

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIA ANIMAL



**“CUANTIFICACIÓN DEL METANO ENTÉRICO DE ALPACAS Y
OVINOS EN PASTOS NATURALES ALTOANDINOS Y HUELLA DE
CARBONO DE LA PRODUCCIÓN ALPAQUERA”**

Presentada por:

GIOVANNA JANET GÓMEZ OQUENDO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN CIENCIA ANIMAL**

Lima - Perú

2023

Document Information

Analyzed document	TESIS Giovanna Gomez.docx (D146681281)
Submitted	2022-10-17 14:54:00
Submitted by	Carlos Gomez Bravo
Submitter email	cagomez@lamolina.edu.pe
Similarity	4%
Analysis address	cagomez.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis Borrador Henry Quiñones.docx Document Tesis Borrador Henry Quiñones.docx (D142061499) Submitted by: gcc@lamolina.edu.pe Receiver: gcc.unalm@analysis.arkund.com	 4
W	URL: https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5514/253T20190904_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 2022-07-19 22:19:03	 11
SA	tesis final para ing.docx Document tesis final para ing.docx (D55313552)	 3
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / INFORME TESIS - ING IRMA LORENA MULLER RIOS 1 REVISIÓN - copia.docx Document INFORME TESIS - ING IRMA LORENA MULLER RIOS 1 REVISIÓN - copia.docx (D146373617) Submitted by: isabel.molina@lamolina.edu.pe Receiver: isabel.molina.unalm@analysis.arkund.com	 30
SA	Tesis abril 20 2022 Corrección.docx Document Tesis abril 20 2022 Corrección.docx (D134261446)	 2
SA	BORRADOR CORREGIDO ADUVIRI (1).pdf Document BORRADOR CORREGIDO ADUVIRI (1).pdf (D111895386)	 1
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / 28-2022. Gomez Oquedo. Digestibilidad y emisiones de metano.docx Document 28-2022. Gomez Oquedo. Digestibilidad y emisiones de metano.docx (D143954394) Submitted by: isabel.molina@lamolina.edu.pe Receiver: isabel.molina.unalm@analysis.arkund.com	 22
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TESIS. Karina Aliaga Vilchez (Maestria).pdf Document TESIS. Karina Aliaga Vilchez (Maestria).pdf (D142245210) Submitted by: vhidalgo@lamolina.edu.pe Receiver: vhidalgo.unalm@analysis.arkund.com	 10
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / tesis Osnayo 08-06.pdf Document tesis Osnayo 08-06.pdf (D140453541) Submitted by: emellisho@lamolina.edu.pe Receiver: emellisho.unalm@analysis.arkund.com	 2
SA	informe final corregido comportamiento .pdf Document informe final corregido comportamiento .pdf (D132854362)	 2
W	URL: https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1823/1/0065mod.pdf Fetched: 2021-09-20 04:14:53	 2

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA ANIMAL**

**“CUANTIFICACIÓN DEL METANO ENTÉRICO DE ALPACAS
Y OVINOS EN PASTOS NATURALES ALTOANDINOS Y
HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN ALPAQUERA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR

Doctoris Philosophiae

Presentada por:

GIOVANNA JANET GÓMEZ OQUENDO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Javier Naupari Vásquez
PRESIDENTE

Ph.D. Carlos Gómez Bravo
ASESOR

Dra. Gladys Carrión Carrera
MIEMBRO

Ph.D. Víctor Guevara Carrasco
MIEMBRO

Ph.D. Miguel Ángel Ara Gómez
MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

A mi esposo David Galarza, por ayudarme a soñar con los ojos abiertos. A mis hijos Franco y Víctor, por existir.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida. Mi profundo agradecimiento a mi asesor el PhD Carlos Gómez Bravo, quien con sus conocimientos y experiencia me apoyó y guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar mis objetivos planteados.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) que a través del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) me otorgó la Beca integral para llevar a cabo mis estudios de doctorado y haberme brindado todos los recursos que fueron necesarios para llevar a cabo la presente investigación. Así mismo, agradecer al equipo técnico del Centro de Investigación y Producción Quimsachata quienes me brindaron un apoyo total durante la fase experimental de la presente investigación, de no haber sido por su incondicional ayuda no hubiese podido arribar a estos resultados.

Por último, quiero agradecer a mis padres, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y su cariño incondicional.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Emisión de metano proveniente de la ganadería en el Perú.....	3
2.2. Producción de metano entérico	5
2.3. Factores que influyen en la emisión de metano entérico	7
- Nivel de alimentación	7
- Composición de la dieta	7
- Genética animal	8
2.4. Fisiología digestiva de los camélidos sudamericanos	9
2.5. Estudios de emisión de metano entérico en camélidos.....	10
2.6. Metodologías de medición de metano entérico emitido por rumiantes	12
2.6.1. Método de cámara respiratoria	12
2.6.2. Método del trazador hexafluoruro de azufre (SF ₆)	12
2.6.3. Metodologías de estimación propuestas por el IPCC	13
2.7. Determinación de la dieta de rumiantes	14
2.7.1. Técnicas para determinar la composición de la dieta de animales al pastoreo...14	
2.7.2. Metodologías utilizadas para determinar la dieta en alpacas y ovinos.....14	
2.7.3. Técnica de simulación manual.....15	
2.8. Huella de carbono	15
2.8.1. Definición de Huella de carbono	15
2.8.2. Huella de carbono en ganadería	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Cuantificación de la emisión de metano entérico en alpacas y ovinos	18
3.1.1. Lugar y duración	18
3.1.2. Animales experimentales	19
3.1.3. Técnica del SF ₆ para mediciones de metano entérico.....19	
a. Elaboración de equipo para colección de gases.....19	
b. Calibración de las cápsulas de permeación	20
c. Dosificación de las capsulas de permeación	21
d. Adaptación de los animales experimentales	22
e. Toma de muestras de aire expirado.....22	

f. Análisis por cromatografía de gases	24
3.1.4. Mediciones en el pasto	25
a. Disponibilidad	25
b. Composición botánica	25
c. Composición nutricional de la dieta.....	26
3.1.5. Mediciones en los animales experimentales.....	26
a. Ingesta de materia seca.....	26
b. Estimación de las emisiones de metano entérico.....	28
3.2. Estimación de la Huella de Carbono de la producción alpaquera	29
3.2.1. Descripción del sistema productivo	29
3.2.2. Delimitación del sistema	30
3.2.3. Unidad funcional y co-productos.....	31
3.2.4. Sistema de asignación	31
a. Asignación económica	31
b. Asignación por masa	32
c. Asignación biofísica	32
3.2.5. Cálculo de emisiones	32
3.2.6. Cálculo de la Huella de carbono	34
3.2.7. Análisis de incertidumbre de la HC mediante la simulación de Monte Carlo..	34
3.2.8. Determinación de la HC con diferentes porcentaje de saca.....	35
3.3. Análisis estadístico	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN... ..	37
4.1 Cuantificación de las emisiones de metano entérico en alpacas y ovinos	37
4.1.1. Mediciones en el pasto	37
a. Disponibilidad del pasto	37
b. Composición botánica de los pastizales	37
c. Composición nutricional de la dieta	38
4.1.2. Mediciones en los animales experimentales	40
a. Ingesta de materia seca.....	40
b. Emisión de metano entérico	41
4.2. Estimación de la Huella de carbono de la producción alpaquera	44
4.2.1 Análisis de incertidumbre de la HC mediante la simulación de Monte Carlo...51	
4.2.2 Determinación de la HC con diferentes porcentaje de saca.....	53

V. CONCLUSIONES	56
VI. RECOMENDACIONES	57
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
VIII. ANEXOS	71

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Fuentes y factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono	33
Cuadro 2: Coeficiente de variación o rango de incertidumbre, factor de emisión utilizado y desviación estándar de las fuentes de emisión predominantes.....	35
Cuadro 3: Composición botánica identificadas en las pasturas	38
Cuadro 4: Composición química de la dieta de alpacas y ovinos (promedio y desviación estándar), Cz, PC y FDN expresado en g/kg de materia seca.....	39
Cuadro 5: Ingesta de materia seca de alpacas y ovinos expresado en Kg, % Peso vivo, Kg PV ⁰⁷⁵	40
Cuadro 6: Digestibilidad de la materia orgánica, emisiones de metano entérico y factor de conversión de metano de alpacas y ovinos (promedio y desviación estándar).....	42
Cuadro 7: Población por categorías, entradas y salidas del sistema de producción alpaquero en el CIP – Quimsachata	45
Cuadro 8: Emisiones de GEI expresado en CO ₂ -eq (kg/año), porcentaje de contribución de las fuentes de emisión (%) y emisiones en kg de CO ₂ -eq por 1 kg de PV de alpaca producido en el Centro de Producción Quimsachata (kg CO ₂ -eq/kg PV)	46
Cuadro 9: Huella de carbono para la producción alpaquera del Centro de investigación y producción Quimsachata según tipo de asignación.....	49
Cuadro 10. Cambio en la Huella de carbono resultante de la variación de los parámetros individuales.....	52
Cuadro 11: Huella de carbono obtenido con diferente porcentaje de saca (%) según asignación biofísica.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estimación de la emisión de CH ₄ proveniente de la fermentación entérica en Perú.....	4
Figura 2: Cápsulas de permeación	21
Figura 3: Adaptación de los animales a los implementos	22
Figura 4: Toma de muestras de aire expirado	23
Figura 5: Colocación de arneses y bolsas colectoras	27
Figura 6: Delimitación del sistema de la producción alpaquera en el Centro de Investigación y Producción (CIP) Quimsachata	30
Figura 7: Porcentaje de contribución de emisiones de cada fuente contaminante.....	47
Figura 8: Distribución de probabilidad de emisiones de GEI de 1 kg de PV de alpaca producida, basada en la simulación de Monte Carlo.....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Características de los animales experimentales	71
Anexo II. Características de las capsulas de premiación seleccionadas	72
Anexo III. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°1	73
Anexo IV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°2	73
Anexo V. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°3	74
Anexo VI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°5	74
Anexo VII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°7	75
Anexo VIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°13	75
Anexo IX. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°14	76
Anexo X. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°16	76
Anexo XI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°18	77
Anexo XII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°19	77
Anexo XIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°20	78
Anexo XIV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°21	78
Anexo XV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°22	79
Anexo XVI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°23	79
Anexo XVII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°24	80
Anexo XVIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°26	80
Anexo XIX. Formato: hoja de análisis de vegetación	81
Anexo XX. Medio utilizado en el Hohenheim Gas Test	82
Anexo XXI. Registro de la digestibilidad de la materia orgánica y consumo de alimento..	83
Anexo XXII. Producción de CH ₄ en g/día durante la etapa experimental	84
Anexo XXIII. Registros de emisiones de CH ₄ expresado en g/día, g/ Kg CMS, g/Kg PV ^{0.75} y valores de Y _m de los animales experimentales.....	85
Anexo XXIV. Condición de las pasturas	86

Anexo XXV. Pastoreo de los animales experimentales	86
Anexo XXVI. Colocación de los implementos	87
Anexo XXVII. Animales con implementos en etapa de acostumbramiento	87
Anexo XXVIII. Alpaca usando arnés	88

RESUMEN

Las alpacas y ovinos presentan diferencias en su anatomía y fisiología digestiva, siendo las primeras más eficientes en el aprovechamiento de los nutrientes provenientes de pastos de pobre calidad nutricional. El objetivo de la presente investigación fue comparar la producción de metano entérico entre alpacas y ovinos bajo un sistema extensivo de crianza, y estimar la huella de carbono de la producción alpaquera. Las emisiones de metano (CH₄) entérico de ocho alpacas de raza huacaya y ocho ovinos criollos machos alimentados con pastos naturales altoandinos fueron medidas y comparadas durante la época seca, utilizando la técnica del gas trazador hexafluoruro de azufre. Se estimó la digestibilidad de la materia orgánica (DMO) utilizando ecuaciones de predicción. Así mismo, se determinó el contenido de fibra detergente neutra (FDN), proteína cruda (PC), y ceniza (Cz) de la dieta de alpacas y ovinos. Los resultados mostraron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) en la cantidad de FDN de la dieta y DMO, obteniéndose en ambos casos mayores niveles en alpacas. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas ($P > 0.05$) en la emisión de CH₄ en g/día (21.8 v 22.7g), g/día kg PV^{0.75} (1.4 v 1.8g), g/kg IMS (25.9 v 21.8g) y g/kg IMO (28.4 v 23.9) entre alpacas y ovinos. Estos resultados sugieren en condiciones ambientales donde la disponibilidad de recursos es baja, las emisiones de metano de las alpacas son similares al de los ovinos. Utilizando el factor de emisión de CH₄ obtenido en la primera parte de la presente investigación, así como otros datos provenientes de una unidad alpaquera evaluada se calculó la huella de carbono (HC) de un kg de peso vivo (PV) de alpaca. Para lo cual se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) y se siguió los lineamientos ISO 14040. La HC estimada en el sistema alpaquero con un porcentaje de saca de 20 por ciento utilizando asignación económica y asignación por masa fue de 24.0 y 29.5 kg de CO₂-eq/kg de PV respectivamente, y según asignación biofísica fue de 22.6 y Kg CO₂-eq/kg carne. Así mismo, también se determinó la HC por unidad de superficie obteniendo 88.6 kg de CO₂-eq/ha. De igual manera, se determinó mediante la asignación biofísica la HC con diferentes porcentaje de saca (10, 15, 20, 25, 30 por ciento), observándose que a medida que el porcentaje de saca aumenta, la HC de la fibra y la HC de carne de alpaca disminuye. Por otro lado, se determinó también que el componente de mayor valor que conforma la HC en una producción alpaquera procede de las emisiones de CH₄ proveniente de la fermentación entérica (66.9 por ciento).

Palabras clave: alpaca, metano, digestibilidad, huella de carbono.

ABSTRACT

Alpacas and sheep present differences in their digestive anatomy and physiology, in addition, alpacas are more efficient using nutrients from pastures of poor nutritional quality. The main of this research was to compare enteric methane emissions between alpacas and sheep under an extensive rearing system and to estimate the carbon footprint of alpaca production. The enteric methane (CH₄) emission of eight male huacaya breed alpacas and eight male creole sheep fed with natural high Andean pastures were measured and compared during dry season, using the sulfur hexafluoride tracer gas technique. The digestibility of organic matter (DOM) was estimated using prediction equations. Likewise, the content of neutral detergent fiber (NDF), crude protein (CP), and ash (A) of alpacas and sheep diet was determined. The results show statistical differences ($P < 0.05$) in the amount of NDF in diet and DOM, obtaining in both cases higher levels in alpacas. However, no statistical differences ($P > 0.05$) were found in the parameters: production of CH₄ in g / day (21.8 v 22.7g), production of CH₄ in g / day kg LW^{0.75} (1.4 v 1.8g), production of CH₄ in g / kg DMI (25.9 v 21.8g) and g/kg OMI (28.4 v 23.9) between alpacas and sheep. These results suggested that alpacas are more efficient at digesting fiber from food; however, under environmental conditions where resource availability is low, methane emissions are similar in alpacas and sheep. Using the emission factor of CH₄ obtained in the first part of this research, as well as other data from the same alpaca herd evaluated, the carbon footprint (CF) of one kg of live weight (LW) was calculated. The life cycle analysis (LCA) methodology was used and the ISO 14040 guidelines were followed. The CF estimated in the alpaca system with a harvest percentage of 20 percent using the economic allocation and the allocation by mass was 24.0 and 29.5 kg of CO₂-eq/kg of LW and for biophysical allocation was 22.6 kg of CO₂-eq/kg of meat. Likewise, the CF per unit area was also determined, obtaining 88.6 kg of CO₂-eq / ha. In the same way, the CH with different percent of extraction (10, 15, 20, 25, 30 percent) was determined by biophysical assignment, observing that as the percent of extraction increases, the CF of alpaca fiber and meat decreases. On the other hand, it was also determined that the component with the highest value that makes up the CF in alpaca production comes from methane emissions from enteric fermentation (66.9 percent).

Key words: alpaca, methane, digestibility, carbon footprint

I. INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con una importante población de alpacas (*Lama pacos*; 3 millones 685,516 ejemplares) y ovinos (*Ovis aries*; 14 millones 280 mil 193 cabezas de ganado ovino), siendo la población de alpacas en el Perú el 87 por ciento de la población mundial (Gallegos 2013). Tanto alpacas como ovinos emiten metano (CH_4), el cual es producido por los microorganismos presentes en el tracto digestivo, principalmente en el rumen (Blaxter y Clapperton 1965) y presentan una relación directa con el consumo de alimento, tiempo de retención del alimento en el rumen y contenido de fibra en la dieta (San Martín 1987).

En la actualidad existen limitados estudios que han cuantificado comparativamente las emisiones de CH_4 de ovinos y alpacas, los cuales han sido realizados bajo condiciones estabuladas o con animales alimentados con pasturas cultivadas no representando el tipo de sistema de pastoreo de alpacas y ovinos en zonas altoandinas, cuya nutrición depende casi exclusivamente del uso de las praderas altioplánicas (bofedales, pajonales y tolares) (Castellaro *et al.* 2004).

Se plantea la hipótesis que, bajo las condiciones de pastoreo en zonas altoandinas, las alpacas producen mayores niveles de CH_4 por kg de alimento consumido que los ovinos, debido al mayor tiempo de retención del alimento en su tracto digestivo y a la mejor digestibilidad de la fibra consumida la cual es rica en carbohidratos metanogénicos (celulosa y hemicelulosa) (Moe y Tyrrell 1979). Esto se debe a que las alpacas presentan un sistema digestivo diferente al resto de rumiantes (Vallenas *et al.* 1971; Heller *et al.* 1986; San Martín y Bryant 1987).

Por otro lado, la adecuada medición de la producción de CH_4 en alpacas nos permitirá una mejor estimación de la huella de carbono (HC). La HC proporciona una estimación del total de gases de efecto invernadero (GEI) incluyendo CH_4 emitidos durante parte o la totalidad de la vida de un bien o servicio como la producción de fibra y carne de alpaca (BSI 2011), expresado como equivalentes de dióxido de carbono ($\text{CO}_2 - \text{eq}$). La estimación de la HC es

fundamental para determinar las mayores fuentes de emisiones e identificar las variables claves durante la producción, con la finalidad de establecer estrategias de manejo que mejoren los sistemas productivos (Dougherty *et al.* 2019) y así disminuir sus emisiones. Dentro del sector ganadero las emisiones de CH₄ a partir de la fermentación entérica contribuyen de manera significativa en el total de emisiones de GEI atribuidas a dicho sector (Batalla *et al.* 2014). En la actualidad, se han realizado investigaciones exhaustivas para estimar la HC de los sistemas ganaderos; sin embargo, no hay información disponible sobre la estimación de HC en producciones alpaqueras.

Por lo tanto, el primer objetivo del presente estudio fué cuantificar y comparar las emisiones de CH₄ entérico de alpacas y ovinos bajo condiciones de pastoreo en zonas altoandinas y el segundo objetivo fue estimar la HC de una producción alpaquera tomando como referencia una producción alpaquera representativa del sistema de manejo de alpacas en el Perú.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EMISIÓN DE METANO PROVENIENTE DE LA GANADERÍA EN EL PERÚ

El calentamiento global es originado por la emisión y acumulación de los GEI en la atmósfera terrestre, siendo necesario verificar y controlar la evolución de dichas emisiones para contribuir a su reducción global. Un inventario de GEI es una base de datos que lista, por fuente, la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera en un espacio y periodo determinados (EPA 2009). Por tanto, el inventario de GEI se considera una importante herramienta para la gestión de las emisiones.

El último Boletín sobre los gases de efecto invernadero (WMO 2012) muestra un incremento en la concentración de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en un 140, un 259 y un 120 por ciento desde el año 1750, respectivamente. El aumento de los niveles de CO₂ a nivel mundial se debe en gran medida a la utilización de combustibles fósiles; mientras que el incremento observado en la concentración de CH₄ y N₂O tiene su origen, principalmente, en las prácticas agrícolas (IPCC 2007). Las emisiones antropógenas de GEI totales entre 2000 y 2010 fueron las más altas en la historia de la humanidad y llegaron a 49 (±4,5) Gt CO₂ eq /año en el año 2010 (IPCC 2014).

En la actualidad el Perú ha elaborado Inventarios Nacionales de GEI con año base 2012, 2010, 2005, 2000 y 1994, los cuales han permitido identificar los sectores con las mayores emisiones con el fin de promover esfuerzos nacionales de gestión de emisiones. Para el año 2012 (INGEI 2012), el total de emisiones/remociones de GEI fueron 171, 310 Gg de CO₂-eq, de las cuales el sector agricultura representó el 15.20 por ciento con 26,044 Gg, dentro del cual la fermentación entérica aporta 10,735 Gg que representan el 41.22% de dicho sector y el 6.27 por ciento de las emisiones totales (MINAM 2016). Estas emisiones se han venido incrementando con el pasar de los años, tal es así que para el año 2012 con respecto al año 1994 el incremento ha sido de 73.36 por ciento.

Las emisiones de GEI en el sector Agricultura se generan por diversas fuentes asociadas con la actividad agrícola y pecuaria. Los GEI identificados en este sector son: metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). En el año 2012, las emisiones de GEI del sector agricultura fueron 26 044 Gg CO₂ -eq, destacando las emisiones generadas por el cambio de uso en suelos agrícolas con 12 196 Gg CO₂ -eq representando el 47 por ciento del total de emisiones de este sector.

La estimación de la emisión de CH₄ proveniente de los diferentes sistemas de producción animal para el 2006 fue de 472 Gg de CO₂-eq, mientras que la producción de estiércol para el 2006 contribuye con solo 13.7 Gg/año, representando un incremento del 22 por ciento (Fernández *et al.* 2007). Los valores obtenidos para las emisiones de CH₄ de ganado vacuno representa el 64.3 por ciento del total de emisiones de CH₄ en el país seguido de los ovinos con 17.3 por ciento y alpacas con 5.2 por ciento (Gráfico 1)

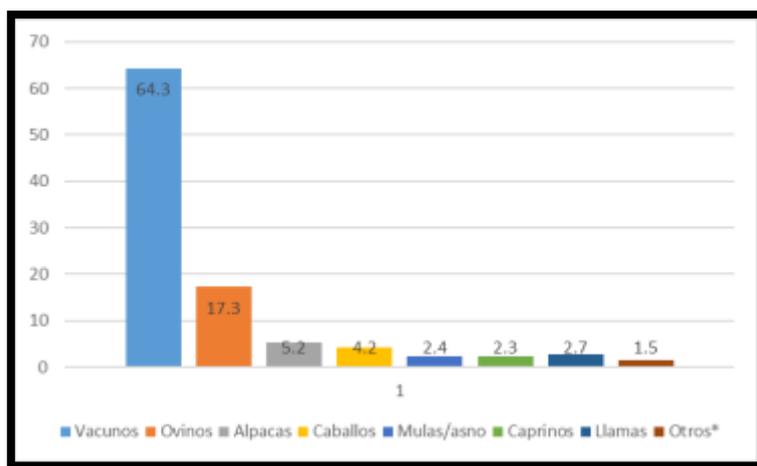


Figura 1. Estimación de la emisión de CH₄ proveniente de la fermentación entérica en Perú

Fuente: Adaptado de Fernández *et al.* (2007)

*Considera cerdos, aves y cuyes.

