

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE AGRONOMÍA Y ZOOTECNIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE ZOOTECNIA



DISEÑO Y VALIDACIÓN DE SISTEMA DE SEGUIMIENTO METABÓLICO  
(JAULA METABÓLICA Y CÁMARA DINÁMICA) PARA ALPACAS

Tesis presentada por el Bachiller en Ciencias  
Agrarias: **WILFREDO MANUEL RIOS RADO**

Para optar al Título Profesional de **INGENIERO  
ZOOTECNISTA**

**ASESOR:**

**PhD. WALTER ORESTES ANTEZANA JULIAN**

**Financiada por el Programa Yachayninchis Wiñarinanpaq**

**CUSCO – PERÚ**

**2023**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, WILFREDO LEANDRO RIOS BERNEDO y NERY RADO DURAN, por el esfuerzo que dedican día a día, por la confianza y el gran apoyo brindado durante esta etapa de mi vida, a mi hermano WINER ANDREE RIOS RADO y a mi hermana NELWY JACKELINE RIOS RADO, por todo el apoyo, a mis tíos URIEL CORONADO MUJICA Y SOFIA RADO DURAN, por los consejos brindados.

Les agradezco por ser parte fundamental de mi vida y por los diversos momentos y emociones que compartimos.

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecer al Proyecto de Investigación “**Desarrollo y validación de metodologías de evaluación de la actividad y la emisión de gases de efecto invernadero en alpacas**”, por el financiamiento de este trabajo de investigación.

Agradezco a la **Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco** y a la **Escuela Profesional de Zootecnia**, por haberme permitido forjarme profesionalmente en ella, expreso mi agradecimiento a todos los docentes por brindarme sus conocimientos y experiencia profesional.

A mi asesor **PhD. Walter Orestes Antezana Julián**, por brindarme su confianza, sugerencias y tiempo para poder desarrollar satisfactoriamente este trabajo de investigación.

Al personal administrativo y técnico del **Centro de Investigación en Camélidos Sudamericanos, CICAS “La Raya” – UNSAAC**; por el apoyo y conocimiento brindado durante el estudio.

Al **Laboratorio de Nutrición de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNSAAC**, por el apoyo en el uso de los equipos y reactivos para el presente estudio.

A mis compañeros **Nilton Ttito Ayte y Maykol Huamani Chancahuaña** por el constante apoyo en las diferentes etapas del trabajo de investigación.

A **Paola Katherine Chipa Guillén**, por su amistad y apoyo durante mi etapa universitaria y realización del proyecto.

## INDICE DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| DEDICATORIA .....   | i   |
| AGRADECIMIENTO .....  | ii  |
| INDICE DE CONTENIDO .....   | iii |
| GLOSARIO .....  | xi  |
| RESUMEN .....   | xii |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1   |
| CAPITULO I .....  | 4   |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 4   |
| 1.    Identificación del problema .....                                   | 4   |
| CAPITULO II .....   | 6   |
| OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....   | 6   |
| 2.1.  Objetivo general .....  | 6   |
| 2.2.  Objetivos específicos .....   | 6   |
| 2.3.  Justificación .....   | 7   |
| 2.4.  Hipótesis .....   | 8   |
| 2.4.1. Hipótesis general .....  | 8   |
| 2.4.2. Hipótesis nula .....   | 8   |
| 2.4.3. Hipótesis alterna .....  | 8   |
| CAPITULO III .....  | 9   |
| REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....  | 9   |
| 3.1.  Antecedentes de la investigación .....                              | 9   |
| 3.1.1. Antecedentes sobre el uso de jaulas metabólicas .....              | 9   |
| 3.1.2. Antecedentes sobre la determinación de las emisiones de metano ... | 11  |
| 3.2.  Marco teórico .....   | 13  |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.1. Los camélidos sudamericanos .....   | 13        |
| 3.2.2. Habitación.....   | 15        |
| 3.2.3. La alpaca .....   | 16        |
| 3.2.4. Población de alpacas en el Perú .....   | 17        |
| 3.2.5. Alimentación .....  | 18        |
| 3.2.6. Etología alimentaria .....  | 20        |
| 3.2.7. Fisiología, anatomía y características digestivas de los camélidos sudamericanos..... | 21        |
| 3.2.8. Requerimientos nutricionales de las alpacas.....                                      | 27        |
| 3.2.9. Técnicas que permiten determinar la digestibilidad y metabolismo de nutrientes.....   | 28        |
| 3.2.10. Frecuencia cardiaca.....   | 29        |
| <b>CAPITULO IV.....</b>  | <b>31</b> |
| <b>MATERIALES Y METODOS .....</b>  | <b>31</b> |
| 4.1. Lugar de estudio .....  | 31        |
| 4.2. Ubicación .....   | 31        |
| 4.3. Duración del estudio.....   | 31        |
| 4.4. Materiales y equipos .....  | 32        |
| 4.4.1. Material biológico para la investigación.....   | 32        |
| 4.4.2. Instalaciones .....   | 32        |
| 4.4.3. Dieta Experimental .....  | 32        |
| 4.5. Materiales y equipos para la investigación .....  | 33        |
| 4.5.1. Material de campo .....   | 33        |
| 4.5.2. Reactivos .....   | 34        |
| 4.5.3. Equipos.....  | 34        |

|                                 |  |    |
|---------------------------------|--|----|
| 4.5.4.                          | <b>Materiales de escritorio</b>                                | 34 |
| 4.5.5.                          | <b>Materiales de laboratorio</b>                               | 35 |
| 4.5.6.                          | <b>Equipos de laboratorio</b>                                  | 35 |
| 4.6.                            | <b>Insumos utilizados para la alimentación de los animales</b> | 36 |
| 4.7.                            | <b>Metodología experimental</b>                                | 36 |
| 4.8.                            | <b>Etapas pre experimentales</b>                               | 36 |
| 4.9.                            | <b>Etapas experimentales</b>                                   | 40 |
| 4.10.                           | <b>Análisis de muestras en laboratorio</b>                     | 43 |
| <b>CAPITULO V</b>               |  | 47 |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> |  | 47 |
| 5.1.                            | <b>Del diseño de la jaula metabólica</b>                       | 47 |
| 5.1.1.                          | <b>Dimensiones de la jaula metabólica</b>                      | 47 |
| 5.1.2.                          | <b>Resultado final de las jaulas metabólicas</b>               | 49 |
| 5.1.3.                          | <b>Comportamiento animal</b>                                   | 49 |
| 5.2.                            | <b>Validación de la jaula metabólica</b>                       | 50 |
| 5.2.1.                          | <b>Consumo de materia seca y consumo de agua</b>               | 50 |
| 5.2.2.                          | <b>Excreción de heces y materia seca</b>                       | 51 |
| 5.2.3.                          | <b>Producción de orina</b>                                     | 52 |
| 5.2.4.                          | <b>Digestibilidad de nutrientes</b>                            | 52 |
| 5.2.5.                          | <b>Registro de las pulsaciones cardiacas por minuto</b>        | 53 |
| 5.3.                            | <b>Del diseño de la cámara dinámica</b>                        | 54 |
| 5.3.1.                          | <b>Dimensiones de la cámara dinámica</b>                       | 54 |
| 5.3.2.                          | <b>Resultado final de la cámara dinámica</b>                   | 55 |
| 5.4.                            | <b>Validación de la cámara dinámica</b>                        | 55 |
| 5.4.1.                          | <b>Emisión y consumo de gases en 24 horas</b>                  | 55 |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.4.2. Emisión de metano.....                                       | 56        |
| 5.4.3. Emisión de dióxido de carbono.....                           | 58        |
| 5.4.4. Consumo de oxígeno.....                                      | 59        |
| 5.4.5. Emisión y consumo de gases durante 20 minutos en ayunas..... | 61        |
| <b>CAPITULO VI.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>  | <b>62</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>CAPITULO VII.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>75</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Peso vivo, consumo y excreción de nutrientes de alpacas adultas obtenidos del estudio "Design, operation, and validation of metabolism crates for nutrition studies in alpacas (Vicugna pacos)" .....  | 10 |
| <b>Tabla 2.</b> Peso vivo, consumo y excreción de nutrientes de alpacas adultas, obtenido del estudio "Efecto del nivel de consumo sobre la digestibilidad y valor energético de concentrado fibroso en llamas y alpacas" .....  | 11 |
| <b>Tabla 3.</b> Emisión de metano de alpacas alimentadas con dietas con diferente tamaño de partícula obtenida del estudio "Efecto del procesamiento forrajero en la respuesta animal y la producción de metano en llamas y alpacas" .....                                     | 12 |
| <b>Tabla 4.</b> Emisión de metano de alpacas adultas en pastoreo y confinamiento, obtenidos del estudio "Producción de metano en camélidos sudamericanos domésticos y su efecto en la salud pública" .....   | 12 |
| <b>Tabla 5.</b> Emisión de metano de alpacas adultas alimentadas con tres dietas experimentales, obtenidos del estudio "Efecto del concentrado fibroso sobre el rendimiento productivo y las emisiones de metano entérico (CH <sub>4</sub> ) en alpacas (Vicugna pacos)" ..... | 13 |
| <b>Tabla 6.</b> Información básica de los animales experimentales .....  | 32 |
| <b>Tabla 7.</b> Composición química de los insumos utilizados en el estudio.....   | 36 |
| <b>Tabla 8.</b> Principales medidas biométricas de alpacas Huacaya adultas del CICAS La Raya, utilizadas para el diseño de la jaula metabólica.....  | 37 |
| <b>Tabla 9.</b> Aporte nutricional por kg de la mezcla del alimento utilizado en el presente estudio .....   | 40 |
| <b>Tabla 10.</b> Aporte nutricional de la ración de mantenimiento suministrada por kg de PV <sup>0.75</sup> a alpacas Huacaya adultas.....   | 40 |
| <b>Tabla 11.</b> Consumo de nutrientes en alpacas Huacaya adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento (40gms/kg PV <sup>0.75</sup> ).....   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 12.</b> Excreción de heces y orina en alpacas alimentadas con una dieta de mantenimiento ( $40 \text{ gMS/kg}^{0.75}$ ).....  | 51 |
| <b>Tabla 13.</b> Digestibilidad de nutrientes en alpacas adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento, en jaulas metabólicas.....  | 53 |
| <b>Tabla 16.</b> Pulsaciones por minuto en alpacas Huacaya adultas en condiciones de ayunas .....  | 54 |
| <b>Tabla 14.</b> Consumo de nutrientes, consumo de $\text{O}_2$ , emisión de $\text{CH}_4$ y $\text{CO}_2$ durante 24 horas en alpacas adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento .. | 56 |
| <b>Tabla 15.</b> Emisión de $\text{CH}_4$ y $\text{CO}_2$ y consumo de $\text{O}_2$ en alpacas adultas en condiciones de ayunas (registro de 20 minutos) .....                               | 61 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Fotografía 1.</b> Insumos utilizados en el presente estudio, heno de avena (derecha) y pellet de alfalfa (izquierda) ..... | 33 |
|---|----|

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Vista aislada del tracto gastrointestinal de la alpaca. C1 Cd y C1 Cr, primer compartimento gástrico dorsal y ventral; C2, segundo compartimento gástrico; C3 A y C3 B, partes proximal y distal del tercer compartimento gástrico..... | 25 |
| <b>Figura 2.</b> Dinámica de la emisión de metano (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto.....  | 57 |
| <b>Figura 3.</b> Dinámica de la emisión de dióxido de carbono (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto..   | 59 |
| <b>Figura 4.</b> Dinámica del consumo de oxígeno (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto.....   | 60 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Anexo 1.</b> Biometría en alpacas adultas.....   | 76 |
| <b>Anexo 2.</b> Sistema móvil para análisis de gases.....                                   | 76 |
| <b>Anexo 3.</b> Esquema del sistema móvil de respirometría de circuito abierto.....         | 77 |
| <b>Anexo 4.</b> Equipos del sistema analizador de gases.....                                | 77 |
| <b>Anexo 5.</b> Dimensiones y características de la jaula metabólica (vista lateral) .....  | 79 |
| <b>Anexo 6.</b> Dimensiones y características de la jaula metabólica (vista superior) ..... | 79 |
| <b>Anexo 7.</b> Dimensiones y características del comedero y del soporte para bebedero      | 80 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Anexo 8.</b> Dimensiones y características de la bandeja colectora de heces (izquierda) y bandeja colectora de orina (derecha) ..... | 80 |
| <b>Anexo 9.</b> Estructura final de la jaula metabólica .....   | 81 |
| <b>Anexo 10.</b> Estructuras de la jaula metabólica .....   | 81 |
| <b>Anexo 11.</b> Dimensiones y características de la cámara dinámica (vista frontal) .....  | 83 |
| <b>Anexo 12.</b> Dimensiones y características de la cámara dinámica (vista posterior) ...  | 83 |
| <b>Anexo 13.</b> Representación de la cámara dinámica acoplada a la jaula metabólica ..   | 84 |
| <b>Anexo 14.</b> Estructura final de la cámara dinámica .....   | 84 |
| <b>Anexo 15.</b> Estructuras de la cámara dinámica.....   | 85 |
| <b>Anexo 16.</b> Cámara dinámica acoplada a la jaula metabólica .....   | 86 |
| <b>Anexo 17.</b> Pesaje de los animales .....   | 86 |
| <b>Anexo 18.</b> Preparación del alimento y agua para el suministro a los animales en jaulas metabólicas y cámara dinámica.....         | 87 |
| <b>Anexo 19.</b> Control del alimento y agua rechazados de la etapa de validación de jaulas metabólicas.....                            | 88 |
| <b>Anexo 20.</b> Control de las excreciones de heces y orina de la etapa de validación de jaulas metabólicas .....                      | 88 |
| <b>Anexo 21.</b> Evaluación de las emisiones y consumo de gases en la etapa de validación de cámara dinámica.....                       | 90 |
| <b>Anexo 22.</b> Control de la frecuencia cardíaca.....   | 91 |
| <b>Anexo 23.</b> Registro de alimento ofrecido y rechazado en la etapa experimental del estudio .....                                   | 91 |
| <b>Anexo 24.</b> Registro de la excreción de heces y orina obtenidos en la etapa experimental del estudio.....                          | 92 |

## GLOSARIO

- **CSA:** Camélidos Sudamericanos
- **FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- **CH<sub>4</sub>:** Metano
- **CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono
- **O<sub>2</sub>:** Oxígeno
- **INEI:** Instituto Nacional de Estadística e Informática
- **NRC:** National Research Council
- **ARC:** Agricultural Research Council
- **ED:** Energía Digestible
- **EM:** Energía Metabolizable
- **ENm:** Energía Neta de mantenimiento
- **PV:** Peso Vivo
- **PV<sup>0.75</sup>:** Peso Metabólico
- **MS:** Materia Seca
- **MO:** Materia Orgánica
- **FDN:** Fibra Detergente Neutra
- **PC:** Proteína Cruda
- **PPM:** Pulsaciones Por Minuto

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación “Diseño y validación de sistema de seguimiento metabólico (jaula metabólica y cámara dinámica) para alpacas”, se realizó en el Centro Experimental CICAS “La Raya”, entre los meses de junio y julio del 2021. El objetivo fue diseñar y validar jaulas metabólicas y cámara dinámica para alpacas. Para la validación se evaluaron 5 animales, la colecta y cuantificación de resultados de las jaulas metabólicas tuvo una duración de 5 días, el análisis en cámara dinámica fue en dos etapas, una etapa de evaluación de 24 horas por tres días y la segunda etapa de evaluaciones de 20 minutos durante 4 días. Se determinó el consumo de alimento y agua, producción de heces y orina, la frecuencia cardíaca, la emisión de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el consumo de oxígeno (O<sub>2</sub>) de los animales evaluados. Para todos los resultados evaluados se utilizó estadística descriptiva.

