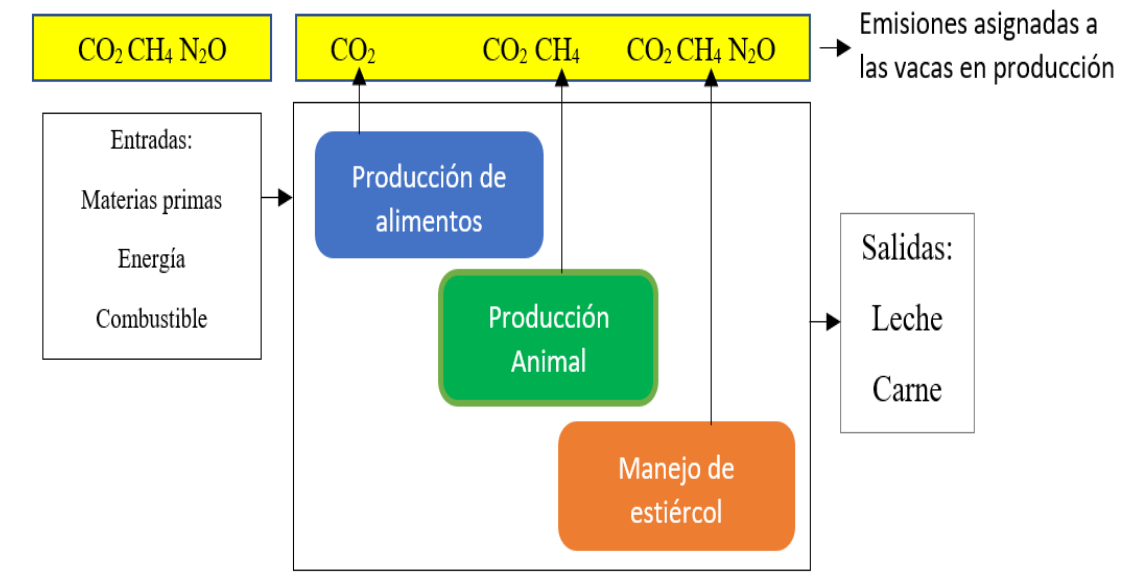


Figura 4: Descripción del modelo a estudiar

Fuente: Adaptado de Lizarralde (2013)

Para la determinación de las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O resultantes de la gestión del ganado y del estiércol se ha utilizado el método de nivel 2 (Tier 2) del IPCC (2019). Este método requiere datos detallados y específicos del país, sobre las necesidades de nutrientes, la ingestión de alimentos y las tasas de conversión del metano aplicables a determinado tipo de alimentos, que luego se utilizan para calcular los factores de emisión correspondientes a las categorías de ganado definidas para el país. La contribución de cada uno de los GEI fue integrada usando factores actuales de caracterización del potencial de calentamiento global (PCG) del IPCC (2013) para un horizonte de 100 años para convertirlos en emisiones equivalentes de CO₂.

1 kg de metano (CH₄) = 28 kg CO₂

1 kg de óxido nitroso (N₂O) = 265 kg CO₂

3.4.1. Inventario del ciclo de vida

Se basa en la información colectada mediante las encuestas y entrevistas, asimismo, implica el modelado del sistema del producto, todo en relación a la unidad funcional teniendo en cuenta el límite propuesto. El modelo HC según Van H (2014) se implementa como un paquete de hoja de cálculo en Microsoft Excel. Las emisiones de los diferentes

procesos a nivel de la puerta de la granja se calculan por separado y se enumeran en un resumen general.

Ajustes de alimentación

El consumo de alimento de una vaca promedio se obtiene por un ajuste a partir de la información dada sobre el suministro de alimento, expresado en kg de materia fresca por día, como alfalfa, avena, cebada, habas y concentrado que se le da a una vaca promedio, al ser posible que se subestime el suministro de forrajes, la ingesta de forrajes ya sea pastoreando o ingerido en el establo no son datos exactos. La cantidad de concentrados que recibe una vaca promedio no cambiará porque se asume que el agricultor conoce correctamente estos valores. Por lo tanto, los ajustes de alimentación se realizan según el principio de cumplir con los requisitos diarios de energía neta (EN) de las vacas de acuerdo con las pautas del IPCC 2019 (Anexo 4) para la producción y mantenimiento de leche, respetando la proporción de los diferentes compuestos de forraje según lo indicado por el agricultor.

Ingesta de forraje estimado a partir de los requisitos de EN para vacas lecheras

Primero, el cálculo de la importancia de cada forraje en la ración se basa en kg de materia fresca de cada forraje indicado por el ganadero, de esta manera la proporción original de los forrajes en la ración sigue siendo la indicada por el ganadero, teniendo una distribución realista de la ingesta. Ecuación de acuerdo al enfoque de Van (2014).

Ecuación 2. Relación de ingesta de forraje Xi

$$Importancia_{Forraje\ xi} (\%) = \frac{Suministro_{Forraje\ xi}}{\sum_1^n Suministro_{Forraje\ xi}} * 100$$

Donde:

Importancia_{Forraje xi} (%) = Parte del suministro del forraje xi, sobre el suministro total de todos los forrajes

Suministro_{Forraje xi} (Kg fresco/día) = Suministro de forraje xi, por una vaca promedio

Segundo, se estima los requisitos de EN en la ración diaria de una vaca promedio siguiendo el enfoque Nivel 2 del IPCC 2019. Restando la cantidad de EN cumplida por los concentrados a los requisitos de EN. Por consiguiente, lo restante de EN debe llenarse a través de EN de forrajes. El contenido total de EN de los forrajes en la ración se calcula teniendo en cuenta su importancia en la ración (Importancia de forraje xi) y el contenido de EN de cada componente del alimento (Anexo 5-8). Cabe resaltar que, las muestras de alimento fueron tomadas en temporada seca. Ecuación de acuerdo al enfoque de Van (2014).

Ecuación 3: Energía neta total de forrajes (MJ/día) en la ración de acuerdo a su proporción

$$EN_{Forrajes} \left(\frac{MJ}{día} \right) = \sum_{i=1}^n (Importancia_{Forraje\ xi} (\%) * EN_{Forraje\ xi} \left(\frac{MJ}{día} \right))$$

Donde:

$EN_{Forrajes}$ (MJ/día) = Contenido total de EN en forrajes según su proporción en la ración

$Importancia_{Forraje\ xi}$ (%) = Proporción de la ingesta de forraje xi sobre la ingesta total de todos los forrajes juntos

$EN_{Forraje\ xi}$ (MJ/día) = Contenido de EN de cada forraje xi

La cantidad de kg DM necesaria para cumplir los requisitos de EN se calcula en la Ecuación 4 de acuerdo al enfoque de Van (2014).

Ecuación 4: Ingesta total en kg de MS de forrajes para cumplir con las necesidades de EN

$$Consumo_{EN\ req} (kg\ MS) = \frac{(EN_{req\ total} (MJ/día) - EN_{conc} (MJ/día))}{EN_{Forrajes} (MJ/día)}$$

Donde:

$Consumo_{EN\ req}$ (kg MS) = Cantidad total de kg MS de forrajes para satisfacer los requisitos de EN de la vaca

$EN_{req\ total} (MJ/día) = \text{Requerimiento total de EN de la vaca}$

$EN_{conc} (MJ/día) = \text{Requerimientos de EN cumplidos por concentrados}$

$EN_{Forrajes} (MJ/día) = \text{Cantidad total de EN en los forrajes según su proporción en la ración}$

Valoración energética de la alimentación

La energía digerible (Mcal/día) de la ración total diaria de las vacas lecheras, se calculó a partir de la energía digerible de cada alimento y la importancia de cada alimento en la ración, calculado anteriormente incluyendo el concentrado en la ración total (Ecuación 5).

Ecuación 5: Energía digerible total de los alimentos (Mcal/día) en la ración de acuerdo a su proporción

$$ED_{Dieta} \left(\frac{Mcal}{día} \right) = \sum_{i=1}^n (Importancia_{Alimento\ x_i} (\%) * ED_{Alimento\ x_i} \left(\frac{Mcal}{kg} \right))$$

Donde:

$ED_{Dieta} (Mcal/día) = \text{Contenido total de ED en su ración diaria según su proporción en la ración}$

$Importancia_{Alimento\ x_i} (\%) = \text{Proporción de la ingesta de alimento } x_i \text{ sobre la ingesta total de todos los alimentos juntos}$

$ED_{Alimento\ x_i} (Mcal/kg) = \text{Contenido de ED de cada alimento } x_i$

La ED de cada alimento se calculó a partir de los nutrientes digeribles totales de cada alimento según la fórmula planteada en la NRC (2001) (Ecuación 6), los cuales se calcularon a partir de los resultados del análisis proximal de cada alimento según la fórmula de estimación de NDT de Bath (NRC 1989) (Ecuación 7).

Ecuación 6: Estimación de energía digerible de los alimentos (NRC 2001)

$$ED (Mcal/kg) = 0.04409 * NDT(\%)$$

Ecuación 7: Estimación de Nutrientes Digestibles Totales (NRC 1989)

$$NDT(\%) = PC * 1.15 + EE * 1.75 + FC * 0.45 + ELN^2 * 0.0085 + ELN * 0.25 - 3.4$$

La energía bruta (Mcal/kg) de cada alimento se calculó utilizando los resultados del análisis proximal mediante la Ecuación 8 propuesta por Martínez (2011). La energía bruta (Mcal/día) de la ración total diaria de las vacas lecheras, se calculó a partir de la energía bruta de cada alimento y la importancia de cada alimento en la ración, calculado anteriormente incluyendo el concentrado en la ración total. Se utiliza la misma metodología que la descrita para la ED de la dieta diaria.

Ecuación 8: Estimación de energía bruta de los alimentos

$$EB \left(\frac{Mcal}{kg} \right) = 5.7 * PC + 9.4 * EE + 4.7 * FC + 4.7 * ELN$$

3.5 CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

3.5.1 Emisiones de metano por fermentación entérica

Para estimar las emisiones de metano producidas por fermentación entérica se usa el Nivel 2 de las Directrices del IPCC (2019), a partir de la ingesta de energía bruta de la ración total previamente calculada, convertida a MJ/día (Mcal = 4.184MJ). El grado utilizado en el que la energía de los alimentos se convierte en CH₄ fue de 6.5%, valor obtenido por el Grupo de Expertos del IPCC (2019), al considerarse una baja producción lechera y presentar una dieta con ED ≤ 62% y FDN < 38%.

Ecuación 9: Factores de emisión de CH₄ por fermentación entérica

$$EF = \left[\frac{EB * \frac{Y_m}{100} * 365}{55.65} \right]$$

Donde:

EF = Factor de emisión, kg CH₄ cabeza⁻¹ año⁻¹

EB = Ingesta de energía bruta, MJ cabeza⁻¹ día⁻¹

Y_m = Factor de conversión en metano, % EB del alimento convertida en metano

El factor 55,65 (MJ/kg CH₄) es el contenido de energía del metano.

3.5.2 Emisiones de metano por manejo del estiércol

La emisión de metano debido al almacenamiento y al tratamiento del estiércol, así como del estiércol depositado en la pastura se estima mediante la Ecuación 10 de acuerdo con las pautas del Nivel 2 del IPCC (2019). Los factores de conversión de metano (FCM) por defecto para cada sistema de manejo de estiércol S dentro de una región climática específica k con temperaturas frías anuales se recuperaron de las directrices del IPCC (2019). (Pastura=0.47%, almacenamiento de sólidos=2.0%, quema para combustible=10.0%). La producción de sólidos volátiles del estiércol se estimó sobre la base de la ingesta alimentaria y la digestibilidad, que son variables también utilizadas para desarrollar los factores de emisión por fermentación entérica de Nivel 2. No se dispuso de valores de medición de B_o específicos, por lo tanto, la capacidad máxima de producción de metano del estiércol producido por el ganado vacuno por defecto fue de 0,13 m³ CH₄ por kg de VS excretados.