La estimación de CH₄ entérico proveniente de los camélidos sudamericanos con el uso de la metodología Tier 2 está basado en la utilización de la base de datos de los factores de conversión de CH₄ de ovinos los cuales tienen mayor similitud con este tipo de ganado. Por tanto, se alienta a los países con grandes poblaciones de especies de animales domesticados respecto a los cuales no hay factores de emisión por defecto del IPCC (llamas y alpacas) a que desarrollen métodos nacionales similares al método de Nivel 2 y basados en trabajos de

investigación bien documentada siempre y cuando se determina que las emisiones de este ganado son significativas (IPCC 2006).

2.2 PRODUCCIÓN DE METANO ENTÉRICO

A lo largo del tracto digestivo se produce la fermentación microbiana anaeróbica que ocurre principalmente en el rumen, convirtiendo los alimentos en productos que pueden ser digeridos y utilizados por el animal (FAO 2009; FAO 2013) como los ácidos grasos volátiles (AGV) (acetato, propionato y butirato) (Mc Donald *et al.* 1995). A este proceso se le conoce como fermentación entérica y produce CH₄ como subproducto (IPCC 2006), 87 por ciento en el rumen y el 13 por ciento restante en el tracto digestivo inferior (Murray *et al.* 1976). Este CH₄ es emitido a la atmósfera principalmente mediante eructos (82.7 por ciento), respiración (15.9 por ciento) y en menor medida a través de flatulencias (1.4 por ciento) (Murray *et al.* 1976).

Dentro del rumen se forma un sistema anaerobio donde ocurre la degradación de la fibra por medio de la fermentación donde está involucrada la actividad microbiana (bacterias, protozoos, hongos, y archaeas) (Blaxter y Clapperton 1965), dentro de ellos tenemos a los microorganismos formadores de CH₄ entérico denominados metanogénicos y protozoos que reducen el CO₂ a CH₄ a partir del CO₂ y protones (H⁺) (Ellis *et al.* 2007). Estos microorganismos permiten mantener la homeostasis acido-base del rumen, permitiendo remover H⁺ y mantener la eficiencia energética y el pH en un rango estrecho para asegurar la salud del rumen.

Los rumiantes presentan una gran población microbiana muy diversa dentro del rumen. Esta se encuentra constituida por microorganismos encargados de fermentar el alimento y producir ácidos grasos volátiles (AGV) que son rápidamente absorbidos a través del epitelio ruminal, sirviendo como fuente de energía para el animal hospedero. Otros productos del proceso fermentativo como CO₂ e hidrógeno (H₂) no son utilizados por el rumiante, pero sirven como sustrato para algunos microorganismos pertenecientes al dominio Archaea, los metanógenos. Éstos producen CH₄ como estrategia metabólica para obtener la energía necesaria para su crecimiento (Schafer *et al.* 1999).

La degradación ruminal de la fibra y de los almidones genera hexosas, que para su fermentación siguen la ruta de Embden Meyerhof, la cual presenta el siguiente balance neto: 1 glucosa + 2 ADP + 2 P_i + 2 NAD⁺ ---> 2 piruvato + 2 ATP + 2 NADH+H⁺ (Murray *et al.*

2011). De este resultado el piruvato obtenido es convertido en AGV, principalmente acético, propiónico y butírico, a través de distintas rutas metabólicas. El acetil-CoA producido a partir del piruvato es metabolizado a acetato, a través de acetil-fosfato, o a butirato, a través de acetoacetil-CoA. La producción total de NAD en su forma reducida ($\text{NADH} + \text{H}^+$), H_2 y CO_2 por molécula de glucosa fermentada hacia acetato o butirato es: $2 \text{NADH} + 2 \text{H}^+$, durante la glucólisis, y $2 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$, durante la descarboxilación del piruvato. El H_2 producido durante la glucólisis es perjudicial para el proceso fermentativo, ya que su acumulación inhibe la enzima $\text{NADH} + \text{H}^+$ ferredoxina oxidorreductasa, impidiendo la regeneración de NAD^+ , lo cual sólo es posible a muy baja presión de H_2 . La producción continua de CH_4 representa uno de los mecanismos por los cuales la presión ruminal de H_2 disminuye (Ramírez *et al.* 2014).

En estudios realizados en laboratorio, al utilizarse un cultivo puro, las bacterias ruminales tendieron a producir compuestos como H_2 , lactato, etanol y succinato para oxidar el $\text{NADH} + \text{H}^+$ producido durante la glucólisis; sin embargo, en el rumen, estos mismos microorganismos producen CO_2 , CH_4 , y AGV, deduciéndose la existencia de un mecanismo de transferencia de H_2 entre las poblaciones de microorganismos halladas en el rumen. Este proceso por el cual un organismo captura H_2 producido por otra especie microbiana y lo utiliza para la formación de otro compuesto, es conocido como sintropía, siendo entonces un caso especial de cooperación simbiótica entre dos tipos de microorganismos metabólicamente diferentes que dependen el uno del otro para la degradación de un sustrato (Schink y Stams 2006).

En el rumen existen principalmente tres sustratos para la metanogénesis: CO_2 , compuestos con grupo metilo y acetato. Sin embargo, los metanógenos ruminales utilizan principalmente H_2 para reducir el CO_2 a CH_4 en una serie de reacciones acopladas a la síntesis de ATP (Leahy *et al.* 2010), donde el CO_2 es utilizado como fuente de carbono y el H_2 como el principal donador de electrones. El formato también es un donador importante de electrones y puede llegar a contribuir con el 18 por ciento del CH_4 producido en el rumen. Aunque las metil-aminas y el metanol también pueden ser utilizados para la producción de CH_4 por los órdenes Metanosarcinal y Metanobacterial, su contribución en la metanogénesis total es muy pequeña (Ramírez *et al.* 2014)

2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO

- Nivel de alimentación

El CH₄ producido por los animales se ve afectado por la cantidad de alimento consumido (Buddle *et al.* 2011; Jonker *et al.* 2017; Lassey *et al.* 2011). El incremento en el nivel de consumo, aumenta la producción de metano (Pinares-Patiño *et al.* 2003), no obstante, disminuyen por unidad de materia seca consumida (Blaxter y Wainman 1961; Blaxter y Clapperton 1965; Johnson y Johnson 1995), debido a que una mayor ingesta acelera la tasa de paso del alimento, disminuyendo el tiempo de fermentación ruminal afectando la degradabilidad de la dieta y reduciendo el tiempo de exposición del material fibroso a los microorganismos metanogénicos (Hindrichsen *et al.* 2006; McAllister *et al.* 1996).

- Composición de la dieta

Estudios realizados por Hammond *et al.* (2013), demuestran que la composición del forraje puede tener un efecto indirecto sobre la producción de CH₄, ya que forrajes con bajo contenido de fibra pueden aumentar el consumo, lo cual se traduce en menores emisiones de CH₄ por unidad de alimento ingerido.

El ritmo de fermentación de los carbohidratos estructurales (celulosa, hemicelulosa) es menor que los no estructurales (almidón, azúcares), produciendo más CH₄ por unidad de sustrato fermentado (Holter y Young 1992). Diferentes estudios en vacunos y ovinos han demostrado que las dietas basadas en granos reducen las emisiones de metano por unidad de materia seca consumida, en comparación con las dietas forrajeras, debido fundamentalmente a tres razones:

- a) Aumento en la producción de propionato, que provee una ruta metabólica que consume H₂ y por lo tanto, reduce el sustrato disponible para la metanogénesis (Murphy *et al.* 1982).
- b) Disminución del pH ruminal con la consecuente inhibición del crecimiento de metanógenos en el rumen (Lana *et al.* 1998)
- c) Disminución del número de protozoarios debido al incremento de la tasa de pasaje, limitando la transferencia de H₂ desde éstos a los metanógenos (Williams y Coleman 1997).

Por tanto, es de esperarse que dietas ricas en forrajes sean más productoras de CH₄ debido a que, genéticamente, los microorganismos celulolíticos producen más acetato e H₂ que las

poblaciones amilolíticas (productoras de menos H₂ y más propionato). Johnson y Johnson (1995) sugieren que la fermentación de las paredes celulares (FDN) conduce a una mayor producción de CH₄ que la fermentación de los componentes intracelulares. No obstante, en el 2009 un estudio realizado por Hammond *et al.* (2013), después de analizar una base de datos de 3000 animales (ovinos y vacunos), encontraron que solo el 13 por ciento de la variación en la producción de CH₄ pudo ser explicada por la composición del pasto.

La inclusión de diferentes cultivares de *Lolium* perenne con un mayor contenido de carbohidratos solubles ha sido asociada con una menor producción de metano (Jonker *et al.* 2017). La fermentación de carbohidratos solubles promueve la producción de propionato, compitiendo con la formación de metano. De igual manera, algunos autores sugieren que la inclusión de carbohidratos no estructurales en la dieta puede disminuir las emisiones de metano por unidad de producto, al incrementar la producción animal.

- Genética animal

Muchos factores influyen en la producción de CH₄ en el rumen, pero el factor genético también desempeña un papel muy importante. Los efectos ambientales juegan un rol significativo en la producción de CH₄, pero existe un porcentaje hereditario que tiene una importante influencia (Aguilar y Rojas 2014). Esto puede ser corroborado por De Haas *et al.* quien en el año 2011 encontró que la producción endógena de CH₄ tiene una base genética, con índices de heredabilidad entre 0,35 para la producción solo de CH₄ endógeno y 0,58 para la producción endógena de CH₄ por contenido de grasa y proteína.

Resultados de un estudio realizado en 4 países de Europa han comprobado que el nivel y tipo de microorganismos productores de CH₄ depende en gran medida, de la dotación genética de la vaca. Lo cual implica que se podría seleccionar a los animales que sean menos propensas a tener grandes cantidades de bacterias productoras de metano en su rumen (Wallace *et al.* 2019). Como estos microbios muestran estimaciones de heredabilidad significativas, su abundancia se explica en gran medida por la genética del huésped.

En otros estudios, Yan *et al.* (2010) observaron que al realizar una selección de las vacas basada en altos niveles de producción de leche y la eficiencia de utilización de la energía, se puede reducir las emisiones de CH₄ de vacas lecheras. De esta manera se podría mejorar la producción lechera de las explotaciones y al mismo tiempo disminuir su impacto ambiental.

Para el caso de ganado de carne la selección de animales con mejores índices de conversión alimenticia ha causado una reducción del 24 – 28 por ciento de CH₄ (Nkrumah *et al.* 2006) lo que refuerza el concepto de la interacción entre estas variables.

Con el incremento de la productividad, las emisiones de CH₄ por animal aumentan, mientras la cantidad de CH₄ por kilogramo de leche o carne disminuye, registrándose una reducción en el CH₄ total al disminuir el número de animales requeridos para generar una determinada cantidad de producto (Ramirez *et al.* 2014).

Otros autores sugieren que la selección genética de animales que consumen menos alimento o producen menos CH₄ por unidad de alimento es otra estrategia de manejo que se puede emplear para reducir las emisiones de CH₄ entérico (Boadi y Wittenberg 2002). Dos aspectos que se han venido investigando como medio para identificar los animales genéticamente superiores son la eficiencia alimenticia neta y el tiempo medio de retención de la ingesta del rumen (Hegarty 2002). De esta forma estos autores indican que la selección de vacas lecheras de altos niveles de producción y con una elevada eficiencia de utilización de la energía, ofrece un método eficaz para la reducción de las emisiones de CH₄.

2.4 FISIOLÓGÍA DIGESTIVA DE LOS CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS

El estudio de la producción de metano en rumiantes es de vital importancia, es por ello que diferentes investigaciones han planteado la posibilidad de que los camélidos producen similares cantidades de metano por unidad de masa corporal, debido a que comparten algunas características de su anatomía y fisiología digestiva con el resto de los rumiantes; sin embargo, a pesar de estas similitudes existen algunas diferencias importantes entre estos dos subórdenes:

- Los camélidos presentan dos compartimentos (C1 y C2) como cámaras de fermentación muy similares a los hallados en el resto de los rumiantes (retículo-rumen), a pesar de esta similitud no pueden ser considerados rumiantes (Wang *et al.* 2000).
- Los camélidos tienen una menor ingesta de alimentos en comparación con los rumiantes (Yaranga 2009), lo que corresponde a sus menores necesidades de energía. Esto puede interpretarse como una adaptación a entornos con baja disponibilidad de recursos.
- Las partículas de los alimentos se conservan más en los compartimentos C1 y C2 del camélido que en el retículo-rumen de los rumiantes. Esto podría ser explicado por tener un tiempo más largo de la fermentación, que es un requisito previo para la digestión de la

fibra. Engelhardt *et al.* (2006) sugirieron que la mayor retención de partículas se logra por el retraso en el inicio de la rumia después de la alimentación en comparación con los rumiantes.

- Los camélidos presentan una mayor digestibilidad de la materia seca y fibra que el resto de los rumiantes (Hintz *et al.* 1973). Esto se logra probablemente con una mayor retención de partículas y no por diferentes vías de fermentación, ya que la composición de la comunidad microbiana en el intestino de los camélidos se asemeja a la de los rumiantes. La mayor retención de partículas y la subsecuente prolongación de la exposición a la fermentación microbiana podrían producir una mayor producción de CH₄ por unidad de alimento ingerido en comparación con los rumiantes.
- La presencia de sacos glandulares en el estómago de los camélidos sudamericanos, a diferencia de los ovinos, les permite una eficiente maceración, mezclado y absorción de la digesta (San Martín 1989). Las secreciones glandulares aportan cantidades de bicarbonato en asociación con la ingesta del C1, que pueden contribuir a la capacidad buffer del contenido del C1 y C2 (Eckerlin y Stevens 1973).

Por tanto, hay notables diferencias en la anatomía y la fisiología del tracto digestivo entre camélidos y rumiantes, que pueden influir en la producción microbiana de CH₄. No obstante, se conoce poco sobre la emisión de CH₄ por los camélidos. En 1996 Hackstein y Van Alen detectaron metanógenos en las heces de camellos bactrianos (*Camelus bactrianus*), alpacas (*Vicugna pacos*) y guanacos (*Lama guanicoe*). Un estudio sobre archaea metanogénicas en los compartimentos C1 y C2 de la alpaca reveló la presencia de cepas de *Methanobrevibacter*, que son los metanógenos más comunes en rumiantes, en cantidades similares a las reportadas para rumiantes (St- Pierre y Wright 2012).

2.5 ESTUDIOS DE EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN CAMÉLIDOS

En una investigación realizada por Pinares *et al.* (2003), donde compararon emisiones de metano entre alpacas y ovinos con tres tipos de forrajes: heno de alfalfa (*Medicago sativa*), pasto centeno perenne/trébol blanco (*Lolium perenne/Trifolium repens*), y trébol de pie de pájaro (*Lotus corniculatus*), determinándose la producción de CH₄ de tres maneras 1) g/día, 2) la pérdida de energía de metano como un porcentaje de la ingesta de energía bruta (%GEI) y 3) la tasa de producción de metano por la unidad de ingesta digestible de la fibra detergente neutro (g/kg DNDFI), utilizando la técnica del trazador de hexafluoruro de azufre y el recuento de protozoarios entre otros, no hallándose diferencias estadísticas (P>0.05) en

ambas especies (alpacas y ovinos) al ser alimentadas con heno de alfalfa, pero si al suministrarles pasto centeno evaluando el parámetro (%GEI), de igual manera al consumir el trébol de pájaro (*Lotus corniculatus*), se halló diferencias estadísticas al evaluar el parámetro (%GEI) ($P < 0.05$) y al evaluar el parámetro (g/kg DNDFI) ($P < 0.05$) donde la alpaca tuvo un mayor rendimiento de metano. Los autores sugieren que las diferencias en el rendimiento de metano entre estas especies se deben al mecanismo fisiológico de cada animal para el aprovechamiento de la fibra, observándose también que la ingesta de alimento voluntario (VFI) y la calidad de la dieta tuvieron también un mayor efecto.

Dittmann *et al.* (2014) realizaron un estudio comparativo en tres especies de camélidos: Camellos (*Camelus bactrianus*), alpacas (*Vicugna pacos*) y guanacos (*Lama guanicoe*), utilizando una cámara de respiración, donde se midió la emisión de metano expresado en L/día, por kg de ingesta de materia seca (IMS), por porcentaje de ingesta de energía digestible (IED) y L/kg de ingesta de fibra detergente neutro digestible (IFDND) y fue comparado con las emisiones de CH₄ de rumiantes (vacuno, ovino y caprino) encontrados en la literatura. Los autores plantearon la hipótesis que los camélidos producen menos metano que los rumiantes por unidad de masa corporal, ya que se sabe que la ingesta de alimentos por alpaca es menor que la de los rumiantes de tamaño similar. Los resultados demostraron que los camélidos produjeron menos metano ($P > 0.05$), expresado sobre la base de la masa corporal ($0,32 \pm 0,11 \text{ L kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) comparado con datos de la literatura sobre rumiantes domésticos alimentados con dietas de forraje ($0,58 \pm 0,16 \text{ L kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los dos subórdenes cuando se expresó la emisión de metano en base a la ingesta de fibra detergente neutra digestible, DNDFI, L por kg de DMI y porcentaje de DEI. Esto implica que las vías de metanogénesis que forman parte de la digestión microbiana en los compartimientos C1 y C2 son similares entre los grupos y que la menor emisión de metano de los camélidos puede ser explicada por su consumo de alimento relativo generalmente más bajo.

En otros estudios realizados en Perú en el Anexo Quimsachata de la estación experimental ILLPA del Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA-Puno en el 2015, Machaca *et al.*, evaluaron el efecto de dos dietas fibrosas en la producción de metano en alpacas, utilizando para tal objetivo un equipo portátil de medición de gases Gasmeter DX-4030 Analyser, y una cámara acondicionada donde no existía posibilidad de ingreso y salida de aire. Los animales fueron alimentados con dos dietas que difieren en el tamaño de fibra (entera y molida). Se realizaron dos medidas al día por animal; la primera a las 10:00 am y la segunda a las 6:00

pm. Los resultados no demostraron un efecto significativo ($P>0.05$) de las dietas fibrosas, ni en la mañana ni en la noche sobre los valores de la emisión de CH_4 . Sin embargo, el tiempo de medición si demostró ser un factor significativo ($P<0.05$).

2.6 METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE METANO ENTÉRICO EMITIDO POR RUMIANTES

Dentro de las metodologías más utilizadas para medir metano directamente en animales se encuentran las cámaras respiratorias y el uso de trazadores como hexafluoruro de azufre, SF_6 . Bhatta *et al.* (2007), presentan varias técnicas metereológicas como la del túnel de viento portátil, las técnicas de arriba abajo y las técnicas de capa límite; así mismo, las técnicas in vitro como la técnica de simulación ruminal y la técnica de producción de gases in vitro; también presentan ecuaciones de predicción como una herramienta sencilla y práctica. Finalmente, tenemos la metodología usada para la estimación de emisiones de CH_4 propuesta por el IPCC (2006).

2.6.1 Método de cámara respiratoria

El método de cámaras respiratorias, de circuito abierto o cerrado, es considerado el “estándar de oro” para la medición de emisiones de metano y normalmente se emplea para validar otros sistemas de medición (Blaxter y Clapperton 1965). En este sistema se pueden realizar mediciones continuas (21-24h) de un individuo por varios días. Este sistema provee un alto nivel de exactitud y hace posible controlar y medir una gran cantidad de parámetros relacionados a la emisión de varios gases (Tremblay y Masse 2008). Sin embargo, además del alto costo de instalación, la mayor desventaja de este método es que confina y aísla al animal en un ambiente restringido. Este confinamiento afecta la expresión del comportamiento normal e incrementa el estrés en el animal, lo que resulta en una reducción del consumo voluntario e induce factores de variación.

2.6.2 Método del trazador hexafluoruro de azufre (SF_6)

El método del SF_6 como trazador, es el más usado para determinar emisiones en ganado en pastoreo (Johnson *et al.* 1994; Bonilla y Lemus 2012). Está basado en el uso de bolos ruminales precargados con SF_6 con una tasa de liberación conocida en el lapso de recolección de la muestra (24 horas), multiplicado por la razón de las concentraciones de CH_4 (ppm) y SF_6 (ppt) que se encuentran en la muestra colectada (determinadas por

cromatografía de gases), se obtiene la emisión de CH₄ para el lapso de recolección en cada animal (Berndt *et al.* 2014; Ulyatt *et al.* 1999). Para poder estimar las emisiones de metano, al animal se le coloca un bozal con una línea de muestreo conectada, a través de una columna reguladora de flujo, a un tanque o recipiente que se encuentra al vacío (Johnson *et al.* 1994).

El uso del gas trazador SF₆, disminuye la importancia de la difusión molecular de los gases en la atmósfera (Johnson y Johnson 1995), así solo una fracción, pero representativa de gas es tomada alrededor del hocico y ollares de cada animal Lasseby *et al.* (2011). El trazador se acumula en el rumen, y posteriormente es liberado junto con el CH₄, donde las tasas de dilución para el SF₆ y el CH₄ son idénticas, por lo tanto, se asume que la emisión de SF₆ simula exactamente la emisión de CH₄ (Johnson y Johnson 1995).

A pesar de ser usado en varios países por diversos laboratorios de investigación, su establecimiento inicial es un tanto complicado debido a que los niveles que se miden son partes por trillón (ppt), lo que requiere un equipo especial de cromatografía de gases (columnas) que debe estar en instalaciones separadas a las que almacenan los bolos de SF₆ o cualquier fuente de este gas, para evitar una lectura falsa. Además, en comparación con las cámaras de respiración, la técnica del SF₆ sobreestima las emisiones diarias de CH₄, debido a una estimación errónea de la tasa de liberación de SF₆ de los tubos de permeación utilizados meses después de su calibración (Deighton *et al.* 2013). Sin embargo, al realizar mediciones por largos periodos de tiempo, la técnica de SF₆ permite la estimación de emisiones diarias, mismas que los otros métodos de estimación durante periodos cortos no pueden estimar directamente (Hegarty 2013).

2.6.3 Metodologías de estimación propuestas por el IPCC

Con el propósito de desarrollar estrategias para mitigar las emisiones de CH₄ de los rumiantes, se debe realizar estimaciones bajo las condiciones medio ambientales propias de nuestro país. En ese sentido, se hace necesario la utilización las diferentes metodologías de estimación propuestas por el IPCC (2006), las cuales se describen a continuación:

- Tier 1: Se basa en factores de emisión por defecto obtenidos de la bibliografía o calculados utilizando una metodología más detallada de Tier 2. Este nivel es utilizado en las especies de animales, de aquellos países en los que la fermentación entérica no sea una categoría de fuente principal o donde no se disponga de datos de caracterización mejorados.

- Tier 2: Es un método más complejo que requiere datos detallados y específicos del país referido a ingesta de energía bruta y a factores de conversión en metano para categorías específicas de ganado. El método de Nivel 2 debe utilizarse si la fermentación entérica es una categoría de fuente principal para la categoría de animales que representa una gran parte de las emisiones totales del país.
- Tier 3: Este método implica el desarrollo de modelos sofisticados en los que se considere la composición de la dieta en detalle, la concentración de productos resultado de la fermentación en los rumiantes, las variaciones estacionales de la población animal o de la calidad y disponibilidad de alimentos, y las posibles estrategias de mitigación.

2.7 DETERMINACIÓN DE LA DIETA DE RUMIANTES

2.7.1 Técnicas para determinar la composición de la dieta de animales al pastoreo

Las técnicas utilizadas para estimar la composición de la dieta buscan establecer la relación que existe entre lo que ingiere el animal de lo que está disponible para su consumo (Quispe 2016). La técnica no-invasiva más reconocida para estimar la composición botánica de la dieta en animales al pastoreo es la técnica de microhistología en heces, la cual presenta muchas desventajas que no permiten su uso de manera rutinaria (Lashley *et al.* 2016).