Los resultados indican que las alpacas consumen valores medios de materia seca de  $40.4 \pm 2.58$  g/kg PV<sup>0.75</sup>/día y  $91.4 \pm 25.75$  ml de agua/kg PV<sup>0.75</sup>/día y excretan en promedio  $829.2 \pm 209.4$  g de heces/animal/día y  $274.8 \pm 107.9$  ml de orina/animal/día. Adicionalmente se determinó la frecuencia cardíaca, resultando un valor medio de  $62 \pm 7.5$  PPM. Respecto a la emisión y consumo de gases, los resultados indican valores medios de emisión de CH<sub>4</sub> de  $16.4 \pm 2.89$  g/día o  $24.0 \pm 3.81$  g/kg MO consumida, igualmente se encontró una emisión media de CO<sub>2</sub> de  $692.7 \pm 67.3$  g/animal/día y un consumo de O<sub>2</sub> de  $472.8 \pm 40.8$  g/animal/día. Los resultados demostraron que las jaulas metabólicas y cámara dinámica diseñadas en el presente estudio, permiten realizar estudios de digestibilidad de nutrientes, así como estudios sobre la emisión y consumo de gases en alpacas.

**Palabras clave:** alpacas, cámara dinámica, emisión de gases, jaulas metabólicas mantenimiento, metano

## INTRODUCCIÓN

Los camélidos sudamericanos (CSA), constituyen un recurso genético de gran importancia social, económica, cultural y científica para el Perú y algunos países de la Región Andina, ya que estos proveen a sus criadores productos de gran calidad, como son la fibra y la carne y, a menudo, constituyen el único medio de subsistencia de una gran parte de la población altoandina (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2005).

El aumento de temperatura del ambiente a mayores altitudes (los andes), por efecto del cambio climático es más acelerado que a menores altitudes (0,6 vs. 0,2 °C/década) (Haynes et al., 2014; Michelutti et al., 2015). La evaluación de su impacto en la ganadería altoandina ha perdido importancia, porque existen factores (erosión de estructuras sociales, migración, minería, etc.) que agravan su efecto (vulnerabilidad); y, por consiguiente, ponen en riesgo el medio de subsistencia de los productores agropecuarios más pobres del país (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola IFAD, 2007).

La crianza de alpacas es considerada de gran importancia en la zona altoandina, pues esta crianza contribuye en gran medida a la economía familiar, también funciona como aporte a la seguridad alimentaria y nutricional para las personas, estos aspectos son sustentados gracias a la fibra y la carne que las alpacas aportan a los productores (Larico, 2019).

En cuanto a su importancia ecológica ambiental, Puccio (2016) afirma que las alpacas y llamas son animales cuya crianza no representa de gran impacto ambiental, puesto que además de generar productos como la carne y fibra de muy buena calidad, estos

animales no requieren de una gran cantidad de forraje y agua y por sus características no provocan daños a las pasturas, haciendo que estas se restauren de forma natural.

Teniendo en cuenta la importancia económica y ambiental de esta especie se requiere optimizar su producción, para lo cual es necesario estudiar con precisión el consumo de alimento, agua, la excreción de heces y orina, la digestibilidad, la emisión de gases como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el consumo de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y estudios metabólicos que permitan mejorar la utilización de nutrientes por esta especie e incrementar la producción de fibra y carne.

Los factores prevalentes en la zona altoandina tales como la gran altitud (hipoxia), alta radiación UV, extremos climáticos, alta variación de temperaturas máximas y mínimas, estacionalidad de lluvias y oferta forrajera, no solo incrementan las necesidades de energía metabolizable y agua de los animales, sino que afectan su producción, reproducción y función ruminal, y los hacen más vulnerables a enfermedades y al cambio climático (Pinares-Patiño, 2017).

Las jaulas metabólicas permiten realizar múltiples operaciones en el ámbito de la nutrición experimental y práctica, como son los estudios controlados con nuevos alimentos fuente de nutrientes, los cuales sólo pueden realizarse en jaulas metabólicas; gracias al control del consumo de los alimentos y a la cuantificación de heces y orina producida por los animales pueden realizarse estudios sobre requerimientos nutricionales y perfil metabólico (Nelson et al., 1954).

Por otra parte, la cámara dinámica conjuntamente con un sistema de respirometría de circuito abierto, nos permitirá determinar con precisión la emisión de  $\text{CH}_4$  entérico, la emisión de  $\text{CO}_2$  y el consumo de  $\text{O}_2$  en alpacas, este proceso se realiza en un

ambiente controlado y posee un potencial para estimar las mediciones de gasto y requerimiento energético (Fernández et al., 2015).

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### **1. Identificación del problema**

En la región Andina la crianza de llamas y alpacas se ha convertido en una actividad económica que ocupa a más de 500 mil unidades familiares, principalmente en Perú y Bolivia donde en conjunto encontramos alrededor de 3.5 millones de alpacas y 3.6 millones de llamas (FAO, 2005). Sin embargo, los índices productivos y reproductivos de esta especie son considerados bajos; un factor determinante para este problema lo constituye la alimentación animal. Es escasa la información sobre la utilización de nutrientes en alpacas, por ello es necesario desarrollar ensayos metabólicos que permitan evaluar la digestibilidad, el consumo y la eficiencia de la utilización de nutrientes.

Para el estudio del metabolismo de los rumiantes se han utilizado tradicionalmente jaulas metabólicas y en los últimos años para estudios calorimétricos, y para la determinación de producción de gases de efecto invernadero, se han desarrollado cámaras dinámicas respirométricas o sistemas abiertos de respirometría (Fernández et al., 2015).

Las jaulas metabólicas se han estado utilizando en los últimos años para controlar de mejor manera en consumo de alimento y agua, la producción de heces y orina, estos datos permiten calcular el balance carbono-nitrógeno, digestibilidad aparente, balance

energético, entre otros. Sin embargo, es escasa la información detallada respecto al desarrollo, validación y utilización de jaulas metabólicas en alpacas.

Las alpacas, al ser considerados pseudo rumiantes, tienen la capacidad de rumiar y el hecho de presentar un estómago separado por cámaras las cuales les permiten clasificar el alimento y someterlos a fermentación (Wang et al., 2000; Engelhardt et al., 2005).

El CH<sub>4</sub> entérico es generado casi en su totalidad en el rumen (85-95%) a diferencia del restante (5-15%) el cual es generado en el intestino grueso. El CH<sub>4</sub> se produce gracias a las arqueas metanogénicas y se forma partiendo de los productos resultantes de la fermentación de la materia orgánica presente en los alimentos. La cantidad de CH<sub>4</sub> entérico generada por los rumiantes varía de acuerdo a diversos factores, pero como promedio, una vaca lechera, un ternero de engorde, una oveja y una cabra pueden producir diariamente 400, 200, 31 y 19 litros respectivamente (Crutzen et al., 1986). El uso de la cámara dinámica se ha dado durante los últimos años, esta permite determinar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (emisión de CH<sub>4</sub> entérico y CO<sub>2</sub>) y el consumo de O<sub>2</sub>, estos datos son de gran importancia para optimizar la utilización de nutrientes y el metabolismo energético. Al respecto se han desarrollado cámaras respirométricas para vacunos, ovinos y caprinos, sin embargo, no se reporta la utilización de estos sistemas de medición en alpacas, por lo que se hace necesario desarrollar una cámara dinámica diseñada especialmente para alpacas.

## **CAPITULO II**

### **OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN**

#### **2.1. Objetivo general**

- Diseñar y validar jaulas metabólicas y cámara dinámica para alpacas (Vicugna pacos)

#### **2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y validar jaulas metabólicas, que permitan controlar el consumo de alimentos, consumo de agua, producción de heces, producción de orina y constantes fisiológicas en alpacas.
- Diseñar y validar una cámara dinámica, que permita controlar el consumo de O<sub>2</sub> y la emisión de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en alpacas.

### **2.3. Justificación**

En el Perú más de 500 mil unidades familiares han optado por la crianza de alpacas y llamas, siendo esta considerada su principal actividad económica, son cerca de 3.5 millones de alpacas y 3.6 millones de llamas que podemos encontrar en el territorio peruano y boliviano respectivamente (FAO, 2005).

Son grandes las extensiones las cuales tienen como finalidad la actividad agropecuaria; la producción animal es considerada el principal sustento económico de los pobladores altoandinos; mismos que son los más expuestos y afectados por los efectos del cambio climático, se proyecta un aumento de temperatura, entre 2° a 5 °C, para el año 2100, dependiendo de las emisiones y la ubicación (Urrutia & Vuille, 2009).

La crianza de camélidos es una actividad que cada año toma más importancia, esta importancia es mayor en áreas altoandinas, donde se requiere de una crianza más informada y tecnificada. Sin embargo, la alimentación en esta especie requiere del desarrollo de conocimientos que permitan mejorar el estatus nutricional de esta especie y con ello los índices productivos y reproductivos. Por ello es necesario validar una jaula metabólica donde se pueda controlar de manera óptima el consumo de alimentos y su metabolismo para así poder calcular el requerimiento nutricional y el valor nutricional de los forrajes para esta especie. Por otro lado, se requiere estudiar el metabolismo energético de esta especie y para ello es importante diseñar y validar una cámara dinámica que permita determinar la cantidad de CH<sub>4</sub> entérico y CO<sub>2</sub> emitidos por los camélidos, asimismo, el consumo de O<sub>2</sub>; la información sobre el uso de cámaras dinámicas es amplia en diversas especies, sin embargo, no hay mucha información sobre el uso de estas en alpacas.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Las jaulas metabólicas y la cámara dinámica, permiten medir con precisión el consumo de alimento, agua, producción de heces, orina, emisión de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y consumo de O<sub>2</sub> en alpacas.

### **2.4.2. Hipótesis nula**

La información del consumo de alimento, agua, producción de heces, orina, emisión de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y consumo de O<sub>2</sub> generada en jaulas metabólicas y cámara dinámica para alpacas, es similar a la información generada en otros estudios y con métodos semejantes.

### **2.4.3. Hipótesis alterna**

La información del consumo de alimento, agua, producción de heces, orina, emisión de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y consumo de O<sub>2</sub> generada en jaulas metabólicas y cámara dinámica para alpacas, es diferente a la información generada en otros estudios y con métodos semejantes.

## **CAPITULO III**

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Antecedentes de la investigación**

##### **3.1.1. Antecedentes sobre el uso de jaulas metabólicas**

El uso de jaulas metabólicas se ha dado desde hace algunos años atrás, siendo estas usadas en diversas especies (ovinos, caprinos, vacunos, etc.), con la finalidad de que a partir de estas jaulas se estudie el valor nutricional de forrajes usados en la alimentación animal; todas estas jaulas han sido diseñadas teniendo en cuenta las diferentes medidas zoométricas de las especies y sus hábitos alimenticios.

En los últimos años se han realizado estudios en alpacas usando jaulas metabólicas, uno de ellos es el realizado por Vélez, et al. (2022), el cual realizó el diseño y validación de jaulas metabólicas para alpacas, donde se evaluaron 5 alpacas adultas alimentadas con heno de avena y pellet de alfalfa, considerando una dieta de mantenimiento, en el cual se obtuvieron resultados medios de: consumo de materia seca  $964 \pm 28.9$  g/día, consumo de agua  $2259 \pm 152.3$  ml/día, excreción de heces  $320 \pm 35.6$  g de MS y excreción de orina  $428 \pm 34.2$  ml (Tabla 1).

**Tabla 1.** Peso vivo, consumo y excreción de nutrientes de alpacas adultas obtenidos del estudio "Design, operation, and validation of metabolism crates for nutrition studies in alpacas (*Vicugna pacos*)"

| Variables                    | Promedio | SD    | Min  | Max  |
|------------------------------|----------|-------|------|------|
| PV, kg                       | 71.2     | 5.04  | 63.1 | 74   |
| Consumo                      |          |       |      |      |
| MS g/día                     | 964      | 28.9  | 893  | 1011 |
| MS por kg PV <sup>0.75</sup> | 42.7     | 1.29  | 40.1 | 45.3 |
| Agua ml/día                  | 2259     | 152.3 | 2050 | 2638 |
| Excreción                    |          |       |      |      |
| MS g/día                     | 320      | 35.6  | 234  | 385  |
| Orina ml/día                 | 428      | 34.2  | 380  | 480  |

Fuente: Vélez, et. al. (2022)

Un estudio similar utilizando jaulas metabólicas fue realizado por Huarccallo (2017), el cual evaluó el efecto del nivel de consumo de alimento sobre la digestibilidad y valor energético de concentrado fibroso en alpacas, durante cuatro etapas 4 alpacas fueron alimentadas con una mezcla de heno de avena y alfalfa, considerando una dieta de mantenimiento, obteniendo resultados medios de: consumo de materia seca 792 g/día, excreción de materia seca 302 g/día y excreción de orina 847 ml/día (Tabla 2).

**Tabla 2.** Peso vivo, consumo y excreción de nutrientes de alpacas adultas, obtenido del estudio "Efecto del nivel de consumo sobre la digestibilidad y valor energético de concentrado fibroso en llamas y alpacas"

| Variables             | Promedio | SD   |
|-----------------------|----------|------|
| PV, kg                | 60       | -    |
| $PV^{0.75}$           | 21.6     | -    |
| Consumo               |          |      |
| MS g/día              | 792      | 75.5 |
| MS por kg $PV^{0.75}$ | 36.7     | -    |
| Excreción             |          |      |
| MS g/día              | 302      | 46.1 |
| Orina ml/día          | 847      | -    |

Fuente: Huarccallo (2017)

### 3.1.2. Antecedentes sobre la determinación de las emisiones de metano

En los últimos años, diversos estudios utilizando cámaras de acumulación de gases fueron realizados con la finalidad de determinar la emisión de  $CH_4$  en alpacas, uno de ellos fue el realizado por Ramírez et al. (2019) evaluaron el efecto del procesamiento forrajero en la respuesta animal y la emisión de  $CH_4$  en 10 alpacas macho de 2 años de edad, alimentadas con una mezcla (1:1) de heno de avena y heno de alfalfa la cual fue procesada mecánicamente a dos tamaños de partícula, 12 y 24 mm respectivamente, la emisión de  $CH_4$  fue estimada a través de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier, con el equipo FTIR, Gasmeter DX-4030, en una cámara de acumulación de gases, obteniendo resultados medios de 11.53 y 13.87 g  $CH_4$ /día. (Tabla 3)

**Tabla 3.** Emisión de metano de alpacas alimentadas con dietas con diferente tamaño de partícula obtenida del estudio "Efecto del procesamiento forrajero en la respuesta animal y la producción de metano en llamas y alpacas"

| Variables                  | Dietas Experimentales |               |
|----------------------------|-----------------------|---------------|
|                            | 12 mm                 | 24 mm         |
|                            | (n=5)                 | (n=5)         |
| PV, kg                     | 53.19 ± 2.33          | 54.52 ± 3.74  |
| CMS, kg/día                | 1.161 ± 0.064         | 1.201 ± 0.135 |
| CH <sub>4</sub> , g/día    | 11.53 ± 1.82          | 13.87 ± 3.39  |
| CH <sub>4</sub> , g/kg MSC | 9.97 ± 1.70           | 11.53 ± 2.23  |
| CH <sub>4</sub> , L/día    | 28.06 ± 4.19          | 33.89 ± 8.28  |

Fuente: Ramírez et al. (2019)