Ecuación 10: Factor de emisión de CH₄ de la gestión de estiércol

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} * 365) * \left[B_{o(T)} * 0.67 * \sum_{S,K} \frac{MCF_{(T,S,K)}}{100} * AWMS_{(T,S,K)} \right]$$

Donde:

$EF_{(T)}$ = Factor de emisión anual de CH₄ para la población de ganado categoría T , kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹

$VS_{(T)}$ = Sólidos volátiles excretados por día en la categoría de ganado T , kg MS animal⁻¹ día⁻¹

365 = Base para calcular la producción anual de VS, días año⁻¹

$B_{o(T)}$ = Capacidad máxima de producción de metano del estiércol producido por el ganado de la categoría T , m³ CH₄ kg⁻¹ de VS excretados

0,67 = Factor de conversión de m³ de CH₄ a kilos de CH₄

$MCF_{(S,k)}$ = Factores de conversión de metano para cada sistema de gestión del estiércol S por región climática k , %

$AWMS_{(T,S,k)}$ = Fracción del estiércol del ganado de la categoría T manejado usando el sistema de gestión de desechos S en la región climática k , sin dimensión

3.5.3 Emisiones de óxido nitroso por manejo del estiércol

La emisión de N_2O del estiércol durante su almacenamiento y tratamiento se estima mediante la siguiente ecuación de acuerdo con las pautas del Nivel 2 del IPCC (2019), estas dependen de su contenido de nitrógeno y de carbono, así como de la duración del almacenamiento y del tipo de tratamiento. Las emisiones directas de N_2O se producen a través de la nitrificación y desnitrificación combinadas del nitrógeno contenido en el estiércol. La cantidad anual de N excretada depende del total de la ingesta anual de N y del total de la retención anual de N del animal. La ingesta anual de N depende de la cantidad anual de alimento digerido por el animal y del contenido de proteínas de ese alimento (Ecuación 10-2, Anexo 10). La retención anual de N es una magnitud de la eficiencia del animal para producir proteína animal a partir de la proteína del alimento (Ecuación 10-3, Anexo 10). Los factores de emisión (EF_3) de acuerdo a la IPCC (2019) fueron de 0,010 kg de N_2O -N por kg de N excretado para estiércol sólido; 0,004 kg de N_2O -N por kg de N excretado en el pasto.

Ecuación 11: Emisiones directas de N_2O de la gestión de estiércol

$$N_2O_D = \left[\sum_S \left[\sum_{T,P} ((N_{(T,P)} * Nex_{(T,P)}) * AWMS_{(T,S,P)}) + N_{cdg(s)} \right] * EF_{3(S)} \right] * \frac{44}{28}$$

Donde:

$N_2O_{D(mm)}$ = Emisiones directas de N_2O de la gestión del estiércol del país, kg N_2O año⁻¹

$N_{(T,P)}$ = Cantidad de cabezas de ganado de la especie/categoría T del país

$Nex_{(T,P)}$ = Promedio anual de excreción de N por cabeza de la especie/categoría T en el país, kg N animal⁻¹ año⁻¹

$AWMS_{(T,S,P)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada especie/categoría de ganado T que se gestiona en el sistema de gestión del estiércol S en el país, sin dimensión

$N_{cdg(s)}$ = Aporte anual de nitrógeno a través del codigestato en el país, kg N año⁻¹, donde el sistema o sistemas se refieren exclusivamente a la digestión anaeróbica

$EF_{3(s)}$ = Factor de emisión para emisiones directas de N_2O del sistema de gestión del estiércol S en el país, kg N_2O-N/kg N en el sistema de gestión del estiércol S

S = Sistema de gestión del estiércol

T = Especie/categoría de ganado

P = nivel de productividad, alta o baja, a considerar si se utiliza el enfoque Tier 1

$44/28$ = Conversión de emisiones de (N_2O-N) (mm) a emisiones de N_2O (mm)

3.5.4 Emisiones de óxido nítrico indirectas por manejo del estiércol

La volatilización de NH_3 y el lavado de NO_3 producen emisiones indirectas de N_2O , la volatilización a través de la deposición atmosférica del N en suelos y cursos de agua, mientras que el lavado por lixiviación y escurrimiento de nitrógeno, estos se estiman mediante la siguiente ecuación de acuerdo con las pautas del Nivel 1 del IPCC (2019), debido a la falta de datos específicos se utilizarán datos de excreción de N por defecto. Para los efectos de volatilización y de lixiviación de NH_3 se utilizó un factor de emisión de 0,010 kg N_2O-N y de 0.011 kg N_2O-N , respectivamente. En el Anexo 10 (Ecuación 10-4 y 10-5) se encuentra la fórmula para hallar la cantidad de N del estiércol que se pierde debido a la volatilización de NH_3 y NO_x , kg N por año.

Ecuación 12: Emisiones indirectas de N_2O debidas a la volatilización de N de la gestión del estiércol

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilización-MMS} * EF_4) * \frac{44}{28}$$

Donde:

N_2O_G (mm) = Emisiones indirectas de N_2O debidas a la volatilización de N de la gestión del estiércol del país, $kg N_2O \text{ año}^{-1}$

EF_4 = Factor de emisión para emisiones de N_2O resultantes de la deposición atmosférica de nitrógeno en la superficie del suelo o del agua, $kg N_2O-N$ (0.010= valor predeterminado en N_2O-N)

$N_{\text{volatilización-MMS}}$ = Cantidad de nitrógeno del estiércol que se pierde debido a la volatilización de NH_3 y NO_x , $kg N \text{ año}^{-1}$

Ecuación 13: Emisiones indirectas de N_2O debidas a la lixiviación de N de la gestión del estiércol

$$N_2O_{L(mm)} = (N_{\text{lixiviación-MMS}} * EF_5) * \frac{44}{28}$$

Donde:

N_2O_L (mm) = Emisiones indirectas de N_2O debidas a lixiviación y escurrimiento de la gestión del estiércol del país, $kg N_2O \text{ año}^{-1}$

EF_5 = Factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento de nitrógeno, $kg N_2O-N/kg N$ lixiviado o escurrido (0.011=valor por defecto $kg N_2O-N$)

$N_{\text{lixiviación-MMS}}$ = Cantidad de nitrógeno del estiércol que lixivia de los sistemas de gestión del estiércol, $kg N \text{ año}^{-1}$

3.5.5 Emisiones por producción de forrajes y concentrado

Las emisiones de $kg CO_2\text{-eq}$ totales, es decir la huella de carbono, de la producción de los forrajes cultivados y los concentrados comprados se midieron mediante la herramienta FeedPrint, teniendo en cuenta la ingesta de alimento por parte del hato lechero calculado anteriormente en alimentación ajustada, el tiempo entre cada siembra de cada cultivo y el número de cortes por año. por ejemplo, la siembra del cultivo de avena se da anualmente, teniendo 2 o 3 cortes por año. El programa FeedPrint es una herramienta que calcula la huella de carbono de las materias primas de los piensos durante su ciclo de vida completo, por lo que, se puede obtener la HC de los insumos de cultivo, el uso de la máquina, la

fábrica de concentrado y el procesamiento, sin la inclusión del transporte. En este estudio no estamos considerando las emisiones de transporte por el programa, ya que se basan en datos de los Países Bajos, por lo que, para la estimación de las emisiones por transporte de forrajes y concentrados se asignó las distancias entre el lugar de producción y venta a la granja por Google Maps y la información de los factores de emisión del tipo de transporte se obtuvo de "Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories" (Fong *et al.* 2020).

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.6.1 Correlación

Se realizó un análisis de correlación para identificar hasta qué punto las variables en estudio de interés están relacionadas linealmente, por lo que, se ha realizado un análisis de correlación simple por el método de Pearson en Minitab, donde las variables a analizar fueron, producción de LCGP, consumo de alfalfa, energía digestible de la dieta y huella de carbono. Los análisis de correlación se dieron entre todas las variables, es decir, se correlacionó la variable producción de LCGP con consumo de alfalfa, con ED de la dieta y con la HC, la variable consumo de alfalfa se correlacionó con la ED de la dieta y con la HC y por último, se analizó la variable ED de la dieta con la variable huella de carbono.

3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad para identificar las variables más críticas, construyendo escenarios posibles que permitieron analizar el comportamiento de un resultado bajo diferentes supuestos. Para ello, se utilizó la herramienta Excel, donde en un primer análisis se realizaron cambios en la variable cantidad de inclusión de la alfalfa dormante en la dieta promedio (base: 2.5 kg, E1: base+0.5 kg, E2:base+1kg, E3:base+1.5kg, E4:base+2kg) y en un segundo análisis se realizaron cambios en producción de leche (base:4.14 LCGP ton/vaca/año, E1: base+2%, E2:base+4%, E3:base+6%, E4:base+8%) para analizar el comportamiento de las emisiones por fermentación entérica y huella de carbono, respectivamente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS HATOS LECHEROS ESTUDIADOS EN LA REGIÓN PUNO

Las granjas lecheras en los distritos estudiados se caracterizan por una agricultura familiar con un sistema de manejo de bajos recursos. El tamaño del rebaño suele ser pequeño de 7 a 27 cabezas, donde la crianza de su ganado es bajo un sistema de alimentación semi intensivo. Durante el mediodía en adelante se mantienen en pastos, donde predomina el pasto natural, en un promedio de 5 a 6 horas al día, las horas restantes están alojados en los establos amarrados a una estaca y por la noche guardados en los cobertizos o corrales. Los forrajes suministrados son pastos cultivados en secano, cosechados y henificados, donde la avena (*Avena sativa*) y la cebada (*Hordeum vulgare*), se suministran todo el año como heno de avena y heno de cebada (Cuadro 5), asimismo, la siembra de estos cultivos de estos se dan anualmente; por otro lado, la alfalfa (*Medicago sativa*), se suministra principalmente en la temporada seca como heno de alfalfa y durante la temporada de lluvias es consumida al pastorear, su cultivo no es permanente, pero se da cada 10 o 15 años. Dependiendo del criterio de los agricultores, basándose en el rendimiento forrajero empírico de la avena o alfalfa se va a elaborar ensilaje, pero principalmente el método de conservación del forraje es heno. Asimismo, para el proceso de arado principalmente al preparar sus tierras para la siembra de los cultivos de avena, cebada y alfalfa, los ganaderos alquilan por horas tractores agrícolas, pudiendo ser de la zona o de otra comunidad. El suministro de alimento concentrado es limitado y solo para ganado en producción y terneros, este contiene principalmente maíz molido, seguido de avena molida, harina de soya, pasta de algodón, harina de pescado y sal. El ordeño se da de manera manual, el número de ganado lechero suele ser de 2 a 15 cabezas, este se da una vez al día por las mañanas. Los ganaderos interrogados no utilizan fertilizantes, ni pesticidas en sus cultivos. No existe una práctica uniforme en cuanto al uso de estiércol, algunos lo almacenan en fosas o en pilas para luego repartirlo en campo y posterior a ello rotularlo para la siguiente siembra, mientras que otros prefieren mantener el estiércol secado al sol durante varios meses para luego fertilizar los pastos y otros lo utilizan

también como carbón para cocinar, al quemarlo como combustible. Las características generales de los hatos lecheros analizados por distrito se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Características generales de las granjas lecheras en Puno

Localización	Granjas lecheras extensivas			
	Ácora	Paucarcolla	Taraco	Ayaviri
Tamaño de ganado lechero	2-4	3-8	2-3	5-15
Estructura de ganado	1 grupo*			
Sistema de alimentación	Semi intensivo			
Forrajes	Cultivo de avena, cebada, alfalfa y habas			
Concentrado	si (limitado)	si (limitado)	-	si (limitado)
Estiércol	Sobre pasturas, almacenamiento de sólidos, quema para combustible.			
Ordeño	Manual			
Raza	BS			
Promedio peso vaca adulta, kg	382.125	389.125	383.5	390.625

*Solo varían en proporciones

BS: Brown Swiss*criollo

Cuadro 5: Suministro de forraje según la estación de las granjas lecheras estudiadas en Puno

Forrajes	Temporada de lluvia					Temporada de seca						
	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV
Heno de avena	x	x	X	X	X	X	X	X	X	x	X	X
Heno de alfalfa						X	X	X	X	x	X	
Heno de cebada	x	x	X	X	X	X	X	X	X	x	X	x
Heno de habas						X	X	X	X	x	X	

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS

En el Cuadro 6 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de la data obtenida sobre algunos parámetros, referente principalmente al ganado y a la producción de leche.