2.7.2 Metodologías utilizadas para determinar la dieta en alpacas y ovinos

A nivel nacional pocos estudios se han realizado para determinar la composición botánica de la dieta de alpacas. Entre estos estudios tenemos a Quispe (2017) quien utilizó la metodología de fístula esofágica en alpacas, para evaluar la selectividad de especies forrajeras en Puno y Cuzco. Así mismo, Quispe (2016) tomó muestras de dietas de alpacas y ovinos mediante la técnica de simulación manual (Austin *et al.* 1983) para evaluar la composición botánica, selectividad de las dietas y compararlas con la composición botánica del campo y la composición química de las mismas en Junín. Por su parte, Arana (2014) determinó la composición botánica de la dieta de alpacas en un pajonal de la región Huancavelica utilizando la técnica de microhistología fecal. Si bien existen estudios previos de la composición de la dieta de alpacas y ovinos, no se pueden extrapolar a las condiciones actuales debido a los marcados cambios climáticos en los últimos años y su efecto sobre la degradación de pastizales. Una técnica simple y de bajo costo es la técnica de simulación

manual, la cual se puede utilizar para la identificación de la composición botánica de la dieta de camélidos sudamericanos al pastoreo de manera rutinaria.

2.7.3 Técnica de simulación manual

La técnica de simulación manual o también llamada como la técnica del bocado (Wallmo y Neff 1970) consiste en tomar muestras manuales representativas de los pastos consumidos simulando la mordida de los animales que se encuentran pastoreando. El área de muestreo estará compuesta por estaciones alimentarias, las cuales se definen como el semicírculo en frente del animal dentro del cual el animal cosecha el pasto cada vez que se detiene a comer (Flores 1983).

2.8 HUELLA DE CARBONO

2.8.1 Definición de Huella de carbono

La huella de carbono (HC) es una de las herramientas utilizadas para cuantificar las emisiones de GEI, es un indicador que permite cuantificar las emisiones de gases en la producción de un bien o servicio, expresadas en kg de CO₂-eq (Batalla *et al.* 2014). La estimación de la HC es fundamental para determinar las mayores fuentes de emisiones e identificar las variables claves durante la producción con la finalidad de establecer estrategias de manejo que mejoren los sistemas productivos, haciéndolos más eficientes y mejorando su rentabilidad (Dougherty *et al.* 2019).

La HC de un producto está basada en la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), esta metodología evalúa el impacto ambiental de la producción e identifica los procesos intensivos en recursos y emisiones dentro del ciclo de vida de un producto (Wiedemann *et al.* 2015).

El esquema común para cualquier estudio de HC implica: a) delimitación del sistema; b) definición de la unidad funcional y sistema de asignación de emisiones; c) descripción de los sistemas productivos d) cálculo de las emisiones, factores de emisión; e) cálculo de la huella de carbono (Batalla *et al.* 2014).

Las emisiones provenientes del sector ganadero son principalmente CH₄, N₂O y CO₂ los cuales son representados como CO₂-eq (IPCC 2006), siendo el potencial de calentamiento global para el CH₄ 25 CO₂-eq y para N₂O 298 CO₂-eq. Por lo tanto, se asume que las emisiones de estos gases afectan la temperatura ambiental en esta proporción, es decir el

potencial de calentamiento global del CH₄ es 25 veces más fuerte que el CO₂. Sin embargo, estudios recientes demuestran que, en comparación con el CO₂, el CH₄ es un gas de calentamiento mucho más potente (por molécula en la atmósfera); pero también es mucho más breve. Por otro lado, el CO₂ y el N₂O tiene un efecto de calentamiento mucho menor durante las primeras décadas, pero se eliminan muy lentamente de la atmósfera, siendo así el N₂O puede tratarse como un equivalente más directo al CO₂ (Lynch *et al.* 2020) y no el CH₄.

Por otro lado, una tasa constante de emisiones de CH₄ contribuirá al mantenimiento de su concentración elevada en la atmósfera. Los aumentos en la tasa de emisiones de CH₄ conducirán a una concentración creciente del mismo y contribuirán a un mayor calentamiento; las reducciones en las tasas de emisión disminuirán las concentraciones de CH₄ y darán como resultado que la temperatura vuelva a bajar de su nivel elevado existente, deshaciendo parte del calentamiento que ya experimentamos (Lynch *et al.* 2020).

Estas emisiones están asociadas principalmente a procesos como la fermentación entérica, manejo del estiércol de los animales (emisiones de CH₄ producidas durante la descomposición de las heces) y los provenientes del cultivo de forrajes (emisiones producidas en el uso de fertilizantes) utilizados en la alimentación animal (ISO 2006).

2.8.2 Huella de carbono en ganadería

La aplicación del ACV en los sistemas agrícolas ganaderos es a menudo compleja debido que además del producto principal hay usualmente co-productos como carne o lana, lo cual requiere partición apropiada de los impactos ambientales de cada producto del sistema sobre la base de una asignación (IDF 2015).

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica utilizada para estimar los aspectos ambientales y los posibles impactos a lo largo de la vida útil de un producto (desde el nacimiento de una cría hasta la venta del mismo animal o de subproductos como: carne, leche, lana, entre otros. Las categorías generales de los impactos ambientales que necesitan consideración incluyen el uso de recursos y las consecuencias ecológicas (ISO 2006)

Las emisiones GEI del sector primario proceden principalmente del uso de combustibles fósiles como fuente energética; la deforestación para el incremento de tierras de cultivo; las emisiones de CH₄ y N₂O provenientes de la gestión de estiércoles; la fermentación entérica

de los rumiantes, así como las emisiones de N₂O derivado de la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Steinfeld *et al.* 2006).

Dentro del sector ganadero las emisiones de CH₄ a partir de la fermentación entérica, las emisiones de CH₄ y de N₂O producidas por la gestión del estiércol, así como la producción de forrajes y concentrados para la alimentación animal, contribuyen de manera significativa en el total de emisiones gases de efecto invernadero atribuidas a dicho sector (Batalla *et al.* 2014)

A nivel mundial se han promovido en los últimos años sistemas pecuarios con menores emisiones de GEI por unidad de producto, pero existen pocas evaluaciones que permitan conocer su verdadero potencial de mitigación (Rivera *et al.* 2015). En ese sentido el uso de herramientas, metodologías y protocolos que permitan medir o estimar las emisiones de GEI en la producción de leche, carne y lana ayudará a determinar su respectiva HC y así implementar estrategias de mitigación.

Algunos estudios de HC realizados en el sector ganadero demuestran que el mayor porcentaje de emisiones procede del mismo ganado y dentro de este las emisiones de CH₄ seguido del N₂O son los más contaminantes (Batalla *et al.* 2014). Esta información es corroborada por estudios realizados en sistemas silvopastoriles, donde además señalan que la producción de CH₄ fue generada principalmente como producto de la fermentación entérica durante la digestión de los alimentos (Rivera *et al.* 2015).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en dos etapas:

- Cuantificación de la emisión de metano entérico en alpacas y ovinos
- Estimación de la Huella de Carbono en la producción alpaquera

A continuación, se detallan las etapas:

3.1 CUANTIFICACIÓN DE LA EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN ALPACAS Y OVINOS

3.1.1 Lugar y duración

La presente investigación se llevó a cabo en la zona denominada Quimsachata, donde los animales pastorearon durante todo el estudio, abarcando un área aproximada de 5 ha. dicha zona se encuentra ubicado en el distrito de Santa Lucia entre las provincias de Lampa y San Román de la región Puno a 4200 msnm, con coordenadas 15°44'00'' de latitud Sur y 70°41'00'' de longitud Oeste y pertenece al Centro de Investigación y Producción (CIP) Quimsachata. La temperatura media anual oscila de 4.5 a 6.0 °C, con 40 por ciento de humedad relativa y una precipitación anual de 500 a 720 mm.

La vegetación presente en la zona está conformada en un alto porcentaje de gramíneas (> 60 por ciento) de los géneros *Festuca*, *Calamagrostis*, *Muhlenbergia*, *Poa*, *Aristida*, *Stipa* y *Bouteloua*, entre otros (Argote *et al.* 2013). Los suelos pertenecientes a la zona de Quimsachata varían de superficiales a medianamente profundo, con un promedio de 0.30 m; textura ligera a media, pH de moderado a ligeramente básico (5.98 a 7.99), materia orgánica medio (3.17 por ciento), fósforo disponible medio (8.3 ppm), potasio disponible bajo (Miranda 1990).

El ensayo se realizó en el año 2018 y tuvo una duración de 3 meses, iniciándose en setiembre y culminando en noviembre, de los cuales los dos primeros meses fueron utilizados para el acostumbramiento de los animales a los pastizales, (debido a que los ovinos fueron traídos de comunidades cercanas al CIP y las alpacas traídas de los rebaños listos para empadrear) y el último mes para el acostumbramiento a los implementos (2 semanas) y para la toma de muestra.

3.1.2. Animales experimentales

Se usaron ocho alpacas macho de raza Huacaya con un peso vivo promedio de 35.5 kg y ocho ovinos macho criollos con un peso vivo promedio de 30.1 kg. Las características de los animales experimentales se detallan en el Anexo I.

El número de animales por especie utilizados en la presente investigación, así como, la cantidad de días en los que se realizó el muestreo de gas expirado (ocho días), se encuentra conforme con lo establecido en: Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants (Berndt *et al.* 2014), para obtener una probabilidad (%) de 71 de detectar una diferencia significativa (P<0.05) entre ambas especies.

3.1.3 Técnica del SF₆ para mediciones de metano entérico

a. Elaboración de equipo para colección de gases

Los elementos que se usaron para esta técnica se basan en los recomendados por la guía de Berndt *et al.* (2014). Se usaron los elementos de conexión rápida Swagelok ® para la línea de colección de gases y elementos de ajuste para la generación de vacío y toma de muestra.

Las líneas de flujo se encuentran sujetas a las jácquimas y son las encargadas de captar y trasladar las muestras de gases emitidos por el animal. Para ello la línea debe asegurar la colección de muestra diaria (24 horas) a una tasa constante, de tal manera de que el cánister (contenedor donde son colectadas las muestras eructadas y exhaladas por los animales) quede lleno a un 40 por ciento de su capacidad.

La línea de flujo presenta un pequeño capilar de acero de 0.005” de diámetro interno. Este es el que permite mantener un flujo constante de muestreo, donde la restricción está dada por la constricción del mismo. El capilar fue apretando en una zona específica hasta lograr un flujo de 0.69 a 0.71 CCM con nitrógeno ultra puro a una presión de + 800 mbar, que

permitió obtener alrededor de - 400 mbar de presión diferencial en el cánister al final de un período de 24 horas de muestreo (tiempo de acumulación de los gases).

Los cánister son cilindros donde las muestras del eructo de los animales evaluados fueron colectadas, por lo que deben ser herméticos para garantizar la adecuada conservación de la muestra. En la presente investigación se utilizó para su construcción tubos de alta presión para agua de PVC de 3” con un espesor de 3.9 mm de marca PAVCO con una medida de 30 cm, en los extremos dos tapas de PVC del mismo espesor. Al extremo de cada cánister se perforó con un taladro pedestal con una broca de 11 mm y luego se hizo una rosca con una terraja macho NTP de ½. Para insertar un codo (B-2-ME, Swagelok) y un conector hembra (B-QC4-B-2PF, Swagelok).

Los cánister fueron evaluados con pruebas de vacío para descartar aquellos cánisters que no logran conservar la hermeticidad. Para lo cual se generó vacío a los cánisters con una bomba de vacío de doble etapa marca CPS, modelo VP12D. Luego se midió la presión con un manómetro diferencial digital marca Control C, código 3462, con un rango presión de -30 a + 30 psi, resolución 0.02 psi. La presión diferencial en Puno a 4200 msnm al vacío fue de - 610 mbar la cual debía mantenerse con una pérdida no mayor al 7 por ciento luego de 72 horas, caso contrario el cánister era descartado.

b. Calibración de las capsulas de Permeación

Las cápsulas emisoras de SF₆ fueron elaboradas por University of Saskatchewan (Department of Animal and Poultry Science, Canadá). Las mismas consisten en una barra de bronce que posee una cavidad en la que contiene el SF₆ y está cerrada mediante una membrana de teflón (Johnson *et al.* 2007) (Figura 2). Para conocer la tasa de liberación del gas de las capsulas, se realizó una calibración con 8 semanas de anticipación en la Universidad San Antonio Abad del Cusco. Se realizó una frecuencia de peso de tres y cuatro días entre peso y peso con una balanza de sensibilidad de 0.0001 gr. Estas fueron mantenidas en una estufa con aire forzado a 39°C durante todo el período de calibración. Las cápsulas fueron pesadas a las 9 a.m. cada día establecido durante su calibración.



Figura 2. Cápsulas de permeación

Para estimar la tasa de liberación en los días efectivos de medición se utilizó la regresión lineal, donde la ecuación de regresión debió tener por lo menos un R² de 99 por ciento para poder ser usado. Las características de las 16 cápsulas seleccionadas se detallan en el Anexo II y sus respectivas gráficas de regresión se presentan en los Anexos del III al XVIII.

c. Dosificación de las capsulas de permeación

La dosificación de las cápsulas de permeación se realizó el segundo día de la etapa de adaptación. El proceso fue al azar y se realizó con un lanza bolos para ovinos. Los animales fueron dosificados a las 6 am en el mismo día y estuvieron en el corral bajo observación hasta el día siguiente para detectar posibles regurgitaciones, saliendo sólo para beber agua al medio día y alimentándose dentro de los corrales con heno de cebada.

El uso de la técnica de SF₆ incluye la toma de muestra de aire del ambiente, el cual debe ser tomado en la misma zona donde los animales pastorean, por lo que se utilizó un animal adicional de cada especie llamados “blancos móviles”. Estos animales si bien es cierto no fueron dosificados con cápsulas de SF₆, si se les procedió a colocar las líneas de flujo, la cual a diferencia del resto de los animales fue posicionada a la altura del costillar para que la muestra no sea contaminada con los gases emitidos por los eructos del animal.

d. Adaptación de los animales experimentales

El período de adaptación tuvo una duración de 14 días, tiempo en el que los 18 animales experimentales utilizaron jácquimas y canister (Figura 3), manteniéndose dentro del área asignada para pastoreo.



Figura 3. Adaptación de los animales a los implementos

La línea de flujo fue conectada desde el canister hasta la nariz del animal y el tubo de nylon que compone la línea fue forrado con duck tape, como un refuerzo para evitar rupturas o dobleces. La línea se fijó con cintillos a distintos puntos en la jácquima; de igual manera el filtro, sobre los ollares de forma que pudo aspirar adecuadamente los gases emitidos durante el eructo de los animales.

e. Toma de muestra de aire expirado

La toma de muestras del aire expirado se realizó durante 8 días a la misma hora (6 am) antes de que los animales salgan al área de pastoreo. Durante este período se trabajó con 36 canisters y 36 líneas de flujo previamente calibradas bajo condiciones de altura, de los cuales 18 canister y 18 líneas de flujo fueron colocados en los animales durante 24 horas y al día siguiente por la mañana (6 am) fueron retirados y remplazados por otro grupo similar completamente limpio. Los canister eran evaluados en el laboratorio con una bomba de vacío todas las mañanas y limpiados con nitrógeno ultra puro para remover los gases residuales, posteriormente el vacío era generado durante 3 minutos por canister, tiempo probado con el cual se generaba el vacío total, -610 mbar (presión diferencial). Este procedimiento era realizado antes de ser trasladados al lugar donde se encontraban ubicados los animales y realizarse el intercambio de canister.

Seguidamente los cánisters eran trasladados a los corrales para ser colocados en los animales (6:00 a.m.). Las presiones de los cánisters eran registradas tanto a la entrada (-610 mbar en promedio) como a la salida (-360 mbar) del período de muestreo (24 horas) (Figura 4).



Figura 4. Toma de muestras de aire expirado

Las líneas de flujo fueron calibradas para tener un llenado en un rango de 30 – 50 por ciento de la capacidad del cánister, cualquier presión final fuera del rango de -366 y - 427 mbar generaría el descarte de la muestra, ya que valores por debajo de -366 mbar indicarían posibles fugas y valores por encima de -427 mbar sería un indicador de posible obstrucción del sistema.

En el laboratorio los canister fueron sometidos a presurización con gas nitrógeno ultra puro hasta alcanzar una presión de + 340 mbar, este procedimiento es realizado para facilitar el muestreo en los viales (frascos de vidrio de 22 ml) y evitar el ingreso del aire exterior. Posteriormente los canister eran dejados en reposos por cuatro horas para homogenizar y estabilizar el nitrógeno con los gases previamente capturados. Los viales de cromatografía fueron ensamblados a las septas de butilo y tapa de aluminio con un crimpador automático Perkin Elmer de 20 mm, para luego ser sometidos a vacío por tres minutos con una bomba CPS y una línea para vacío de viales (mecanismo compuesto por una tubería que conecta la bomba de vacío con una serie de válvulas para gases).

Se realizó pruebas para medir la calidad de sellado y hermeticidad del vial luego del vacío, para lo cual se escogía al azar dos viales, los cuales se sumergían en agua y se les insertaba

una aguja. Si el vacío era bueno, el vial se llenaba con agua sobrepasando el cuello del vial, de no ser el caso, el lote de viales crimpados era descartado.

Al finalizar las cuatro horas de realizada la presurización con nitrógeno de los cánister, se procedió a realizar el sub-muestreo con una línea de muestreo y una jeringa de 50 ml. El sub-muestreo de gases se realizó primero tomando las dos primeras muestras de cada cánister y eliminándolas con la finalidad de limpiar la jeringa entre cánister y evitando una contaminación cruzada. Posteriormente se tomaron dos sub muestras por cánister.

f. Análisis por cromatografía de gases

La cromatografía de gases (CG) fue utilizada para medir la concentración de CH₄ (ppm) y SF₆ (ppt) encontrados en los viales que contienen aire expirado. Esta técnica se realizó mediante la inyección manual de las muestras (0.6 ml) a un cromatógrafo de gases modelo 7890B, marca Agilent technologies. Teniendo una temperatura del inyector de 200°C con una presión de 11.2 psi y un flujo de 8.12 ml/min.

Se utilizó una columna de sílice para hidrocarburos ligeros y gases azufrados, GS-GasPro marca Agilent technologies de 30 m y diámetro interno de 0.32 mm. Así mismo, se utilizó un detector de ionización de flama (FID) de la marca Aligent technologies, con una sensibilidad ≤ 1.4 pico gramos para las mediciones de CH₄. La temperatura del detector fue de 250°C utilizándose helio como gas portador (10 ml/min), hidrógeno como gas combustible (40 ml/min) y aire como gas oxidante (350 ml/min).

En la CG están involucradas dos fases, una móvil y una estacionaria. La fase móvil, frecuentemente llamada gas acarreador es un gas inerte por ejemplo helio, argón o nitrógeno. La fase estacionaria consiste de columnas empacadas en las cuales la parte sólida actúa como fase estacionaria. La separación de los compuestos en una muestra de gas se basa en las diferencias en la fuerza con la cual éstos interactúan con la fase estacionaria. Entre más fuerte sea la interacción mayor es el tiempo que el compuesto interactúa con la fase estacionaria y por lo tanto le toma mayor tiempo migrar a lo largo de la columna y el compuesto en cuestión tiene un mayor tiempo de retención (Saynes y Ramírez 2018).

3.1.4 Mediciones en el pasto

Los pastizales altoandinos evaluados se caracterizaron por ser mayormente de tipo pajonal, los cuales constituyen un ecosistema importante en el altiplano puneño, representando más del 70 por ciento de esta región semi árida (Flores 1991).

A continuación, se presentan las mediciones realizadas:

a. Disponibilidad

La disponibilidad total de materia seca (fitomasa) se midió tres días antes que los animales entraran a la zona de pastoreo utilizando el método directo: "Evaluación por corte". Se identificaron dos sitios, entendiéndose como sitio al área que difiere en cuanto al tipo o cantidad de vegetación que puede sustentar (Borrelli y Oliva 2001), sitio de ladera y sitio de planicie. Con el uso de un cuadrante de metal de 1 m² se ubicó al azar 40 puntos de muestreo (20 en cada sitio) lanzando el marco a diferentes lugares del campo de pastoreo, siendo un muestreo totalmente al azar y con la ayuda de una tijera para cortar pasto se colectó manualmente el tejido vegetal ubicado dentro del cuadrante, al ras del suelo. Según las recomendaciones de ASRM (1962) y AOAC (1980) cada muestra fue colocada en bolsa de papel procediendo a registrar el peso verde, se codificaron y se protegieron externamente con bolsa de plástico para posteriormente ser trasladado al LENA Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), ubicado en la ciudad de Lima. En el laboratorio se realizó un sub muestreo y se procedió a secar las muestras en estufa a temperatura de 105 °C durante 24 horas, finalmente las muestras fueron pesadas nuevamente en una balanza de precisión. Para obtener la disponibilidad de materia seca expresada en kg ms/ha se procedió a multiplicar el % de materia seca por el peso de la muestra en fresco (m²) y llevarlo a 10 000 m² o una hectárea.

b. Composición botánica

La composición botánica fue estimada mediante la evaluación de los pastos para determinar que especies eran predominantes en dicha zona, utilizándose el método de transacción al paso (Parker 1951). Esta técnica se realizó antes de que los animales ingresen al lugar de pastoreo y consistió en la toma de muestras de la vegetación obtenidas por señalamiento o toques con un anillo censador, del diámetro de una pulgada y recorriendo el terreno dando 100 pasos dobles. Todas las observaciones se anotan en un formulario denominado "hoja de análisis de vegetación", en la primera línea se anota las especies perennes y anuales; en

la segunda línea se anota las especies sin valor como: Mantillo (Ml.), Roca (R), Pavimento de erosión (Pe), Suelo desnudo (S), Musgo (M). La hoja de análisis de vegetación utilizada en la presente investigación se muestra en el Anexo XIX.

c. Composición nutricional de la dieta

La técnica utilizada para obtener las muestras de las dietas de alpacas y ovinos y así determinar su composición nutricional, fue la técnica de simulación manual (Wallmo y Neff 1970). Esta metodología consistió en la observación de los animales (ocho alpacas y ocho ovinos) por tres días durante las tres primeras horas de pastoreo, en los primeros días de la etapa de colección de gas expirado. Tras la observación cuidadosa del pasto que era seleccionado por el animal durante el momento de la mordida, se procedía a tomar muestras manuales representativas de los pastos consumidos simulando la mordida. El área de donde son escogidas las muestras es conocida como estación alimentaria, la cual según lo expuesto por Flores (1983) está definida como el semicírculo en frente del animal de donde se cosecha el pasto.

Las muestras fueron secadas en estufa a 60°C por 48 horas, posteriormente fueron llevadas al Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos (LENA) del Departamento de Nutrición Animal de la (UNALM), para el análisis químico de materia seca (MS) y fibra detergente neutro (FDN), esta técnica usa extracciones químicas (con una solución detergente neutra bajo reflujo) seguido por determinación gravimétrica del residuo de fibra (Van Soes *et al.* 1991; citado por Segura *et al.* 2007). Los análisis de proteína cruda (PC) y ceniza (Cz) fueron obtenidas utilizando el método Kjeldahl (el cual mide el contenido de nitrógeno de una muestra) y por incineración respectivamente, los cuales fueron realizados en el Instituto de Nutrición Animal de la Universidad de Hohenheim en Stuttgart-Alemania.