Marca & Roque (2019) evaluaron la emisión de CH<sub>4</sub> en 14 alpacas, donde se utilizó una cámara de acumulación de gases y el equipo analizador de gases Gasmeter DX-4030, la estimación de la emisión de CH<sub>4</sub> se dio en dos partes, CH<sub>4</sub> entérico emitido con alpacas en pastoreo y con alpacas en confinamiento alimentadas con una dieta de mantenimiento, se obtuvieron resultados medios de 17.7 ± 1.9 g CH<sub>4</sub>/día y 16.8 ± 2.7 g CH<sub>4</sub>/día respectivamente. (Tabla 4)

**Tabla 4.** Emisión de metano de alpacas adultas en pastoreo y confinamiento, obtenidos del estudio "Producción de metano en camélidos sudamericanos domésticos y su efecto en la salud pública"

| Variables               | Fases experimentales |               |
|-------------------------|----------------------|---------------|
|                         | Pastoreo             | Confinamiento |
|                         | (n=14)               | (n=14)        |
| PV, kg                  | 54.83 ± 7.1          | 59.5 ± 3.7    |
| CMS, kg/día             | 1114.5 ± 298.9       | -             |
| CH <sub>4</sub> , g/día | 17.7 ± 1.9           | 16.8 ± 2.7    |
| CH <sub>4</sub> , L/día | 43.2 ± 4.6           | 40.1 ± 6.5    |

Fuente: Marca & Roque (2019)

Quispe (2015), evaluó el efecto del concentrado fibroso sobre el rendimiento productivo y las emisiones de metano entérico, utilizó un total de 12 alpacas Huacaya macho de 2 años de edad, alimentadas con tres dietas diferentes (forraje entero (heno de avena y heno de alfalfa) y concentrados fibrosos de 12mm y 8mm), para estimar la emisión de metano se utilizó el equipo Gasmeter DX-4030, el cual estima la emisión de metano por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, se obtuvieron resultados medios de 18.025, 13.275 y 12.875 g CH<sub>4</sub>/día. (Tabla 5)

**Tabla 5.** Emisión de metano de alpacas adultas alimentadas con tres dietas experimentales, obtenidos del estudio "Efecto del concentrado fibroso sobre el rendimiento productivo y las emisiones de metano entérico (CH<sub>4</sub>) en alpacas (Vicugna pacos)"

| Variables               | Dietas experimentales    |                      |                     |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|
|                         | Forraje entero<br>(n=12) | C.F. 12 mm<br>(n=12) | C.F. 8 mm<br>(n=12) |
| PV, kg                  | 36.8                     | 35.5                 | 31.3                |
| CMS, kg/día             | 0.309                    | 0.979                | 0.868               |
| CH <sub>4</sub> , g/día | 18.025                   | 13.275               | 12.875              |
| CH <sub>4</sub> , L/día | 44.2                     | 32.6                 | 31.6                |

Fuente: Quispe (2015)

### 3.2. Marco teórico

#### 3.2.1. Los camélidos sudamericanos

Existen restos arqueológicos los cuales son procedentes de áreas ocupadas hace 6 millones de años, los cuales nos dan indicios del inicio de domesticación de los camélidos. Según estos restos se puede deducir que las alpacas son vicuñas domesticadas y las llamas son guanacos domesticados (Bonavia, 1996).

Recientemente ha aumentado el interés por los camélidos, esto se debe a su rusticidad. Su gran capacidad de desarrollarse de manera normal en condiciones ambientales desfavorables como las que podemos observar en el altiplano andino. La crianza de los camélidos sudamericanos constituye una de las actividades más importantes para un considerable sector de la población rural, en especial, de las zonas andinas de Bolivia y Perú. Otros países que aprovechan esta actividad en menor escala son Argentina, Chile y Ecuador (Fernández-Baca, 1991).

Los camélidos son eficientes en transformar forrajes toscos y pobres en productos como carne, fibra cuero y subproductos como estiércol, además de servir como animales de carga (López & Raggi, 1992).

La domesticación de la alpaca y la llama, por el poblador alto andino, data de hace seis a siete mil años, aprovechando de estos su fibra y carne. Las especies silvestres, en particular la vicuña, tuvieron una cuidadosa protección para aprovechar su valiosa fibra para la indumentaria de la realeza inca. Sin embargo, el ingreso de especies animales del viejo mundo, hizo que los CSA fueran descuidados y desplazados a las zonas más inhóspitas de los Andes, donde sobrevivieron gracias a su enorme poder de adaptación (FAO, 2005). Esta situación provocó que los conocimientos tradicionales de las Alpacas y Llamas se pierdan, asimismo, como el crecimiento sin control de las poblaciones de sus parientes silvestres, esto condujo a casi a la extinción de la vicuña, especie deseada por su valiosa fibra (Fernández-Baca, 2005).

Actualmente, los CSA domésticos constituyen el principal medio de utilización productiva de extensas áreas de pastos naturales de las zonas altoandinas, donde no es posible la agricultura ni la crianza económica de otras especies de animales

domésticos, debido a que los camélidos, convierten, con eficacia la vegetación nativa de estos ambientes en fibra y carne de alta calidad (Fernández-Baca, 2005; Avilés et al., 2018).

El Perú ocupa el primer lugar del mundo en la tenencia de alpacas (3' 685, 516 cabezas, ubicadas entre los 3800 y 4800 msnm) y el segundo lugar en llamas (Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI, 2012), después de Bolivia. El aprovechamiento racional de esta ventaja comparativa que incluye además a los CSA silvestres, vicuña y guanaco es el reto que el país encara como el medio más efectivo de lucha contra la pobreza y la inseguridad alimentaria, que afecta a las comunidades campesinas que viven de la crianza de estas especies (Fernández-Baca, 2005).

### **3.2.2. Habitación**

Casi toda la población de camélidos sudamericanos se encuentra en los países de Argentina, Bolivia, Chile, Ecuador, y Perú. La población de especies silvestres se encuentra principalmente en Argentina (Guanacos), Perú (Vicuñas) y una menor cantidad en Bolivia y Chile, mientras que la mayor parte de especies domésticas se encuentran fundamentalmente en Bolivia (Llamas) y Perú (Alpacas) encontrándose poblaciones más pequeñas en Argentina, Chile y Ecuador. En general se podría decir que los camélidos sudamericanos pueden vivir desde el nivel del mar hasta los 5000 metros de altitud (Ruiz et al., 2004).

Si bien el hábitat de los CSA es prevalentemente de una orografía escarpada, se caracteriza también por poseer estratos semihúmedos y semi-áridos, afectados por un clima de tundra fría, húmeda en las partes altas y seca en las partes más bajas; además su temperatura promedio se encuentra entre 6°C y 8°C; con un nivel de

precipitación entre 400mm y 700mm, concentrándose el 75 por ciento de esta en los meses diciembre a marzo. En general, los CSA pueden vivir en zonas más altas de los 5,000 metros; pero la alpaca prefiere zonas húmedas o bofedales (humedales o wetlands) y la vicuña las praderas altas; a diferencia de la llama, que habita en todos los niveles, aunque prefiere los lugares secos (Brenes et al., 2001).

La hipoxia (baja concentración de O<sub>2</sub> se encuentra en una función inversa a altitud) y el frío son los factores estresantes más importantes; más aún, considerando que su migración a zonas de elevada altitud habría ocurrido en un periodo reciente; (Monge & León-Velarde, 1991) esto se suma la variable disponibilidad de forraje, de gramíneas amacolladas de los géneros *Stipa*, *Festuca* y *Calamagrostis*, suficiente en la época húmeda (diciembre a marzo), pero escasa en la época seca (mayo a octubre); a pesar de que los animales acumulan grasa subcutánea, muscular y retroperitoneal de reserva durante la época húmeda, que luego movilizan en las épocas de escasez, como uno de sus mecanismos adaptativos (San Martín & Bryant, 1989; Fowler, 1998).

### **3.2.3. La alpaca**

La alpaca (*Vicugna pacos*), es considerada la especie más pequeña entre todos los camélidos domésticos (Marín et al., 2007); además, se le considera una buena productora de fibra y carne; estos productos son parte primordial para la subsistencia y el bienestar de sus criadores (Engelhardt et al., 1986; San Martín & Bryant, 1989). Desde un punto de vista trófico, se le considera a la alpaca como un herbívoro selectivo y oportunista, además de manifestar una preferencia por las herbáceas (pudiendo sobrevivir con forrajes de baja calidad), y solamente ramonea en casos de

extrema necesidad, pero es vital que el consumo de agua sea diario (San Martín, 1991).

Su distribución territorial abarca una franja, desde el norte del Perú hasta el sur de Bolivia, con muy pocos animales en el norte de Chile y Noroeste de Argentina (Wheeler, 1995). El Perú cuenta con más del 80 por ciento de la población mundial de alpacas (más de tres millones y medio), que se encuentran principalmente en las zonas altoandinas de los departamentos de Puno, Cusco, Arequipa, Ayacucho, Huancavelica y Apurímac; estando el 20 por ciento restante, en Bolivia y Chile, aunque también existen en algunos países de la Unión Europea y Estados Unidos; del total, aproximadamente el 86 por ciento son de color blanco (Brenes et al., 2001).

Existen dos razas de alpacas, Huacaya y Suri; la primera se caracteriza por su vellón compacto, esponjoso, de fibras suaves y onduladas; y, la segunda, por su vellón más suelto, sedoso y lacio (García et al., 2002). La coloración del vellón es más uniforme que en la llama; debido a que fue seleccionada artificialmente para la producción de fibra con fines industriales (Wheeler, 1991).

Las alpacas nacen con peso promedio de 7 kg, alcanzando entre los 6 - 8 meses de edad los 28 kg; y, a los 2 años un promedio de 48 kg, con un 56 por ciento de rendimiento de carcasa (García et al., 2002).

#### **3.2.4. Población de alpacas en el Perú**

Según el IV Censo Nacional Agropecuario (CENAGRO), realizado por el INEI, (2012), se estima que la población de alpacas se encuentra distribuida en 17 departamentos, siendo los de mayor producción Puno y Cusco con una producción de 1,459,903 y 545,454 respectivamente. Siendo seguidas por otras regiones como Arequipa

(468,392), Huancavelica (308,586), Ayacucho (230,910), entre otras regiones. Además, se estima que el 99 por ciento de las alpacas se encuentran en poder de personas naturales, llamados también pequeños criadores y el 1 por ciento restante en diversas formas organizativas (medianas y grandes empresas, cooperativas, asociaciones, comunidades campesinas, entre otros). Además, la crianza de este animal involucra a un aproximado de 82.459 productores agropecuarios (Carrasco, 2019).

### **3.2.5. Alimentación**

En alpacas, el alimento principal proviene de la disponibilidad y calidad de los pastos naturales; el cual varía de acuerdo a la época del año (estación de lluvia y seca), carga animal y la selectividad individual; su dieta es generalmente de alto contenido de fibra y baja proteína en función de la preponderancia de gramíneas frente a leguminosas (Bustinza, 2001).

En consecuencia, la disponibilidad, y el aporte nutricional del pastizal alto andino es variable durante todo el año, condicionados por el factor climático; situación que es paliada por la alta selectividad que tienen las alpacas en pastoreo; con preferencias de algunos pastos, de acuerdo a la época del año; en época seca, priorizan las especies *Calamagrostis heterophylla*, *Calamagrostis vicunarum*, *Poa spp.* *Carex spp.*, *Alchemilla pinnata*, y otras; como también especies de menor abundancia, pero de alta palatabilidad como: *Stipa brachiphylla*, *Poa gymnantha*, *Muhlenbergia peruviana*, *Trifolium amabile*, entre otras; excepto la *Festuca dolichophylla* por la que tienen baja preferencia (Bryant & Farfan, 1984).

En general, la alimentación de los camélidos sudamericanos está constituida por gramíneas, cuya predominancia se encuentra en las praderas de pastos naturales. La abundancia de alimento está altamente ligada a la variación estacional (época de secas y época de lluvias) presente en las zonas donde habitan estos animales. La temperatura ambiental varía de una máxima de 18 a 20° C en el día a -12° C durante la noche en los meses invernales. Con cierta frecuencia, la sierra alta es afectada por tormentas de nieve que dejan sin alimento a los animales por varios días hasta derretir la nieve. Otros años hay sequías prolongadas que, igualmente, afectan la disponibilidad de forraje lo que repercute en el comportamiento productivo de los animales (FAO, 2005).

El uso de pastos cultivados como forma de complemento para una alimentación con praderas naturales no es algo común a pesar de que el uso de los pastos cultivados ha demostrado tener experiencias exitosas en los animales. Se lograron obtener pastos cultivados a altitudes de 4 000 metros y más, con rendimientos excelentes. Especies de gramíneas del género *Lolium* y de leguminosas del género *Trifolium*, han dado excelentes resultados y son plenamente aceptados por las alpacas y llamas. Son notables también los logros obtenidos en el Departamento de Puno con el Proyecto de Cooperación de Nueva Zelanda en el Perú, que se llevó a cabo en la década de los 70s. Se obtuvieron resultados excelentes en la ganancia de peso de alpacas al pastoreo en una asociación de alfalfa y *Dactylis glomerata* con cargas de hasta 60 cabezas por hectárea, similar a lo obtenido con ovinos. También, se reporta que no se observaron problemas de timpanismo en alpacas debido al consumo de leguminosas, a diferencia de ovinos y vacunos en los que esta afección constituyó un verdadero problema. Estas experiencias demuestran la factibilidad de establecer pastos

cultivados a altitudes de 4 000 m o más, lo que constituye una alternativa importante para aliviar la presión sobre los pastos naturales y al mismo tiempo obtener una mayor productividad por unidad de superficie con los consiguientes beneficios económicos para los productores (FAO, 2005).

En resumen, el consumo de alimento dependerá de su composición química, digestibilidad y disponibilidad (López et al., 1998), como también de su contenido de proteína (San Martín & Bryant, 1989); en el caso del forraje, este se tipifica en función de su fibra detergente neutra (López et al., 1998). La alpaca para cubrir su demanda de un consumo de materia seca, requiere 60,5g/kg PV<sup>0.75</sup> y de 53,7g/kg PV<sup>0.75</sup>, en estación seca y húmeda, respectivamente (Reiner et al., 1987); que representa en promedio 1,80 por ciento del peso corporal (San Martín & Bryant, 1989); disponiendo 1,25 por ciento para su mantenimiento, y hasta 1,50 por ciento para su gestación; pudiendo llegar a 2,75 por ciento, cuando se incluye la lactación (Van-Saun, 2006).

### **3.2.6. Etología alimentaria**

Los camélidos son una especie adaptada completamente a áreas donde la disponibilidad de alimento es escasa, esto debido a las diversas características que poseen estos animales, tales como la selectividad de pastizales, consumo reducido y mayor tiempo de retención del alimento en el tracto digestivo. Las alpacas presentan durante el pastoreo una conducta muy diferente a otras especies, esto debido a la particularidad de presionar y cortar el pasto conservando de mejor manera el estrato herbáceo (Baroni Casas & Suarez Diaz, 2017); tienden a pasar gran parte del día pastando, ramoneando y rumiando, a pesar de esta última característica, las alpacas en un sentido taxonómico no son consideradas rumiantes (Fowler, 2008).

### **3.2.7. Fisiología, anatomía y características digestivas de los camélidos sudamericanos**

#### **Cavidad bucal**

Los labios de los camélidos sudamericanos son delgados, el labio superior está dividido por una hendidura media (labio leporino) y el labio inferior relativamente grande. Los labios son móviles, permitiéndoles la capacidad de seleccionar los alimentos (San Martín, 1999).