Cuadro 6: Valores medios, máximos y mínimos de la data obtenida de los distritos analizados

Parámetros	Unidades	Promedio	CV	Máximo	Mínimo
Superficie agrícola	Ha	5.94	73.60%	15	2
GANADO					
Vacas productoras	número	4.63	71.44%	15	2
Vacas secas	número	2.12	73.18%	5	1
Vaquillas	número	1.50	59.63%	4	1
Terneros	número	3.19	41.65%	5	1
Peso vivo ganado maduro	Kg	386.34	2.37%	398	375
Peso nacimiento	Kg	32.03	12.49%	38.17	28.03
Tasa de reemplazo	%	16.20	41.5%	53.81	29.35
PRODUCCIÓN DE LECHE					
Duración de lactación	meses	7.38	14.11%	9.5	6
Producción por vaca	kg por día	8.46	27.25%	15.48	6.03
Contenido de grasa	%	4.36	15.09%	5.69	3.1
Contenido de proteína	%	3.88	9.66%	4.46	3.19
Contenido de lactosa	%	4.78	5.89%	5.13	4.12
Producción anual por vaca	Kg	3086.34	27.25%	5651.67	2200
LCGP producción anual	Kg	3366.27	29%	6283.99	2156.32

En la descripción de datos de los hatos lecheros de la región Puno, se observa que existen grandes variaciones entre las variables tomadas, la variación más grande entre las 16 granjas analizadas fue la superficie agrícola (5.94 ± 4.37 ha), seguido del número de ganado en las diferentes categorías (productoras, secas, vaquillas, terneros, CV=71, 73, 60, 42 %, respectivamente), esto debido a que existen datos extremos.

El peso vivo del ganado maduro promedio fue de 386.3 ± 9.2 kg, mientras que el peso al nacimiento fue de 32.03 ± 4 kg (CV=12.5%). En un estudio comparativo realizado en el Valle de Mantaro en Perú sobre la huella de carbono de granjas lecheras extensivas e intensivas por Van (2014), para el caso del sistema extensivo, muestra una variación entre los agricultores encuestados en el número de ganado lechero (6-35 vacas lecheras), asimismo, reporta un peso vivo promedio del ganado maduro de 370 kg y un peso al nacimiento promedio de 35 kg.

Con respecto a la producción de leche del estudio actual fue de 8.46 ± 2.31 kg leche/vaca/día (CV = 27.3%), mientras que el estudio de Van reportó 12.2 kg leche/vaca/día, esto puede deberse por diversos factores, entre ellos el valor nutricional de su dieta y los requerimientos energéticos que debe cubrir el animal. No obstante, Bartl (2011) reportó una producción diaria de leche de 2.57 kg leche/vaca/día donde la alimentación del ganado está principalmente restringida a pastos permanentes.

La producción anual de leche por vaca se presentó en un rango de 2200 a 5651.67 kg de leche/año, con un promedio de 3086.34 kg leche/año, siendo considerado el hato lechero como vacas de baja producción (<5000 kg/año) según la IPCC (2019).

4.3 HUELLA DE CARBONO

4.3.1 Ingesta de alimento ajustada

En el Cuadro 7 se muestra la ración ajustada de forrajes para una vaca promedio expresada en kg de MS por día para los cuatro distritos. La ración de cada hato lechero se basa en información recopilada a través de cuestionarios dirigidos directamente al ganadero, al no ser posible recopilar datos exactos de la ingesta de forrajes, ya sea por pastoreo o ingerido en el establo, lo segundo debido a que, en el día a día la distribución de los forrajes no se registra en función a un grupo específico, ni por nivel de producción de leche, la estructura del ganado es en un solo grupo, por ejemplo, una paca de avena se le distribuye a 4 vacas, pudiendo sobreestimar o subestimar lo ingerido por el animal. Por ello, tomando como referencia el trabajo de Van (2014) se realizó el ajuste de dicha ración basados en los requerimientos netos de energía, respetando la proporción original de los diferentes componentes del forraje propuestos por el ganadero.

En el cuadro, se observa la proporción de la cantidad final de forrajes según su importancia dada por el ganadero, donde la proporción del forraje de interés, heno de alfalfa dormante, dentro de los forrajes suministrados es menos del 16.2 % sin incluir el consumido al pastoreo. Por otro lado, el forraje más usado para alimentar al animal es proveniente de la avena forrajera.

Cuadro 7: Ingesta de forrajes después del ajuste por requerimientos de EN

	Consumo ajustado kg MS/vaca/día									
	Heno de alfalfa	Proporción del forraje %	Heno de avena	Proporción del forraje, %	Heno de cebada	Proporción del forraje, %	Heno de habas	Proporción del forraje, %	Pasturas*	Proporción del forraje, %
Ayaviri	2.16	16.13	4.74	35.48	2.16	16.13	0.00	0.00	4.31	32.26
Taraco	1.28	9.68	4.27	32.26	2.13	16.13	1.28	9.68	4.27	32.26
Paucarcolla	1.72	13.79	4.30	34.48	2.15	17.24	0.00	0.00	4.30	34.48
Acora	1.19	11.11	3.18	29.63	1.59	14.81	0.79	7.41	3.97	37.04

*Pasto natural principalmente

La cantidad de concentrados que recibe una vaca promedio no ha sido ajustada, asumiendo que el ganadero conoce correctamente estos valores. El suministro de concentrado es limitado, es ofrecido solo a las vacas en producción y terneros, por esta razón, se trabajó con la información dada por el ganadero. Los hatos lecheros evaluados del distrito de Taraco no suministraban alimento balanceado a sus animales, alimentación basada 100% en forrajes.

En el Cuadro 8 se observa la ingesta del alimento total ajustada para una vaca promedio expresada en kg de MS por día para los 4 distritos. La energía digestible de las dietas ha sido calculada a partir de la composición química de los insumos alimenticios y la proporción de cada uno (Anexo 5-9).

Cuadro 8: Ingesta de alimento total después del ajuste por requerimientos de EN

	Distritos de la región Puno			
	Ayaviri	Taraco	Paucarcolla	Acora
Ingesta de forraje, kg MS	13.37	13.24	12.48	10.73
Ingesta de concentrado, kg MS	1.08	0.00	1.10	0.92
Energía digestible de la dieta, %	59.13	58.18	59.03	58.66
Ingesta total, kg MS/vaca promedio/día	14.45	13.24	13.58	11.65

Con respecto a la energía digestible de las dietas de los distritos ($58.75 \pm 0.43\%$). Se observó que es relativamente baja a comparación a la energía digestible de la ración para vacas lecheras reportada por Van (2014), siendo esta de 66.8%, asimismo, el porcentaje de inclusión de concentrado es 22,2% de la MS consumida/vaca/día a diferencia del trabajo actual que reportó una inclusión menos del 6% de la MS consumida por vaca por día (Cuadro 9). Al respecto, se ha encontrado que con dietas altamente fibrosas y de baja digestibilidad se aumentan las emisiones de metano y se genera una gran pérdida de energía por esta vía. Asimismo, la producción de metano presenta una correlación negativa con la disponibilidad de energía proveniente de los alimentos, por lo tanto, una reducción en la producción de metano a través del uso de aditivos para alimentos y de la canalización de hidrógeno hacia los ácidos grasos de cadena corta y masa microbial, es deseable siempre y cuando éstos no afecten la productividad animal, según lo indicado por Lila *et al.* (2003).

Cuadro 9: Resumen de los valores medios, máximos y mínimos sobre la alimentación ajustada de los hatos lecheros estudiados

	Unidad	Promedio	CV	Máximo	Mínimo
Heno de alfalfa	kg MS/vaca/día	1.588	27.98%	2.157	1.192
Heno de avena, cebada y otros	kg MS/vaca/día	10.865	9.33%	11.954	9.537
Forraje en la dieta	%	94.132	4.17%	100	91.898
Concentrado por vaca	kg MS/vaca/día	0.775	67.47%	1.1	0
Concentrado en la dieta	%	5.868	66.82%	8.102	0
Consumo de MS	kg MS/vaca/día	13.228	8.85%	14.451	11.650

La variación en el consumo de alimento, en particular en la inclusión de concentrado en la dieta fue alta (CV = 67.5%), con un promedio de 0.775 ± 0.5 kg MS/vaca/día, representando una proporción de 5.93 ± 4.1 % del consumo diario de materia seca por vaca/día, esto debido a que los ganaderos del distrito de Taraco no incluían alimento balanceado en la dieta de sus vacas, al ser este muy limitado y representar un costo adicional para ellos, según lo mencionado en la entrevista.

4.3.2 Emisiones de GEI en los diferentes procesos

Las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O convertidas por su potencial de calentamiento global correspondiente a kg CO₂-eq de cada proceso de los hatos lecheros extensivos se muestran en el Cuadro 10.

Se observa que el proceso de producción de forrajes emite GEI en menor proporción a diferencia de las emisiones por manejo del ganado, de estiércol y de la producción de concentrado. Por otro lado, el proceso biológico, fermentación entérica, emite GEI en mayor proporción en los cuatro distritos evaluados. Las emisiones de metano tienen un origen tanto por fermentación entérica como por estiércol (Anexo 12). Las emisiones de metano entérico producidas por vaca están relacionadas con la cantidad y calidad dietética, mientras que el metano del estiércol se relaciona principalmente con las prácticas de su manejo (almacenamiento sólido, pasturas y quema de combustible), esto es interesante para tener una idea de dónde se pueden implementar las mejoras.

El distrito que produce mayores GEI por animal anualmente es Ayaviri (3951.85 kg CO₂-eq vaca/año), mientras que el distrito de Acora es el que menos gases produce (3189.22 kg CO₂-eq vaca/año), en el Cuadro 8 se observa la energía digestible de la dieta para Ayaviri 59.13%, siendo superior al de las otras dietas (Paucarcolla=59.03%, Taraco=58.18%, Ácora=58.66%). La ingesta de EB utilizada para estimar las emisiones por fermentación entérica se basa en las necesidades netas de energía de la vaca, que a su vez está determinada por el peso medio de una vaca adulta, valor nutricional de su dieta y la producción media de leche. En el distrito de Ayaviri, el peso promedio de una vaca adulta es ligeramente mayor al de los otros distritos (390.6 ± 7.3 kg) (Cuadro 6) junto a un bajo valor nutricional de su dieta (Anexo 9) según la IPCC (2019) al tener una ED \leq 62% y FDN $>$ 38%. Los GEI emitidos en kg CO₂-eq vaca/año por la producción de forrajes son mayores en los distritos de Ayaviri y Paucarcolla, teniendo en cuenta que el análisis fue hecho de acuerdo a la ración ajustada del hato lechero, considerando la superficie agrícola con la que cuenta cada ganadero. Asimismo, las dietas suministradas al ganadero tienen como forraje principal a la avena forrajera, el cual es un cultivo que se siembra anualmente, empleando maquinaria. En los Anexo 12,13 y 14 se resumen las emisiones de cada proceso a nivel de los hatos lecheros de los distritos de la región Puno.