3.1.5 Mediciones en los animales experimentales

a. Ingesta de materia seca

Con la finalidad de expresar el metano por unidad de consumo se estimó la ingesta de materia seca (IMS) en alpacas y ovinos bajo condiciones de pastoreo, para lo cual se utilizó un método indirecto:

$$\text{IMS} = \text{CMO} / \% \text{ MOD de la dieta}$$

Donde CMO corresponde al consumo de materia orgánica y MOD corresponde a la materia orgánica encontrada en la dieta. Finalmente, la ingesta de materia seca (IMS) se obtuvo dividiendo el consume de material orgánica (CMO) entre el porcentaje de la materia orgánica (MOD) encontrada en la dieta.

La estimación del consumo de materia orgánica (CMO) se determina en base a la excreción de la materia orgánica (MO) y la digestibilidad de la materia orgánica (DMO) (Smith y Reid 1954), según la siguiente formula:

$$\text{CMO} = \text{MO de la excreción fecal} / [1 - \text{DMO} / 1000]$$

La ecuación de Obregón (2019) fue utilizada para medir la digestibilidad de la materia orgánica (DMO) del alimento consumido en alpacas y la ecuación de Wang *et al.* (2009) fue utilizada para medir la digestibilidad de la materia orgánica consumida en ovinos.

$$\text{DMO} = 0.899 - 0.644 * \exp(-0.577 * \text{PCf}) \quad \text{Wang et al. (2009)}$$

$$\text{DMO} = 0.076 - (-0.3386 * \exp(-(-0.4484) / 100 * \text{PCf})) \quad \text{Obregon (2020)}$$

Donde DMO es el porcentaje de la digestibilidad de la materia orgánica y PCf es la concentración de proteína cruda en las heces expresada en g/kg de materia orgánica (MO).

La proteína cruda fecal fue determinada utilizando el método de colección total de heces. Durante 8 días se realizó la colección de heces de los animales experimentales con el uso de arneses y bolsas colectoras ubicadas en la base de la cola (Figura 5). Las heces totales excretadas de cada animal durante un período de 24 horas fueron mezcladas y pesadas con una balanza modelo PCE-BSH 6000, posteriormente una sub muestra correspondiente al 20% del total de heces de cada animal fue tomada y lleva a refrigeración (-10°) para su posterior análisis.



Figura 5. Colocación de arneses y bolsas colectoras

Las muestras fecales congeladas fueron descongeladas durante la noche, homogenizadas y agrupadas por animal. Se tomó una sub muestra de 500 g de la muestra agrupada. Todas las muestras fueron secadas en una estufa por 48 horas, luego las muestras fecales se molieron para pasar por un tamiz de 1 mm.

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos (LENA) del Departamento de Nutrición Animal de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), según el AOAC (1995). La concentración de materia seca (MS) de las muestras fecales se determinaron por duplicado secando las muestras de alimentación en un horno de aire forzado a 105 ° C durante 24 horas. Después, el sustrato fecal restante se pesó e incineró en un horno de mufla a 550 ° C durante cuatro horas para determinar la concentración de cenizas (Cz). Para el análisis de proteína cruda (PC), las concentraciones de nitrógeno de las muestras fecales fueron determinadas por duplicado utilizando el método micro Kjeldahl; luego, la concentración de nitrógeno se convirtió en proteína cruda (PC) multiplicándola por 6.25.

b. Estimación de las emisiones de metano entérico

Las emisiones de metano CH₄ entérico fueron estimados usando la ecuación de Williams *et al.* (2011):

$$CH_4Q = [SF_6Q] * [(CH_4C - CH_4B) / (SF_6C - SF_6B)] * [CH_4MM / SF_6MM]$$

Donde CH₄Q son las emisiones de metano expresado en g/día, SF₄Q es la tasa de permeación predeterminada del SF₆ expresada en mg/día, CH₄C y SF₆C es la concentración de las muestras de CH₄ y SF₆ de los cánister expresado en ppm y ppt respectivamente, CH₄B y SF₆B son las concentraciones de CH₄ Y SF₆ del medio ambiente expresado en ppm y ppt respectivamente, CH₄MM y SF₆MM son la masa molar de los gases de CH₄ y SF₆ expresado en g/mol.

Los valores obtenidos de CH₄Q fueron corregidos por las presiones inicial y final del periodo de muestreo de acuerdo a las recomendaciones de Berndt *et al* (2014):

$$CGC = CG * (PA - PN) / (PI - PF)$$

Donde CGC es la concentración de CH₄ corregido expresado en ppm y SF₆ expresado en ppt, CG es la concentración obtenida de la cromatografía de CH₄ expresado en pp y SF₆ expresado en ppt, PA es el promedio de la presión ambiental expresado en mbar, PN es la

presión final del cánister después de la presurización con nitrógeno expresado en mbar, PI es la presión inicial del cánister vacío expresado en mbar, PF es la presión final de los cánister después de 24 horas de colección expresado en mbar.

3.2 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA PRODUCCIÓN ALPAQUERA

La estimación de la HC se realizó siguiendo el protocolo ISO 14040 (ISO 2006), el cual describe el análisis del ciclo de vida de un producto tomándose en consideración las emisiones derivadas del proceso y las directrices establecidas por el IPCC (2006).

3.2.1 Descripción del sistema productivo

El estudio fue realizado en el Centro de Investigación y Producción Quimsachata perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria. El sistema de producción alpaquero se caracteriza por ser extensivo, donde las alpacas son pastoreadas a campo abierto en praderas naturales de ocho a 10 horas diarias con suplementación de heno durante la época seca (mayo a diciembre) para las alpacas que se encuentran ubicadas en la cercanía del Centro de producción,

El sistema es manejado bajo un pastoreo rotacional, teniendo un área total de 6,280 hectáreas las cuales se encuentran divididas en tres sectores: Tincopalca (2,514.0 has), Compuerta – Huata (1,467.5 has) y Quimsachata (2,299.5 has). Las áreas de pastoreo presentan reducida capacidad de carga debido a que la mayoría de las zonas de pastoreo son de buena, regular y pobre condición (INIA 2008). Siendo la capacidad de carga en promedio 1.2 U. A/ha, donde U. A. es unidad animal, correspondiente a una alpaca hembra adulta con su cría lactante.

Los animales son trasladados a las zonas más altas durante la época de lluvia (diciembre - abril), donde se encuentran los mejores pastizales que servirán de alimento a las hembras y a sus crías lactantes. Durante la época seca (mayo – noviembre) los animales son llevados a las zonas bajas donde aún quedan pastos de mejor calidad nutricional.

Las praderas naturales del CIP Quimsachata poseen una composición florística y cobertura de superficie que corresponde al tipo de pastizales naturales alto andinos compuesta por especies perennes, dentro de las cuales destacan: *Mhulembergia peruviana* (llapa pasto),

Hipchoeris stenocephala (pilli), *Festuca dolichophylla* (Chilligua) y *Stipa ichu* (ichu), (INIA 2008)

Respecto al manejo del estiércol, tanto las heces como la orina excretada en las áreas de pastoreo y corrales no son removidas, siendo incorporadas al suelo naturalmente. El combustible registrado tuvo dos propósitos, el primero fué para ser utilizado dentro del Centro de producción con la finalidad de trasladar al personal técnico hacia las áreas de pastoreo y corrales de las alpacas, para realizar labores de manejo durante todo el año. El segundo propósito, fue para ser utilizado fuera del Centro para el traslado de las pacas de heno desde el lugar de compra hasta el mismo Centro de producción. La energía eléctrica registrada es utilizada para el alumbrado de las oficinas e instalaciones de todo el Centro de producción.

Los datos fueron tomados de acuerdo a la información y datos encontrados en las libretas de campo, registros de producción, documentos contables y cuadernos de actividades.

3.2.2 Delimitación del sistema

La delimitación del sistema comprende todas las emisiones de GEI que se produjeron dentro de la explotación (Figura 6), llegando el análisis solo hasta el punto en que los animales son vendidos en el mismo Centro de investigación, es decir, no contemplando las emisiones provenientes de otras actividades posteriores.

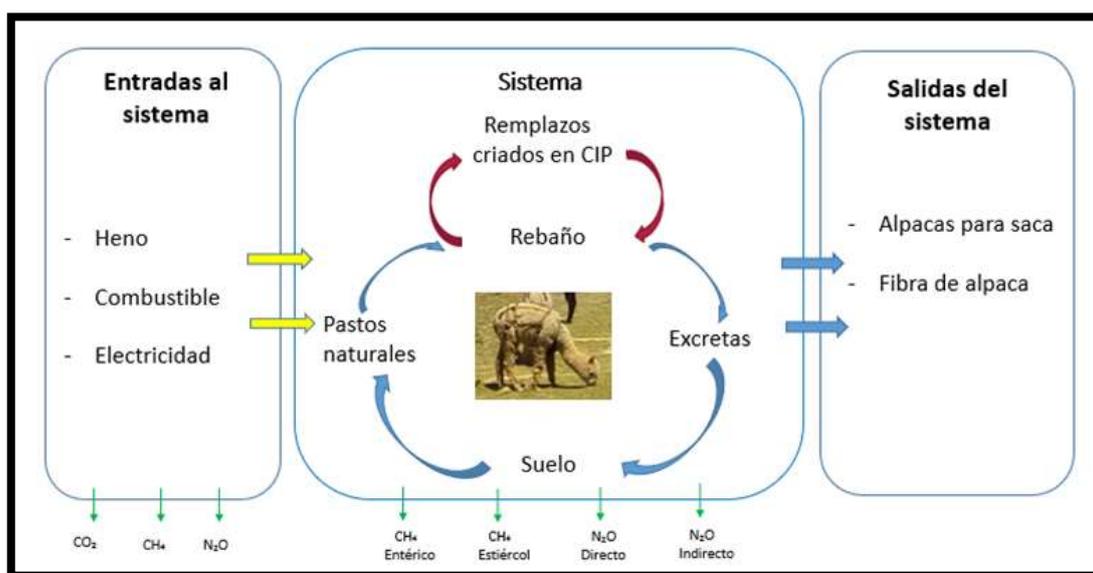


Figura 6. Delimitación del sistema de la producción alpaquera en el Centro de Investigación y Producción (CIP) Quimsachata

En el presente estudio, se incluyeron las emisiones de los GEI más importantes emitidos por las actividades agrícolas: dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) que abarcan tanto las emisiones directas como las indirectas. Las emisiones directas son aquellas producidas en la granja (por ejemplo, las emisiones de CH₄ provenientes de la fermentación entérica y de las excretas a nivel de praderas pastoreadas y en corrales) y que son controladas por el Centro de producción. Las emisiones indirectas se componen de emisiones que se producen en otros lugares, pero son atribuibles a las actividades de la granja (por ejemplo, las emisiones que surgen de la electricidad utilizada en el Centro de producción) (Peri *et al.* 2020).

3.2.3 Unidad funcional y co-productos

La unidad funcional (UF) es la unidad de referencia a la que van a ir imputadas las emisiones producidas en el sistema previamente delimitado (Batalla *et al.* 2014). En ese sentido la UF determinada según la asignación económica, fue un kg de peso vivo (PV) de alpaca, debido a que la mayor fuente de ingresos del CIP Quimsachata está basada en la venta de alpaca en pie, siendo los pesos de saca: 38 kg para tuis y 60 kg para adultos. Sin embargo, los sistemas ganaderos generan más de un producto final, que generalmente tienen un valor económico menor al producto principal. Estos son llamados coproductos, a los cuales es necesario asignar también las emisiones producidas. En el presente estudio se determinaron dos coproductos la fibra blanca y la fibra de color de alpaca, cuyo peso de vellón grasiento para alpaca adulta es de 2.6 kg y para alpaca tuis (joven) es de 1.9 kg.

3.2.4 Sistema de asignación

La asignación consiste en el reparto de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a un proceso entre las diferentes entradas y salidas de ese proceso. En el presente estudio se estableció tres tipos de asignación: asignación económica, asignación por masa y asignación biofísica (índice de requerimiento de proteína), adicionalmente se determinó la cantidad de emisiones de GEI por unidad de superficie (hectárea).

a. Asignación económica.

Se asignan emisiones de GEI de forma proporcional al valor económico de cada producto de acuerdo al IDF (2015). El factor de asignación (FA) económica se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FA \text{ (económica)} = (X * A) / (X * A + Y * B + Z * C)$$

Donde X es el total de peso vivo (kg), A es el precio del peso vivo en kg (S/), Y es el peso total de fibra blanca producida (kg), B es el precio de la fibra blanca (S/), Z es el peso total de la fibra de color producida y C es el precio de la fibra de color producida (S/).

b. Asignación por masa.

Se establece en función de la cantidad producida de cada producto. El FA por masa se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$FA \text{ (por masa)} = (X) / (X + Y + Z)$$

Donde X es el total de peso vivo (kg), Y es el peso total de fibra blanca producida (kg) y Z es el peso total de la fibra de color producida (kg).

c. Asignación biofísica.

Se asignan emisiones de GEI a cada requerimiento de proteína establecido para funciones fisiológicas como crecimiento animal y producción de fibra, siguiendo la guía de Evaluación y Desempeño Ambiental del ganado LEAP (2014), para lo cual se establece las unidades funcionales: 1 kg de PV de alpaca destinada para venta y 1 kg de fibra de alpaca. El factor de asignación (FA) biofísica se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FA \% \text{ (biofísica)} = 100 * (X) / (X + Y)$$

Donde X es el requerimiento de proteína destinado para la producción de carne y Y es el requerimiento de proteína destinado para la producción de fibra. En este sentido se podrá determinar el FA para cada uno de las unidades funcionales ya establecidas.

3.2.5 Calculo de emisiones

Los potenciales que se utilizaron fueron los establecidos por el IPCC (Forster *et al.* 2007) siendo todas las emisiones expresadas en kg de CO₂ equivalente, considerando 1 CO₂-eq para 1 molécula de CO₂, 25 CO₂-eq para 1 molécula de CH₄ y 298 CO₂-eq para 1 molécula de N₂O.

La HC se calculó en dos pasos; el primer paso abordó el cálculo de las emisiones producidas fuera del centro de producción que están asociadas al sistema (combustible, electricidad y fertilizantes) mientras que el segundo paso abordó los cálculos de las emisiones producidas

dentro del Centro de investigación: producción de CH₄ a partir de la fermentación entérica, producción de CH₄ a partir del manejo del estiércol y producción de N₂O a partir de la gestión de estiércol.

Los factores de emisión para el cálculo de las emisiones de GEI (CH₄, N₂O y CO₂) proveniente del estiércol, combustible, electricidad y los fertilizantes fueron estimados basándose en la metodología proporcionados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2006). No obstante, los factores de emisión para el cálculo de las emisiones de CH₄ entérico para la población de alpacas fueron obtenidos por proporcionalidad de acuerdo al peso corporal basándose en los resultados de la primera parte del presente estudio, estimándose un factor de emisión de 7.69 kg CH₄/año para alpacas jóvenes con peso promedio de 38 kg. (Cuadro 1). Así mismo, los factores de emisión para el cálculo de CH₄ provenientes de la gestión de estiércol fueron determinados por proporcionalidad de acuerdo al peso corporal de cada categoría de alpacas (adultos, tuis y crías).

Cuadro 1. Fuentes y factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono

Fuente de emisión	Ecuaciones	Factores de emission
Combustible	$\sum_a (\text{combustible } a * EFa)$	FE _a = 42.90 Tj/Gg (valor calórico de gasolina de 90)
Electricidad	$\sum Mwh * FE$	0.547 (Factor de emisión del SEIN, 2007)
Fertilizantes	$N_2O_{ATD} - N = F_{SN} * FRAC_{(GASF)} * EF * \frac{44}{28}$	EF = 1 % FRAC _(GASF) = 0.1
Metano entérico	Machos / Hembras (60 kg) Tuis (38 Kg) Crías (25 Kg)	FE (adultos) = 12.14 kg CH ₄ /año FE (tuis) = 7.69 kg CH ₄ /año FE (crías) = 5.06 kg CH ₄ /año
Metano estiércol	$CH_4 \text{ estiércol} = \sum (EF_t * N_t)$	FE (adultos) = 0.24 kg CH ₄ /año FE (tuis) = 0.15 kg CH ₄ /año FE (crías) = 0.1 kg CH ₄ /año
Óxido nitroso de estiércol	$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_s \left[\sum_T (N_t * Nex_t * MS_{(T,S)}) \right] * EF_{3(S)} \right] * \frac{44}{28}$ $Nex_{(T)} = N_{indice(T)} * \frac{TAM}{1000} * 365$	FE ₃ = 0.01 MS = 100% N _{índice} = 1.17 TAM = (masa animal típica)
	$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilizacion-MMS} * EF_4) * \frac{44}{28}$ $N_{volat-MMS} = \sum_s \left[\sum_T \left[(N_{(T)} * Nex_{(T)} * MS_{(T,S)}) * \frac{FRAC_{GasMS}}{100} \right] \right]$	FE ₄ = 0.01 FRACGASM = 12%

3.2.6 Cálculo de Huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono se determina multiplicando el factor de asignación (sea asignación económica, por masas o biofísica) por el impacto medio ambiental del proceso (kg de CO₂-eq producido), y dividido entre el total de saca expresado en kg de PV.

$$HC = \frac{FA * Total CO_2 - eq (kg)}{Total de saca (kg)}$$

Utilizando la asignación biofísica se determinó la HC con diferentes porcentajes de saca: 10, 15, 25 y 30 por ciento y se realizó la comparación con el valor real de saca (20 por ciento). Dichos porcentajes corresponden al rango de saca en crianza de alpacas que puede ser evidenciado por investigaciones realizadas por Gutiérrez (1993), quien estimó valores de saca para alpacas con diferentes sistemas de manejo productivo: empresas multi comunales, empresas asociativas de la sierra central y comunidades campesinas (7.5, 13.9, y 16 por ciento de saca respectivamente).

3.2.7 Análisis de incertidumbre de la HC mediante la simulación de Monte Carlo

Se evaluó la contribución de cada parámetro (factores de emisión proveniente de cada fuente de emisión) aumentando uno a la vez y analizando como se ven afectadas las emisiones totales estimadas. Los parámetros se seleccionaron en función de su importancia para la HC.

El nivel de aumento de cada parámetro dependió de los rangos de incertidumbre proporcionados por el IPCC (2006) tal y como se muestra en el Cuadro 2 y se consideró razonable no usar los valores extremos (Flysjo *et al.* 2011). Para el caso de los parámetros FE de la fermentación entérica, se consideró un incremento del 20 por ciento el cual fue determinado a partir de la desviación estándar de los valores de FE para cada categoría de animales (crías, tuis y adultos) obtenidos en la primera etapa del estudio.

Cuadro 2. Coeficiente de variación o rango de incertidumbre, factor de emisión utilizado y desviación estándar de las fuentes de emisión predominantes

Parámetros	Coeficiente de variación o rango de incertidumbre	FE usado	DE
FE de las emisiones de CH ₄ entérico en adultos	0.26 ^a	12.13	3.14
FE de las emisiones directas de N ₂ O de gestión de estiércol	0.003 - 0.03 ^b	0.01	0.005
FE de las emisiones indirectas de N ₂ O de gestión de estiércol	0.002 - 0.05 ^b	0.01	0.005

^a Coeficiente de variación derivado de los datos de la primera etapa del estudio, ^b rangos proporcionados por el IPCC (2006).

La simulación de Monte Carlo se llevó a cabo eligiendo al azar un valor para cada FE definido, realizando 5000 interacciones. La simulación de Monte Carlo se realizó utilizando la herramienta Excel. Los intervalos dentro de los cuales la simulación elegiría aleatoriamente un valor para cada FE fueron definidos por sus desviaciones estándar, las cuales fueron determinadas basándose en los rangos de incertidumbre propuestos por el IPCC (2006), mostrados en el Cuadro 2. Para las estimaciones de los FE se asumió una función logarítmica normal.

3.2.8 Determinación de la HC con diferente porcentaje de saca

Para determinar las poblaciones de las diferentes categorías de alpaca, así como las producciones de fibra bajo diferentes porcentajes de saca se realizó un desarrollo de población utilizando los parámetros productivos y parámetros reproductivos del Centro de investigación. Así mismo, para obtener los porcentajes de saca fue necesario establecer diferentes escenarios donde varía el parámetro porcentaje de natalidad (20, 31, 54, 70 y 95 por ciento). Dichos porcentajes de natalidad fueron obtenidos de investigaciones realizadas en sistemas productivos alpaqueros (López 2017; Barrantes *et al.* 2018 y Ampuero *et al.* 2014).

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La prueba de Tukey fue utilizada para comparar las medias de las mediciones de metano entérico entre alpacas y ovinos. Esta comparación fue realizada por especie animal y por unidad evaluada (g CH₄/día, g CH₄/PM y g CH₄/CMS). La prueba de Tukey fue utilizada también para evaluar las diferencias en la composición química de los pastos de la dieta entre alpacas y ovinos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CUANTIFICACIÓN DE LA EMISIÓN DE METANO ENTÉRICO EN ALPACAS Y OVINOS

4.1.1 Mediciones en el pastizal

a. Disponibilidad del pasto

La disponibilidad encontrada fue de 1630 kg MS/ha, dicho valor se encuentra dentro de los valores reportados por Condori (2005) quien encuentra una fluctuación de la producción de fitomasa, baja en periodos de época seca y alta en época de lluvias, con un promedio de 1196.86 Kg/ha en época seca y 2148.14 Kg/ha en época lluviosa. En otros estudios, Castellaro *et al.* (2004) encontraron valores de 1860 kg ha⁻¹ con un rango entre 637 y 3633 kg ha⁻¹ en una investigación realizada en localidades ubicadas dentro del Parque Nacional Lauca, I Región, Chile durante la época seca (mes de julio). De igual manera, valores similares (1560 kg MS/ha) fueron reportados por Zapana (2016) durante un estudio realizado en Puno a una altura de 3850 msnm en una zona de baja humedad, donde evaluó fitomasa de pastizales, obteniendo un valor de 1692.3 kg MS/Ha predominando el desarrollo de la especie *Muhlenbergia fastigiata*. La diferencia entre el valor encontrado en el presente estudio y lo reportado por los autores puede ser atribuidos a los tipos y condiciones de los pastizales evaluados, especialmente durante la época seca donde hay escasez grande de producción de fitomasa (Farfan y Farfan 2012)

b. Composición botánica de los pastizales

En el Cuadro 3 se muestran los resultados de la composición botánica del pasto. En el presente estudio se identificaron tres tipos de pastizales: pajonal de puna, césped de puna y canllares (CONATURA 2004). Las especies predominantes dentro de los pastizales considerados pajonal son: chilligua (*Festuca dolicophyla*), ichu (*Stipa ichu*), coccho ocscha

(*Stipa obtuse*) ichu (*Stipa brachyphyla*), chili (*Muhlebergia festigiata*), sillo sillo (*Alchemilla pinnata*), tola tola (*Parastrephya lipidophylla*) y kanlli (*Margiricarpus pinus*). Entre las especies predominante en césped de puna y canllares se encuentran el crespillo (*Calamagrostis vicunarum*) y el pinco pinco (*Ephedra americana*), respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Quispe (2017), quien en un estudio realizado en pastizales naturales de la provincia de Jauja entre 4162 msnm a 4014 msnm, encontró una mayor formación vegetativa de Pajonal de festuca (*Festuca dolichophylla*), Pajonal stipa (*Stipa ichu*), *Calamagrostis vicunarum* y *Alchemilla pinnata*, encontrándose los dos primeros pastizales en mayor proporción (con respecto a los demás) durante la época seca, siendo confirmado por el MINAM (2002) que señala, que los pajonales secos ubicados al centro y sur del país se caracterizan por la presencia dominante de especies de pastos, entre las cuales destaca el ichu (*Stipa sp.*), acompañado de los géneros Festuca y Calamagrostis, entre otros.