Los incisivos de los camélidos sudamericanos, así como en los ovinos y en el ganado, están localizados en la parte frontal de la mandíbula inferior y estos presentan superficies cortantes en forma de cuña que permiten cortar el alimento presionándolo contra la almohadilla dentaria que se encuentra en la mandíbula superior. Durante la masticación, el movimiento vertical y horizontal permite un uso eficiente de los molares y premolares en cortar y triturar los alimentos fibrosos (San Martín, 1999).

Los CSA presentan labios partidos, los cuales trabajan independientemente simulando un par de dedos con los cuales abrazan al alimento. Poseen dientes incisivos muy afilados por lo tanto cortan el alimento y no se arranca como en otras especies (Montes, 2000).

#### **Dentición**

La fórmula dental de los camélidos sudamericanos es diversa, esto depende del alimento que ellos consumen, como lo procesan y también al factor defensa, el cual está directamente relacionado con los caninos (San Martín & Bryant, 1989).

Trabajando con 235 mandíbulas de alpacas, llamas y cruces entre alpacas y vicuñas, se desarrolló una fórmula dentaria para dientes temporales y permanentes. Los camélidos sudamericanos completan totalmente su desarrollo dentario a los 4.5 años de edad (Wheeler, 1982).

Al nacimiento, los CSA tienen en su totalidad todos sus dientes temporales, a excepción de los caninos; al alcanzar la edad de 18 a 24 meses, se presenta en cambio de incisivos por pinzas, los cuales están ubicados en la parte delantera de la mandíbula inferior y estos presentan bordes cortantes cuneiformes, lo que les permite cortar las plantas al hacer presión en la almohadilla dentaria, la cual se encuentra en la parte delantera de la mandíbula superior (San Martín, 1996).

Una particularidad son los incisivos que se ubican oblicuamente y tienen un crecimiento continuo, semejante al de los roedores. Por esta cualidad son muy longevos, favorecidos por este tipo de sistema dentario que les permite seguir cosechando forraje eficientemente a pesar del paso de los años (Rossi, 2004).

### **Glándulas salivales**

Las alpacas presentan glándulas salivales las cuales tienen una estructura tanto serosa, muscular y mixtas (San Martín & Bryant, 1987; San Martín, 1996). Estas glándulas tienen como principal objetivo secretar saliva, las cuales tienen una diferentes e importantes funciones, las cuales son: lubricar el alimento seco, agregar bicarbonato y fosfato como amortiguadores para la acidez en el momento de la fermentación y también el reciclado de los nutrientes como son la urea y el fosforo (Yaranga, 2009).

Existen estudios en los cuales se demuestra que el flujo salival de los CSA es mayor a la de los ovinos. Este aspecto conjuntamente con el tamaño relativamente pequeño de los C1 y C2 del estómago, determina que la concentración de los elementos y compuestos buffer o tampones por unidad de volumen del contenido estomacal en la alpaca sea mayor que en los ovinos (San Martin & Bryant, 1987).

## **Rumia**

La rumia es un factor de gran importancia en la vida de los CSA, pues esta actividad se realiza en docenas de periodos y tiene una duración aproximada de 7 a 12 horas. La rumiación, facilita en gran medida la acción de la fermentación microbiana y la destrucción de la membrana celular de los pastos ingeridos, esto en consecuencia produce una secreción intensa de saliva (Yaranga, 2009).

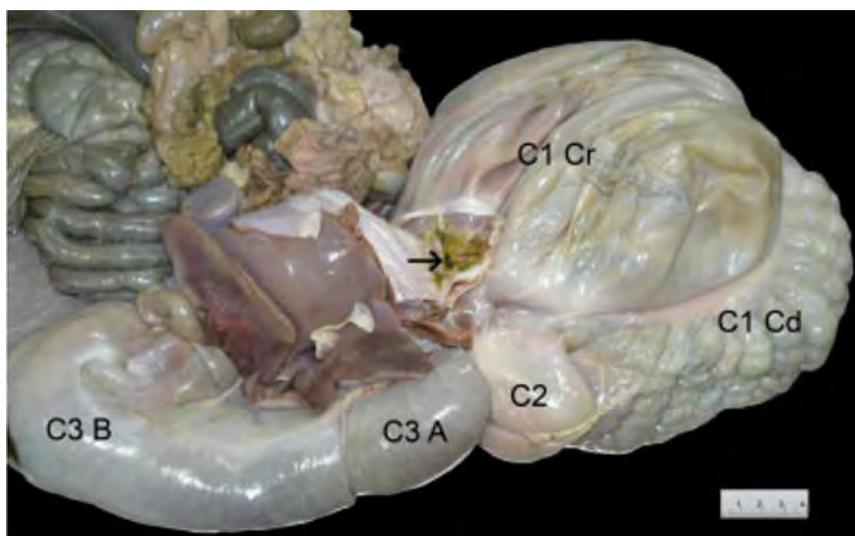
## **Estómago**

El sistema digestivo de la alpaca se caracteriza porque el estómago verdadero o abomaso está precedido por tres compartimentos histológicamente diferentes, el primero corresponde al rumen y representa el 83% de la capacidad total, este compartimento está dividido en un saco dorsal y uno ventral. El segundo compartimento está representado por el retículo (4% de la capacidad total) y el último por el omaso que tiene una capacidad de un 8%, el cual se confunde macroscópicamente con el estómago verdadero o abomaso, ya que no existen estructuras anatómicas que los separen. Sin embargo, internamente se aprecian crestas dispuestas longitudinales formando pequeñas cavidades similares a las que se observan en el retículo (Sato & Montoya, 1989).

El estómago de los camélidos sudamericanos está dividido en 3 compartimentos: compartimento 1 (C1) comparable con el rumen, retículo o panza; el compartimento 2 (C2) comparable con omaso o librillo y por último el compartimento 3 (C3) comparable con el abomaso o estómago verdadero, los cuales corresponden el 83%, 6% y 11% del volumen total del estómago, respectivamente (Heller et al., 1984; San Martín, 1996; Bustinza, 2001).

El primer compartimento (C1) tiene una gran semejanza con el compartimento ruminal de los rumiantes, posee un complejo ecosistema microbiano que incluye bacterias, protozoos, arqueas y hongos, es en este lugar donde se produce la fermentación del forraje consumido, la fermentación es considerada como un proceso fundamental para la nutrición del animal; el C1 es considerado el compartimento más grande de los tres y está dividido por un pliegue muscular transversal en dos porciones, una craneal y otra caudal. El C2 es el más pequeño siendo este la continuación del C1. El C3 se origina en el C2, está situado al lado derecho del C1 y tiene forma tubular alargada. Solo en este compartimento es donde se produce la secreción por ácido clorhídrico (Engelhardt et al., 2007).

Todo alimento que el camélido consume tiende a transformarse a energía, gracias a poseer un número mayor de ciclos de rumia y por ende una mayor secreción de jugos gástricos, lo que conlleva a un mayor aprovechamiento de los insumos ingeridos (Montes, 2000).



Fuente: (Baroni Casas & Suarez Díaz, 2017)

**Figura 1.** Vista aislada del tracto gastrointestinal de la alpaca. C1 Cd y C1 Cr, primer compartimento gástrico dorsal y ventral; C2, segundo compartimento gástrico; C3 A y C3 B, partes proximal y distal del tercer compartimento gástrico

### **Glándulas estomacales**

Se destaca la presencia de sacos glandulares en el estómago que les permite una eficiente maceración, mezclado y absorción de la digesta (San Martín & Bryant, 1989).

La mucosa glandular mucinógena está presente en todos los compartimentos del estómago, con excepción de la quinta parte distal del C3 y tiene una estructura similar a la de los rumiantes, con diferencias en la disposición física (Cummings et al., 1972).

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 & Stevens, 1973). Los C1 y C2 (principalmente el C1) están implicados en los procesos de fermentación y contienen la microbiota necesaria para el aprovechamiento de los vegetales fibrosos (Cerón, 2015).

La gran cantidad de células absortivas de la superficie ruminal, provocan que la tasa de absorción en camélidos sea superior, aproximadamente 2 a 3 veces mayor a lo observado en el rumen de ovinos y cabras (San Martin & Bryant, 1987).

### **Motilidad estomacal**

La motilidad estomacal cumple un rol crítico con respecto a la actividad de fermentación continua. Una motilidad constante asegura que los alimentos estén más expuestos a la unión microbiana para su posterior degradación, además asegura la mezcla de las fases líquidas y sólidas de la digesta, así como favorece el vaciamiento de los reservorios digestivos (Avendaño, 2002; Van-Saun, 2006).

### **Retención del alimento en el tracto digestivo**

Los camélidos sudamericanos retienen el alimento por mucho más tiempo que los rumiantes (Heller et al., 1986). Estudios realizados en camélidos sudamericanos (llamas), reportaron una retención del alimento por un periodo de 63.2 horas y 40.9 horas en ovinos (San Martin, 1987).

Un mayor tiempo de retención de las partículas sólidas es un factor muy importante para determinar la eficiencia de la digestibilidad en el estómago de los camélidos sudamericanos a partir de dietas con alto contenido fibroso. Cuando el tiempo de retención de las partículas es mayor, se presenta una aparente mejora en la digestibilidad de los alimentos de baja calidad y proteína, por otro lado, los alimentos de alta calidad no se ven afectados por este factor (San Martin & Bryant, 1987).

### **Metanogénesis**

La generación de metano se da como resultado de la fermentación microbiana de la materia orgánica presente en la dieta consumida por los animales. Es generado principalmente por los microorganismos denominados arqueas, la tasa de metanogénesis varía por factores como la diversidad de microorganismos metanogénicos presentes en el rumen y de su alimentación, sin embargo, estos factores son principalmente influenciados por la dieta, tasa de consumo, tamaño del compartimento del rumen, masticación (salivación) y la tasa de pasaje de los alimentos por parte de los animales (Bonilla et al., 2020).

### **3.2.8. Requerimientos nutricionales de las alpacas**

#### **Energía y requerimientos energéticos de las alpacas**

En toda especie la energía es un factor muy importante, pues su disponibilidad garantiza la nutrición y la correcta generación de procesos asociados con sostenibilidad de la vida. La energía disponible en el alimento es considerada como limitante en todo sistema de alimentación (National Research Council NRC, 1985; Torres et al., 2009).

En el caso de las alpacas, su requerimiento energético presenta muchas demandas como son la gestación, el crecimiento del feto, el parto, la producción láctea, entre otros; el estado nutricional depende de su capacidad de mantenimiento y producción (Skidmore, 2011).

#### **Gasto energético de mantenimiento**

El gasto energético de mantenimiento, mide cuanta es la cantidad que un organismo necesita para su sostenimiento, sin comprometerse a un cambio neto de la energía

contenida en sus tejidos corporales (Agricultural Research Council ARC, 1980). Cuando un animal ha completado en su totalidad su crecimiento, y no se encuentra en producción, no gana ni pierde peso; esto quiere decir que el animal se encuentra en una condición de mantenimiento. El requerimiento o necesidad de mantenimiento, se traduce como la medida de la cantidad de energía que el animal necesita consumir para mantener sus funciones vitales, sin tener excesos ni carencias (Hafez & Dyer, 1972).

Diferentes ensayos en alimentación de llamas y alpacas en condiciones de altura se realizaron suministrando dietas que presentaban diferentes niveles de consumo de materia seca, siendo estos los siguientes:  $40 \text{ g/kg}^{0.75}$  para el nivel de mantenimiento,  $50 \text{ g/kg}^{0.75}$  en un nivel intermedio bajo,  $60 \text{ g/kg}^{0.75}$  en un nivel intermedio alto y  $70 \text{ g/kg}^{0.75}$  para un nivel de libre consumo (ad libitum), los niveles de suministro de materia seca se presentan como requerimientos energéticos de mantenimiento y ganancia para alpacas y llamas (Ramírez, 2017).

### **3.2.9. Técnicas que permiten determinar la digestibilidad y metabolismo de nutrientes**

#### **Jaulas metabólicas**

Las jaulas metabólicas son estructuras las cuales constan de un comedero, bebedero, además poseen diversas estructuras que nos permitirán almacenar las heces y orina producidas por los animales. Esta estructura está construida de acuerdo a las características biométricas de los animales, y nos permiten analizar datos como consumo de alimento, excreción de heces y orina que luego de un análisis en laboratorio también permite calcular la energía digestible (ED), energía metabólica

(EM), energía neta de mantenimiento (ENm) y energía neta de producción (ENp) (Roa & Céspedes, 2011).

### **Bolsas Colectoras de heces**

Las bolsas colectoras de heces comprenden sacos atados al animal mediante diversos arneses con la capacidad de soportar el peso de las heces, poseen bolsas de polietileno en su interior, las cuales sirven de almacenamiento de las heces y pueden ser retirados en el momento que el operario desee pesarlo, rotularlo y almacenarlo (Obregón, 2022).

### **Cámara dinámica**

El término de cámara dinámica se les da a ambientes cerrados, que presentan al menos una entrada y una salida de gases por donde el aire debe transitar de forma continua y discontinua. Al momento de construir una cámara dinámica se debe tomar en cuenta este aspecto, pues se debe acondicionar la entrada y salida de gases según la velocidad y dirección que toma el flujo del aire dentro de la cámara dinámica, por este motivo es común encontrar cámaras dinámicas diseñadas en forma de cubo pues facilitan el manejo y de igual manera se busca utilizar materiales transparentes que nos permitan tener una visión del animal, asimismo, que el animal pueda observar a su alrededor, esto con la finalidad de reducir el estrés (Ruiz, 2012).

#### **3.2.10. Frecuencia cardiaca**

Se realizó un estudio en alpacas en dos zonas diferentes, (zona del altiplano y zona central) donde se hizo una comparación del registro de frecuencia cardiaca, sorpresivamente a diferencia de otras especies que a mayor altura (baja concentración

de oxígeno en el ambiente) presentan mayor ritmo cardiaco, las alpacas presentaron valores menores en el altiplano a diferencia de lo encontrado en la zona central; estos datos son sorprendentes y de gran importancia, pues nos permite conocer la capacidad de aclimatación que poseen las alpacas (Crossley et al., 1990).

## **CAPITULO IV**

### **MATERIALES Y METODOS**

#### **4.1. Lugar de estudio**

El trabajo de investigación se desarrolló en el Centro de Investigación en Camélidos Sudamericanos CICAS “La Raya”, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, situado en el distrito de Marangani, provincia de Canchis y Departamento de Cusco.

#### **4.2. Ubicación**

- Latitud sur : 14° 00' – 15° 45'
- Latitud oeste : 69° 00' – 75° 00'
- Altitud : 4200 m.s.n.m.
- Promedio de precipitación pluvial : 519 mm
- Temperatura promedio anual : 6° C – 15.5° C

#### **4.3. Duración del estudio**

La etapa de diseño y construcción de jaulas metabólicas y cámara dinámica tuvo una duración de 4 meses, donde se dio una revisión bibliográfica para poder diseñar las jaulas, se realizó la biometría y consiguientemente la construcción de jaulas metabólicas y cámara dinámica, y la etapa experimental de validación de los equipos diseñados y contruidos tuvo una duración de 33 días. La etapa de análisis de muestras en laboratorio se realizó entre los meses de septiembre y diciembre del 2021.

#### 4.4. Materiales y equipos

##### 4.4.1. Material biológico para la investigación

Se utilizaron 5 alpacas Huacaya macho de 2 a 3 años de edad sin defectos y de buena condición corporal, con un peso promedio de  $46.6 \pm 3.75$  kg (Tabla 6).