Cuadro 10: Emisiones de los procesos en los distritos de la región Puno, sistemas con alfalfa dormante. PCG: CH₄=28, N₂O=265 de acuerdo al IPCC (2013)

	kg CO ₂ -eq vaca/año			
	Ayaviri	Taraco	Ácora	Paucarcolla
Fermentación Entérica	3000.19	2720.45	2410.67	2804.15
Metano por gestión estiércol	149.21	148.58	127.28	141.08
N ₂ O directo por gestión estiércol	198.70	149.23	169.23	152.53
N ₂ O indirecto por volatilización	32.56	23.40	26.53	24.99
N ₂ O indirecto por lixiviación	2.39	1.72	1.95	1.83
Emisiones de producción de forraje	238.22	227.29	169.92	230.39
Emisiones de producción de concentrado	330.58	0.00	283.65	333.73
TOTAL, GEI kg CO₂-eq vaca/año	3951.85	3270.66	3189.22	3688.71

Las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O provenientes de los procesos involucrados en el sistema estudiado se han expresado en kg CO₂-eq vaca/día para poder compararlo con el estudio realizado en el Valle de Mantaro en Perú sobre la HC por Van (2014), que reporta 12.4 kg CO₂-eq vaca/día para una granja extensiva, de los cuales 9.5 kg CO₂-eq vaca/día corresponden por fermentación entérica, 1.9 kg CO₂-eq vaca/día por manejo de estiércol y 0.9 kg CO₂-eq vaca/día por producción de alimentos, mientras que el estudio actual muestra un valor inferior de 9.66 ± 1 kg CO₂-eq vaca/día, donde 7.49 ± 0.7 kg CO₂-eq vaca/día, 0.93 ± 0.1 kg CO₂-eq vaca/día y 1.24 ± 0.5 kg CO₂-eq vaca/día, por FE, manejo de estiércol, producción de alimentos, respectivamente. Es importante indicar que las emisiones calculadas han sido valoradas sobre la categoría de ganado lechero maduro.

En otras consideraciones, para el caso de las emisiones por producción de alimentos principalmente en relación a la producción de concentrado, se debe recalcar que se está incluyendo las emisiones por cambios de uso de la tierra (LUC) siguiendo las pautas de la Federación Internacional de lechería (IDF). Además, es posible que exista una

sobrestimación por parte del programa utilizado (FeedPrint), debido que como parte de las entradas para los cultivos puede incluir la huella de carbono de fertilizantes.

En consideración a las diferencias en el manejo de estiércol, en los sistemas extensivos suele manejarse principalmente como sólido o es depositado sobre pasturas, por lo que, tiende a producir menos CH₄ al descomponerse bajo condiciones más, sin embargo es necesario tener en consideración el clima de la zona de estudio, debido que los valores de MCF están de acuerdo a la temperatura para el sistema en estudio. La temperatura promedio de Puno oscila de 2.8°C - 15.4°C (SENAMHI 2020), es decir, tiene un clima frío, por lo tanto, los MCF considerados son de 2% para almacenamiento de sólidos, 0.47% para pasturas y praderas y 10% para quema para combustible, a diferencia del estudio de Van, donde el clima del Valle Mantaro es cálido (pasturas, almacenamiento de sólidos, MCF=1.5 y 4%, respectivamente).

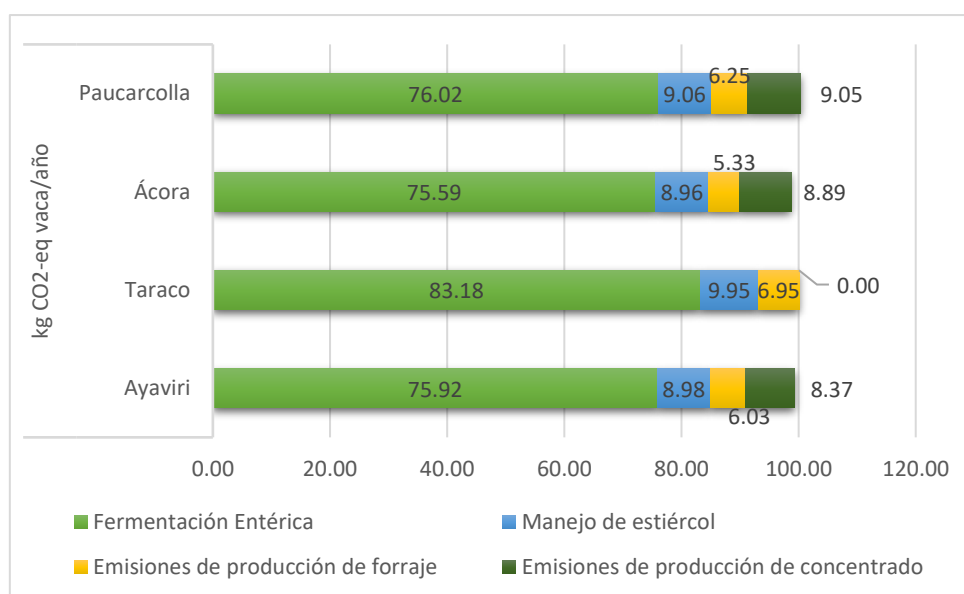


Figura 5: Proporción de las emisiones provenientes de los procesos en los distritos de la región Puno, sistemas con alfalfa dormante

La Figura 5 muestra la proporción de cada fuente de emisión expresadas en porcentaje del total de GEI por distrito. En todos los distritos se puede observar que la fermentación entérica es la que realiza el mayor aporte de emisiones, contribuyendo con más de la mitad del total de las emisiones de GEI (Paucarcolla=76.02%, Taraco=83.18%, Ácora=75.59%, Ayaviri=75.92%), teniendo en cuenta que el porcentaje de forraje en la

mayoría de las dietas corresponde a más del 90% (Taraco al 100%) y una digestibilidad dietética de $58.75 \pm 0.4\%$.

En el presente estudio se encontró que las principales fuentes de emisiones de GEI son debido a la fermentación entérica ($78.2 \pm 3.7\%$), seguido del manejo de las excretas ($9.2 \pm 0.5\%$), de la producción de concentrado ($6.7 \pm 4.6\%$) y forrajes ($6.0 \pm 0.6\%$). En un contexto similar, un estudio realizado en Asturias por Salcedo (2015), a pesar de tener diferencias en la metodología, teniendo como unidad funcional 1 kg de leche corregida por grasa y utilizar un PCG de 21 para CO₂ y 310 para N₂O del IPCC de 1996, se analizaron 15 explotaciones con diferentes tipologías de alimentación, teniendo como resultado una tendencia similar a nuestro estudio con respecto a principales fuentes de emisiones de GEI, donde nos reporta que las mayores emisiones son debido a la fermentación entérica ($44,8 \pm 3,5\%$), al manejo de las excretas ($21,5 \pm 2,6\%$) y la compra de alimentos ($19,6 \pm 3,6\%$). Esto podría deberse, porque el metano es producido fundamentalmente por microorganismos del rumen durante la fermentación anaeróbica de carbohidratos solubles y carbohidratos estructurales, siendo estos últimos preponderantes en dietas basadas en forrajes (Kurihara *et al.* 1999). El metano se produce en el rumen a partir del hidrógeno liberado en la fermentación de los carbohidratos. El ácido acético formado en el rumen libera hidrógeno, mientras que la formación de propionato lo consume, lo que explica la relación positiva entre la producción de metano y la relación acetato/propionato producidos en el rumen (Johnson y Johnson 1995). El hidrógeno es, por tanto, un elemento limitante en la producción de metano. Por ello, si deseamos modificar la producción de CH₄ ruminal, se debe tener en cuenta una alternativa de remoción de hidrógeno, de manera que no se vea perjudicada la eficiencia del sistema digestivo (Clark *et al.* 2011). Asimismo, los alimentos fibrosos de baja digestibilidad y a un ritmo de paso lento a través del rumen favorecen las vías bioquímicas que forman hidrógeno, elevando el potencial en la formación de CH₄. Por el contrario, los alimentos energéticos suministrados limitadamente, como el concentrado, favorecen una mayor síntesis en el rumen de propiónico, aminorando la síntesis de CH₄ (Salcedo 2015). Por cuanto, manipular la dieta hacia la formación de propionato contribuye a reducir la formación de CH₄. No obstante, su producción está relacionada con el tipo y consumo de alimento (Ellis *et al.* 2008). De igual manera, diversos estudios han concordado con dicha tendencia, indicando que el mayor impacto de los sistemas extensos en el medio ambiente es debido a la fermentación entérica del ganado (Bartl *et al.* 2011, Lizarralde 2013, Van

2014, Rotz y Thoma 2017, Flysjö *et al.* 2011). Asimismo, recientemente Mitloehner en CLEAR CENTER (2020) nos indica que el metano biogénico de los animales es un contaminante climático de corta duración (12 años) y un gas de flujo hecho de carbono atmosférico que ha estado circulando por la atmósfera desde que comenzó la vida, debido que, como parte del ciclo del carbono biogénico, las plantas absorben CO₂ y, a través del proceso de fotosíntesis, aprovechan la energía del sol para producir carbohidratos como la celulosa, siendo entonces un carbono reciclado. Teniendo en cuenta que, si aumentan las emisiones de CH₄, el calentamiento aumentará, si es constante el calentamiento será neutral y si se reduce el calentamiento dejará de serlo para ser un posible enfriamiento, Por lo tanto, el metano puede ser parte de la solución climática.

4.3.3 Huella de carbono de acuerdo a la unidad funcional

La huella de carbono de la producción de leche en un sistema que utiliza alfalfa dormante como parte de su dieta de los distritos de la región Puno se muestran en el Cuadro 11. Las emisiones totales (kg CO₂-eq vaca/año) se han distribuido entre la leche y la carne, asignando a la producción de leche un 96%, en el Cuadro 11 se muestran las emisiones ya asignadas para dicho principal co-producto.

Tener en cuenta que, los resultados de este estudio, huella de carbono de la producción de leche, con un sistema de alimentación que incluye alfalfa dormante en su dieta, en diferentes distritos de la región Puno, son basados en la información de ganaderos que, si bien cuentan con un número pequeño de ganado, representan más del 80% de las unidades agropecuarias a nivel nacional. Asimismo, las muestras obtenidas tanto de leche como de los alimentos fueron tomadas una vez en un determinado momento de mediados a finales de la temporada seca. De igual manera, hay que recalcar que se tomaron decisiones en base a los datos recopilados, recurriendo en algunos puntos a información secundaria, como la asignación de co-productos y asumiendo valores obtenidos de las muestras para todo el año. Por otro lado, debe mencionarse que la comparación de los resultados con otros estudios se ha considerado con precaución debido a las diferencias en la metodología (unidad funcional, factor de caracterización del PCG, método de asignación, unidad de emisión) y considerando que las emisiones calculadas han sido valoradas sobre la categoría de ganado lechero maduro.

Cuadro 11: Impacto ambiental por kg LCGP de las emisiones. Asignación de co-productos de 96% de leche: 4% de carne.

	Distritos de la región Puno			
	Ayaviri	Taraco	Ácora	Paucarcolla
Vacas lecheras	8	3	3	6
Producción de leche (kg LCGP/vaca/día)	11.34	8.90	6.82	9.83
Producción de leche (ton LCGP/hato/año)	33.13	9.75	7.46	21.53
Emisiones de kg CO ₂ -eq vaca/año	3793.78	3139.83	3061.65	3541.16
Huella de Carbono kg CO ₂ -eq/ton LCGP	916.22	966.51	1230.56	987.02
Huella de Carbono kg CO₂-eq/LCGP	0.9162	0.9665	1.2306	0.9870

Se observa que, el distrito de Acora presenta la mayor huella de carbono (HC= 1.23 kg CO₂-eq/LCGP) dentro de los distritos analizados, una digestibilidad dietética de 58.66% y una producción de leche de 8.9 kg LCGP/vaca/día, sin embargo, a nivel de hato lechero emite una menor huella de carbono al tener un número de reducido de vacas lecheras y en general cabezas de ganado. Por otro lado, el distrito de Ayaviri a pesar de presentar la mayor emisión de kg CO₂-eq vaca/año tiene la menor HC (0.92 kg CO₂-eq/LCGP), al producir una mayor producción de leche por parte del hato lechero.