Cuadro 3. Composición botánica identificadas en las pasturas

Especie	Nombre comun	Tipo de pastizal	(%)
<i>Festuca dolichophylla</i>	Chilliwa	Pastizal de puna	28
<i>Stipa ichu</i>	Ichu	Pastizal de puna	9
<i>Stipa obtuse</i>	Coccho ocscha	Pastizal de puna	10
<i>Stipa brachyphyla</i>	Ichu	Pastizal de puna	6
<i>Muhlebergia festigiata</i>	Qota	Pastizal de puna	15
<i>Alchemilla pinnata</i>	Sillu sillu	Cesped de puna	12
<i>Parastrephya lipidophylla</i>	Tola	Pastizal de puna	8
<i>Margiricarpus pinnatus</i>	Kanlli	Canllar	6
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	Crespillo	Pastizal de puna	6

c. Composición nutricional de la dieta

Los resultados correspondientes a la composición química se muestran en el Cuadro 4. Flores en 1996 realizó estudios sobre el valor nutritivo de pastos altoandinos, reportando valores de 4.32 por ciento de PC durante la época seca concluyendo que las alpacas al pastoreo en el altiplano pueden estar en déficit de proteína cruda (PC) durante este periodo de escasez. De igual manera Chino (2020) evaluó la composición química de los pastizales

altoandinos consumidos por alpacas durante época seca en el Centro Experimental “La Raya”, obteniendo valores muy similares a los reportados en el presente estudio, 77.3 y 705.5 g/kg de MS para PC y FDN respectivamente.

Cuadro 4. Composición química de la dieta de alpacas y ovinos (promedio y desviación estándar) Cz, PC y FDN expresado en g/kg de materia seca.

	Alpaca	Ovinos
Cz ¹	86.1 ± 5.9 ^a	89.9 ± 5.3 ^a
PC ²	76.2 ± 4.1 ^a	72.8 ± 18.7 ^a
FDN ³	688.0 ± 6.4 ^a	530.0 ± 35.4 ^b

^{a, b} En cada fila las medias seguidas por diferentes letras difieren estadísticamente (P < 0.05).

¹ Ceniza. ²Proteína cruda. ³Fibra detergente neutro.

No se hallaron diferencias estadísticas (P>0.05) en las concentraciones de proteína cruda y ceniza entre las dietas de alpacas y ovinos, sin embargo, sí se encontraron diferencias estadísticas al evaluar FDN (P<0.05) (Cuadro 4). La calidad nutricional de una pastura se observa básicamente en su contenido de proteína cruda y energía. San Martín (1987) determinó que la menor calidad nutricional de la dieta corresponde a la consumida por la llama, seguida por la alpaca, siendo la de mejor calidad la ingerida por el ovino. Esta mejor calidad de la dieta consumida por los ovinos se debe a su mayor capacidad de selección de los forrajes consumidos. Sin embargo, en el presente estudio no hubo diferencias significativas en la proteína hallada en las dietas de alpacas y ovinos, estos resultados tendrían su explicación en la época del año en la que se desarrolló la investigación (época seca), donde el alimento es escaso y de muy pobre calidad nutritiva. En el ambiente altoandino alpacas, llamas y ovinos son dependientes de la pastura natural como fuente de alimento. La producción de materia vegetal no es constante a lo largo del año, ni de un año al otro. Esto significa que los animales están sujetos a variaciones en cantidad y calidad de pastura disponible a lo largo de su vida (FAO 1996), por lo tanto, es comprensible que no existan diferencias en calidad proteica entre los pastos consumidos por ambas especies.

El valor de FDN de los pastos difieren en ambas especies, siendo esto consecuencia de la selectividad. En comparación con el ovino, la alpaca selecciona más las gramíneas altas que las bajas (Bonacic 1991). Así mismo, San Martín (1987) afirma que, al comparar la

selectividad de las 3 especies, se puede observar que los ovinos son los animales más selectivos y las alpacas ocupan una posición intermedia entre ovinos y llamas. Por lo tanto, la alpaca sería un animal altamente adaptable, variando su selectividad de plantas en los forrajes nativos, de acuerdo a su disponibilidad

4.1.2 Mediciones en los animales experimentales

a. Ingesta de materia seca

La ingesta de materia seca por porcentaje de PV se muestra en el Cuadro 5 donde se puede observar valores superiores estadísticamente ($PV < 0.05$) para los ovinos respecto a las alpacas. El nivel de consumo de alimento expresado en kg de materia seca, según San Martín (1991) es de 1.8 por ciento de su peso vivo en alpacas y de 2.3 por ciento en ovinos, observándose siempre un mayor consumo para el caso de los ovinos en relación con su peso vivo. El mismo autor en el año 1989 reportó valores inferiores de la ingesta de materia seca por porcentaje PV en alpacas y ovinos cuando fueron alimentos con pastos naturales en época seca (1.29 y 1.15, respectivamente), observándose en este caso que las alpacas presentan un mayor consumo. En el presente estudio el menor consumo observado en los camélidos sudamericanos, podría estar asociado al menor requerimiento de energía en los camélidos sudamericanos (Schneider *et al.* 1974, citado por San Martín y Bryant 1987). Lo cual conlleva a que las alpacas presenten un menor potencial de consumo. En alpacas en mantenimiento el consumo es de 1.25 por ciento (Van Saun 2006).

Cuadro 5. Ingesta de materia seca de alpacas y ovinos (promedio y desviación estándar) expresado en kg, % peso vivo, kg PV^{0.75}.

Variable	Alpacas	Ovinos
Ingesta de materia seca (kg/día)	0.8 ^a ± 0.2	1.1 ^a ± 0.2
Ingesta de materia seca %PV	2.2 ^b ± 0.4	3.7 ^a ± 1.0
Ingesta g de MS/kg PV ^{0.75}	55.1 ^b ± 11.9	87.6 ^a ± 23.9

^{a, b} En cada fila las medias seguidas por diferentes letras difieren estadísticamente ($P < 0.05$).

Muchos estudios confirman que los camélidos presentan una menor ingesta de alimento comparado con los ovinos (Fraser y Baker 1998); sin embargo, otros autores no encontraron diferencias estadísticas (Warmington *et al.* 1989).

La ingesta de materia seca expresado en g/kg de PV^{0.75} tuvo un valor estadísticamente superior ($P < 0.05$) para los ovinos respecto a las alpacas. Estos datos concuerdan con lo mencionado por San Martín (1987) quien afirma que la ingesta de materia seca en alpacas ajustado con su peso metabólico es 36 por ciento más bajo comparado con los ovinos cuando son alimentados con pastos naturales.

Un ensayo comparativo de consumo en confinamiento y pastoreo entre alpacas y ovinos machos, alimentados en nivel ad libitum, reveló que las alpacas seleccionan dieta de menor calidad, y consumen menor cantidad de materia seca que el ovino (g/kg PV^{0.75}), 38.8 v 74 heno de alfalfa (*Medicago sativa*) en confinamiento; 33.5 v 70 ryegrass/trébol blanco (*Lolium perenne/Trifolium repens*), y 40.3 v. 128.0 para trébol cornudo (*Lotus corniculatus*) en pastoreo, respectivamente (Pinares *et al.* 2003).

Valores similares sobre el consumo de alimento ajustado al peso metabólico en alpacas fue reportado por Reiner *et al.* (1987), quien menciona que en un sistema de pastoreo sobre *Festuca dolichophylla* y *Muhlenbergia fastigiata* principalmente y a 4200 msnm durante época seca obtuvo valores de consumo de 60.5g/ kg PV^{0.75}. De igual forma López *et al.* (1998) encontró que cuando las alpacas consumen a voluntad una mayor cantidad de *Festuca dolichophylla*, la ingesta de materia seca es de 56.9 g / kg PV^{0.75}.

Estos estudios demuestran que los datos reportados en la presente investigación se encuentran dentro de los valores esperados dentro de un sistema de alimentación extensiva.

b. Emisión de metano entérico

Los resultados de emisiones de metano entérico en alpacas y ovinos alimentados con pastos naturales alto andinos se muestran en el Cuadro 6. La base de datos se detalla en los Anexos XXII y XXIII.

Cuadro 6. Digestibilidad de la materia orgánica, emisiones de metano entérico y factor de conversión de metano de alpacas y ovinos (promedio y desviación estándar).

Variable	Alpacas	Ovinos
DMO (%)	62.1 ± 1.2 ^a	52.4 ± 1.2 ^b
CH ₄ (g/día)	21.8 ± 7.4 ^a	22.7 ± 4.8 ^a
CH ₄ (g/kg IMS ¹)	25.9 ± 6.7 ^a	21.8 ± 6.7 ^a
CH ₄ (g/kg IMO ²)	28.4 ± 7.2 ^a	23.9 ± 7.3 ^a
CH ₄ (g/kg PV ^{0.75})	1.4 ± 0.4 ^a	1.8 ± 0.4 ^a
Y _m (%) ³	8.3 ± 2.1 ^a	7.5 ± 2.4 ^a

^{a, b} Medias con diferentes super índices en la misma fila difieren significativamente P < 0.05.

¹ Ingesta de materia seca, ² Ingesta de materia orgánica, ³ fracción de la energía bruta destinada a la producción de metano.

La producción de CH₄ entérico en la presente investigación fue expresada en g/día, g/kg IMS y g/kg PV^{0.75}. Los valores de DMO de las alpacas fue superior estadísticamente al de los ovinos (P<0.05). Estos valores de digestibilidad fueron obtenidos mediante las ecuaciones de Obregón (2019) para el caso de alpacas y Wang *et al.* (2009) para el caso de ovinos.

Diferentes estudios mencionan que los camélidos presentan una superior eficiencia en la digestión de la materia seca y la fibra que los rumiantes (Hintz *et al.* 1973 y Sponheimer *et al.* 2003) debido a una mayor retención de partículas. Lo que da como resultado en un mayor tiempo disponible para la fermentación de la digesta y por lo tanto una mayor digestibilidad de los nutrientes. Esta mayor retención de partículas en los camélidos y, por consiguiente, la mayor exposición a la fermentación microbiana podría dar como resultado una mayor producción de CH₄ por unidad de alimento ingerido en comparación con los rumiantes.

No se encontraron diferencias estadísticas en las emisiones de CH₄ entérico por unidad de ingesta de materia seca y por unidad de ingesta de materia orgánica entre ambas especies; sin embargo, en ambos casos las emisiones de CH₄ de las alpacas fue numéricamente mayor respecto a los ovinos. Dicho resultado en la producción de CH₄ g/kg IMS nos daría a entender que las vías de metanogénesis que forman parte de la digestión microbiana en los compartimientos C1 y C2 son similares entre ambos grupos (Dittman *et al.* 2014).

En un estudio realizado por Zhai *et al.* en el 2015, señala que ovinos que consumieron pastos con un porcentaje de DMO (52%) similar al obtenido en el presente estudio, presentaron emisiones de CH₄ iguales a 10 g/día difiriendo en el valor obtenido en el presente estudio. En un estudio realizado por Boadi y Wittenberg (2002) en vacunos se ofreció forrajes con alta, media y baja digestibilidad de materia orgánica, reportando valores de emisiones de CH₄ expresados en L/ Kg de MO, encontrando que la producción de CH₄ se incrementó conforme la digestibilidad de la materia orgánica disminuía. La cantidad de CH₄ producido por animal según Harinder y Makkar (2004) se da principalmente por la fermentación de los pastos hasta los ácidos grasos volátiles acetato y butirato, por lo tanto, una producción de gas relativamente menor estaría asociado con la producción de propionato. Los rumiantes emiten el metano a la atmósfera mediante la eructación y la cantidad liberada depende del volumen de alimentos consumidos y de la composición de la ración (Gil 2004 y Beauchemin y McGinn 2005), en ambos casos, tanto las alpacas como los ovinos consumieron la misma calidad de alimento, debido a la escasez de pastos propio de la época y del tipo de pastizal, esta podría ser la explicación para la similitud encontrada entre la producción de CH₄ g/kg IMS en alpacas y ovinos. Probablemente, el mecanismo fisiológico de adaptación de las alpacas como una tasa más baja de paso de alimentos implicaría una alta digestibilidad de la fibra y, por lo tanto, un mayor rendimiento de metano (Pinares *et al.* 2003).

La cantidad de CH₄ entérico en g/kg PV^{0.75} reportado en este estudio fue similar tanto en alpacas como en ovinos, cuadro 4. Las emisiones entéricas de CH₄ de alpacas reportadas en este estudio fueron similares a las reportadas por Moscoso *et al.* (2016), quienes encontraron emisiones de CH₄ de 1.3 g día / kg PV^{0.75}. Así mismo, Zhai *et al.* (2015) encontró valores mas bajos de CH₄ entérico expresado en g/kg PV^{0.75} cuando los ovinos fueron sometidos a diferentes intensidades de pastoreo: ligero, medio y pesado, obteniendo valores de 0.9, 1.1 y 1.14 g/kg PV^{0.75}. Wang *et al.* (2009) estudió que las digestibilidades de materia seca y materia orgánica tuvieron una correlación significativamente positiva con la producción de CH₄ expresado en g/ kg PV^{0.75}. Estos estudios demuestran que existen diferentes factores que pueden influir en la emisión de CH₄ entérico, por lo que los autores sugieren tener una descripción detallada de la población ganadera, ingesta diaria de alimenta y tasa de conversión de CH₄ en alimento entre otros.

De los resultados obtenidos tanto en la producción de metano como en la calidad nutritiva de los pastos consumidos por ambas especies se puede inferir que bajo las condiciones en la que se realizó la presente investigación, las alpacas tienen una mayor capacidad para digerir

los carbohidratos estructurales al cubrir sus necesidades nutricionales y producir una cantidad similar de CH₄ que los ovinos consumiendo una dieta con mayores niveles de fibra.

El metano expresado como porcentaje de la energía bruta ingerida (Y_m) observado en las alpacas no fue estadísticamente diferente (P>0.05) a los valores de Y_m hallados en los ovinos, lo que puede ser explicado por la baja calidad y digestibilidad de los pastos consumidos por ambas especies dado que pastorearon en la misma zona, viéndose reflejado estos valores en las similares emisiones de metano. Ambas características del alimento calidad y digestibilidad afectan en mayor medida los valores de Y_m (Harper *et al.* 1999).

El valor de Y_m obtenido para los ovinos se encuentra dentro del rango establecido por el IPCC (2006), (6.5 ± 1 por ciento) del mismo modo valores de Y_m no son reportados para las alpacas en la guía del IPCC (2006). Esta guía estima el Y_m basado en mediciones de IMS, energía bruta y emisiones de metano, argumentando que, con raciones de buena calidad, alta digestibilidad y valor energético, se deben usar los valores de Y_m más bajos en el rango. De lo contrario, cuando se usan raciones más pobres, con baja digestibilidad, los rangos más altos se consideran más apropiados (IPCC 2006), esto explicaría los altos valores de Y_m obtenidos en este estudio debido a la baja calidad nutricional de los pastos disponibles para ambas especies. Por otro lado, valores obtenidos por Pelchen y Peters (1998) destacan la relación existente entre el consumo de alimento y el valor del porcentaje de pérdida de CH₄ (como porcentaje de la ingesta de la energía bruta) cuyos valores oscilan entre 7.94, 7.09, 7.17, 6.91% y 6.39 por ciento para diferentes niveles de alimentación, menor a 0.8 kg, 0.8 – 1 kg, 1.0-1.2 kg 1.2 – 1.4 kg y mayores a 1.4 kg respectivamente. Presentando valores muy similares a los obtenidos en el presente estudio.

4.2 Estimación de la Huella de Carbono de la producción alpaquera

En el Cuadro 7 se describe la población promedio anual alpaquera del CIP Quimsachata con sus respectivas categorías, así como las posibles fuentes de emisión de GEI distribuidas dentro de las entradas al sistema, los productos resultantes categorizados y distribuidos dentro de las salidas del sistema. Dentro de los índices productivos seleccionados se encuentran: porcentaje de fertilidad definido como el porcentaje de alpacas paridas respecto al número total de alpacas servidas (80 por ciento), porcentaje de natalidad definido como el porcentaje de crías nacidas respecto al número total de alpacas servidas (54 por ciento) y porcentaje de saca definido como el porcentaje de animales destinados para venta respecto al total de la población (20 por ciento).

Cuadro 7. Población por categorías, entradas y salidas del sistema de producción alpaquero en el CIP - Quimsachata.

Año 2018	
Población Promedio Anual	
Categoría	Cabezas
Machos- (> 3 años)	278
Tuis machos (< 3 años)	84
Crías machos (< 8 meses)	163
Hembras (> 2 años)	684
Tuis hembras (< 2 años)	113
Crías hembras (< 8 meses)	170
Entradas	
Heno avena (kg/año)	6,000
Combustible gasolina (L/año)	2,023.86
Electricidad (kwh/año)	14,423.86
Salidas	
Categoría	Cabezas
N ° Alpacas tuis saca (< 3 años)	136
N° Alpacas viejas saca (> 7 años)	211
Fibra de alpaca blanca (kg)	343
Fibra de alpaca color (kg)	681

La cantidad en kg de PV de alpacas vendidas durante el año 2018 fue de 17,828 kg cuyo precio fue de S/4.0 por kg, la cantidad de fibra vendida para el mismo año fue de 343 kg de fibra blanca (grasienta) y 681 kg de fibra de color (grasienta) y sus precios fueron S/35.6 por kg y S/13.3 por kg para fibra blanca y fibra de color, respectivamente. Los precios de cada producto antes señalado se obtuvieron de las boletas de venta correspondiente al año 2018.

La emisión de GEI halladas en las entradas y dentro del sistema productivo están representadas en la base de CO₂-eq para el año completo de producción (2018). La descripción se encuentra detallada en el Cuadro 8. El total de emisiones producidas por el Centro de producción durante el año 2018 fue de 556,102 kg de CO₂ -eq. Utilizando la asignación económica como referencia, la HC determinada para la unidad funcional fue de 24.03 kg CO₂-eq/kg PV de alpaca.

Cuadro 8. Emisiones de GEI expresado en CO₂-eq (kg/año), porcentaje de contribución de las fuentes de emisión (%) y emisiones en kg de CO₂-eq por 1 kg de peso vivo de alpaca producido en el Centro de Producción Quimsachata (kg CO₂-eq/kg PV).

Fuentes de emission	Total de Co ₂ -e (kg/Año)	Contribución (%)	Emisión (kg CO ₂ - eq/kg PV)
Ingresos al Sistema			
Combustible	5649	1.02	0.24
Electricidad	7,889	1.42	0.34
Fertilizantes	208.5	0.04	0.01
Sub total	13,746	2.47	0.59
Dentro del Sistema			
CH ₄ fermentación entérica	371,964	66.9	16.07
CH ₄ gestión de estiércol	7,343	1.32	0.32
N ₂ O gestión de estiércol	163,047	29.32	7.04
Sub total	542,355	97.53	23.43
	556,102	100.00	24.03¹

¹según asignación económica.

Un ACV de cualquier producto agrícola debería considerar las peculiaridades de cada país dentro de su contexto de análisis, por lo tanto, debemos saber cómo aplicar esta metodología correctamente de acuerdo con las características de las diferentes regiones (Ruviano *et al.* 2012). En ese sentido, el presente estudio consideró el tipo de pastoreo realizado en la región

altoandina, la suplementación con heno en temporada de heladas y prácticas respecto al manejo de las excretas.

Los datos proporcionados en el presente estudio nos muestran la cantidad de emisiones producidas en un centro de producción alpaquero bajo un sistema de alimentación extensivo, donde el manejo de los animales (nutricional, sanitario y reproductivo) es el óptimo teniendo en cuenta las condiciones agrestes en la cual se desarrolla dicha actividad. No se han encontrado registro de HC realizados en crianza de camélidos en la actualidad, sin embargo, hay una amplia información sobre emisiones de gases de efecto invernadero en granjas de ovinos, donde el producto principal es 1 kg de PV producido y como co-producto la lana obtenida de la esquila.

Dentro del Centro de investigación el gas que tuvo mayor importancia por la cantidad de emisiones fue el CH₄, observándose valores de CH₄ de fermentación entérico de 66.9 por ciento de la HC. Las emisiones directas e indirectas de N₂O representaron el 29.3 por ciento de la HC total producida. En cuanto a las emisiones encontradas fuera del sistema de producción como el uso de electricidad y el uso de combustible, sólo representaron un pequeño porcentaje de la huella de carbono 1.4 y 1.0 por ciento del total de emisiones respectivamente. De esta forma se observa que el cálculo de HC nos permite conocer también el porcentaje de contribución de cada fuente de emisión (Figura 7).



Figura 7. Porcentaje de contribución de emisiones de cada fuente contaminante

Los porcentajes de contribución de emisiones de GEI de cada fuente contaminante encontrados en el presente estudio se encuentran acorde con lo reportado en la literatura, Peri *et al.* (2020) hallaron porcentajes similares de los GEI producidos en granjas de ovinos en la Patagonia alimentados con pastos altoandinos entre otros (60 – 65 por ciento para CH₄ entérico y 27 – 30 por ciento de N₂O del estiércol). Así mismo, Dyer *et al.* (2014) determinaron que las emisiones de CH₄ representaron el 50 por ciento de las emisiones totales y el N₂O representó el 30 por ciento del total de emisiones de las granjas de ovinos en Canadá. Sin embargo, Jones *et al.* en el 2013 realizaron un estudio comparativo de granjas ubicadas en diferentes altitudes en Inglaterra y Gales (tierras bajas, mesetas y tierras altas), donde también se observó que los valores de CH₄ entérico y N₂O proveniente del estiércol presentaban los mayores porcentajes de emisiones totales (43.6 – 49.3 por ciento para CH₄ entérico y 34 – 36.3 por ciento de N₂O proveniente del estiércol). La etapa de la cuna a la granja puede dominar las emisiones de todo el ciclo de vida y el CH₄ entérico animal puede representar alrededor del 50-70 por ciento de las emisiones de la cuna a la granja. Por lo tanto, la población animal y la productividad, y los datos sobre la calidad del alimento son datos clave de la actividad primaria para calcular las emisiones de CH₄ entérico. De manera similar, el CH₄ y el N₂O de las excretas animales pueden representar alrededor del 5 al 35 por ciento de las emisiones desde la cuna hasta la granja (LEAP 2014).

Dentro de los resultados obtenidos, una de las fuentes que contribuyen con la emisión de N₂O son las provenientes de la gestión de estiércol (163,047 kg CO₂-eq/año). Flessa *et al.* (2002) señala que las actividades que más contribuyen a la emisión de gases como el N₂O, son las que se encuentran asociadas a las prácticas agrícolas. Así mismo, se considera que entre el 20 y el 35 por ciento del total de N₂O emitido anualmente es producido directamente en los campos donde se realizan las actividades agropecuarias, dentro de los cuales los pastizales son considerados la mayor fuente de N₂O debido a las excreciones de heces y orina por parte de los animales (Luo *et al.* 2010).