**Tabla 6.** Información básica de los animales experimentales

|                     | Jaula Metabólica |        |        |        |        | Promedio |
|---------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|----------|
|                     | 1                | 2      | 3      | 4      | 5      |          |
| Arete               | H9596            | H10139 | H10442 | H10387 | H9591  |          |
| Fecha de Nacimiento | Feb-18           | Ene-19 | Feb-19 | Feb-19 | Feb-18 |          |
| Edad                | 3 años           | 2 años | 2 años | 2 años | 3 años |          |
| Peso (kg)           | 43.2             | 49.2   | 43.0   | 45.0   | 52.4   | 46.6     |

##### 4.4.2. Instalaciones

Para la realización de este estudio se prepararon dos ambientes cerrados, ventilados e interconectados donde se controló el flujo de aire y se mantuvo una temperatura constante; un ambiente para la evaluación de jaulas metabólicas y el segundo para la evaluación de cámara dinámica donde también se encontraba el equipo analizador de gases.

##### 4.4.3. Dieta Experimental

Para realizar este estudio se utilizaron dos tipos de alimento, heno de avena (energético) y pellet de alfalfa (proteico) (Fotografía 1), los cuales se suministraron en diferentes concentraciones, siendo 70% heno de avena y 30% pellet de alfalfa. La ración suministrada a los animales fue formulada en base a una dieta de mantenimiento ( $40 \text{ gMS/kg PV}^{0.75}$ ), según lo expuesto por Ramíres (2017).



**Fotografía 1.** Insumos utilizados en el presente estudio, heno de avena (derecha) y pellet de alfalfa (izquierda)

#### **4.5. Materiales y equipos para la investigación**

##### **4.5.1. Material de campo**

- Sogas
- 01 recipiente para la colecta de alimento rechazado
- 07 bolsas de tela colectoras de heces impermeabilizadas de 25cm x 35 cm
- 07 recipientes de plástico para la colecta de orina
- 01 recipiente para el pesado de heces
- 02 embudos provistos de una malla para el filtrado de agua
- Guantes de látex
- Frascos para colecta de heces
- 01 probeta de vidrio graduada
- 01 cuaderno de campo
- 01 balanza de laboratorio de precisión (EJ-2000, Max: 2100 g, d=0.1 g)
- 01 balanza tipo plataforma (PERUTRONIX SERIAL RS-232, Max: 2000 kg, d=0.3 kg)

- Rotuladores indelebles
- 02 vaso de precipitado de 100 ml y 500 ml
- 01 brocha
- 01 plancha para construcción
- 01 termohigrómetro
- 01 estetoscopio
- Barbijos

#### **4.5.2. Reactivos**

- Ácido sulfúrico al 10%

#### **4.5.3. Equipos**

- Flujómetro (Thermal Mass Flowmeter, SensyMaster FMT, ABB, Zúrich, Suiza)
- Enfriador de gases (Sample Gas Cooler, SCC-C, ABB, Zúrich, Suiza)
- Ventilador Helio Centrifugo (In-Line, TD-MIXVENT, Soler & Palau)
- Rotámetro (Medidor de Flujo, RATE-MASTER®, SERIE RM, Dwyer)
- Bomba de membrana (Diaphragm Pump 4N, ABB)
- Analizador de gases (Continuous Gas Analyzers, EasyLine EL 3020, ABB, Zúrich, Suiza)
- Sistema de colección de datos (CR800 Series Dataloggers, Campbell Scientific. Inc.)
- PC integrada (Pos-D)

#### **4.5.4. Materiales de escritorio**

- Cámara fotográfica

- Lapiceros
- Plumones
- Cuaderno
- Laptop

#### **4.5.5. Materiales de laboratorio**

- Bolsas herméticas
- Probetas de vidrio de 500 ml.
- Pipetas Pasteur
- Crisoles de porcelana
- Alcohol isopropílico
- Papel toalla

#### **4.5.6. Equipos de laboratorio**

- Molino de cuchillas (Foss Knifetec KN 295)
- Balanza analítica de precisión (Sartorius Quintix 224-1S, Max: 220 g, d=0.01 mg)
- Ultramicrobalanza (Perkin Elmer AD 6000, Max: 1g, d=0.1 µg)
- Estufa de secado de convección forzada de 720 L (Binder FED 720)
- Mufla eléctrica (Protherm Furnaces ECO 110/9)
- Prensa peletizadora (Parr)
- Calorímetro Automático Isoperibólico (Parr 6400)
- Analizador Elemental Orgánico (Perkin Elmer Series II CHNS/O Analyser 2400)

#### 4.6. Insumos utilizados para la alimentación de los animales

Los insumos usados para este trabajo de investigación fueron dos: heno de avena (concentrado energético) y pellet de alfalfa (concentrado proteico). Se realizó el análisis en laboratorio para determinar la composición química de estos dos insumos a utilizar (Tabla 7).

**Tabla 7.** Composición química de los insumos utilizados en el estudio

|                         | Unidad    | Heno de Avena | Pellet de Alfalfa |
|-------------------------|-----------|---------------|-------------------|
| Materia Seca            | %         | 81.9          | 89.1              |
| Materia Orgánica        | %         | 96.0          | 91.1              |
| Energía Bruta           | Kcal/g MS | 4.36          | 4.45              |
| Proteína Cruda          | %         | 5.28          | 17.02             |
| Fibra Detergente Neutra | %         | 60.9          | 44.6              |
| Carbono                 | %         | 45.8          | 45.2              |
| Nitrógeno               | %         | 0.845         | 2.72              |

#### 4.7. Metodología experimental

El presente estudio fue realizado en tres etapas: etapa pre experimental, etapa experimental y el análisis de muestras en laboratorio.

#### 4.8. Etapa pre experimental

##### Diseño y construcción de las jaulas metabólicas

El primer diseño de la jaula metabólica fue realizado utilizando información presente en diferentes estudios realizados en otras especies, se tomaron como modelo las jaulas metabólicas para cabras realizadas en el estudio realizado por Fernández et al., (2015), posteriormente se realizó el diseño y se adecuaron las medidas de la jaula metabólica según las medidas de las alpacas, es así que se diseñó la jaula metabólica tomando en cuenta las características morfométricas, etológicas, de confort y según

los hábitos alimenticios de las alpacas, además se tomó en cuenta que las jaulas faciliten la manipulación de los animales y que la colección de muestras se realice sin causar alguna molestia a los animales.

Previamente al diseño de la jaula metabólica se realizó la medición de las principales medidas biométricas de 10 alpacas adultas (Anexo 1, Tabla 8), esto con la finalidad de diseñarlas con información más robusta, así también diseñar un espacio dimensionado en unidad adulto y donde la alpaca pueda sentirse en confort y no alterar o restringir su comportamiento normal.

**Tabla 8.** Principales medidas biométricas de alpacas Huacaya adultas del CICAS La Raya, utilizadas para el diseño de la jaula metabólica.

| N°                  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | Promedio |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Arete               | H6625  | H11224 | H10892 | H7418  | H5359  | H11223 | H8792  | H4290  | H9973  | H10862 |          |
| Fecha de Nacimiento | Dic-14 | Feb-20 | Ene-20 | Mar-15 | Feb-12 | Mar-20 | Feb-17 | Feb-11 | Ene-19 | Ene-20 |          |
| Largo del Cuello*   | 43.5   | 46.0   | 47.0   | 48.0   | 41.0   | 40.0   | 48.0   | 31.5   | 44.0   | 46.0   | 43.5     |
| Altura a la Cabeza* | 146.0  | 132.0  | 139.0  | 134.0  | 132.0  | 133.0  | 142.0  | 134.0  | 136.0  | 129.0  | 135.7    |
| Altura a la Cruz*   | 90.0   | 85.0   | 90.0   | 89.0   | 86.0   | 85.0   | 86.0   | 85.0   | 87.5   | 81.5   | 86.5     |
| Largo del Cuerpo*   | 99.0   | 81.0   | 85.0   | 95.0   | 91.5   | 84.0   | 91.0   | 94.0   | 84.5   | 81.5   | 88.7     |
| Largo total*        | 142.5  | 127.0  | 132.0  | 143.0  | 132.5  | 124.0  | 139.0  | 125.5  | 128.5  | 127.5  | 132.2    |
| Ancho de Caderas*   | 32.0   | 32.5   | 40.0   | 28.5   | 39.0   | 39.0   | 42.0   | 36.0   | 34.5   | 32.0   | 35.6     |

Donde: \*, cm

Se construyeron 10 jaulas individuales de acero inoxidable cuyo diseño contempla una serie de plataformas en la base, capaces de categorizar las muestras que se deseen obtener (heces y orina) de la alpaca, además, las jaulas también cuentan con un comedero y un espacio para bebedero acoplado a estas.

### **Diseño y construcción de la cámara dinámica**

Se diseñó la cámara dinámica tomando en cuenta las características morfométricas de los animales, la cámara dinámica se diseñó con la finalidad de ser acoplada a las

jaulas metabólicas y otorgar un ambiente cerrado y hermético que evite la entrada y salida del aire.

La parte anterior de la cámara dinámica posee una ventana de acrílico que permite observar al animal en evaluación, posee también una taquilla extraíble que permite el suministro de alimento y la limpieza de la base de la cámara dinámica, en esta taquilla se encuentra también un agujero de 5 cm de diámetro que permite el ingreso de aire hacia la cámara dinámica.

La parte posterior posee una manga de tela retráctil que permite ingresar la cabeza del animal ajustando el orificio de entrada y creando un espacio hermético, asimismo, posee una placa metálica en la parte posterior que evita el ingreso de los miembros anteriores del animal hacia el espacio de la cámara dinámica.

### **Sistema Móvil de Respirimetría de Circuito Abierto**

El sistema fue instalado en un espacio móvil de acero inoxidable (Anexo 2). Las tuberías de acero inoxidable, el flujómetro (Thermal mass flowmeter, SensyMaster FMT450, ABB, Zúrich, Suiza) que registraba la cantidad de flujo de aire por la primera línea de análisis ( 50 L/min) y la temperatura del flujo, el enfriador de gases (Sample Gas Cooler, SCC-C, ABB, Zúrich, Suiza) que permitía eliminar la presencia de humedad en el aire de la segunda línea de análisis (1 L/min), y el ventilador (Ventiladores Helio Centrífugo In-Line, TD-MIXVENT, Soler & Palau) que extraía el flujo de aire del sistema en un valor de 50 L/min, fueron acoplados en la parte baja del sistema móvil. El rotámetro (Medidor de flujo RATE-MASTER®, SERIE RM, Dwyer), la bomba de membrana (Diaphragm Pump 4N, ABB) que nos registraba el flujo constante de la segunda línea de análisis, el analizador de gases para la determinación

de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) (Continuous gas analyzers, EasyLine EL3020, ABB, Zúrich, Suiza) el cual posee dos sensores, Sensor Uras26 para la determinación de la presencia de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en la muestra de aire analizado y el Sensor Magnos28 el cual determinaba la presencia de O<sub>2</sub> en la muestra de aire analizado, el sistema de colección de datos (CR800 Series Dataloggers, Campbell Scientific. Inc.) que permitía recopilar los datos enviados por los diferentes equipos y una computadora integrada (Pos-D) el cual mostraba el registro de los datos analizados en forma de lista y gráficos, mediante el software de Campbell Scientific Inc. se encontraban en la parte superior del sistema móvil. Todo el sistema fue conectado mediante una manguera de alta presión a la cámara dinámica donde se encontraba el animal (Anexo 3, Anexo 4).

### **Selección de alpacas**

Los animales utilizados para esta investigación fueron 5 alpacas Huacaya macho, seleccionados del plantel de reproductores del CICAS La Raya; las alpacas se encontraban en perfecto estado de salud y fueron sometidos a las mismas condiciones de alimentación y manejo.

### **Control de peso vivo**

Los animales fueron pesados en dos etapas; antes de iniciar la etapa experimental y al finalizarla (Anexo 17), y se realizó el registro del mismo (Anexo 25). El pesaje se realizó con una balanza tipo plataforma de la marca PERUTRONIX SERIAL RS-232, que cuenta con un lector digital, con una capacidad de 2 toneladas y un margen de error de 0.3 kg.

### **Composición química de la ración suministrada**

Según lo expuesto anteriormente la ración suministrada a los animales tuvo la siguiente composición química (Tabla 9, Tabla 10):

**Tabla 9.** Aporte nutricional por kg de la mezcla del alimento utilizado en el presente estudio

|                         | Unidad    | A. N. Alimento |
|-------------------------|-----------|----------------|
| Materia Seca            | (g/kg)    | 840.7          |
| Materia Orgánica        | (g/kg)    | 793.9          |
| Energía Bruta           | (Kcal/kg) | 3690.7         |
| Proteína Cruda          | (g/kg)    | 75.8           |
| Fibra Detergente Neutra | (g/kg)    | 468.2          |
| Carbono                 | (g/kg)    | 383.2          |
| Nitrógeno               | (g/kg)    | 12.1           |

**Tabla 10.** Aporte nutricional de la ración de mantenimiento suministrada por kg de PV<sup>0.75</sup> a alpacas Huacaya adultas

|                         | Unidad                       | A.N. Ración |
|-------------------------|------------------------------|-------------|
| Materia Seca            | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 42.0        |
| Materia Orgánica        | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 39.7        |
| Energía Bruta           | (Kcal/kgPV <sup>0.75</sup> ) | 184.5       |
| Proteína Cruda          | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 3.79        |
| Fibra Detergente Neutra | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 23.4        |
| Carbono                 | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 19.2        |
| Nitrógeno               | (g/kgPV <sup>0.75</sup> )    | 0.606       |

#### 4.9. Etapa experimental

##### Adaptación de animales a las jaulas metabólicas

La etapa de adaptación de las jaulas metabólicas tuvo una duración de 21 días, etapa en la cual se observó la evolución del comportamiento animal, dentro de las jaulas metabólicas, así mismo, en esta etapa se realizó la adaptación a la nueva dieta suministrada y a los arneses y bolsas colectoras de heces.

Se consideró 21 días de adaptación a la dieta experimental según lo descrito por (Ruiz & Ruiz, 1992), pues esto permite lograr una limpieza completa del tracto digestivo en los animales eliminando en su totalidad residuos de la dieta previa al estudio permitiendo obtener muestras de heces correspondientes a la nueva dieta.

El suministro de agua fue ad libitum durante esta etapa.

La limpieza de las jaulas metabólicas, bolsas colectoras de heces, recipientes utilizados para la colecta y cuantificación de heces y orina, fue realizada diariamente.

### **Evaluación del comportamiento animal**

Durante la etapa de evaluación de los animales, también se evaluaron los signos o indicadores de malestar o estrés en las alpacas, siendo estos determinados por el ruido, vocalizaciones o comportamiento según lo descrito por Fowler (2008).

### **Validación de jaulas metabólicas**

La etapa de validación de jaulas metabólicas tuvo una duración de 5 días, en los cuales se suministró alimento según sus requerimientos de mantenimiento ( $40 \text{ gMS/kg PV}^{0.75}$ ) en función al peso vivo registrado, además de suministrar agua ad libitum a los animales (Anexo 18).

### **Control de consumo de alimento y agua**

El alimento y agua fueron suministrados a las 8:00 a.m., se mezcló el heno de avena con el pellet de alfalfa, se suministró 2.5 litros de agua inicialmente y esta se aumentaba observando el consumo por parte del animal (Anexo 19, Anexo 23), asegurando que el animal siempre cuente con agua a disponibilidad. Al día siguiente

a las 07:00 a.m. se realizaba la colecta y cuantificación del alimento rechazado y el restante de agua.

### **Control de la producción de heces y orina**

Se colectaron y cuantificaron las muestras de heces de las bolsas colectoras y de lo restante en la bandeja colectora de heces, asimismo, la orina fue colectada de los recipientes ubicados en el suelo y del restante que quedaba en la bandeja colectora de orina, los dos últimos días de colecta de heces y orina, se tomó una muestra y se almacenó a -20 °C para su posterior análisis en laboratorio (Anexo 20, Anexo 24).