En consideración a la huella de carbono promedio para la base de datos analizada fue 1.03 ± 0.14 kg CO₂-eq/ LCGP. Este valor de la huella de carbono de la leche calculada se encuentra en un rango ligeramente más elevado que la HC presentada en otros estudios de sistemas extensivos (Van 2014, Lizarralde 2013, Flysjö *et al.* 2011). Como es el caso de Van (2014), en un estudio comparativo realizado en el Valle de Mantaro en Perú entre granjas lecheras extensivas e intensivas, calculando una huella de carbono promedio de 0.952 kg CO₂-eq/ LCGP con PCG de CH₄=25 de acuerdo con el IPCC del 2007 y de 1.226 kg CO₂-eq/ LCGP con PCG de CH₄=34 de acuerdo con el IPCC del 2013. Teniendo en cuenta que, el potencial de calentamiento global se define como la contribución a la absorción atmosférica de radiación infrarroja por gases derivados antropogénicamente

como CH₄, CO₂ y N₂O, lo que lleva a un aumento de la temperatura global (Harrison 2001) durante un período de tiempo determinado (IDF 2015). La HC es menor a la del sistema evaluado en ambos casos de factores de caracterización de PCG, esto podría asignarse al nivel muy bajo de producción de leche promedio de las vacas bajo el sistema lechero de la región de Puno, 8.46 kg de leche/vaca/día frente a 12.2 kg de leche/vaca/día, por bajo consumo de forrajes de baja digestibilidad y una mayor inclusión de concentrado en sus dietas, 0.775 ± 0.5 kg MS/vaca/día frente a 1.6 kg MS/vaca/día. Asimismo, los valores utilizados por falta de información local en las emisiones de óxido nitroso proveniente de la actividad ganadera y del suelo podrían estar generando una sobrestimación o subestimación del valor final de la huella de carbono.

Por otro lado, Velarde-Guillén *et al.* (2021) indican que la huella de carbono de la producción de leche de América Latina observada en su trabajo, mostró un rango de 1,73 a 2,96 kg CO₂-eq/kg LCGP, observándose un rango superior al del estudio actual, esto puede deberse a que el 60% de las granjas analizadas se dieron en zonas de clima tropical. De manera similar, Gómez (2018) reporta un promedio de HC de la leche a la puerta de la finca fue de 1,43 ± 0,31 kg de CO₂-eq por kg de LCGP con variaciones entre 0,86 y 1,98 kg CO₂eq/kg LCGP, si bien el desempeño productivo de los animales fueron similares, el nivel tecnológico de las fincas del estudio es mayor al reportado en el estudio actual (ordeño manual, sin uso de fertilizantes ni pesticidas).

El estudio ACV realizado por Bartl *et al.* (2011) descrito anteriormente, realiza un enfoque parcialmente igual al actual, teniendo en cuenta que el resultado no es comparable con el estudio, se menciona por ser uno de los pocos estudios realizado en Perú. Este autor reporta una HC (reconocido como Potencial de Calentamiento Global en su investigación) muy alta de 13.780 kg CO₂-eq/ECM para el sistema extensiva, en primera instancia podría deberse a que utilizó un factor de caracterización de PCG para un horizonte de 20 años (CH₄=72, N₂O=289), sin embargo, podría asignarse principalmente al nivel muy bajo de producción de leche de las vacas en el sistema lechero extensivo en las laderas (2,57 kg de leche).

Asimismo, Lizarralde (2013), realizó un análisis de relación entre la huella de carbono y las prácticas de manejo en 24 granjas o tambos lecheros en Uruguay, ha utilizado una metodología similar al estudio actual, basándose en la guía del IDF y según el IPCC (2006), obteniendo resultados de la huella de carbono promedio de, 0,99 kg CO₂-eq/kg

LCGP, con una variación de $\pm 10\%$, siendo menor a la indicada en la investigación (1.03 ± 0.14 kg CO₂-eq/LCGP), sin embargo, Lizarralde (2013) utilizó una asignación del 87% para leche, haciéndolo no comparable con el estudio. Por ello, para realizar una comparación más cercana de las huellas de carbono promedio se utilizará el mismo valor de asignación. El valor promedio obtenido de los 16 distritos de la región Puno analizados fue 0.93 ± 0.13 kg CO₂-eq/ LCGP, el cual es inferior al valor reportado para los tambos de Uruguay. Es importante resaltar que las emisiones provienen del ganado productivo y de reposición a diferencia del actual que solo se centra en el primero. Cabe resaltar que, los tambos analizados por Lizarralde no fueron seleccionados de manera aleatoria, representando tambos lecheros con medianas producciones de leche (5672 kg leche/vaca) y con instalaciones tecnificadas, lo cual podría explicar su huella de carbono.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.4.1 Correlación

La correlación de Pearson entre las variables, huella de carbono y producción de leche LCGP, consumo de alfalfa (henificado) y energía digestible de la dieta se muestran en el Cuadro 12. Se observa que existe una correlación moderada alta negativa entre la huella de carbono y la producción de LCGP de $r = - 0,580$ con un $p < 0,05$ siendo estadísticamente significativo, asimismo se muestra una correlación más alta entre la huella de carbono con la consumo de alfalfa dormante ($r = - 0,697$ con un $p < 0,05$). Sin embargo, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la asociación entre las variables huella de carbono y energía digestible de la dieta, al mostrar un valor de r de $- 0.205$ con un $p > 0,05$. Los resultados demuestran la correlación entre la variable HC y las variables consumo de alfalfa y producción de LCGP, donde los distritos de Ayaviri y Paucarcolla presentan las menores huellas 0.92 kg CO₂-eq/LCGP y 0.99 kg CO₂-eq/LCGP respectivamente, mayor inclusión del forraje alfalfa en su dieta con 2.15 kg MS $1,72$ respectivamente frente a un promedio de 1.59 ± 0.4 kg MS y una mayor producción 11.34 kg LCGP/vaca/día en Ayaviri y de 9.83 kg LCGP/vaca/día en Paucarcolla. Lizarralde (2013), nos reporta una relación más fuerte ($r = - 0.81$ con un $p < 0.05$), esto podría deberse a que el coeficiente de correlación de Pearson es muy sensible a los datos extremos y los coeficientes de variación tanto de la producción de leche como de la HC superan el 20%.

Cuadro 12: Coeficiente de correlación de Pearson y significancia para variables de interés del estudio

	HC kg CO ₂ -eq/LCGP	Producción de LCGP	Consumo de alfalfa	Energía digestible de la dieta
HC kg CO ₂ -eq/LCGP		p<0.05	p<0.05	n.s
Producción de LCGP	-0.580		p<0.05	n.s
Consumo de alfalfa	-0.697	0.587		p<0.05
Energía digestible de la dieta	-0.205	0.356	0.809	

*P<0.05: estadísticamente significativo, n.s: no significativo

4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el Cuadro 13 se observa un resumen de los análisis de sensibilidad realizados frente a un cambio en el porcentaje de inclusión del heno de alfalfa y en la producción de leche (Anexo 15).

Cuadro 13: Resumen de los escenarios posibles sobre el aumento de inclusión de alfalfa dormante en la dieta para el distrito de Ayaviri, región Puno

	Inclusión de Alfalfa				
	Base (2.5 kg)	+0.5 kg	+1 kg	+1.5 kg	2+ kg
Fermentación entérica	3000.19	3004.93	3006.67	3008.42	3010.16
LCGP ton/vaca/año	4.14	4.223	4.306	4.388	4.471
Total kg CO ₂ eq vaca/año	3793.78	3798.33	3799.99	3801.67	3803.35
Huella de Carbono kg CO ₂ -eq/LCGP	0.92	0.90	0.88	0.87	0.85

El cuadro resumido de análisis de sensibilidad, muestra los posibles escenarios frente a cambios en el porcentaje de inclusión de alfalfa dormante en la dieta sobre las emisiones

por fermentación entérica, donde se tomó como referencia los datos del distrito de Ayaviri, el cual incluye en su dieta un 14.9% (2.5kg) de heno alfalfa, modificando a su vez el porcentaje de pastos naturales, este cambio se dio en un 17.9, 20.9, 23.9 y 26.9%, correspondiente a 0.5 kg adicional por escenario, teniendo como resultado un aumento de 0.22% de metano por FE al aumentar 1 kg más en su dieta y de 0.33% cuando este es de 2 kg, asimismo se observó que la EB aumentó, por lo que el aumento de emisiones por FE puede deberse a la estrecha relación con la ingesta de la energía bruta de la ración del animal. Posteriormente se utilizaron los escenarios posibles de FE para un análisis sobre la HC, modificando a la vez el nivel de producción de leche en un 2%,4%,6%,8%, teniendo en cuenta lo reportado por Cáritas del Perú, para esto se asumió que las emisiones de los procesos restantes no cambien. Los escenarios posibles respecto a la huella de carbono muestran una reducción de hasta un 7.54% de acuerdo al dato simulado de emisión por FE si se suministrara al animal 4.5 kg de alfalfa y de 2.23%, si este aumento fuera de 1 kg de alfalfa. Si bien con una mayor inclusión de alfalfa dormante en la dieta del animal puede aumentar las emisiones por FE, también puede aumentar la producción de leche al aumentar al valor nutricional de la dieta, dando oportunidad al animal de convertir energía del alimento en leche y en consecuencia una menor HC. En base a esta simulación, podemos seguir afirmando que las estrategias de mitigación deben enfocarse en la mejora del valor nutricional de las dietas, no solo por la contribución ambiental sino también productiva del animal y en consecuencia una mayor rentabilidad para el productor.

V. CONCLUSIONES

- La huella de carbono en un sistema que utiliza alfalfa dormante analizada fue 1.03 ± 0.14 kg CO₂-eq/ LCGP. El distrito de Ayaviri reportó una HC de 0.92 kg CO₂-eq/ LCGP, con una producción de leche (11.34 kg LCGP/vaca/día) superior al resto y una disponibilidad energética del 59.13%. El distrito de Acora reportó la HC más alta (1.23 kg CO₂-eq/LCGP), teniendo una baja producción de leche de 6.82 kg LCGP/vaca/día, pero si una digestibilidad dietética similar a los demás distritos (58.66%). El coeficiente de correlación entre las variables HC y la producción de LCGP es de $r = - 0,580$ con $p < 0.05$, asimismo, la HC con la variable consumo de alfalfa muestra una correlación negativa moderada alta ($r = - 0.697$).
- El sistema de alimentación en la región de Puno se caracteriza por tener una dieta basada en forrajes (+90%), de un bajo valor nutricional (ED, 2430.97 ± 26.98 Kcal). En consecuencia, una alta emisión de metano por fermentación entérica (97.64 ± 8.7 kg CH₄/vaca/año).
- El mayor impacto de los sistemas extensivos en el medio ambiente es debido a la fermentación entérica del ganado ($78.2 \pm 3.7\%$), los alimentos fibrosos de baja digestibilidad favorecen las vías bioquímicas para la formación de hidrógeno, elevando el potencial en la formación de CH₄.

VI. RECOMENDACIONES

- Los resultados de este estudio sugieren que, se debe mejorar la calidad de la dieta, pudiendo ser mediante una mayor inclusión de alfalfa, y la productividad del animal considerando también la calidad genética; siendo posible reducir la huella de carbono de leche y al mismo tiempo mejorar los ingresos económicos del ganadero.
- Se recomienda realizar más investigaciones de huella de carbono o análisis de ciclos de vida completos en los diferentes sistemas y regiones a nivel nacional.
- Para realizar un estudio de huella de carbono se recomienda revisar la guía de la Federación Internacional de Lechería para tener una metodología con un enfoque común.
- Revisar minuciosamente los datos requeridos dentro del ciclo de vida del producto para tener una data 100 por ciento primaria.
- Poner a prueba opciones de mitigación, con un enfoque principal de reducir las emisiones por fermentación entérica (CH₄) en sistemas extensivos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROBANCO. 2012. Desarrollo ganadero en zonas altoandinas con la introducción del cultivo de alfalfa dormante de secano. Consultado el 5 nov 2018. Disponible en: https://www.agrobanco.com.pe/pdf_cpc/AlfalfaDormante.pdf

Agrónomos y Veterinarios Sin Fronteras (AVSF). 2010. Ganadería y cambio climático: Ir más allá de las ideas preconcebidas y reconocer el lugar específico de la ganadería campesina. Texto de referencia AVSF.

Argote, G. 2004. El Cultivo de Alfalfa, Instalación, Producción y Manejo. Puno: Boletín N° 01. INIA. Estación experimental Illpa. INIA. Boletín N° 01-2004. Puno-Perú.

Bartl, K., Gómez, C. and Nemecek, T. 2011. Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. Journal of Cleaner Production. Vol. 19, p. 1494-1505.

Bath, D.L.; Sumber, J.; King, J.; Berry, S.; Leonard, R.; Clerich, S. 1987. Composition of by-products and unusual feedstuffs. Feedstuffs, 58:32.