Como fue mencionado anteriormente las emisiones de CH₄ inicialmente provocan un incremento en el calentamiento global, el cual disminuye durante las próximas décadas a diferencia de las emisiones de CO₂ y N₂O cuyo impacto de calentamiento se mantiene constante por años (Lynch *et al.* 2020). Bajo este concepto, es importante tener en cuenta el alto porcentaje de emisiones de CH₄ entérico producido en la producción alpaquera. Sin embargo, se debe señalar que mientras que las emisiones de CO₂ y N₂O deben llegar a cero para detener el aumento de la temperatura, las emisiones de CH₄ pueden mantenerse

indefinidamente (en algún nivel por debajo de las emisiones actuales) sin que las temperaturas aumenten más (Lynch *et al.* 2020).

En el Cuadro 9, se observa la HC según los diferentes tipos de asignación para un sistema con 20 por ciento de saca, obteniendo valores de 29.5 y 24.0 Kg CO₂-eq/kg producto según asignación por masa y asignación económica respectivamente. Así mismo, en el presente estudio se determinó que la asignación biofísica de emisiones entre la fibra y la carne fue de 72.6 por ciento para el PV de las alpacas (carne) y 27.4 por ciento para la producción de fibra. En este sentido se obtuvo valores de HC de 22.6 Kg CO₂ -eq/kg de PV de alpaca (destinada para venta) y 53.0 Kg CO₂-eq/kg de fibra. También se determinó la cantidad de CO₂ –eq por ha pastoreada cuyo valor obtenido fue de 88.6 Kg CO₂-eq/ha.

Cuadro 9. Huella de carbono para la producción alpaquera del Centro de investigación y producción Quimsachata según tipo de asignación

Tipo de asignación	Unidad funcional	Valor
Asignación masa	Kg CO ₂ -eq/kg PV	29.5
Asignación económica	Kg CO ₂ -eq/kg PV	24.0
Asignación biofísica (kg de carne)	Kg CO ₂ -eq/kg carne	22.6
Asignación biofísica (kg de fibra)	Kg CO ₂ -eq/kg fibra	53.0
Por unidad de superficie	Kg CO ₂ -eq/ha	88.6

La HC obtenida bajo asignación económica fue de 24.03 kg de CO₂-eq/kg de PV. Valores similares fueron reportados por Batalla *et al.* en el 2014, (variando de 11.5 – a 44.9 kg de CO₂-eq/kg PV) en una investigación realizada en granjas de ovinos bajo un manejo extensivo con aprovechamiento de pastos naturales muy similar al sistema de producción del Centro de Producción estudiado en la presente investigación. Por otro lado, Dyer *et al.* (2014) estimaron la HC en granjas de ovinos en Canadá, reportando en promedio valores de 13.9 kg CO₂-eq/kg PV, dichas granjas estaban bajo un sistema de producción extensivo, con una alimentación basada en granos y pastos cultivados. Así mismo, en Inglaterra Jones *et al.* (2013) realizó un estudio de HC en granjas de ovinos ubicadas en las tierras bajas medias y altas de Inglaterra y Gales obteniendo valores de 10.85, 12.85 y 17.86 kg de CO₂-eq/kg PV,

respectivamente, siendo las granjas de ovinos de las tierras altas las de menor productividad por poseer menor calidad de pasturas y a su vez las de mayor valor de HC. Los datos de emisiones determinados en el presente estudio se informan por unidad de producto. Desde la perspectiva de la HC, los sistemas ganaderos extensivos comunes dan como resultado una baja eficiencia de producción, que luego resulta en altas emisiones de gas por unidad de producto producido (Peri *et al.* 2020), siendo así se puede observar en la literatura que granjas cuyo tipo de alimentación está basada en pastos de baja calidad presentan un valor de HC más alto. Conceptualmente, esto debería permitir las comparaciones del potencial de calentamiento global de diferentes grupos de alimentos, productores y cadenas de suministro para el mismo producto. Sin embargo, la divergencia en los enfoques metodológicos entre los estudios a menudo dificulta la comparación significativa de las HC calculadas (Flysjö *et al.* 2011).

La determinación de la HC usando la asignación económica es el método más aplicado para sistemas de ovinos hasta la fecha, sin embargo, proporciona resultados que varían con el tiempo en respuesta a las fluctuaciones del mercado y a las intervenciones de precios, complicando la interpretación de los resultados en las evaluaciones comparativas (Wiedemann *et al.*, 2015), siendo preferible tomar en cuenta otros tipos de asignación que sean más estables en el tiempo como la asignación biofísica (para 1 kg de PV de alpaca producida y 1 kg de fibra) y la asignación por masa. Aplicando la asignación por masa se obtuvo valores de HC de 29.5 kg CO₂ -eq/kg de producto, el cual se encuentra dentro de los resultados reportados por Dougherty *et al.* (2019) quienes, en un estudio realizado en cinco diferentes sistemas de producción de carne ovina en California, obtuvieron valores desde 13.9 a 30.6 kg de CO₂ -eq/kg en la producción de cordero.

Los resultados obtenidos de HC usando la asignación biofísica fue de 22.6 kg CO₂ -eq/kg de PV de alpaca producida y 53.0 kg CO₂ -e/kg de fibra producida, estos resultados difieren de los obtenidos por Peri *et al.* (2020) quien en un estudio realizado en granjas ovinas de la Patagonia – Argentina alimentadas con diferentes tipos de pastizales entre ellos pastizales andinos, encontraron valores de HC que oscilaban entre 12.15 y 38.45 kg de CO₂ -eq / kg de peso vivo producida y valores de 7.83 a 16.92 kg de CO₂ -eq / kg de lana grasosa. Si bien es cierto los valores hallados de HC expresado en CO₂ -eq/kg de PV de alpaca se encuentra dentro de lo reportado por los autores, la HC CO₂ -eq/kg de fibra producida es superior debido probablemente a la baja producción de fibra de las alpacas en dicho sistema productivo.

Así mismo, sería interesante plantear no sólo expresar las emisiones por unidad de producción, sino también por otras unidades que puedan favorecer a los sistemas ecológicos, más extensivos con aquellos más intensificados, como podría ser por unidad de superficie. En ese sentido se determinó la HC expresado por unidad de superficie, obteniéndose un valor de 88.6 kg de CO₂-eq/ha. Dicho valor se verá afectado por la cantidad de animales que tenga el sistema y la calidad de la dieta que consuman, debido a que los sistemas que manejan campo natural con baja dotación de ganado presentarían menores emisiones que sistemas más intensivos. Estudios realizados en diferentes sistemas de producción ganadera en Nueva Zelanda y Uruguay, muestran que, los sistemas extensivos emiten niveles altos de GEI por unidad de producto, debido a la menor productividad de los animales, pero menores emisiones globales por hectárea (Becoña y Wedderburn 2010).

4.2.1 Análisis de incertidumbre de la HC mediante la simulación de Monte Carlo

El aumento de un parámetro a la vez afectó la HC como se observa en el Cuadro 10. Los porcentajes incrementados en cada uno de los parámetros fueron los siguientes: para los parámetros FE de combustible y electricidad se dio un incremento del 10 por ciento, para los parámetros FE de las emisiones directas, indirectas y lixiviaciones de N₂O provenientes de los fertilizantes se dio un incremento del 100 por ciento ya que se encuentra dentro del rango de incertidumbre 0.003-0.03, 0.002-0.05 y 0.0005-0.025, respectivamente, para los parámetros FE de CH₄ entérico de las tres categorías se dio un incremento del 20 por ciento encontrándose este valor dentro de los parámetros ya establecidos durante la primera investigación, para los parámetros FE de CH₄ proveniente del estiércol se dio un incremento del 25 por ciento ya que se encuentra dentro del valor recomendado por el IPCC (2006) y para los parámetros FE del N₂O directo e indirecto provenientes del estiércol se dio un incremento del 100 por ciento, ya que dichos valores se encuentran dentro del rango de incertidumbre 0.003-0.03 y 0.002-0.05, respectivamente (IPCC 2006).

Cuadro 10. Cambio en la Huella de carbono resultante de la variación de los parámetros individuales

Parámetros (aumento %)	HC Kg CO ₂ -eq/kg PV	Incremento de HC (%)
FE Combustible (+10)	24.05	0.12
FE Electricidad (+10)	24.06	0.17
FE Fertilizante N ₂ O directas (+ 100)	24.03	0.04
FE Fertilizantes N ₂ O indirectas (+100)	24.03	0.04
FE Fertilizantes N ₂ O indirectas lixiviación (+100)	24.03	0.04
FE Metano entérico en crías (+20)	24.39	1.54
FE Metano entérico en tuis (+20)	24.35	1.37
FE Metano entérico en adultos (+20)	26.55	10.53
FE Metano del estiércol en crías (+25)	24.03	0.04
FE Metano del estiércol en tuis (+25)	24.03	0.04
FE Metano del estiércol en adultos (+25)	24.08	0.25
FE N ₂ O directo del estiércol (+100)	30.31	26.19
FE N ₂ O indirecto del estiércol (+100)	24.77	3.12

Los tres parámetros que provocaron el mayor aumento en la HC total fueron: el FE utilizado para las emisiones de CH₄ entérico en alpacas adultas (10.53 por ciento), el FE utilizado para las emisiones directas del N₂O (26.19 por ciento) y el FE utilizado para las emisiones indirectas del N₂O (3.12 por ciento), los dos últimos provenientes de la gestión de estiércol. Los cambios en otros parámetros fueron de menor importancia.

Los parámetros individuales pueden tener un impacto significativo en el resultado final de HC, tal y como se observó en el presente estudio. Es decir, al variar un parámetro a la vez dentro de los límites razonables (no usando valores extremos) en este estudio la HC cambió hasta en un 26.19 por ciento. Por lo tanto, aumentar todos los parámetros en un 100% no sería realista para la HC (Flysjo *et al.* 2011).

La simulación de Monte Carlo nos proporciona un valor medio de 24.02 kg de CO₂ -eq/kg de PV de alpaca producida con una desviación estándar de 4.54. El intervalo de predicción

(entre 2.5 y 97.5 por ciento de la distribución de incertidumbre) fue de 15.28 y 33.17 kg de CO₂-eq/kg de PV de alpaca producida y su coeficiente de variación correspondiente fue de 19 por ciento (Figura 8).

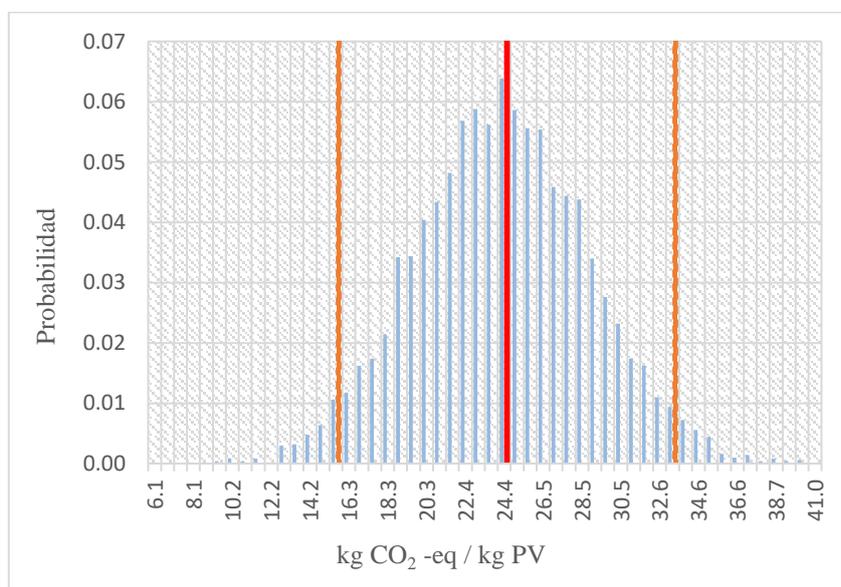


Figura 8. Distribución de probabilidad de emisiones de GEI de 1 kg de PV de alpaca producida, basada en la simulación de Monte Carlo

Las incertidumbres en los FE son causadas predominantemente por variaciones naturales en los sistemas biológicos, no capturados en los modelos existentes (Flysjö *et al.* 2011), por lo tanto, analizar estos parámetros mediante la simulación de Monte Carlo nos proporciona un rango de valores donde se encuentre la HC total, considerando todas las posibles opciones de los valores de las fuentes de emisión, con un relativo grado de incertidumbre.

4.2.2 Determinación de la HC con diferentes porcentajes de saca

Utilizando la asignación biofísica se obtuvo la HC con diferentes porcentajes de saca (10, 15, 20, 25, 30 por ciento) (Cuadro 11). Donde se puede observar que el aumento de la cantidad de animales para saca incrementa también la cantidad de fibra producida para venta. Observándose que a medida que el porcentaje de saca aumenta, la HC de la fibra y la HC de carne de alpaca disminuye. El uso de la asignación biofísica basado en el requerimiento de proteína de alpacas para determinar la HC con diferentes porcentaje de saca, proporciona información importante que podrá ser comparado con otras especies, debido a que la única

condición es que los productos deben tener propiedades físicas similares u objetivos similares en el mercado (LEAP 2014).

Cuadro 11. Huella de carbono obtenido con diferente porcentaje de saca (%) según asignación biofísica

	SACA				
	10%	15%	20%	25%	30%
Fibra (kg)	2640	2716	2876	2988	3161
PV (kg)	6166	9456	17828	21336	29038
HC fibra (CO ₂ -eq)	57.7	54.1	53.0	51.0	48.2
HC carne (CO ₂ -eq)	65.5	44.7	22.6	18.9	13.9

La HC estimada bajo diferente porcentaje de saca dio como resultado valores menores al incrementarse la cantidad de animales destinados para venta, siendo estos resultados posibles debido a que la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero se distribuye entre la cantidad de kilogramo de PV destinado para venta (HC con asignación biofísica para kg de PV) y de igual manera entre la cantidad de fibra producida (HC con asignación biofísica para fibra). Por lo tanto, a mayor producción de kg de PV listo para venta será inferior la HC en dicha explotación. Estudios comparativos entre sistemas ganaderos en Nueva Zelanda y Uruguay, demuestran que el incremento en la producción de kg de PV de ganado obtiene bajos valores de CO₂-eq/kg de PV (Becoña y Wedderburn 2010). En este sentido, es importante alcanzar niveles de productividad aceptables para la especie y sistema de producción, lo cual contribuirá no solo a disminuir el valor de la HC, sino también a mejorar los márgenes económicos de la explotación, siendo esto fundamental para garantizar la continuidad de este modelo productivo

El presente estudio proporciona datos relevantes que promueven la discusión sobre las oportunidades que tiene el sistema de producción alpaquero para modificar y disminuir las emisiones. Según lo analizado previamente se podría decir que las emisiones de CH₄ son el principal problema ambiental de las alpacas, sin embargo, es importante resaltar que la producción de rumiantes puede traer consigo una variedad de otras preocupaciones

ambientales (incluidas las climáticas) y sociales. Los rumiantes como ha sido señalado anteriormente también son responsables de otras emisiones que cambian el clima: N₂O y CO₂, provenientes del estiércol de los animales, la producción de alimentos e insumos, así mismo, del cambio de uso de la tierra incluida la deforestación y la limpieza de otra vegetación para producción de pastos o piensos para cereales (Lynch *et al.* 2020).

La reducción de la edad para el sacrificio del ganado y del número de días que los animales se alimentan en los corrales de engorde, mediante mejoras en la alimentación y en la genética, pueden tener un impacto significativo en las emisiones de los GEI provenientes de los sistemas de producción de carne (FAO 2013).

Los modelos de GEI de toda la granja que cuantifican todas las emisiones de GEI directas e indirectas son una herramienta crucial para desarrollar líneas de base de emisiones y explorar opciones de mitigación (Jones *et al.* 2013). En una encuesta reciente de opinión de expertos y granjeros, tanto el aumento de las tasas de crecimiento del cordero como la mejora de la nutrición de las ovejas en gestación para aumentar la supervivencia del cordero se consideraron medidas efectivas y prácticas para mitigar las emisiones en las granjas de ovinos (Jones *et al.* 2013). Así mismo, el mejoramiento genético de los animales para carne influye positivamente en la disminución de las emisiones de GEI (FAO 2013). Por lo tanto, este estudio demuestra que obteniendo una mayor producción de kg de PV mejorando el manejo productivo de las alpacas, las emisiones de GEI producidos dentro del sistema ganadero disminuirían.

V. CONCLUSIONES

1. La emisión de CH₄ entérico por unidad de ingesta de materia orgánica en alpacas (28.4 g/kg IMO) fue similar (P>0.05) al de ovinos (23.9 g/kg IMO) al ser alimentados con pastos naturales altoandinos en épocas seca.
2. La emisión de CH₄ entérico por unidad de peso metabólico en alpacas (1.4 g/kg PV^{0.75}) fue similar (P>0.05) al de ovinos (1.8 g/kg PV^{0.75}) al ser alimentados con pastos naturales altoandinos en épocas seca.
3. La Huella de Carbono del sistema extensivo de la producción alpaquera según asignación económica fue de 24 kg CO₂-e / kg PV.
4. La mayor fuente de contribución a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero provino del gas CH₄ (66.9 por ciento) producido durante la fermentación entérica de las alpacas.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.** Comparar las emisiones de CH₄ entérico entre alpacas y ovinos alimentados con pastos naturales alto andinos en época de lluvia.
- 2.** Realizar ecuaciones de predicción de la emisión de CH₄ entérico en alpacas y ovinos.
- 3.** Determinar huella de carbono en alpacas alimentadas con pastos cultivados.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, E; Rojas, A.** 2014. Métodos utilizados para reducir la producción de metano endógeno en rumiantes. Costa Rica. Nutrición animal tropical. 8: 72-90
- Ampuero, E; Alarcón, V; Maza, A; Ordoñez, C.** 2014. Parámetros productivos de alpacas del CICAS – La Raya. Cusco, Perú, Universidad San Antonio Abad del Cusco. Perú.
- AOAC** (Asociación de químicos agrícolas, Estados Unidos). 1980. Official Methods of Analysis. 9 ed. Estados Unidos.
- AOAC** (Asociación de químicos analíticos oficiales, Estados Unidos). 1995. Official Methods of Analysis: Official Method for Protein. Estados Unidos. Method No. 920.87.
- Arana, W.** 2014. Composición botánica de la dieta de alpacas (*Vicugna pacos*) y llamas (*Lama glama*) en pastoreo mono-específico y mixto en dos épocas del año. Tesis para optar título de ingeniero zootecnista.
- Argote, G; Aguirre, L; Flores, E.** 2013. Frecuencia de *Trifolium amabile* kunth (fabaceae) en dos sitios del altiplano de puno, Perú. Ecología Aplicada. 12(2).
- ASRM** (Junta de la Sociedad Americana de Manejo de Pastizales y Agricultura, Estados Unidos). 1962. Basic problems and techniques in range research. Washington DC, USA: National Academy of Sciences Pub. N°. 890. 336 p.
- Austin, D; Urness, P; Fierro, L.** 1983. Spring livestock grazing affects crested wheatgrass regrowth and winter use by mule deer. Journal of Range Management, 36: 586–593.
- Barrantes, C; Flores, E; Ruiz, J.** 2018. Caracterización de planteles de los sistemas de producción alpaquera de la sierra central del Perú. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. 29(4): 1335-1348
- Batalla, I; Gutiérrez, R; Del Hierro, O; Pérez, D; Mena, Y.** 2014. Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería bovina y ovina ecológicas en dehesas de Andalucía. XI Congreso de SEAE: Agricultura ecológica familiar.
- Beauchemin, K; Mcginn, S.** 2005. Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets. Journal of Animal Science. 83:653.

Becoña, G; Wedderburn, L. 2010. Comparación del impacto ambiental en relación a gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos de Uruguay y Nueva Zelanda. AgResearch. New Zealand's science.

Berndt, A; Boland, T; Deighton, M; Gere, J; Grainger, C; Hegarty, R; Iwaasa, A; Koolaard, J; Lassey, K; Luo, D; Martin, R; Martin, C; Moate, P; Molano, G; Pinares-Patiño, C; Ribaux, B; Swainson, N; Waghorn, G; Williams, S. 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. New Zealand. Pages 166. New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre.

Bhatta, R; Enishi, O; Kurihara, M. 2007. Measurement of Methane Production from Ruminants. Asian-Australasian Journal Animal Science. 20(8):1305- 1318.

Blaxter, K; Clapperton, J. 1965. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. British Journal of Nutrition. 19: 511-522.

Blaxter, K; Wainman, F. 1961. The utilization of food by sheep and cattle. The Journal of Agricultural Science. 57(03):419-25

Boadi, D; Wittenberg, K. 2002. Methane production from dairy cattle and beef heifers feed forages differing in nutrient density using the sulphur hexafluoride (SF6) technique. Journal of Animal Science. 82:201-206

Bonacic, C. 1991. Características biológicas y productivas de los camélidos sudamericanos. Avances de Medicina Veterinaria. Vol.6, N°2.

Bonilla, J; Lemus, C. 2012 Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. 3:215-246.

Borreli, P; Oliva, G. 2001. Evaluación de pastizales. Cap. 6. Pp 161-182.

BSI. (Estándares del instituto británico, Inglaterra). 2011. PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.

Buddle, B; Denis, M; Attwood, G; Altermann, E; Janssen, P; Ronimus, R; Pinares-Patiño, C; Muetzel, S; Wedlock, D. 2011. Review: Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pastures. The Veterinary Journal, 188: 11-17.

Castellaro, G; Ullrich, T; Warckwits, B; Raggi, A. 2004. Composición botánica de la dieta de alpacas (*Lama pacos* L.) y llamas (*Lama glama* L.) en dos estaciones del año, en praderas altiplánicas de un sector de la provincia de Parinacota, Chile. Agriculture. Technology. Vol.64. N.4.

Chino, L. 2020. Relación entre composición química y la producción de metano in vitro de pastizales altoandinos consumidos por alpacas. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

CONATURA (Asociación para la investigación y conservación de la naturaleza, Perú) 2004. Manual de gestión ambiental de la vicuña. Asociación para la investigación y conservación de la naturaleza. Arequipa, Perú.

Condori, L. 2005. Evaluación agrostológica y alternativas de mejoramiento y manejo de pastos y forrajes del fundo Los Sauces S.A.C. Muñani. Azángaro. Tesis Ing. Agr. Puno. Perú.

De Haas, Y; Windig, J; Calus, M; Dijkstra, J; De Haan, M; Bannink, A; Yeerkamp, R. 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. Journal of Dairy Science. 94: 6122–6134.

Deighton, M; O'loughlin, B; Williams, S; Moate, P; Kennedy, E; Boland, T; Eckard, R. 2013. Declining sulphur hexafluoride permeability of polytetrafluoroethylene membranes causes overestimation of calculated ruminant methane emissions using the tracer technique. Animal Feed Science Technology. 183: 86-95.

Dittmann, M.T; Ruge, U; Lang, R.A; Moser, D; Galffi, C; Kreuzer, M; Claus, M. 2014. Methane emission by camelids. Plos one, 9(4), e94363, 1-8.

Dougherty, C; Oltjen, J; Mitloehner, F; Depeters, E; Pettey, L; Macon, D; Finzel, J; Rodrigues, K; Kebreab, E. 2019. Carbon and blue water footprints of sheep production. Journal of Animal Science. 97: 945 – 961

Dyer, J; Verge, X; Desjardins, R; Worth, D. 2014. A comparison of the greenhouse gas emissions from the sheep industry with beef production in Canada. Sustainable Agriculture Research. Vol 3. No 3.

Eckerlin, R; Stevens, C. 1973. Bicarbonate secretion by the glandular sacculles of the llama stomach. The Cornell veterinarian. 63: 436-445.