Los dos últimos días de colecta se agregó 15 ml de ácido sulfúrico diluido al 10% a la orina para luego ser almacenada a -20 °C para su posterior análisis en laboratorio.

### **Adaptación de animales a la cámara dinámica**

Durante esta etapa se ingresaron los animales a la cámara dinámica por periodos cortos para familiarizarlos con la estadía dentro del espacio cerrado.

### **Control de la emisión de gases durante 24 horas**

La etapa de medición de gases en 24 horas tuvo una duración de tres días (un día por animal), durante esta etapa se seleccionó a los tres animales que mostraron mayor docilidad dentro de la cámara dinámica, estos animales fueron ingresados durante 24 horas para el control de consumo y emisión de gases (Anexo 21). Dentro de la cámara dinámica se le proveyó de alimento y agua, registrándose el consumo de estos, así como la producción de heces y orina.

### **Control de la emisión de gases en ayunas**

La etapa de control de la emisión de gases en ayunas se realizó a las 7:00 a.m., tuvo una duración de 20 minutos por animal durante 4 días, en esta etapa fueron 5 los animales que ingresaron a la cámara dinámica para sus respectivas mediciones. Un día antes de la medición se suministró alimento a las 10:00 a.m. y se retiró a las 04:00 p.m., con esto se aseguró 15 horas de ayuno en los animales.

### **Control de la frecuencia cardiaca**

Para el control de frecuencia cardiaca se utilizó un estetoscopio, se auscultó en la zona izquierda entre el cuarto espacio intercostal y la quinta costilla (zona donde se ubica la válvula atrio ventricular izquierda) (Espiritu, 2019), las mediciones se hicieron por 3 minutos, para obtener un promedio por minuto más preciso y se realizaron mientras los animales se encontraban en la evaluación dentro de la cámara dinámica y en estado de reposo (Anexo 22).

#### **4.10. Análisis de muestras en laboratorio**

Las muestras de alimento, heces y orina fueron analizadas en el laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad De Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, con la finalidad de determinar su composición química (MS, MO, EB, PC y FDN).

### **Preparación previa de las muestras**

Las muestras fueron sometidas a un proceso de oreo por 24 horas a temperatura ambiente, para luego proceder con el secado de las muestras utilizando una Estufa de Convección Forzada Binder FED720, a una temperatura de 60 °C por 48 horas, se realizó el registro del peso inicial y final de las muestras.

Luego de realizado el secado de las muestras, se procedió con la molienda de las muestras de alimento y heces, para ello se utilizó el molino de cuchillas Foss Knifetec KN295; las muestras fueron almacenadas para los siguientes análisis.

Las muestras de orina fueron liofilizadas durante 48 horas para luego ser almacenadas para su posterior análisis.

### **Determinación de materia seca**

El análisis de materia seca fue realizado mediante el protocolo de la Association of Official Analytical Chemist 930.15 (A.O.A.C, 2019), se separaron en crisoles muestras de 3 gramos, para luego ser introducidas a la estufa de modelo FED 720, Binder a una temperatura de 105°C por 17 horas. Una vez concluido el tiempo, las muestras fueron pesadas para obtener un peso final. La determinación de materia seca se dio con la siguiente fórmula:

$$\%MS = \frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

### **Determinación de materia orgánica**

El análisis de materia orgánica fue realizado mediante el protocolo de la AOAC 942.05 (A.O.A.C., 2019), se separaron en crisoles muestras de 1.5 gramos aproximadamente para luego ser introducidas a la mufla de modelo Protherm Furnaces ECO110/9 precalentada por dos horas. Una vez las muestras ya se aseguraron dentro de la mufla se programa una temperatura de calcinación (600°C) por 8 horas, terminado el proceso de calcinación las muestras fueron pesadas para obtener el peso de las cenizas y por consiguiente la materia orgánica y el porcentaje de la misma. La determinación de materia orgánica y su porcentaje se realizó con la siguiente fórmula:

$$\%MO = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso de ceniza}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

### **Determinación de energía bruta**

Se realizaron pellets de cada muestra a analizar utilizando la prensa peletizadora Parr, con pesos aproximados de 0.5 a 1.0 g, para luego ser colocado en la Bomba Calorimétrica Parr Instrument Company 6400, una vez acondicionada la muestra se procede a analizarlo según el protocolo propuesto por su fabricante.

### **Determinación de proteína cruda**

Para la determinación de carbono, nitrógeno y proteína cruda en las heces y la orina se empleó el analizador elemental de la marca Perkin Elmer Serie II 2400 que indica los porcentajes de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre, para ello se pesaron alrededor de 2 mg en la ultramicrobalanza Perkin Elmer AD 6000 y se colocaron en viales específicos para este equipo. Para la determinación de proteína cruda se realizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Proteína cruda} = \% \text{ nitrógenox } 6.25$$

### **Determinación de fibra detergente neutra**

Para la determinación de FDN se empleó un Aparato de Digestión – ANKOM Technology, Fiber Analyzer: A200/220, Bolsas-filtros, ANKOM Technology, Catalogue N°: F57, Sellador Eléctrico por calor. ANKOM Technology, Catalogue N°: 1915/1920, Desecador – ANKOM Technology, Catalogue N°: X45 (moisture stop) y un molino (malla de 2mm). Como procedimiento primero se pesaron las bolsas-filtro para luego colocar una muestra de 0.45 – 0.5 g de muestra previamente secada y molida a través

de una malla de 2 mm. Después se pesó una bolsa-filtro vacía para determinar la corrección por bolsa vacía, posterior a ello sellar las bolsas; procesadas 24 muestras se agrega de 1900 – 2000 ml de solución detergente neutra (ND), y se inició con el agitador y el calor por 75 min. Terminado el proceso se enjuagó la válvula con alrededor de 2000 ml de agua caliente (90-100°C), se removieron las bolsas del suspendedor y se exprimió suavemente el agua sobrante para colocarlas en un Beaker y se agregó acetona, se dejó remojando de 3 a 5 min. Se secaron las muestras por 15 minutos a temperatura ambiente antes de introducirlas a la estufa para su secado final a 105°C de temperatura. Una vez terminado el proceso se dejaron enfriar las bolsas y finalmente fueron pesadas. Para la determinación del porcentaje de fibra detergente neutra se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{FDN} = \frac{100 \times (\text{Peso final} - \text{Peso de la bolsa} - \text{filtro})}{\text{Peso de la muestra}}$$

### **Determinación del coeficiente de digestibilidad**

Adicionalmente a los objetivos del estudio se realizó la determinación del coeficiente de digestibilidad, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Digestibilidad} = \frac{\text{Nutriente consumido} - \text{Nutriente excretado}}{\text{Nutriente consumido}} \times 100$$

## **CAPITULO V**

### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

#### **5.1. Del diseño de la jaula metabólica**

##### **5.1.1. Dimensiones de la jaula metabólica**

Con lo planteado previamente en el diseño de la jaula metabólica, se obtuvieron los siguientes resultados:

Largo de la jaula (Anexo 5, Anexo 6), para esta medida se tomó en cuenta la longitud corporal, la longitud el cuello y cabeza y la posición que el animal adopta cuando duerme la cual es postrada de cubito ventral con el cuello y la cabeza extendida hacia adelante (Fowler, 2008), la cual puede alcanzar una envergadura de 1.32 m, en razón a esto se dimensiono una luz de 1.6 m (representa un 120% del largo total del animal).

Ancho de la jaula (Anexo 6), se tomó en cuenta el ancho del cuerpo de una alpaca adulta (0.36 m) y se decidió duplicar esta medida para dar opción al movimiento del animal, considerando que los ensayos tienen periodos de larga duración (> a 20 días). La luz interior de las jaulas tuvo una medida de 0.75 metros (representa un 200 % del ancho del animal).

Altura interna de la jaula (Anexo 5), fue determinada tomando en cuenta la altura corporal de la alpaca, se determinó una altura de 0.9 m (100 % de la altura a la cruz de una alpaca adulta). Esto también permitió que las alpacas puedan verse durante los días de confinamiento. El resto de medidas complementarias fueron dimensionadas tomando en cuenta la cámara dinámica y las necesidades

estructurales de las jaulas (una altura total de 1.8 metros y una altura interna de 1.47 m).

Las paredes laterales de la jaula están cubiertas por una plancha de acero y están reforzadas por varas de fierro separadas entre sí por 36 cm (Anexo 5).

La parte anterior de la jaula es libre y posee soportes para el comedero y bebedero, en la parte posterior se encontraba una puerta que posee un ancho de 0.75 metros y una altura de 0.9 m para evitar la salida del animal, tal como se observa en el Anexo 5.

El comedero posee un diseño de paralelepípedo trapezoidal invertido, con un largo de 0.50 metros, un ancho de 0.26 metros, una altura interna de 0.16 metros y una altura externa de 0.45 metros, estas dimensiones están diseñadas para facilitar el consumo de alimento y evitar el desperdicio del alimento suministrado (Anexo 7).

El soporte para bebedero se ubica al lado del comedero con un diseño circular de 0.18 metros de diámetro permitiendo el soporte de los recipientes para el suministro de agua (Anexo 7).

El comedero y bebedero están acoplados a un marco que a su vez se acopla a la jaula metabólica, el marco posee un largo de 0.75 metros y un ancho de 0.43 metros, el comedero está sostenido al marco por varillas metálicas de media pulgada y 0.34 metros de largo (Anexo 7).

La plataforma principal que representa el piso de la jaula metabólica se encuentra a 0.33 metros del suelo y está sostenida por 5 varillas de acero que se encuentran a 0.36 metros de distancia en la base de la jaula metabólica (Anexo 6), la plataforma

principal tiene un largo de 1.6 metros de largo y 0.75 metros de ancho, además cuenta con 400 agujeros de 2 cm de diámetro para facilitar el pasaje de las heces producidas por el animal.

La jaula metabólica contempla en la base dos bandejas de acero, la primera es una bandeja de retención de heces y pasaje de orina (Anexo 8), posee un largo de 0.85 metros y 0.68 metros de ancho y una altura de 5 cm, posee un conjunto de 350 agujeros de 1 cm de diámetro que permite la retención de heces y el paso de la orina a la siguiente bandeja. La segunda bandeja es para la retención de orina (Anexo 8), al igual que la primera, esta posee las mismas dimensiones, posee una hendidura al medio y una abertura en la parte anterior que permite que la orina discurra hacia un recipiente de almacenamiento.

#### **5.1.2. Resultado final de las jaulas metabólicas**

Todas las estructuras diseñadas fueron construidas en fierro y planchas de acero galvanizado.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes planteadas, se construyeron las jaulas metabólicas conforme se observa en los Anexos 9 y 10.

#### **5.1.3. Comportamiento animal**

No se presentaron indicadores de estrés al permanecer en las jaulas, así como, tampoco se presentaron signos de agresividad entre alpacas o con el operador, signos determinados por la posición de orejas y cola observadas en las alpacas durante la etapa de evaluación.

## 5.2. Validación de la jaula metabólica

Las jaulas metabólicas utilizadas permitieron controlar el consumo de alimento y agua, asimismo, permitieron controlar la producción de heces y orina en alpacas adultas.

En la Tabla 11 se presenta los resultados de consumo de nutrientes, obtenidos haciendo uso de las jaulas metabólicas.

### 5.2.1. Consumo de materia seca y consumo de agua

**Tabla 11.** Consumo de nutrientes en alpacas Huacaya adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento (40gms/kg PV<sup>0.75</sup>)

| Dieta de mantenimiento (40 gMS /kg PV <sup>0.75</sup> ) |                 |       |      |        |        |
|---|-----------------|-------|------|--------|--------|
| VARIABLES REGISTRADAS                                   | Promedio (n: 5) | SD    | CV   | Min    | Max    |
| Peso Vivo, kg   | 46.6            | 3.75  | 8.05 | 43.0   | 52.4   |
| Peso Metabólico, kg                                     | 17.8            | 1.07  | 6.01 | 16.8   | 19.5   |
| Consumo   |                 |       |      |        |        |
| Materia Seca, g/animal/ día                             | 720.4           | 70.1  | 9.73 | 562.3  | 814.2  |
| Materia Seca, g/kgPV <sup>0.75</sup> / día              | 40.4            | 2.58  | 6.40 | 33.4   | 42.0   |
| Materia Orgánica, g/animal/ día                         | 680.1           | 66.3  | 9.75 | 531.7  | 768.8  |
| Energía Bruta, kcal/animal/ día                         | 3162.9          | 307.7 | 9.73 | 2466.9 | 3574.3 |
| Proteína Cruda, g/ animal/ día                          | 65.4            | 6.2   | 9.53 | 48.8   | 73.5   |
| FDN, g/ animal/ día                                     | 400.6           | 39.3  | 9.81 | 314.5  | 453.2  |
| Carbono, g/ animal/ día                                 | 328.4           | 32.0  | 9.74 | 256.4  | 371.1  |
| Nitrógeno, g/ animal/día                                | 10.5            | 1.00  | 9.53 | 7.81   | 11.8   |
| Agua, ml/animal/día                                     | 1623.2          | 473.3 | 29.2 | 50.0   | 2440.0 |
| Agua, ml/ kgPV <sup>0.75</sup> /día                     | 91.4            | 25.7  | 28.2 | 2.57   | 131.3  |

Donde: kgPV<sup>0.75</sup>, kg peso metabólico; FDN, fibra detergente neutra

### Consumo de materia seca

Como se pudo observar en la Tabla 11, el promedio de consumo de materia seca en alpacas adultas en el presente trabajo de investigación, fue de 720.4 ± 70.1 g/día, siendo un valor inferior a lo reportado por Vélez et al. (2022), quien encontró un promedio de consumo de materia seca de 964 ± 28 g/día. De la misma forma es inferior a lo reportado por Huareccallo (2017), quien encontró un valor medio de 792 g/día;

esta diferencia puede deberse al factor edad y peso vivo de los animales utilizados en los diferentes estudios, siendo estos mayores a los utilizados en el presente.

## Consumo de agua

El promedio de consumo de agua en alpacas adultas en el presente trabajo fue de  $1623.2 \pm 473.3$  ml/día tal como se muestra en la Tabla 11, este resultado es inferior a lo reportado por Vélez et al. (2022), quien encontró valores medios de consumo de agua de  $2259 \pm 152.3$  ml/día; esta diferencia podría deberse al consumo de materia seca, el cual fue menor en el presente estudio.