CARBON TRUST. 2013. Carbon footprint [En línea]. 20 mayo 2021. Disponible en: <http://www.carbontrust.com/resources/guides/carbon-footprinting-and-reporting/carbon-footprinting>

Cederberg, C., Mattsson, B. 2000. Life cycle assessment of milk production - a comparison of conventional and organic farming. Journal of Cleaner Production. Vol. 8, p. 49-60.

Cheng, G. 2017. Desarrollo de la cadena de lácteos en base a alfalfa dormante en la región altoandina: Medio de vida digno para poblaciones vulnerables. Cáritas del Perú. Consultado el 20 de nov 2018. Disponible en: <https://network.changemakers.com/challenge/creatingsharedvalue/entry/>

CLEAR CENTER. 2021. Methane has been the Achille's heel for cattle emissions, but it may be part of a climate solution. University of California, Davis. Disponible en:

<https://clear.ucdavis.edu/news/methane-has-been-achilles-heel-cattle-emissions-it-may-be-part-climate-solution>

Choque, J. 2002. Producción y Manejo de Especies Forrajeras. Puno: Sagitario.

Clark H, Kelliher F, Pinares-Patiño C. 2011. Reducing CH₄ Emissions from Grazing Ruminants in New Zealand: Challenges and Opportunities. Asian-Australasian Journal Animal Science. 24: 295-302.

De Boer, I.J.M. 2003. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. Livestock Production Science. Vol. 80, p. 69-77.

De Vries, M., De Boer, I.J.M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments. Livestock Science 128, p.1-11.

Del Prado, A. y Manzano, P. 2020. La ganadería y su contribución al cambio climático. BC3-Basque Centre for Climate Change. 37 p

Del Pozo, M. 1983. La Alfalfa su Cultivo y Aprovechamiento. Madrid: Mundi-Prensa. Madrid, España. 380 p.

DRA-Puno. 2018. Ganadería lechera altoandina: Sincronización de las características de la genética animal a las condiciones ecológicas. Nota de prensa. Consultado el 08 de nov 2018. Disponible en: <https://www.agropuno.gob.pe/ganaderia-lechera-altoandina-sincronizacion-de-las-caracteristicas-de-la-genetica-animal-a-las-condiciones-ecologicas/>

Ellis, J.L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Bannink, A., Odongo, N.E., McBride, B.W., France, J. (2008). Aspects of rumen microbiology central to mechanistic modelling of methane production in cattle. J. Agric. Sci. 146, p. 213-233.

EOI. 2016. Análisis de Ciclo de Vida. Master en Ingeniería y Gestión medioambiental. p. 43: 4-8.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2010. Animal Production and Health Division. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector. A Life Cycle Assessment. Roma, Italia. 94 p.

Flysjö A, Henriksson M, Cederberg C, Ledgard S, Englund JE. 2011. The impact of various parameters on the carbon footprint of milk production in New Zealand and Sweden. *Agricultural Systems*. 104 (6): p. 459-469.

Flores E. 1993. Applying the concept of feeding stations to the behavior of cattle grazing variable amounts of available forage. Master' Thesis. USA: Utah State University. 58 p.

Fong, W., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A. and Deng-Beck, C. 2020. Global Protocol for community scale greenhouse gas emission inventories. Greenhouse gas protocol. Disponible en: <https://ghgprotocol.org/>

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A., Tempio, G. 2013. Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), Roma.

Gómez, E. 2018. Impacto de las prácticas de manejo sobre la huella de carbono de la leche en los sistemas de producción bovina de la provincia de Ubaté. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.

GuinéE, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., De Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., and Udo De Haes, H.A. 2001. Levenscyclusanalyse: de ISO-normen uitgewerkt in een praktijkgerichte handleiding. Centrum voor Milieukunde – Universiteit Leiden, Nederland. p. 26

Harrison, R.M., 2001. In: *Pollution: Causes, Effects and Control*, fourth ed. Royal Society of Chemistry, Cambridge, Great Britain.

Haro, J., Gómez, C. 2018. Mitigación de emisiones provenientes de la ganadería en la región andina. Proyecto: Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la región andina dentro del contexto de cambio climático.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Universidad Nacional Agraria la Molina. – Lima: IICA.

IHOBE S.A. 2009. Análisis de ciclo de vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca Gobierno Vasco.

INEI. 2012. IV Censo Nacional Agropecuario 2012. Resultados definitivos.

INEI. 2015. Perú: Síntesis Estadística 2015. Lima. Setiembre.

INFOAGRO. 2004. Página virtual de información agrícola. Consultado el 15 de nov 2018. Disponible en: <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/alfalfa.htm>

International Dairy Federation (IDF). 2015. A common carbon footprint approach for the dairy sector. The IDF guide to standard life cycle assessment methodology. 479/2015. ISSN 0250- 5118.

International Organisation for Standardisation (ISO). 2006a. Environmental Management – Life Cycle Assessment: Principles and Framework (ISO 14040). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

International Organisation For Standardisation (ISO). 2006b. Environmental Management – Life Cycle Assessment: Principles and Framework (ISO 14044). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

IPCC. 2006. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.

IPCC. 2019. Emissions from livestock and manure management. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 10.

Johnson K.A., Johnson D.E. 1995. Methane emissions from cattle. *J Anim Sci.* 73: 2483-2492

Kurihara M, Magner T, Mccrabb H, Mccrabb G. 1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*; 81: 227-234.

León, J. 2017. Cáritas del Perú promovió la instalación de casi 90 mil hectáreas de alfalfa dormante. *Cáritas del Perú Transformando Vidas*. Consultado el 10 de nov 2018. Disponible en: http://www.caritas.org.pe/noticias_en_red23102017.html

Lila, Z.A, N. Mohammed, S. Kanda, T. Kamada and H. Itabashi. 2003. Effect of saponin on ruminal fermentation with particular reference to methane production in vitro. *J. Dairy Sci.* 86:3330–3336.

Lizarralde, C. 2013. Relación entre la huella de carbono y las prácticas de manejo en predios lecheros de Uruguay. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias Agrarias.

Mahecha, L. 2002. Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuaria* Vol. 15: 2.

Malpartida, E. 2000. Pastos Y Forrajes. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. Citado por Mamani 2016. Efecto de la frecuencia y altura de corte en la producción de alfalfa (*Medicago sativa l.*) en dos tipos de suelo en Coata – Puno.

Martínez, A. 2011. Valoración energética de alimentos. Asociación Iberoamericana de Zootecnia/Universidad de Córdoba. Consultado el 24 de nov 2021. Disponible en: http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/17_17_30_Valoracion_de_Alimentos.pdf

Meul, M., C. Ginneberge, C.E. Van Middelaar, I.J. De Boer, D. Fremaut, and G. Haesaert. 2012. Carbon footprint of five pig diets using three land use change accounting methods. *Livestock Science*. Vol. 149, p. 215-223.

MINAGRI. 2017. Diagnóstico de crianzas priorizadas para el plan ganadero 2017-2021. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. Primera Edición - enero 2017.

MINAN. 2021. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014. Mayo. Consultado el 22 de mayo 2021. Disponible en: <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2016/>

Mckeon, G. M., Stone, G. S., Syktus, J. I., Carter, J. O., Flood, N. R., Ahrens, D. G., Bruget, D. N., Chilcott, C. R., Cobon, D. H., Cowley, R. A., Crimp, S. J., Fraser, G. W., Howden, S. M., Johnston, P.W., Ryan, J. G., Stokes, C. J., Day, K. A. 2009. Climate change impacts on northern Australian rangeland livestock carrying capacity: A review of issues. *Rangeland Journal* 31(1): 1-29.

National Research Council. 1989. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 6th edition Washington, D.C. National Academy Press. 215 p

National Research Council. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. Seventh Revised Edition. 2001. Washington, DC: The National Academies Press. 381 p (13)

Olarte, S. Y Olarte, C.U. 2013. Artículo: La producción de leche orgánica en Puno: una alternativa de desarrollo sostenible. *Revista Mundo Agrario*, 13(26). En Memoria Académica.

Paredes, R., Escobar-Mamani, F. 2018. El rol de la ganadería y la pobreza en el área rural de Puno. *Rev. Investig. Altoandin.*; 20(1): 39 – 60.

Ramos, E. 2016. Crece la producción de leche en Puno y Cusco, ahora el reto es estandarizar una industria láctea. Agencia Agraria de Noticias. Consultado el 10 de nov 2018. Disponible en: <http://agraria.pe/noticias/crece-la-produccion-de-leche-en-puno-y-cusco-ahora-12704>

Ribeiro-Filho, H.M., Civiero, M. and Kebreab, E., 2020. Potential to reduce greenhouse gas emissions through different dairy cattle systems in subtropical regions. *Plos one*, 15(6), e0234687.

Rivera, R. 2016. Caracterización de los sistemas de producción de leche con alfalfa dormante (*Medicago sativa L.*) en la región Puno. Tesis para optar el título de Ingeniero Zootecnista.

Rotz, C. A., and G. Thoma. 2017. Assessing carbon footprints of dairy production systems. Pages 3–18 in *Large Dairy Herd Management*. 3rd ed. D. K. Beede, ed. American Dairy Science Association, Champaign, IL.

Salcedo, G. 2015. DairyCant: a model for the reduction of dairy farm greenhouse gas emissions. *Advances in Animal Biosciences* 6: p. 26–28.

SENAMHI. Información del tiempo y clima anual. Consultado el 12 de nov 2020 Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-puno>

SIEA. 2018. IV Censo Nacional Agropecuario 2012. Puno. Consultado el 16 de nov 2018. Disponible en: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/?q=iv-censo-nacional-agropecuario-2012/iv-cenagro-2012>

Silva, P. 2014. Introducción de alfalfas dormantes incrementan producción de leche en las zonas altoandinas. Cáritas del Perú. Boletín Cáritas en Acción N° 20. Consultado el 10 de nov 2018. Disponible en: http://www.caritas.org.pe/boletin20_2014/enfoque5.html

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T. D., Castel, V., Rosales M., M. and Haan, C. 2006. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

O'Brien, D., Shalloo, L., Patton, J., Buckley, F., Grainger, C. and Wallace, M. 2012. A life cycle assessment of seasonal grass-based and confinement dairy farms. *Agricultural Systems*. Vol. 107, p. 33-46.

Thornton P. K., Gerber P. 2010. Climate change and the growth of the livestock sector in developing countries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15, p. 169-184.

Thomassen M. A., Dalgaard R., Heijungs R., and De Boer I. 2008. Attributional and consequential LCA of milk production. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 13, p. 339-349.

Torres, H. 2011. El cultivo de la alfalfa dormante en la sierra altoandina. Cáritas del Perú. Consultado el 10 de nov 2018. Disponible en: http://www.caritas.org.pe/boletin11_2011/enfoque4.html

Van H. 2014. Carbon Footprint of milk produced in extensive and intensive dairy production systems in Peru and potential for mitigation through diet optimization. Faculty of Bioscience Engineering. Master's Thesis . Universiteit Gent.

Velarde-Guillén, J., Arndt, C. and Gomez, C. 2021. Milk Carbon Footprint in Latin American Livestock: effect of dairy system, breed and climate. *Research Square*.

Vellinga, T.H., Blonk, H., Marinussen, M., Van Zeist, W., De Boer, I. and Starman, D. 2013. Methodology used in FeedPrint: a tool quantifying greenhouse gas emissions of feed production and utilization. *Wageningen UR Livestock Research*. 22-28. p. 71-78

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Información recolectada sobre la estructura del hato lechero

Distrito	Productor	N° Vacas productoras	N° Vacas secas	N° Vaquillas	N° Terneros
Ayaviri	1	15	5	4	3
	2	6	5	2	4
	3	6	1	1	3
	4	5	4	2	5
Taraco	1	3	5	1	2
	2	3	1	1	5
	3	2	1	1	3
	4	2	1	1	3
Ácora	1	4	2	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	2	1	4
	4	2	2	1	5
Paucarcolla	1	3	1	1	2
	2	8	1	3	5
	3	6	1	1	2
	4	4	1	1	2

Anexos 2. Pesos de los animales en estudio, pesaje con cinta bovinométrica

Distrito	Productor	Peso vaca adulta, kg	Peso ternero al nacimiento*, kg
Ayaviri	1	398	38.17
	2	392	-
	4	392	-
	5	380.5	33.74
Taraco	2	398	-
	3	386	-
	4	375	28.03
	5	375	-
Ácora	1	398	29.3
	2	380.5	28.7
	3	375	-
	4	375	-
Paucarcolla	1	392	-
	3	398	34.25
	4	386	-
	5	380.5	-

*Los animales pesados tenían entre 2-7 días de nacidos. No todos los distritos contaban con terneras con menos de una semana de nacida.