Ellis, J; Kebreab, E; Odongo, N; McBride, B; Okine, E; France, J. 2007. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of Dairy Science*. 90: 3456-3467.

Engelhardt, W; Haarmeyer, P; Kaske, M; Lechner-doll, M. 2006. Chewing activities and esophageal motility during feed intake, rumination and eructation in camels. *Journal of comparative Physiology A*. 176: 117–124.

EPA (Agencia de protección ambiental, Estados Unidos). 2009. Estados Unidos. <https://www.epa.gov>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 1996. Manual de prácticas de manejo de alpacas y llamas. Roma, Italia.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2009. La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y opciones. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. Documento No. 177, Roma, Italia.

Farfan, R; Farfarn, E. 2012. Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandinos. INIA - Gobierno Regional de Moquegua – Perú.

Fernández, M; García, M; Gómez, C. 2007. Emisión de metano proveniente de diferentes sistemas de producción animal en el Perú: implicancias nutricionales. *Revista de Ciencias Veterinarias*. Vol. 23 N° 4. Lima, Perú.

Flessa, H; Ruser, R; Dörsch, P; Kamp, T; Jimenez, M; Munch, J; Beese, F. 2002 Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91: 175–189.

Flores, E. 1983. Applying the concept of feeding stations to the behavior of cattle grazing variable amounts of available forage. A Thesis of Master of Science. Utah State University.

Flores, E. 1991. Manejo y utilización de pastizales. Avances y perspectivas del conocimiento de los camélidos sudamericanos. FAO. Santiago, Chile. 429 p

Flores, E. 1996. Reality, limitations and research needs of the peruvian livestock sector. In latin america livestock regional assessment workshop, San José. Costa Rica. SR-CRSP and liga. Davis: Small Ruminant CRSP.

- Flysjö, A; Henrikson, M; Cederberg, C; Ledgard, S; Englund, J.** 2011. The impact of various parameters on the carbon footprint of milk production in New Zealand and Sweden. *Agriculture System.* 104: 459 – 469
- Forster, P; Ramaswamy, V; Artaxo, P; Berntsen, T; Betts, R; Fahey, D; Haywood, J; Lean, J; Lowe, D; Myhre, G; Nganga, J; Prinn, R; Raga, G; Schulz, M; Van Dorland, R.** (2007) Changes in atmospheric constituents and inradiative forcing. In 'Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change'. (Eds S Solomon, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor, HL Miller) pp. 129–234. (Cambridge University Press: Cambridge)
- Fraser, M; Baker, D.** 1998. A comparison of voluntary intake and in vivo digestión in guanacos (*Lama guanicoe*) and sheep given fresh grass. *Animal Science.* 67: 567–572.
- Gallegos, R.** 2013. Índices Productivos de Alpacas del Centro de Investigación y Producción "La Raya". *Revista de Investigaciones Altoandinas*, Vol.15, No.2, pp. 255-262.
- Gil, S.** 2004. Sistema de producción de carne bovina: engorde intensivo (feedlot). Elementos que intervienen y posibles impactos en el medio ambiente.
- Gutiérrez.** 1993. Control y evaluación de la producción - capítulo VI. Manual de producción de alpacas y tecnología de sus productos. Proyecto TTA. Lima -Perú. 79-91.
- Hackstein, J; Van Alen, T.** 1996. Fecal methanogens and vertebrate evolution. *Evolution.* 50:559–572
- Hammond, K; Burke, J; Koolgaard, J; Muetzel, S; Pinares, C; Waghorn, G.** 2013. Effects of feed intake on enteric methane emissions from sheep fed fresh white clover (*Trifolium repens*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*) forages. *Animal Feed Science Technology.* 179: 121-132.
- Harinder, P; Makkar, S.** 2004. Recent advances in the in vitro gas method for evaluation of nutritional quality of feed resources. Animal production and health section. Joint FAO/IAEA 3
- Harper, L; Denmead, O; Freney, J; Byers, F.** 1999. Direct measurements of methane emissions from grazing and feedlot cattle. *Journal of Animal Science.* 77: 13921401.

Hegarty, R. 2002. Strategies for mitigating methane emissions from livestock – australian options and opportunities. In: takahashi j, young ba (eds) ghges and animal agriculture. Elsevier, Dordrecht.

Hegarty, R. 2013. Applicability of short-term emission measurements for on farms quantification of enteric methane animal. 7:401-8

Heller, R; Cercasov, W; Engelhardt, V. 1986. Retention of fluid and particles in the digestive tract of the llama (*Lama guanacoe F. glama*). Comparative Biochemistry and Physiology. 83A: 687–691.

Hindrichsen, I; Wettstein, H; Machmuller, A; Kreuzer, M. 2006. Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation. Agriculture Ecosystems & Environment, 113: 150-161.

Hintz, H; Schryver, H; Halbert, M. 1973. A note on the comparison of digestion by new-world camels, sheep and ponies. Animal Production 16: 30–35. División. Viena, Austria.

Holter, J; Young, A. 1992. Methane prediction in dry and lactating holstein cows. Journal of Dairy Science. 75: 2165-2175.

IDF (Federación internacional de lácteos, Bélgica). 2015. Guide to standard life cycle assessment methodology. Bulletin of the international dairy federation.

INGEI (Inventario nacional de gases de efecto invernadero, Perú). 2012.

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12021/inventario_de_gei_2012-ingei.pdf

INIA (Instituto nacional de innovación agrarian, Perú). 2008. INIA plan operative anual. Illpa, Puno

IPCC (Panel intergubernamental del cambio climático). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4: Agriculture, forestry and land use. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.

IPCC (Panel intergubernamental del cambio climático). 2007. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon

S, Qin D, Manning M, Chen Z, 53 Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller H. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (Panel intergubernamental del cambio climático). 2014. Cambio climático 2014. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

ISO (Organización internacional de estandarización, Suiza) 14040. 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva, Switzerland.

Johnson, K; M. Huyler, H; Westberg, B; Lamb, P; Zimmerman. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique. *Environmental Science and Technology*. 28: 359–362

Johnson, K; Johnson, D. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 73: 2483–2492.

Johnson, K; Westberg, H; Michal, J; Cossalman, M. 2007. The SF6 tracer technique: methane measurement from ruminants. Chapter 3: 33-67.

Jones, A; Jones, D; Cross, P. 2013. The carbon footprint of UK sheep production: current knowledge and opportunities for reduction in temperate zones. *Journal of Agricultural Science*. 152: 288–308.

Jonker, A; Molano, G; Koolgaard, J; Muetzel, S. 2017. Methane emissions from lactating and non-lactating dairy cows and growing cattle fed fresh pasture. *Animal Production Science*. 57: 643–648

Lana, R; Russell, J; Van Amburgh, M. 1998. The role of pH in regulating ruminal methane and ammonia production. *Journal of Animal Science*. 76: 2190-2196.

Lashley, M; Chitwood, M; Garret, M; Moorman, C; Deperno, S. 2016. Do indirect bite count surveys accurately represent diet selection of white-tailed deer in a forested environment? *Wildlife Research* 43:254-260.

Lassey, K; Pinares, C; Ylaming, J; Smith, A; Clark, H. 2011. Assessing the SF6 tracer technique as an estimator of methane emissions from ruminants. Ministry of Agriculture and Forestry

Leahy, S; Kelly, W; Altermann, E; Ronimus, R; Yeoman, A. 2010. The genome sequence of the rumen methanogen *Methanobrevibacter ruminantium* reveals new possibilities for controlling ruminant methane emissions. Plos One. 5: 1-17.

LEAP (Evaluación y desempeño ambiental del ganado, Italia). 2014. Greenhouse gas emissions and fossil energy demand from small ruminant supply chains: guidelines for Quantification. LEAP, FAO, Rome, Italy.

López, A; Maiztegui, J; Cabrera, R. 1998. Voluntary intake and digestibility of forages with different nutritional quality in alpacas (*Lama pacos*). Small Ruminant Research. 29:295-301.

López, S. 2017. Evaluación de los parámetros reproductivos en alpacas (*Vicugna pacos*) de la raza huacaya en las comunidades altoandinas de Huaytire y Maure, Tacna-2015. Tesis para optar el título de medico veterinario y zootecnista.

Luo, J; De Klein, C; Ledgard, S; Sagar, S. 2010 Management options to reduce nitrous oxide emissions from intensively grazed pastures: a review. Agriculture Ecosystems & Environment, 136: 282-291.

Lynch, J; Garnett, T; Persson, M; Roos, E; Reisinger, A. 2020. Methane and the sustainability of ruminant livestock. Food Climate Research Network. University of Oxford.

Machaca, m; quispe, a; castro, g; arroyo, t; huanca, b; roque, w; huanca. 2015. Efecto de dos dietas fibrosas en la producción de metano en alpacas. facultad de medicina veterinaria. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima – Perú.

Mc Donald, P; Edwards, R; Greenhalgh, J; Morgan, C. 1995. Animal Nutrition. Singapore: Longman. 607 p.

Mcallister, T; Okine, E; Mathison, G; Cheng, K. 1996. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. Canadian Journal of Animal Science, 76:231-43.

MINAM (Ministerio del ambiente, Perú). 2002. Estrategia nacional ante el cambio climático (ENCC). Perú

MINAM (Ministerio del ambiente, Perú). 2016. El Perú y el cambio climático. Tercera comunicación nacional del Perú a la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. www.minam.gob.pe.

Miranda, F. 1990. Evaluación edafo-agrostológico de praderas naturales del Centro Experimental Quimsachata-Puno. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Moe, P; Tyrrell, H. 1979. Methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 62: 1583–1586

Moscoso, J; Marco, A; Quispe, H; Cruz, W; Franco, F; San Martín, F; Olazábal, J; Velez, V; Pinares, C. 2016. Emisiones de metano en alpacas (*Lama pacos*) y llamas (*Lama glama*) al pastoreo en el altiplano peruano en época lluviosa. 3ra Conferencia de gases de efecto invernadero en sistemas agropecuarios de Latinoamérica. 2017. Uruguay.

Murphy, M; Baldwin, R; Koong, L. 1982. Estimation of stoichiometric parameters for rumen fermentation of roughage and concentrate diets. *Journal of Animal Science*. 55: 411-421.

Murray, R; Bryant, A; Leng, R. 1976. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *British Journal of Nutrition*. 36: 1-14.

Murray, K; Rodwell, V; Bender, D; Botham, KM; Weil, PA. 2011. Harper's illustrated biochemistry. 29th ed. New York: McGraw-Hill.

Nkrumah, J; Okine E; Mathison, G; Schmid, K; Li, C; Basarab, J; Price, M; Wang, Z; Moore, S. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 84: 145-153

Obregon, A. 2020. Consumo y digestibilidad de cuatro dietas de diferente calidad en alpacas. Tesis de nutrición, Lima, Perú.

Parker, K.W. 1951. Method of measuring trend in range conditions on national forest ranges. USDA Forest Service, 26 pp, mixeo.

Pelchen, A; Peters, J. 1998. Methane emissions from sheep. *Small Ruminant Research*. 27: 137-150

- Peri, P; Rosas, Y; Ladd, B; Diaz-Delgado, R; Martínez, G.** 2020. Carbon footprint of lamb and wool production at farm gate and the regional scale in southern Patagonia. *Sustainability* 12, 3077; doi:10.3390/su12083077
- Pinares, C; Ulyatt, M; Lassey, K; Barry, T; Holmes, C.** 2003. Rumen function and digestion parameters associated with differences between sheep in methane emissions when fed chaffed lucerne hay. *Journal of Agricultural Science*. 140: 205-214.
- Pinares-Patiño, C; Ulyatt, M; Lassey, K; Barry, T; Holmes, C.** 2003. Persistence of differences between sheep in methane emission under generous grazing conditions. *Journal of Agricultural Science*, 140: 227-233.
- Quispe, C.** 2016. Efecto del pre-pastoreo con vacunos sobre las dietas de alpacas y ovinos en pastizales naturales. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae.
- Quispe, R.** 2017. Almacenamiento de carbono en pastizales naturales con y sin práctica de restauración del paraje Lomo Largo – Jauja. Huancayo, Perú.
- Ramírez, J; Posada, S; Noguera, R.** 2014. Ruminant methanogenesis and mitigation strategies. *CES. Medicina Veterinaria y Zootecnia*. V 9, No.2 Medellín jul./dez
- Reiner, R; Bryant, F; Farfan, R; Craddock, B.** 1987. Forage intake of alpacas grazing andean rangeland in Perú. *Journal of Animal Science*. 64: 868–871.
- Rivera, J; Chara, J; Restrepo, E; Barahona, R.** 2015. Estimación de la huella de carbono en sistemas silvopastoriles intensivos y convencionales para la producción de leche bovina en Colombia. 3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles.
- Ruviaro, C; Gianezini M; Brandao, F; Winck, C.** 2012. Life cycle assessment in brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production* 28: 9 - 24
- Schafer, G; Engelhard, M; Müller, V.** 1999. Bioenergetics of the archaea. *microbiology and molecular biology Reviews*. 63: 570-620.
- Schink, B; Stams, A.** 2006. Syntrophism among prokaryotes. In: Dworkin M, Falkow S, Rosenberg E, Schleifer KH, Stackebrandt E (eds). *The Prokaryotes: an evolving electronic resource for the microbiological community*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag. 309-335

Schneider, W; Bauffe, R; Von Engelhardt, W. 1974. Energy and nitrogen exchange in the llama. In: Proceeding of sixth symposium energy metabolism of farm animals, European Assoc. Anim. Prod. Pub. No. 14: 127 – 130.

San Martin, F. 1987. Comparative forage selectivity and nutrition of south american camelids and sheep. Ph. D. Dissertation Texas Tech. Univ., Lubbock, TX, 146 pp.

San Martin, F; Bryant, F. 1987. Nutrición de los CSA, estado actual de nuestro conocimiento. Art. Téc. T-9-505. College of Agricultura Sciencie. Texas. University. 67 p.

San Martin F. 1989. Nutrition of domesticated south america alpacas and llamas. Small Ruminant Research 2: 161-216.

San Martin, F. 1991 Nutrición y alimentación en: “producción de rumiantes menores - alpacas”, editado por Novoa, C. y F. Flores. RERUMEN CUCD –INIAA. Lima, p. 359

Saynes, V; Ramirez, E. 2018. El uso de la cromatografía de gases en investigaciones de emisiones de gases de efecto invernadero del sector pecuario. Agroproductividad. 11: 81-88.

Segura, F; Echeverri, R; Patiño, A; Mejía, A. 2007. Descripción y discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica. 14: 72-81.

Smith, A; Reid, J. 1954. Use of chromic oxide as an indicator of fecal output for the purpose of determining the intake of pasture herbage by grazing cows. Journal of Dairy Science. 38: 515-524.

Sponheimer, M; Robinson, T; Roeder, B; Hammer, J; Ayliffe, L. 2003 Digestion and passage rates of grass hays by llamas, alpacas, goats, rabbits, and horses. Small Ruminant Research. 48: 149–154.

ST–Pierre, B; Wright, A. 2012. Molecular analysis of methanogenic archaea in the forestomach of the alpaca (*Vicugna pacos*). BMC microbiology. 12: 1

Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M; De Haan, C. 2006 Livestock’s long shadow: environmental issues and options. FAO, Rome, Italy.

- Tremblay, F; Masse, D.** 2008. Instrumentation for precise quantification of methane emissions from dairy herds. Agriculture and Agri-Food Canada, Dairy and Swine Research and Development Centre. Quebec, Canada.
- Ulyatt, M; Baker, S; Mccrabb, G; Lassey, K.** 1999. Accuracy of SF₆ tracer technology and alternatives for field measurements. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50: 1329-1334.
- Vallenas, A; Cummings, J; Munnell, J.** 1971. A gross study of the compartmentalized stomach of the two new world camelids, the llama and guanaco. *Journal of Morphology*. 134: 339-424.
- Van Saun, R.** 2006. Nutrient requirements of south american camelids: a factorial approach. *Small Ruminant Research*. 61:165-186.
- Van Soest, P; Robertson, J; Lewis, B.** 1991. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*. 74:3583-3597.
- Wallace, J; Sasson, G; Garnsworthy, P; Tapio, I; Gregson, E; Bani, P; Huhtanen, P; Bayat, A; Strozzi, F; Biscarin, F; Snelling, T; Saunders, N; Potterton, S; Craigon, J; Minuti, A; Trevisi, E; Callegari, M; Piccioli, F; Cabezas, E; Vilkki, J; Pinares, C; Fliegerová, K; Mrázek, J; Sechovcová, H; Kopečný, J; Bonin¹, A; Boyer, F; Taberlet, P; Kokou, F; Halperin, E; Williams, J; Shingfield, K; Mzrahi, I.** 2019. A heritable subset of the core rumen microbiome dictates dairy cow productivity and emissions. *Science advance*. 5: eaav8391.
- Wallmo, C; Neff, D.** 1970. Direct observations of tamed deer to measure their consumption of natural forage. p. 105-110. In: Range and wildlife habitat evaluation-a research symposium. U.S. Department of Agriculture Miscellaneous Publications. 1147. 220 p
- Wang, J; Lan, G; Wang, G; Li, H; Xie, Z.** 2000. Anatomical subdivisions of the stomach of the bactrian camel (*Camelus bactrianus*). *Journal of Morphology*. 245: 161–167
- Wang, C; Tas, B; Glindemanna, T; Raveb, G; Schmidtc, L; Weißbachc, F; Susenbeth, A.** 2009. Fecal crude protein content as an estimate for the digestibility of forage in grazing sheep. *Animal Feed Science and Technology*. 149: 199–208

Warmington, B; Wilson, G; Barry, T. 1989. Voluntary intake and digestion of ryegrass straw by llama x guanaco crossbreds and sheep. *Journal of Agriculture Science. Camb.* 113: 87 – 91.

Wiedemann, S; Ledgard, S; Henry, B; Yan, M; Mao, N; Russell, S. 2015. Application of life cycle assessment to sheep production systems: investigating co-production of wool and meat using case studies from major global producers. *Int. J. LCA.* 20:463-476.

Williams, A; Coleman, G. 1997. The rumen protozoa. In: Hobson PN, Stewart CS (eds). *The rumen microbial ecosystem.* 2nd ed. New York: Springer. 77-139.

Williams, S; Moate, P; Hannah, M; Ribaux, B; Wales, W; Eckard, R. 2011. Background matters with the SF6 tracer method for estimating enteric methane emissions from dairy cows: a critical evaluation of the SF6 procedure. *Animal Feed Science and Technology.* 170: 265– 276.

WMO (World Meteorological Organization). 2012. *Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - N°8: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011.*

Yan, T; Mayne, C; Gordon, F; Porter, M; Agnew, R; Patterson, D; Ferris, C; Kilpatrick, D. 2010. Mitigation of enteric methane emissions through improving efficiency of energy utilization and productivity in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science.* 93: 2630–2638.

Yaranga, R. 2009. *Alimentación de camélidos sudamericanos y manejo de pastizales.* Huancayo – Perú

Zapana, J. 2016. *Evaluación de biomasa y capacidad de carga óptima de pastizales naturales en la comunidad Chila, Tiquillaca.* Tesis Universidad Nacional del altiplano. Puno, Perú.

Zhai, X; Tingting, L; Tang, S; Xiaojuan, L; Xiuzhi, M; Guodong, H; Andreas, w; Chengjie, W. 2015. Methane emission from sheep respiration and sheepfolds during the grazing season in a desert grassland. *The Open Atmospheric Science Journal.* 9: 23-28.

VIII. ANEXOS

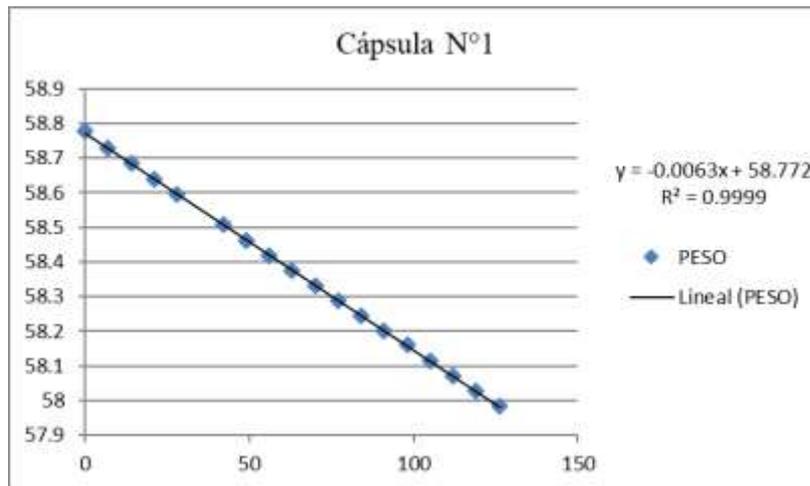
Anexo I. Características de los animales experimentales

Especie	Código	Raza	Peso vivo (kg)	Sexo
Alpaca	8-A	Huacaya	38.00	Macho
Alpaca	9-A	Huacaya	38.00	Macho
Alpaca	3-A	Huacaya	42.20	Macho
Alpaca	4-A	Huacaya	38.00	Macho
Alpaca	2-A	Huacaya	35.50	Macho
Alpaca	7-A	Huacaya	35.00	Macho
Alpaca	11-A	Huacaya	39.60	Macho
Alpaca	5-A	Huacaya	38.00	Macho
Alpaca	BL-A	Huacaya	29.80	Macho
Ovino	5-OV	Criollo	30.80	Macho
Ovino	1-OV	Criollo	26.40	Macho
Ovino	6-OV	Criollo	32.20	Macho
Ovino	0-OV	Criollo	26.40	Macho
Ovino	11-OV	Criollo	28.60	Macho
Ovino	9-OV	Criollo	34.40	Macho
Ovino	4-OV	Criollo	28.20	Macho
Ovino	8-OV	Criollo	28.00	Macho
Ovino	BL-OV	Criollo	29.00	Macho

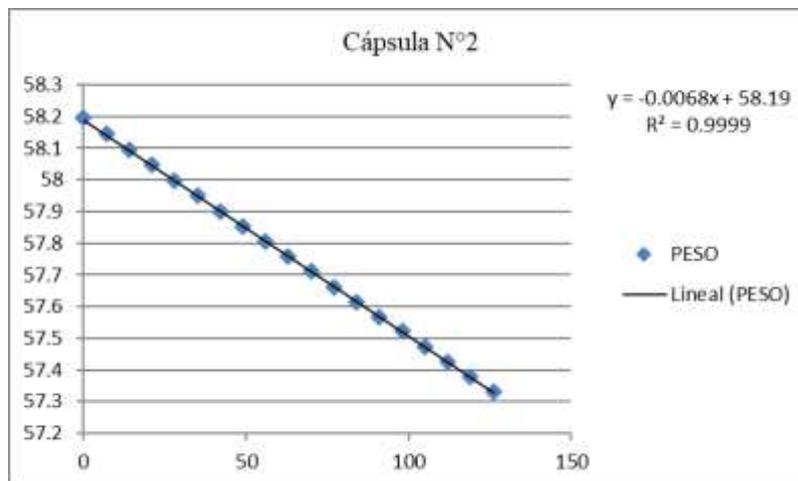
Anexo II. Características de las capsulas de permeación seleccionadas

N° De capsula	Carga de SF6 en (mg)	Tasa de permeación (mg/día)	R2
1	1103.5	6.3	0.9999
2	844	6.8	0.9999
3	992.7	6.8	0.9999
5	915.1	7.3	0.9999
7	638	7.7	0.9999
13	575.5	7.2	0.9997
14	601.9	6.9	0.9998
16	723.7	7.4	0.9995
18	610.6	7.5	0.9999
19	785.7	6.8	0.9999
20	611.2	7.3	0.9999
21	525.6	7.7	0.9999
22	611.9	7.7	0.9999
23	764.3	6.2	0.9999
24	1023.7	5.2	0.9999
26	719.2	6.5	0.9999