### 5.2.2. Excreción de heces y materia seca

**Tabla 12.** Excreción de heces y orina en alpacas alimentadas con una dieta de mantenimiento ( $40 \text{ gMS/kg}^{0.75}$ )

| Dieta de mantenimiento ( $40 \text{ gMS/kg PV}^{0.75}$ ) |                 |       |      |       |        |
|--|-----------------|-------|------|-------|--------|
| Variables Registradas                                    | Promedio (n: 5) | SD    | CV   | Min   | Max    |
| Peso Vivo, kg  | 46.6            | 3.75  | 8.05 | 43.0  | 52.4   |
| Peso Metabólico, kg                                      | 17.8            | 1.07  | 6.01 | 16.8  | 19.5   |
| Excretado  |                 |       |      |       |        |
| Heces  |                 |       |      |       |        |
| Heces Frescas, g/animal/ día                             | 829.2           | 209.4 | 25.3 | 537.4 | 1289.6 |
| Materia Seca, g/animal/ día                              | 254.9           | 55.2  | 21.6 | 171.8 | 359.4  |
| Materia Orgánica, g/animal/ día                          | 228.2           | 49.4  | 21.6 | 154.1 | 322.6  |
| Energía Bruta, kcal/animal/ día                          | 1097.3          | 235.9 | 21.5 | 746.5 | 1540.3 |
| Proteína Cruda, g/animal/ día                            | 28.7            | 7.6   | 26.6 | 16.9  | 43.6   |
| FDN, g/animal/ día                                       | 175.9           | 37.9  | 21.5 | 116.4 | 244.8  |
| Carbono, g/animal/ día                                   | 116.7           | 25.2  | 21.6 | 78.8  | 163.5  |
| Nitrógeno, g/animal/día                                  | 4.58            | 1.22  | 26.6 | 2.70  | 6.98   |
| Orina  |                 |       |      |       |        |
| Orina Producida, ml/animal/ día                          | 274.8           | 107.9 | 39.3 | 36.0  | 490.0  |
| Materia Seca, g/animal/ día                              | 23.1            | 9.1   | 39.3 | 3.03  | 41.3   |
| Energía Bruta, kcal/animal/ día                          | 60.8            | 24.1  | 39.6 | 8.46  | 109.1  |
| Proteína Cruda, g/animal/ día                            | 13.4            | 5.1   | 37.7 | 2.07  | 21.5   |
| Carbono, g/animal/ día                                   | 6.55            | 2.65  | 40.4 | 0.907 | 11.9   |
| Nitrógeno, g/animal/día                                  | 2.15            | 0.809 | 37.7 | 0.331 | 3.45   |

Donde: FDN, fibra detergente neutra

### **Excreción de heces**

El promedio de excreción de heces frescas en alpacas adultas fue de  $829.2 \pm 209.4$  g/día tal como se muestra en la Tabla 12.

### **Excreción de materia seca**

El promedio de excreción de materia seca en heces de alpacas adultas fue de  $254.9 \pm 55.2$  g/día tal como se muestra en la Tabla 12.

El resultado obtenido en el presente estudio fue inferior a lo reportado por Vélez (2022), quien encontró un promedio de  $320 \pm 35.6$  gMS/día, asimismo, es inferior a lo reportado por Hwareccallo (2017), quien encontró un valor medio de 302 gMS/día. Debido probablemente a la diferencia de consumo de materia seca de los estudios.

#### **5.2.3. Producción de orina**

El promedio de producción de orina en alpacas adultas fue de  $274.8 \pm 107.9$  ml/día tal como se muestra en la Tabla 12.

El resultado obtenido en el presente estudio fue inferior a lo reportado por Vélez et al. (2022), quien estimó un valor medio de  $428 \pm 34.2$  ml orina/día. De la misma forma es inferior a lo reportado por Hwareccallo (2017), quien encontró un valor medio de 847 ml orina/día, la diferencia de los resultados probablemente se deba al mayor consumo de agua registrado en los estudios comparados.

#### **5.2.4. Digestibilidad de nutrientes**

Adicionalmente a los objetivos del estudio, se determinó la digestibilidad de nutrientes de la dieta suministrada a los animales experimentales, como se presenta en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Digestibilidad de nutrientes en alpacas adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento, en jaulas metabólicas

| Dieta de mantenimiento (40 gMS /kg PV <sup>0.75</sup> ) |                 |      |      |      |      |
|---|-----------------|------|------|------|------|
|   | Promedio (n: 5) | SD   | CV   | Min  | Max  |
| <b>VARIABLES REGISTRADAS</b>                            |                 |      |      |      |      |
| Peso Vivo, kg   | 46.6            | 3.75 | 8.05 | 43.0 | 52.4 |
| Peso Metabólico, kg                                     | 17.8            | 1.07 | 6.01 | 16.8 | 19.5 |
| <b>Digestibilidad %</b>                                 |                 |      |      |      |      |
| Materia Seca  | 64.7            | 5.95 | 9.20 | 53.8 | 76.7 |
| Materia Orgánica  | 66.6            | 5.66 | 8.50 | 56.1 | 77.9 |
| Energía Bruta   | 65.4            | 5.79 | 8.85 | 54.9 | 77.3 |
| Proteína Cruda  | 56.5            | 9.42 | 16.7 | 37.9 | 71.9 |
| FDN   | 56.2            | 7.38 | 13.1 | 43.5 | 71.5 |
| Carbono   | 64.6            | 5.95 | 9.21 | 53.9 | 76.8 |
| Nitrógeno   | 56.5            | 9.42 | 16.7 | 37.9 | 71.9 |

Donde: FDN, fibra detergente neutra

El resultado de digestibilidad de materia seca fue similar a los resultados encontrados en los estudios realizados por Vélez et al., (2022); Roque et al., (2020) y Huareccallo, (2017) quienes encontraron valores de 66.8 %, 61.9 % y 61.9 %, respectivamente; la similitud de los resultados pudo deberse al parecido en las dietas utilizadas en los estudios.

#### **5.2.5. Registro de las pulsaciones cardiacas por minuto**

Los resultados de las mediciones de pulsaciones por minuto en ayunas son presentados en la Tabla 16.

**Tabla 14.** Pulsaciones por minuto en alpacas Huacaya adultas en condiciones de ayunas

| Variables Registradas | Alpaca 1 | Alpaca 2 | Alpaca 3 | Alpaca 4 | Alpaca 5 | Promedio | SD   | Significancia |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|---------------|
| Peso vivo             |          |          |          |          |          |          |      |               |
| kg                    | 43.2     | 49.2     | 43       | 45       | 52.4     | 46.6     | 3.75 |               |
| Frecuencia Cardiaca   |          |          |          |          |          |          |      |               |
| Día 1 PPM             | 83       | 82       | 64       | 74       | 48       | 70       | 14.5 |               |
| Día 2 PPM             | 64       | 68       | 70       | 62       | 46       | 62       | 9.5  |               |
| Día 3 PPM             | 58       | 73       | 61       | 62       | 56       | 62       | 6.5  |               |
| Día 4 PPM             | 65       | 53       | 56       | 52       | 49       | 55       | 6.1  |               |
| Promedio              | 68       | 69       | 63       | 63       | 50       | 62       | 7.5  | 0.0588        |
| SD                    | 10.8     | 12.0     | 5.9      | 8.9      | 4.4      |          |      |               |

Donde: PPM: Pulsaciones por minuto

No se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los resultados de pulsaciones por minuto en alpacas.

Se obtuvieron en general un promedio de  $62 \pm 7.5$  pulsaciones por minuto en alpacas adultas en condiciones de ayunas, este resultado es similar a lo encontrado por Crossley et al. (1990), quien estimó la frecuencia cardiaca en la zona del altiplano y zona central de Chile, encontrando valores de  $54.05 \pm 13.63$  y  $67.82 \pm 12.20$  PPM en cada zona, respectivamente. La variabilidad de resultados puede deberse al tipo de régimen de manejo de los animales (manejo extensivo, semi confinado y confinado).

### 5.3. Del diseño de la cámara dinámica

#### 5.3.1. Dimensiones de la cámara dinámica

La cámara dinámica posee un volumen de 510 litros, con un largo de 0.68 m, un ancho de 0.5 m y una altura de 1.5 m, estas medidas permiten acoplar la cámara a la jaula metabólica (Anexo 11, Anexo 13, Anexo 16). En la parte anterior tiene una ventana fija de acrílico de 0.8 m de largo y 0.5 m de ancho que permite la visibilidad al animal y a los operadores, en la parte inferior se encuentra una gaveta extraíble y ajustable de 0.65 m de largo y 0.45 m de ancho, para suministrar el alimento y facilitar la limpieza

de la cámara (Anexo 11). La parte posterior de la cámara cuenta con una manga de tela impermeable y en la parte inferior se encuentra una placa metálica de 0.4 metros que evita el ingreso de las extremidades anteriores hacia la cámara dinámica (Anexo 12).

La cámara dinámica posee dos orificios, uno en la parte media de la gaveta extraíble (entrada de aire) y el otro es un orificio tubular que se encuentra en la parte superior de la cámara dinámica (salida hacia el sistema de respirometría) (Anexo 11), esto para hacer dinámico el flujo de gases en su interior.

### **5.3.2. Resultado final de la cámara dinámica**

La estructura de la cámara dinámica también fue construida en acero inoxidable, y por la parte posterior se hizo uso de una manga de tela impermeabilizada.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se construyó la cámara dinámica conforme se observa en los Anexos 14 y 15.

## **5.4. Validación de la cámara dinámica**

La cámara dinámica utilizada permitió controlar las emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , asimismo, permitió controlar el consumo de  $\text{O}_2$  en alpacas adultas.

Los resultados obtenidos de la cámara dinámica son presentados a continuación:

### **5.4.1. Emisión y consumo de gases en 24 horas**

Los resultados del análisis de la emisión y consumo de gases en 24 horas son presentados en la Tabla 14.

**Tabla 15.** Consumo de nutrientes, consumo de O<sub>2</sub>, emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> durante 24 horas en alpacas adultas alimentadas con una dieta de mantenimiento

| VARIABLES REGISTRADAS                   | Alpaca 1 | Alpaca 2 | Alpaca 3 | Promedio | SD    |
|---|----------|----------|----------|----------|-------|
| Peso vivo                               | 49.2     | 43       | 52.4     | 48.2     | 4.78  |
| PM                                      | 18.6     | 16.8     | 19.5     | 18.3     | 1.37  |
| Consumo                                 |          |          |          |          |       |
| Materia Seca, kg/día                    | 0.731    | 0.703    | 0.739    | 0.725    | 0.019 |
| Materia Orgánica, kg/día                | 0.690    | 0.664    | 0.697    | 0.684    | 0.017 |
| Proteína Cruda, kg/día                  | 0.068    | 0.063    | 0.068    | 0.066    | 0.003 |
| FDN, kg/día                             | 0.405    | 0.392    | 0.409    | 0.402    | 0.009 |
| Metano                                  |          |          |          |          |       |
| Metano, g/día                           | 19.2     | 13.4     | 16.7     | 16.4     | 2.89  |
| Metano, g/kg MS consumido               | 26.2     | 19.1     | 22.6     | 22.6     | 3.58  |
| Metano, g/kg MO consumido               | 27.8     | 20.2     | 23.9     | 24.0     | 3.81  |
| Metano, g/kgPC consumida                | 283.5    | 211.4    | 244.2    | 246.4    | 36.1  |
| Metano, g/kg FDN consumido              | 47.4     | 34.3     | 40.7     | 40.8     | 6.57  |
| Dióxido de Carbono                      |          |          |          |          |       |
| CO <sub>2</sub> g/día                   | 711.2    | 618.1    | 748.9    | 692.7    | 67.3  |
| CO <sub>2</sub> g/kg PV <sup>0.75</sup> | 38.3     | 36.8     | 38.5     | 37.8     | 0.902 |
| Oxígeno                                 |          |          |          |          |       |
| Oxígeno, g/día                          | 512.4    | 430.9    | 475.2    | 472.8    | 40.8  |
| Oxígeno, g/kg PV <sup>0.75</sup>        | 27.6     | 25.7     | 24.4     | 25.9     | 1.60  |

Donde: PV<sup>0.75</sup>, peso metabólico; FDN, fibra detergente neutra; CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono

#### 5.4.2. Emisión de metano

El promedio de la emisión de CH<sub>4</sub> en alpacas adultas durante 24 horas de medición fue de 16.4 ± 2.89 g/día, tal como se muestra en la Tabla 14.

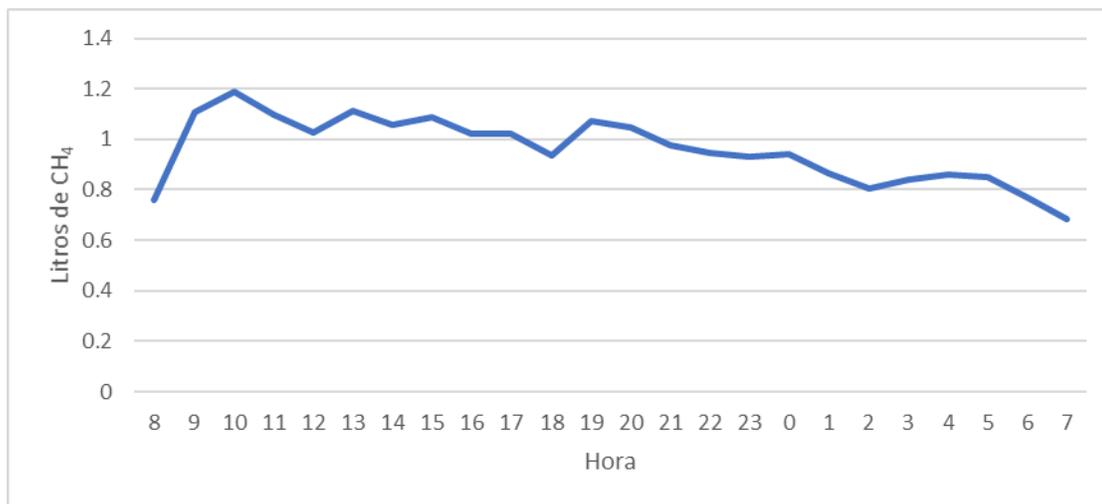
El resultado obtenido en el presente estudio fue superior a lo encontrado por Ramírez et al. (2019), quienes encontraron valores medios de 11.53 y 13.87 g CH<sub>4</sub>/día en alpacas de dos años alimentadas con heno de avena y alfalfa con diferente tamaño de partícula (12 y 24 mm). Sin embargo, el resultado obtenido fue inferior a lo reportado por Marca & Choque (2019), quienes reportaron valores medio de 17.7 ± 1.9 g CH<sub>4</sub>/día en alpacas en pastoreo y 16.8 ± 2.7 g CH<sub>4</sub>/día en alpacas en confinamiento. Asimismo,

Quispe (2015), realizó un estudio en alpacas Huacaya macho de 2 años empleando tres dietas diferentes: forraje entero (heno de avena y pellet de alfalfa), concentrado fibroso (12 mm y 8 mm), donde obtuvo un valor de 18.025 g CH<sub>4</sub>/día en alpacas alimentada con forraje entero este resultado fue superior a lo encontrado en el presente estudio. Sin embargo, obtuvo valores menores en alpacas alimentadas con concentrado fibroso (12 y 8 mm), siendo estos 13.275 y 12.875 g CH<sub>4</sub>/día respectivamente, valores inferiores a lo reportado en el presente estudio.

#### 5.4.2.1. Dinámica de la emisión de metano durante 24 horas

Se realizaron aglomerados del promedio por hora de la emisión de CH<sub>4</sub> de los animales evaluados, esto para observar de mejor manera la variación durante el día, así observar claramente las horas donde se incrementaba la emisión.

**Figura 2.** Dinámica de la emisión de metano (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto



La emisión de CH<sub>4</sub> se concentró mayormente en las primeras 12 horas del día, correspondiente a las horas de mayor actividad del animal (consumo de alimento,

consumo de agua, rumia) y se reduce las 12 últimas horas, horas donde el animal reduce su actividad metabólica y entra en reposo, tal como se muestra en la Figura 1; este comportamiento en la emisión de gases fue similar a lo encontrado por Machaca et al., (2015), quienes observaron un aumento en las emisiones de CH<sub>4</sub> durante el día en alpacas alimentadas con alimento fibroso molido; de igual manera este comportamiento fue similar a lo encontrado en cabras lecheras en el estudio realizado por Ruiz, (2012), quien pudo observar que el aumento en las emisiones de metano se daban durante el día, mientras que durante la noche estas descendía considerablemente.