Anexo3. Cuadro resumen para obtener leche corregida por grasa y proteína

Descripción de la muestra	Grasa %	Prot %	Producción de leche, kg/vaca/año	Producción de leche diaria/vaca	LCGP, kg/año
TES NUT AYAVIRI 1	4.73	3.59	5651.67	15.48	6283.99
TES NUT AYAVIRI 2	4.52	3.55	2770.00	7.59	3000.00
TES NUT AYAVIRI 3	5.69	4.16	2933.33	8.04	3736.51
TES NUT AYAVIRI 4	5.15	3.54	3055.00	8.37	3542.25
TES NUT TARACO 1	4.95	4.46	2467.50	6.76	2976.71
TES NUT TARACO 2	4.45	3.19	2773.33	7.60	2902.33
TES NUT TARACO 3	4.17	4.39	3237.50	8.87	3578.43
TES NUT TARACO 4	4.74	3.89	3112.50	8.53	3537.01
TES NUT ACORA 1	3.8	4.41	2320.00	6.36	2462.67
TES NUT ACORA 2	4.33	4.26	2200.00	6.03	2452.63
TES NUT ACORA 4	4.16	3.91	2700.00	7.40	2880.45
TES NUT ACORA 6	3.1	3.63	2356.25	6.46	2156.32
TES NUT PAUCAR 1	3.7	4.06	2725.00	7.47	2785.16
TES NUT PAUCAR 2	3.83	3.64	3644.37	9.98	3664.13
TES NUT PAUCAR 3	4.8	3.8	3950.00	10.82	4490.20
TES NUT PAUCAR 4	3.62	3.63	3485.00	9.55	3411.47

Anexo 4. Fórmulas para calcular los requerimientos de EN de una vaca

Requerimientos de EN para vacas según IPCC 2019

Ecuación 1: Requerimiento de EN para mantenimiento

$$NE_m = Cf_i * (peso)^{0.75}$$

Ecuación 2: Requerimiento de EN para actividad

$$NE_a = C_a * NE_a$$

Ecuación 3: Requerimiento de EN para crecimiento

$$NE_g = 22.02 * \left(\frac{BW}{C * MW} \right)^{0.75} * WG^{1.097}$$

Ecuación 4: Requerimiento de EN para lactancia

$$NE_l = Leche * (1.47 + 0.40 * grasa)$$

Ecuación 5: Requerimiento de EN para preñez

$$NE_p = C_{preñez} * NE_m$$

Ecuación 6: Requerimiento total de EN

$$NE_{Total} = EN_M + NE_a + EN_g + EN_l + (EN_p * \left(\frac{Partos_T - Partos_H}{vacas lecheras}\right))$$

Donde:

NE_m = energía neta requerida por el animal para su mantenimiento, MJ día-1

C_{fi} = coeficiente que varía para cada categoría de animales (valor=0.386)

Peso = peso vivo del animal, kg.

NE_a = energía neta para la actividad animal, MJ día-1

Ca = coeficiente correspondiente a la situación alimentaria del animal (Valor=0.17)

NE_g = energía neta para el crecimiento, MJ día-1

BW = peso corporal vivo promedio (BW) de los animales de la población, kg

C = es un coeficiente con un valor de 0,8 para hembras, 1,0 para castrados y 1,2 para toros (NRC, 1996)

MW = peso corporal vivo y maduro de una hembra adulta en condición corporal moderada, kg

WG = aumento de peso diario promedio de los animales de la población, kg día-1

NE_l = energía neta para lactancia, MJ día-1

Leche = cantidad de leche producida, kg de leche día-1

Grasa = contenido graso de la leche, % por peso

NE_p = energía neta para la preñez, MJ día-1

C_{preñez} = coeficiente de preñez (valor=0.10)

NE_m = energía neta requerida por el animal para su mantenimiento, MJ día-1

NETot = Necesidades energéticas netas diarias totales para el ganado

Partos_T = número de partos en total

Partos_H = número de partos de vaquillas

Vacas lecheras = número de vacas lecheras

Anexo 5. Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Ayaviri en estudio

	AYAVIRI				
	PASTURAS	HENO ALFALFA	HENO AVENA	[CON]	HENO CEBADA
FDN, %	62.57	42.58	47.72	18.62	49.23
DIG. IN VITRO VER. MS, %	49.16	73.33	62.66	85.37	42.25
HUMEDAD, %	9.36	9.335	10.815	9.64	11.52
PROTEÍNA, %	4.5	17.45	6.665	18.45	3.68
GRASA, %	2.54	1.675	1.52	7.86	0.97
FIBRA, %	22.73	22.06	24.61	4.87	26.57
CENIZA, %	5.75	7.115	4.535	5.75	3.69
ELN, %	55.12	42.365	51.855	53.43	53.57
NDT MS, %	56.0533	55.3727	53.8190	71.3870	52.2713
ED, Mcal/kg	2.471	2.441	2.373	3.147	2.305
EB, Mcal/kg	4.154	4.180	4.117	4.531	4.068
EM, Mcal/kg	2.046	2.016	1.947	2.729	1.878
EN _l , Mcal/kg	1.253	1.237	1.199	1.629	1.161
EN _m , Mcal/kg	1.336	1.316	1.271	1.780	1.226
MS, %	90.64	90.665	89.185	90.36	88.48
Importancia	0.298	0.149	0.328	0.075	0.149

Anexo 6. Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Taraco en estudio

	TARACO				
	HENO HABAS	HENO CEBADA	PASTURAS	HENO ALFALFA	HENO AVENA
FDN, %	47.90	49.23	62.57	44.41	46.34
DIG. IN VITRO VER. MS, %	35.63	42.25	49.16	75.53	67.49
HUMEDAD, %	10.76	11.52	9.36	9.7	11.38
PROTEÍNA, %	8.14	3.68	4.5	19.26	7.58
GRASA, %	0.53	0.97	2.54	1.26	0.96
FIBRA, %	34.98	26.57	22.73	23.1	21.08
CENIZA, %	3.45	3.69	5.75	6.71	4.78
ELN, %	42.14	53.57	55.12	39.97	54.22
NDT MS, %	48.2586	52.2713	56.0533	54.9211	55.0264
ED, Mcal/kg	2.128	2.305	2.471	2.421	2.426
EB, Mcal/kg	4.138	4.068	4.154	4.181	4.061
EM, Mcal/kg	1.699	1.878	2.046	1.996	2.000
ENI, Mcal/kg	1.062	1.161	1.253	1.226	1.228
ENm, Mcal/kg	1.110	1.226	1.336	1.303	1.306
MS, %	89.24	88.48	90.64	90.3	88.62
Importancia	0.097	0.161	0.323	0.097	0.323

Anexo 7. Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Paucarcolla en estudio

	PAUCARCOLLA				
	HENO AVENA	HENO CEBADA	PASTURAS	HENO ALFALFA	[CON]
FDN, %	46.66	49.23	62.57	47.72	25.58
DIG. IN VITRO VER. MS, %	67.93	42.25	49.16	71.57	81.59
HUMEDAD, %	11.36	11.52	9.36	8.88	8.46
PROTEÍNA, %	7.18	3.68	4.5	18.69	15.76
GRASA, %	1.49	0.97	2.54	1.4	8.76
FIBRA, %	23.53	26.57	22.73	23.22	6.86
CENIZA, %	6.19	3.69	5.75	7.18	8.07
ELN, %	50.25	53.57	55.12	40.63	52.09
NDT MS, %	52.0785	52.2713	56.0533	55.1818	69.2271
ED, Mcal/kg	2.296	2.305	2.471	2.433	3.052
EB, Mcal/kg	4.017	4.068	4.154	4.198	4.492
EM, Mcal/kg	1.869	1.878	2.046	2.007	2.633
ENI, Mcal/kg	1.156	1.161	1.253	1.232	1.576
ENm, Mcal/kg	1.220	1.226	1.336	1.310	1.718
MS, %	88.64	88.48	90.64	91.12	91.54
Importancia	0.312	0.156	0.312	0.125	0.095

Anexo 8. Composición química y valores energéticos de los componentes de la ración del ganado lechero del distrito de Acora en estudio

	ACORA					
	HENO ALFAFA	PASTURAS	HENOS HABAS	HENO CEBADA	HENO AVENA	[CON]
FDN, %	42.00	62.57	47.90	49.23	49.90	24.36
DIG. IN VITRO VER. MS, %	72.45	49.16	35.63	42.25	65.08	82.30
HUMEDAD, %	8.82	9.36	10.76	11.52	10.86	7.52
PROTEÍNA, %	14.12	4.5	8.14	3.68	6.88	14.47
GRASA, %	1.91	2.54	0.53	0.97	1.26	6.1
FIBRA, %	23.79	22.73	34.98	26.57	22.9	9.43
CENIZA, %	5.92	5.75	3.45	3.69	4.42	11.53
ELN, %	45.44	55.12	42.14	53.57	53.68	50.95
NDT MS, %	55.7967	56.0533	48.2586	52.2713	54.9351	62.9617
ED, Mcal/kg	2.460	2.471	2.128	2.305	2.422	2.776
EB, Mcal/kg	4.238	4.154	4.138	4.068	4.110	4.236
EM, Mcal/kg	2.035	2.046	1.699	1.878	1.996	2.354
ENI, Mcal/kg	1.247	1.253	1.062	1.161	1.226	1.423
ENm, Mcal/kg	1.328	1.336	1.110	1.226	1.303	1.536
MS, %	91.18	90.64	89.24	88.48	89.14	92.48
Importancia	0.104	0.345	0.069	0.138	0.276	0.068

Anexo 9. Composición química y energía digestible de las dietas del ganado lechero en estudio por distrito

	Ayaviri	Taraco	Paucarcolla	Acora
FDN, %	49.37	52.06	50.15	51.48
HUMEDAD, %	10.17	10.54	10.18	9.99
PROTEÍNA, %	8.06	7.15	8.05	6.97
GRASA, %	2.24	1.46	2.42	2.01
FIBRA, %	22.46	24.06	22.13	23.36
CENIZA, %	5.24	4.98	5.97	5.35
ELN, %	51.74	51.91	51.26	52.32
NDT MS, %	55.75	54.30	55.37	55.13
ENERGÍA DIGESTIBLE, %	59.13	58.18	59.03	58.66

Anexo 10. Ecuaciones necesarias para estimar GEI por manejo de estiércol

Ecuación 10-1. Tasa de ingesta de N para vacunos

$$N_{Ingesta(T)} = \frac{GE}{18,45} * \left(\frac{CP\%}{6,25} \right)$$

Donde:

- $N_{Ingesta(T)}$ = N consumido diariamente por animal de la categoría T , kg N animal⁻¹ día⁻¹
- GE = Ingesta de energía bruta del animal, en modelo entérico, basada en energía digerible, producción de leche, preñez, peso actual, peso maduro, tasa de aumento de peso, y constantes del IPCC, MJ animal⁻¹ día⁻¹.
- 18.45 = Fracción de conversión para GE dietaria por kg de materia seca, MJ kg⁻¹. Este valor es relativamente constante para toda una amplia gama de alimentos de forraje y basados en granos que consume habitualmente el ganado.
- CP% = Porcentaje de proteína cruda de la dieta, entrada
- 6.25 = Conversión de kg de proteína de la dieta a kg de N de la dieta, kg proteína en el alimento (kg N).