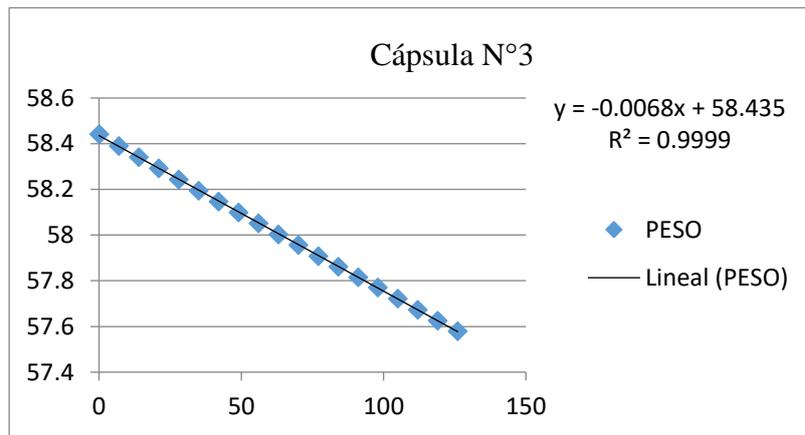
Anexo III. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°1



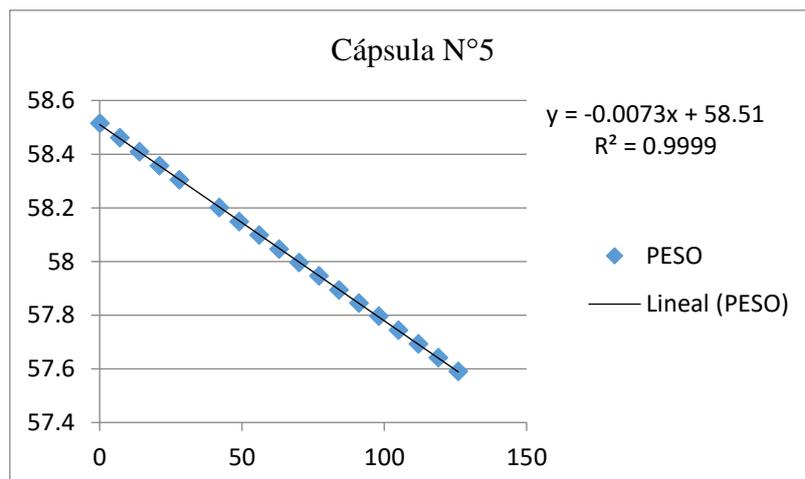
Anexo IV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°2



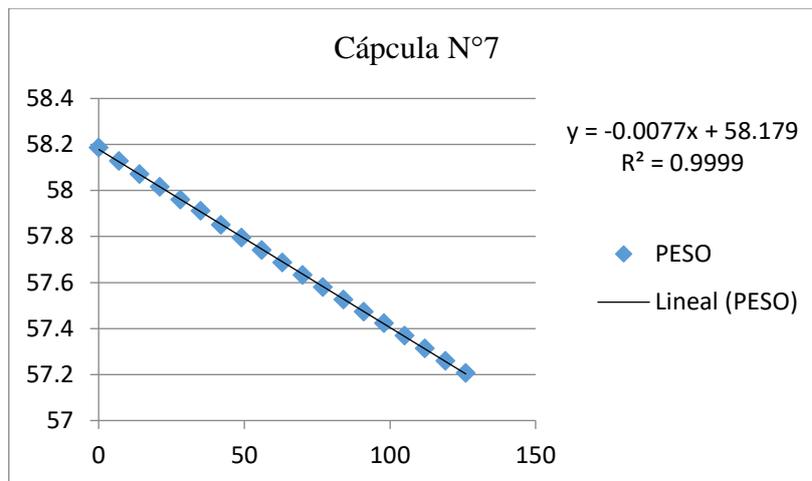
Anexo V. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°3



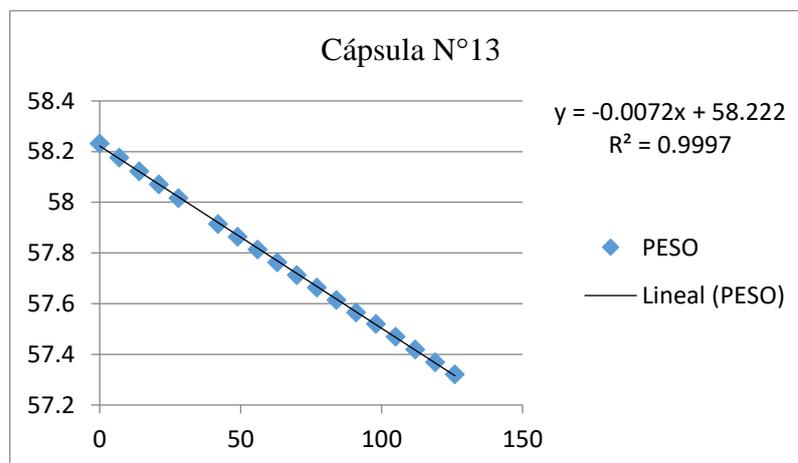
Anexo VI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°5



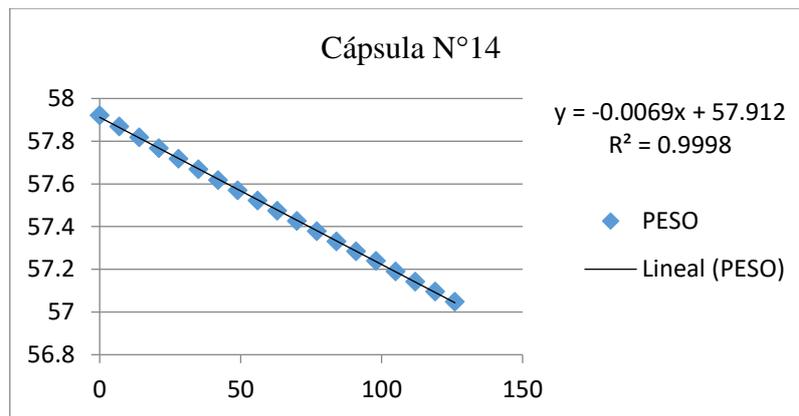
Anexo VII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°7



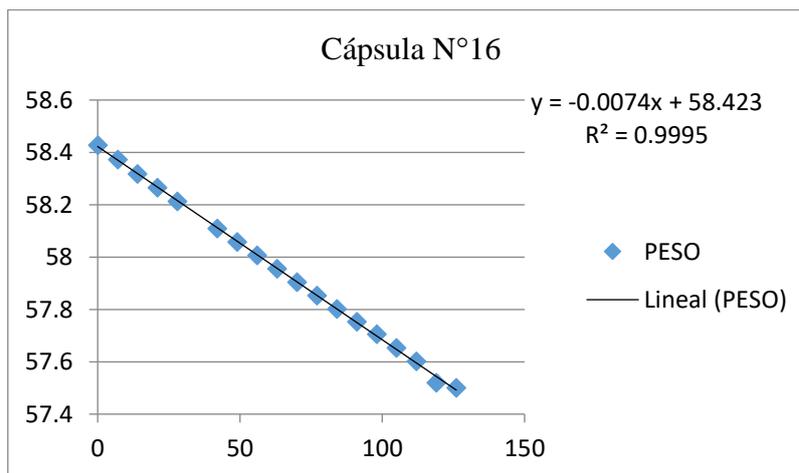
Anexo VIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°13



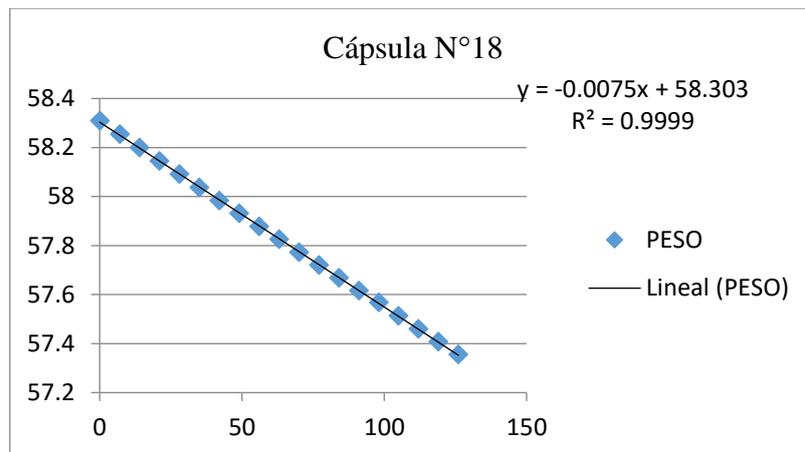
Anexo IX. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°14



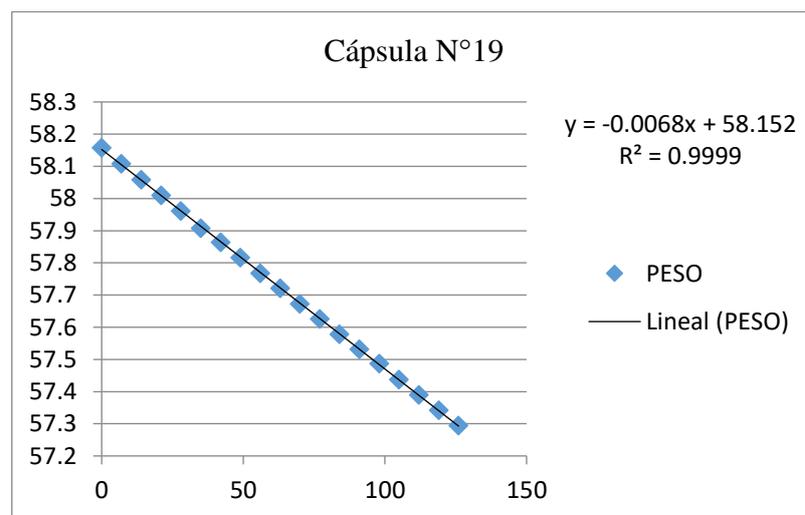
Anexo X. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°16



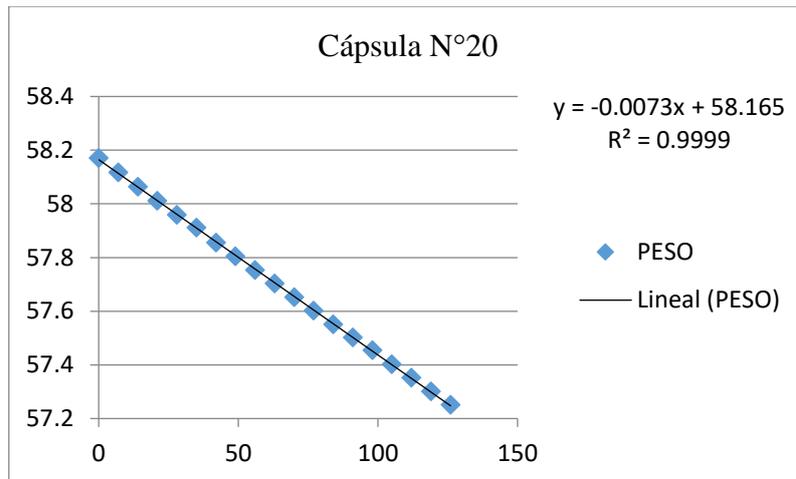
Anexo XI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°18



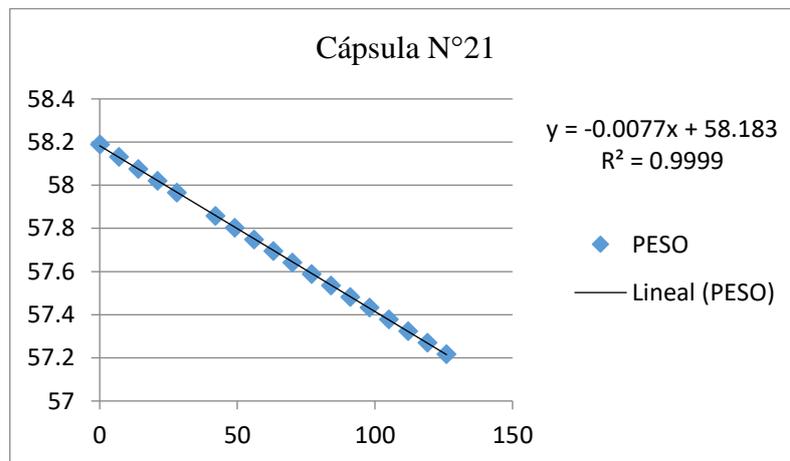
Anexo XII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°19



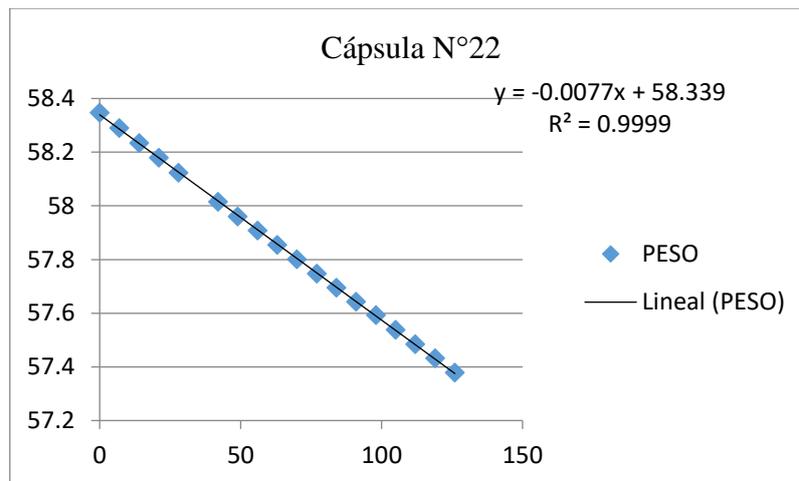
Anexo XIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°20



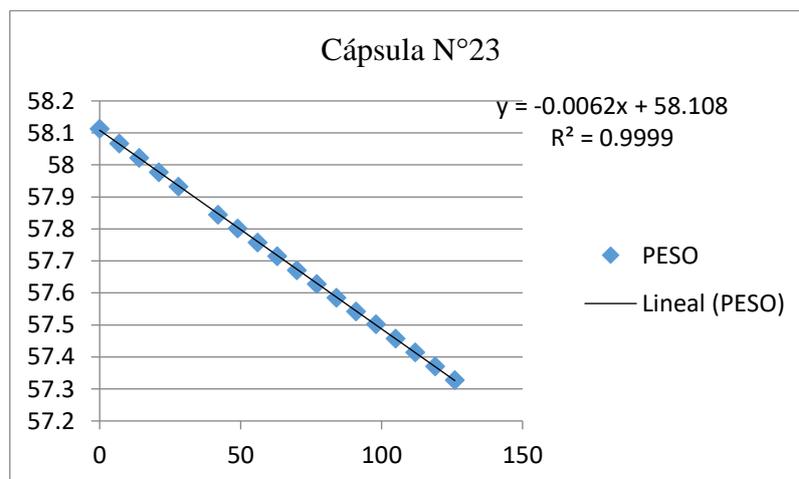
Anexo XIV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°21



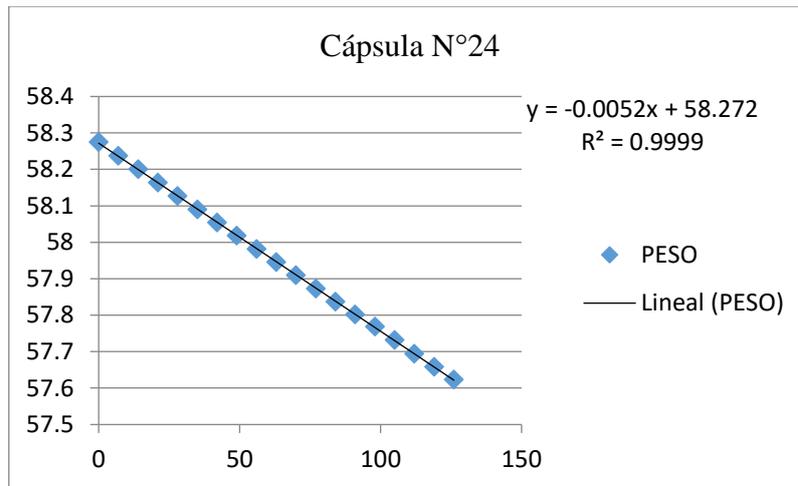
Anexo XV. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°22



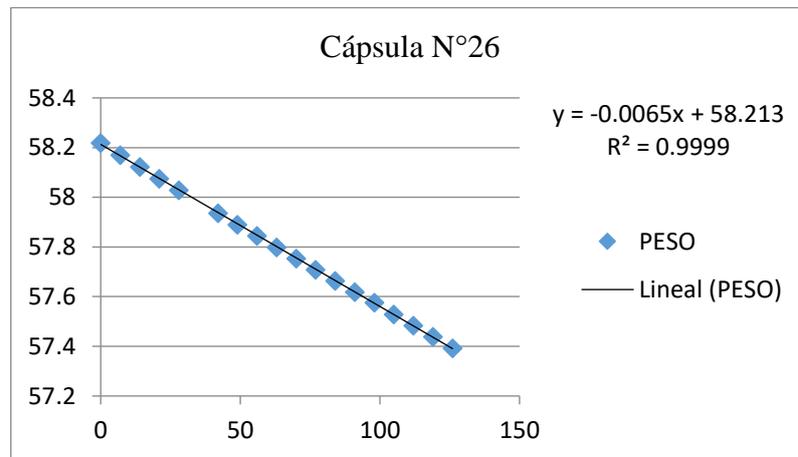
Anexo XVI. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°23



Anexo XVII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°24



Anexo XVIII. Regresión masa vs tiempo de la cápsula de permeación N°26



Anexo XX. Medio utilizado en el Hohenheim Gas Test

Componentes	Peso molecular	Concentración final	Cantidad
Buffer			
Ammonium bicarbonate	79.1	0.05 M	8.0 g
Sodium bicarbonate	84.0	0.42 M	70.0 g
ddH ₂ O			2000 ml
Volumen Total			2000 ml
Macrominerales			
Sodium dihydrogen Phosphate	142.0	0.040 M	11.4 g
Potassium dihydrogen Phosphate	136.1	0.046 M	12.4g
Magnesium sulphate 7 x H ₂ O	246.1	0.002 M	1.2 g
Volumen total	Enrasar con	dH ₂ O	2000 ml
Microminerales			
Calcium Chloride 2 x H ₂ O	147.0	0.45 M	6600 mg
Calcium Chloride 2 x H ₂ O	197.9	0.25 M	5000 mg
Manganese Chloride 4 x H ₂ O	237.9	0.02 M	500 mg
Cobalt Chloride 6 x H ₂ O	270.3	0.15 M	4000 mg
Ferric trichloride 6 x H ₂ O			
Volumen total	Enrasar con	dH ₂ O	2000 ml
Resarzurine			
Resarzurine		0.40 %	400 mg
Volumen total			100 ml
Solución reductora			
Sodium sulphite		1 M	625 mg
Sodium hydroxide			4 ml
Volumen total	Enrasar con	dH ₂ O	100 ml

Anexo XXI. Registro de la digestibilidad de la materia orgánica y consumo de alimento

Animales	DMO (%)	CMO (g)	CMS (g)
Alpacas			
8-A	0.63	1026.7	1120.8
9-A	0.62	632.2	681.8
3-A	0.62	941.7	1036.7
4-A	0.64	600.9	656.7
2-A	0.63	752.5	824.2
7-A	0.64	535.1	587.7
11-A	0.61	965.5	1060.4
5-A	0.60	735.7	807.9
Ovinos			
5-OV	0.52	910.0	999.5
1-OV	0.52	810.3	892.1
6-OV	0.51	818.8	889.0
2-OV	0.54	1168.5	1277.0
11-OV	0.55	978.2	1080.9
9-OV	0.52	915.8	1009.7
4-OV	0.52	1520.2	1676.1
8-OV	0.52	851.7	939.0

Anexo XXII. Producción de CH₄ en g/día durante la etapa experimental

N° ALPACA	CH ₄ g/día								PROMEDIO
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	
8	13.75	20.07	21.17	29.11	22.32	31.45	23.89	26.55	23.54
9	14.70	21.27	22.10	22.56	24.35	25.61	20.18	21.64	21.55
3	21.32	19.14	28.95	26.56	18.81	19.37	19.50	27.32	22.62
4	15.83	16.84	16.46	17.48	14.21	10.19	12.69	11.71	14.43
2	14.51	14.29	18.13	13.49	11.17	10.89	10.00	14.49	13.37
7	14.92	13.05	20.34	17.82	14.96	15.64	14.16	17.93	16.10
11	27.54	31.04	37.24	39.48	43.04	27.81	44.45	31.12	35.21
5	25.29	24.84	23.50	24.51	22.75	20.28	35.31	46.22	27.84
PROMEDIO	18.48	20.07	23.48	23.88	21.45	20.16	22.52	24.62	21.83
N° OVINO	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	PROMEDIO
5	28.13	30.07	32.96	26.87	49.67	26.40	25.48	24.58	30.52
1	20.25	24.12	17.12	23.51	40.89	18.41	19.82	16.02	22.52
6	16.41	15.84	42.59	24.85	37.59	13.91	19.07	16.74	23.37
2	14.48	12.01	16.77	18.31	18.44	16.92	12.79	7.90	14.70
11	28.05	29.08	30.93	24.38	18.87	23.27	25.29	20.09	24.99
9	17.65	20.50	18.46	17.26	23.63	17.00	14.43	11.90	17.60
4	25.14	23.81	20.42	22.86	23.95	24.54	21.92	24.61	23.41
8	32.10	32.86	32.33	31.24	17.68	23.90	14.55	12.99	24.71
PROMEDIO	22.78	23.54	26.45	23.66	28.84	20.54	19.17	16.85	22.73

Anexo XXIII. Registros de emisiones de CH₄ expresado en g/día, g/ Kg CMS, g/Kg PV^{0.75} y valores de Ym de los animales experimentales

Animales	CH₄ (g/día)	CH₄ (g/kg CMS)	CH₄ (g/kg PV^{0.75})	Ym
Alpacas				
8-A	23.5	21.0	1.5	6.7
9-A	21.5	31.6	1.4	9.7
3-A	22.6	21.8	1.4	6.8
4-A	14.4	21.9	0.9	7.0
2-A	13.4	16.2	0.9	5.2
7-A	16.1	27.4	1.1	9.0
11-A	35.2	33.2	2.2	10.7
5-A	27.8	34.4	1.8	11.0
Ovinos				
5-OV	30.5	30.5	2.3	10.1
1-OV	22.5	25.2	1.9	8.5
6-OV	23.4	26.3	1.7	8.8
2-OV	14.7	11.5	1.3	3.9
11-OV	25.0	23.1	2.0	7.4
9-OV	17.6	17.4	1.2	5.9
4-OV	23.4	13.9	1.9	4.6
8-OV	24.7	26.3	2.0	10.5

Anexo XXIV. Condición de las pasturas



Anexo XXV. Pastoreo de los animales experimentales



Anexo XXVI. Colocación de los implementos



Anexo XXVII. Animales con implementos en etapa de acostumbramiento



Anexo XXVIII. Alpaca usando arnés