Ecuación 10-2. Tasa de excreción anual de N

$$N_{ex(T)} = (N_{Ingesta(T)} * (1 - N_{Retención(T)})) * 365$$

Donde:

- $N_{ex(T)}$ = Tasa de excreción anual de N, kg N animal⁻¹ año⁻¹
- $N_{Ingesta(T)}$ = Ingesta anual N por cabeza de la especie/categoría animal T , kg N animal⁻¹ año⁻¹
- $N_{Retención(T)}$ = Fracción de la ingesta anual de N retenida por el animal de la especie/categoría T , sin dimensión

Ecuación 10-3. Tasa de retención anual de N

$$N_{Retenido(T)} = \left[\frac{Leche * \left(\frac{Leche PR\%}{100} \right)}{6,38} \right] + \left[\frac{WG * \left[268 - \left(\frac{7,03 * NE_g}{WG} \right) \right]}{100} \right] \frac{100}{6,25}$$

Donde:

- $N_{Retención(T)}$ = N retenido diariamente por animal de la categoría T , kg N animal⁻¹ día⁻¹
- Leche = producción de leche, kg animal⁻¹ día⁻¹ (sólo aplicable a vacas lecheras)
- Leche PR% = porcentaje de proteína en la leche, calculado como $[1,9 + 0,4 * \%Grasa]$, donde %Grasa es una entrada, que se supone como 4% (sólo aplicable a vacas lecheras)
- 6,38 = conversión de proteína de la leche a N de la leche, kg proteína (kg N)⁻¹
- WG = aumento de peso, entrada para cada categoría de ganado, kg día⁻¹
- 268 y 7,03 = constantes de la Ecuación 3-8 del NRC (1996)
- NE_g = energía neta para crecimiento, calculada en la caracterización del ganado sobre la base del peso actual, el peso maduro, la tasa de aumento de peso y constantes del IPCC, MJ día⁻¹

1 000 = conversión de gramos por kilo, g kg-1

6,25 = conversión de kg de proteína de la dieta a kg de N de la dieta, kg proteína (kg N)-1

Ecuación 10-4. Pérdidas de N debidas a la volatilización de la gestión del estiércol

$$N_{volatilización-MMS} = \sum_s \left[\sum_T [(((N_{(T,P)} * Nex_{(T,P)}) * MS_{(T,S,P)}) + N_{cdg(s)}) * Frac_{GasMS(T,S)}] \right]$$

Ecuación 10-5. Pérdidas de N debidas a la lixiviación de la gestión del estiércol

$$N_{lixiviación-MMS} = \sum_s \left[\sum_T [(((N_{(T,P)} * Nex_{(T,P)}) * MS_{(T,S,P)}) + N_{cdg(s)}) * Frac_{GasMS(T,S)}] \right]$$

Donde:

$N_{lixiviación-MMS}$ = Cantidad de nitrógeno del estiércol que lixivia de los sistemas de gestión del estiércol, kg N año-1

$N_{volatilización-MMS}$ = Cantidad de nitrógeno del estiércol que se pierde debido a la volatilización de NH_3 y NO_x , kg N año-1

$N_{(T)}$ = Cantidad de cabezas de ganado de la especie/categoría T del país

$Nex_{(T)}$ = Promedio anual de excreción de N por cabeza de la especie/categoría T en el país, kg N animal-1 año-1

$MS_{(T,S)}$ = Fracción de la excreción total anual de nitrógeno de cada especie/categoría de ganado T que se gestiona en el sistema de gestión del estiércol S en el país, sin dimensión

$Frac_{GasMS}$ = Porcentaje de nitrógeno del estiércol gestionado para la categoría de ganado T que se volatiliza como NH_3 y NO_x en el sistema de gestión del estiércol S , %

$Frac_{lixiviaciónMS}$ = Porcentaje de pérdidas de nitrógeno del estiércol gestionado de la categoría T debido a escurrimiento y lixiviación durante el almacenamiento sólido y líquido del estiércol (rango típico: 1-20%).

*Valores por defecto de las fracciones de pérdida de nitrógeno debido a la volatilización de nh_3 y nox y a la lixiviación de nitrógeno del manejo del estiércol

$Frac_{GasMS}$: 0.3

$Frac_{lixiviaciónMS}$: 0.02

Anexo 11. Encuesta hecha a los ganaderos basada en el cuestionario de Van (2014)

Información General

Fecha	
Nombre	
Asociación	
Localización	
Superficie agrícola	

Ganado

Vacas productoras	
Vacas secas	
Vaquillas	
Terneros	
Toros	

Duración lactación (meses)	
Duración de la seca (meses)	
Producción inicio lactación (L)	
Producción pico lactación (L)	

Peso vivo (kg)	
Inseminación efectiva	
Peso ternero parto	
Producción promedio/vaca/día	

12 - 24 meses de edad	
>24 meses (sin contar vacas en producción)	

Edad de los terneros al destete	
Edad de los terneros a la entrada al ganado	

Costos veterinarios promedio (vaca/año)			
Costo mano de obra temporal ganadería			
Costo alquiler toro o pajilla inseminación (por año)			
Precios de la leche	Precio y meses	Precio y meses	Precio y meses
Autoconsumo de la leche (L/día)			
Alimentación leche ternero (L/día)	1º mes	2º mes	3º mes

Raciones de las vacas en producción (Kg/vaca/día)

Alimentos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC

Raciones de los otros animales

Alimentos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC

Cultivo Forrajero

Cultivo:	Stock: Si/No	Nivel del stock (kg):	Mes:									
Superficie (ha)												
Rendimiento (t/ha/año)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nivel de producción (%)												

Cultivo:	Stock: Si/No	Nivel del stock (kg):	Mes:									
Superficie (ha)												
Rendimiento (t/ha/año)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nivel de producción (%)												

Recursos de explotación

Compras de recursos alimentarios no producidos sobre la explotación

Concentrados y tubérculos	Forrajes
Sal mineral (kg/año por el ganado)	

Situaciones de cultivos

Cultivo	
% de pajas cosechadas	
Fertilizantes (cantidad/ha)	
Pesticidas, herbicidas (cantidad/ha)	
Semilla (cantidad/ha)	
Mecanización (combustible, alquileres, preparación suelo, etc.)	
Mano de obra temporal	
Alquileres de tierras	

Excretas del ganado

¿Tiene alguna fosa?	
Capacidad de la fosa (t de estiércol fresco)	
Estiércol en la fosa	
Limpia de la fosa por año	

Anexo 12. Emisiones de GEI por fermentación entérica y por gestión de estiércol del ganado lechero en estudio por distrito

Distrito	Emisión por FE de CH ₄ kg/hato lechero/año	Emisión de CH ₄ en estiércol kg CH ₄ /hato lechero/año	Emisiones directas de N ₂ O, kg N ₂ O/vaca/año	Emisiones indirectas de N ₂ O, kg N ₂ O/vaca/año	Emisiones indirectas de N ₂ O, kg N ₂ O/vaca/año
Ayaviri	2142.9928	106.5759	0.5377	0.0881	0.0065
	1178.6461	58.6167	0.8868	0.1453	0.0107
	750.0475	37.3016	0.7434	0.1218	0.0089
	964.3468	47.9591	0.8314	0.1362	0.0100
Taraco	777.2700	42.4508	0.5553	0.0871	0.0064
	388.6350	21.2254	0.6690	0.1049	0.0077
	291.4763	15.9191	0.4865	0.0763	0.0056
	291.4763	15.9191	0.5417	0.0849	0.0062
Ácora	600.8896	27.2736	0.6171	0.0968	0.0071
	400.5930	18.1824	0.6287	0.0986	0.0072
	500.7413	22.7280	0.6057	0.0950	0.0070
	400.5930	18.1824	0.7028	0.1102	0.0081
Paucarcolla	344.3821	20.1548	0.6405	0.1050	0.0077
	774.8598	45.3482	0.5810	0.0952	0.0070
	602.6687	35.2708	0.4718	0.0773	0.0057
	344.3821	20.1548	0.6090	0.0998	0.0073

Anexo 13. Emisiones de GEI por producción de forrajes del ganado lechero en estudio
por distrito

	Cultivo	Cantidad	Unidad	kc CO ₂ eq				Total de kg CO ₂ eq/año/vaca
				Transporte	Cultivo	Proceso	LUC	
Ayaviri	Alfalfa	0.7871455	tn	0.3	3.33	0	0	3.62
Taraco		0.4675024	tn	0.7	1.98	0	0	2.64
Paucarcolla		0.5294743	tn	0.5	2.65	0	0	3.17
Acora		0.5135837	tn	0.5	1.84	0	0	2.34
Ayaviri	Avena	1.73172	tn	2.9	170	0	0	172.94
Taraco		1.5583412	tn	6.6	153	0	0	159.62
Paucarcolla		1.3236858	tn	5.2	158	0	0	163.23
Acora		1.3695567	tn	5.0	114	0	0	118.99
Ayaviri	Cebada	0.7871	tn	2.9	52.3	0	5.77	61.01
Taraco		0.7792	tn	6.6	51.8	0	5.71	64.13
Paucarcolla		0.6618	tn	5.2	52.2	0	5.76	63.19
Acora		0.6848	tn	5.0	38.6	0	4.25	47.84
Ayaviri	Pasturas (20% alfalfa, 80% pasto natural**)	1.574291	tn	0.2	0.454	0	0	0.65
Taraco		1.558341	tn	0.4	0.449	0	0	0.89
Paucarcolla		1.323686	tn	0.3	0.453	0	0	0.80
Acora		1.711946	tn	0.3	0.418	0	0	0.75

*Cultivo, incluye entradas para cultivar y uso de máquinas

** Se omite las emisiones del pasto natural

Avena forrajera, cebada forrajes: 2.5 cortes/año

Alfalfa dormante, siembra cada 12.5 años, corte 4/año

Anexo 14. Emisiones de GEI por la compra de concentrado del ganado lechero
en estudio por distrito

Distrito	Transporte	Cultivo*	Proceso**	LUC***	Total de kg CO ₂ eq/hato/año	Total de kg CO ₂ eq/vaca/año
Ayaviri	17.6405448	1321	401	905	2644.64054	330.5800681
Taraco	0	0	0	0	0	0
Acora	29.93547	413	125	283	850.93547	283.6451567
Paucarcolla	31.3609686	991	301	679	2002.36097	333.7268281

*Cultivo, incluye entradas para cultivar y uso de máquinas

**Procesos, incluye energía y auxiliares

***LUC: cambio del uso de la tierra

Vehículo	CO ₂ Factor kg/milla vehicular	CH ₄ Factor kg/milla vehicular	N ₂ O Factor kg/milla vehicular	CO ₂ eq kg/milla vehicular
Light-Duty Truck B	0.472	0.000019	0.000018	0.477839

Fuente: EPA, "Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories," Table 8 Business Travel and Employee Commuting, March 9, 2018

Anexo 15. Análisis de sensibilidad para el distrito de Ayaviri

Resumen del escenario						
	Valores actuales:	Base	Primer escenario	Segundo Escenario	Tercer escenario	Cuarto escenario
Celdas cambiantes:						
Pasturas*	0.298	0.298	0.269	0.239	0.209	0.179
Heno alfalfa*	0.149	0.149	0.179	0.209	0.239	0.269
Consumo de MS	14.4506901	14.4506901	14.4564	14.4621	14.4677	14.4734
Celdas de resultado:						
F. Entérica	3000.19	3000.19	3004.93	3006.67	3008.41	3010.16

Notas: La columna de valores actuales representa los valores de las celdas cambiantes en el momento en que se creó el Informe resumen de escenario. Las celdas cambiantes de cada escenario se muestran en gris.

*Importancia del alimento en la dieta

Resumen del escenario						
	Valores actuales:	Base	Primer escenario	Segundo escenario	Tercer escenario	Cuarto escenario
Celdas cambiantes:						
F. Entérica	3000.19	3000.19	3004.93	3006.67	3008.41	3010.16
Prod. Leche	4.14	4.14	4.22	4.31	4.39	4.47
Celdas de resultado:						
HC	0.92	0.92	0.90	0.88	0.87	0.85

Notas: La columna de valores actuales representa los valores de las celdas cambiantes en el momento en que se creó el Informe resumen de escenario. Las celdas cambiantes de cada escenario se muestran en gris.

HC: Huella de carbono