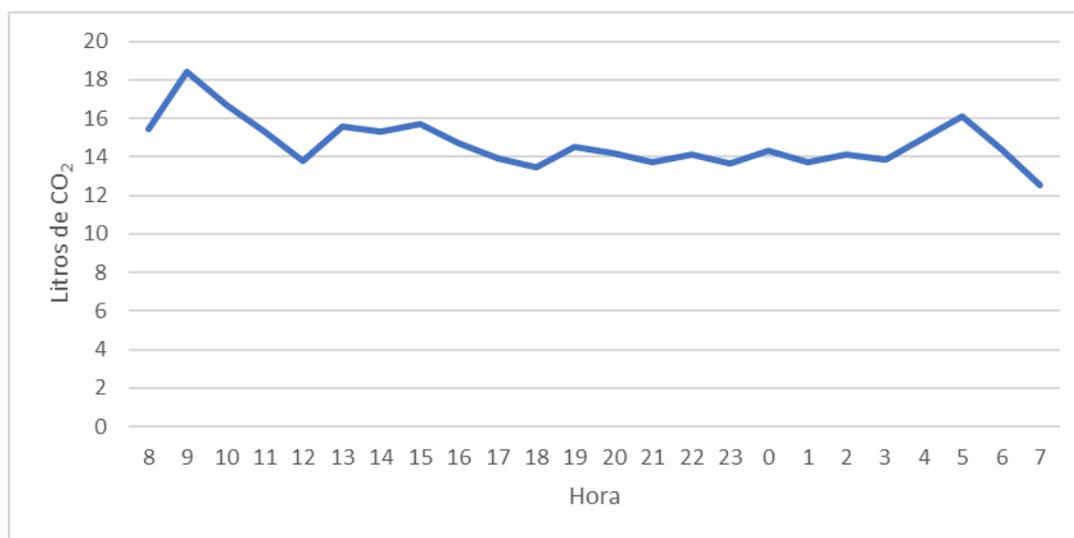
#### **5.4.3. Emisión de dióxido de carbono**

El promedio de la emisión de CO<sub>2</sub> en alpacas adultas durante 24 horas de medición fue de 692.7 ± 67.3 g/día, tal como se muestra en la Tabla 14; el resultado en el presente estudio fue superior a lo encontrado por Bhatta et al., (2013), quienes en su estudio determinaron las emisiones de CO<sub>2</sub> en cabras japonesas alimentadas con tres dietas con diferente concentración de taninos de *Mimosa spp.* (dieta control, dieta baja en taninos y dieta alta en taninos), obteniendo resultados de 595.2, 585.4 y 569.6 g CO<sub>2</sub>/día, respectivamente.

##### **5.4.3.1. Dinámica de la emisión de dióxido de carbono**

Se realizaron aglomerados del promedio por hora de la emisión de CO<sub>2</sub> de los animales evaluados, esto para observar de mejor manera la variación durante el día, así observar claramente las horas donde se incrementaba la emisión.

**Figura 3.** Dinámica de la emisión de dióxido de carbono (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto



La emisión de CO<sub>2</sub> se concentró mayormente en las primeras 12 horas del día, correspondiente a las horas de mayor actividad del animal (consumo de alimento, consumo de agua, rumia) y fue reduciendo las 12 últimas horas, horas donde el animal reduce su actividad metabólica y entra en reposo, tal como se muestra en la Figura 2, esta dinámica de emisión de CO<sub>2</sub> fue similar a lo encontrado por Ruiz, (2012), que también pudo observar en cabras el aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> correspondiente a las horas de actividad de los animales y su descenso en las horas de descanso.

#### **5.4.4. Consumo de oxígeno**

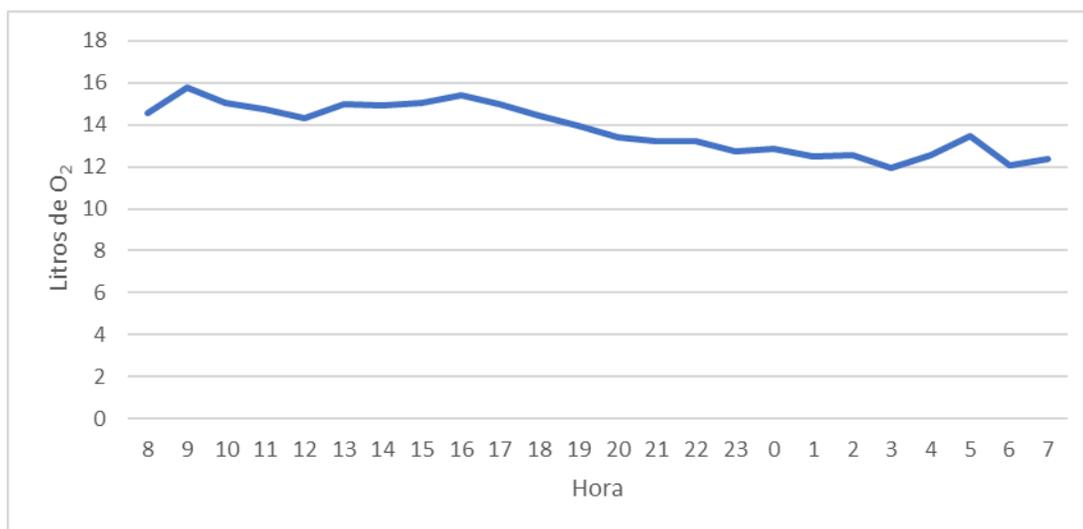
El promedio del consumo de O<sub>2</sub> en alpacas adultas durante 24 horas de medición fue de  $472.8 \pm 40.8$  g/día, equivalente a  $25.9$  g/kg PV<sup>0.75</sup>, tal como se muestra en la Tabla 14; este resultado es superior a lo encontrado en el estudio realizado por Brosh et al., (1986), los cuales encontraron valores de consumo de oxígeno de  $24.8$  g O<sub>2</sub>/kg PV<sup>0.75</sup>

en cabras beduinas alimentadas con tres forrajes de diferente calidad (heno de alfalfa, pasto rodesio y paja de trigo).

#### 5.4.4.1. Dinámica del consumo de oxígeno

Se realizaron aglomerados del promedio por hora del consumo de O<sub>2</sub> de los animales evaluados, para observar de mejor manera la variación durante el día y observar claramente las horas donde se incrementaba el consumo.

**Figura 4.** Dinámica del consumo de oxígeno (l/hora) en alpacas Huacaya adultas determinadas con el sistema de respirometría de circuito abierto



El consumo de O<sub>2</sub> se concentró mayormente en las primeras 12 horas del día, correspondiente a las horas de mayor actividad del animal (consumo de alimento, consumo de agua, rumia) y se va reduciendo las 12 últimas horas, horas donde el animal reduce su actividad metabólica y entra en reposo, tal como se muestra en la Figura 3; esta dinámica podría deberse a las horas donde el animal se encontraba activo, correspondiente también a las horas donde el animal se encontraba en reposo.

### 5.4.5. Emisión y consumo de gases durante 20 minutos en ayunas

Los resultados del análisis de la emisión y consumo de gases en ayunas son presentados en la Tabla 15.

**Tabla 16.** Emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y consumo de O<sub>2</sub> en alpacas adultas en condiciones de ayunas (registro de 20 minutos)

| Variables registradas | Alpaca 1 | Alpaca 2 | Alpaca 3 | Alpaca 4 | Alpaca 5 | Promedio | SD    | Significancia |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|---------------|
| Peso Vivo             |          |          |          |          |          |          |       |               |
| kg                    | 43.8     | 50.2     | 44.2     | 46.6     | 53.2     | 47.6     | 4.03  |               |
| Metano                |          |          |          |          |          |          |       |               |
| Día 1 g/20 min        | 0.081    | 0.036    | 0.060    | 0.096    | 0.165    | 0.088    | 0.049 |               |
| Día 2 g/20 min        | 0.097    | 0.092    | 0.098    | 0.117    | 0.118    | 0.104    | 0.012 |               |
| Día 3 g/20 min        | 0.133    | 0.067    | 0.058    | 0.110    | 0.127    | 0.099    | 0.035 |               |
| Día 4 g/20 min        | 0.117    | 0.075    | 0.081    | 0.131    | 0.162    | 0.113    | 0.036 |               |
| Promedio              | 0.107    | 0.067    | 0.074    | 0.114    | 0.143    | 0.101    |       | 0.0008        |
| SD                    | 0.023    | 0.024    | 0.019    | 0.015    | 0.024    |          |       |               |
| Dióxido de carbono    |          |          |          |          |          |          |       |               |
| Día 1 g/20 min        | 11.24    | 10.36    | 8.03     | 11.02    | 12.32    | 10.60    | 1.60  |               |
| Día 2 g/20 min        | 8.90     | 11.24    | 8.25     | 9.36     | 10.43    | 9.64     | 1.20  |               |
| Día 3 g/20 min        | 9.50     | 10.46    | 7.03     | 9.45     | 11.22    | 9.53     | 1.58  |               |
| Día 4 g/20 min        | 9.73     | 10.12    | 7.18     | 10.02    | 11.47    | 9.70     | 1.56  |               |
| Promedio              | 9.84     | 10.54    | 7.62     | 9.96     | 11.36    | 9.87     |       | 0.0001        |
| SD                    | 0.993    | 0.485    | 0.611    | 0.765    | 0.779    |          |       |               |
| Oxígeno               |          |          |          |          |          |          |       |               |
| Día 1 g/20 min        | 4.66     | 4.72     | 3.96     | 4.84     | 5.37     | 4.71     | 0.505 |               |
| Día 2 g/20 min        | 2.17     | 5.28     | 3.82     | 4.21     | 5.15     | 4.13     | 1.26  |               |
| Día 3 g/20 min        | 2.13     | 4.46     | 2.67     | 3.69     | 4.94     | 3.58     | 1.18  |               |
| Día 4 g/20 min        | 1.88     | 4.25     | 2.23     | 3.68     | 4.73     | 3.35     | 1.25  |               |
| Promedio              | 2.71     | 4.68     | 3.17     | 4.11     | 5.05     | 3.94     |       | 0.003         |
| SD                    | 1.30     | 0.446    | 0.851    | 0.548    | 0.277    |          |       |               |

Se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en las emisiones de metano y dióxido de carbono, así como también en el consumo de oxígeno.

La emisión promedio de metano en condiciones de ayunas fue de 0.101 g/20 minutos.

La emisión promedio de dióxido de carbono en condiciones de ayunas fue de 9.87 g/20 minutos.

En consumo promedio de oxígeno en condiciones de ayunas fue de 3.94 g/20 minutos.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones del presente trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

- La jaula metabólica diseñada en el presente estudio permitió controlar el consumo de alimentos, excreción de heces y orina, obteniéndose que las alpacas consumieron un promedio de  $40.4 \pm 2.58$  g MS/kg PV<sup>0.75</sup>, consumieron  $91.4 \pm 25.75$  ml de agua/día/kg PV<sup>0.75</sup>, excretaron un promedio de  $829.2 \pm 209.4$  g de heces/animal/día y  $274.8 \pm 107.9$  ml de orina/animal/día; también se registró la frecuencia cardiaca promedio la cual fue de  $62 \pm 7.5$  PPM.
- La cámara dinámica (sistema móvil de respirometría de circuito abierto) permitió controlar las emisiones de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y el consumo de O<sub>2</sub> y se determinó que las alpacas emiten en promedio  $16.4 \pm 2.89$  g CH<sub>4</sub>/día y  $24.0 \pm 3.81$  g CH<sub>4</sub>/kg MO consumida, también se determinó se emiten  $692.7 \pm 67.3$  g CO<sub>2</sub>/animal/día y consumen  $472.8 \pm 40.8$  g O<sub>2</sub>/animal/día.

## RECOMENDACIONES

- Desarrollar estudios metabólicos y de balance energético en alpacas.
- Evaluar las emisiones de metano, dióxido de carbono y el consumo de oxígeno en alpacas sometidas a diferentes condiciones de alimentación (subalimentación, sobrealimentación y ad libitum).
- Evaluar las emisiones de metano en alpacas, utilizando diferentes dietas experimentales.
- Evaluar la emisión de metano en diferentes estados fisiológicos de las alpacas.

## **CAPITULO VII**

### **BIBLIOGRAFÍA**

- A.O.A.C. (2019). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International. Association of Official Analytical Chemist, 21st Edition.
- ARC. (1980). Agricultural Research Council. The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Technical Review by an Agricultural Research Council Working Party, Commonwealth Agricultural Bureau. Farnham Royal, UK.
- Avendaño, S. (2002). Estudio comparativo de la digestibilidad in vitro, in situ y enzimática de forrajes de diferente calidad nutritiva en alpacas (*Lama pacos*) (Tesis de Pregrado). 52. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Medicina Veterinaria.
- Avilés Esquivel, D., Barros Rodríguez, M., & Montero Recalde, M. (2018). Los Camélidos Sudamericanos: Productos y Subproductos Usados en la Región Andina. *Actas Iberoamericanas en Conservación Animal AICA*, 11, 30-38.
- Baroni Casas, M. F., & Suarez Diaz, H. G. (2017). "ANATOMÍA DEL ESTÓMAGO DE LA ALPACA (*Vicugna pacos*, Linnaeus 1758)." 1, 105–112.
- Bhatta, R., Enishi, O., Yabumoto, Y., Nonaka, I., Takusari, N., Higuchi, K., Tajima, K., Takenaka, A., & Kurihara, M. (2013). Methane reduction and energy partitioning in goats fed two concentrations of tannin from *Mimosa* spp. *Journal of*

Bonavia, D. (1996). Los camélidos sudamericanos: una introducción a su estudio. (págs. 12-20). Lima, Perú: Institut français d'etudes andines.

Bonilla Sandi, D. J., Novoa Jiménez, L., Portuguez Molina, V., Quinto Ureña, F., & Rojas Gutiérrez, J. J. (2020). Metanogénesis microbiana en animales poligástricos. *Nutrición Animal Tropical*, 14(1), 36-49.

Brenes, E. R., Madrigal, K., Pérez, F., & Valladares, K. (2001). El cluster de los camélidos en Perú: diagnóstico competitivo y recomendaciones estratégicas. Instituto Centroamericano de Administración de Empresas INCAE.

Brosh, A., Shkolnik, A., & Choshniak, I. (1986). Metabolic effects of infrequent drinking and low-quality feed on Bedouin goats. *Ecology*, 67(4), 1086–1090.  
<https://doi.org/10.2307/1939831>

Bryant, F. C., & Farfan, R. D. (1984). Dry season forage selection by alpaca (*Lama pacos*) in Southern Peru. *J. Range Manage*, 37:330:333.

Bustinza, V. (2001). “La alpaca: Conocimiento del gran potencial andino”. Puno, Perú: UNA-Puno.

Carrasco, J. C. (01 de agosto de 2019). Agraria.pe. Obtenido de <https://agraria.pe/noticias/peru-alberga-al-87-de-la-poblacion-mundial-de-alpacas-19523>

Cerón, M. E. (2015). Diversidad microbiana del estómago de los camélidos sudamericanos. VII world congress on south american camelids. Puno-Perú.

- Crossley, J., Raggi, A., & Mac-Niven, V. (Julio de 1990). Constantes fisiológicas de interés clínico de alpacas chilenas (*Lama Pacos*) en el altiplano y zona central. 12(1). Monografías de Medicina Veterinaria. Obtenido de <https://revistahistoriaindigena.uchile.cl/index.php/MMV/article/view/10457>
- Crutzen, P. J., Aselman, I., & Seiler, W. (1986). Methane Production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna and humans. En T. & Francis, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* (págs. 38(3-4), 271-284). Alemania: Taylor & Francis Group. doi:10.3402/tellusb.v38i3-4.15135
- Cummings, J. F., Munnell, J. F., & Vallenias, A. (1972). The mucigenous glandular mucosa in the complex stomach of two new-world camelids, the llama and guanaco. *Journal of Morphology*, 137, 71-109.
- Eckerlin, R. H., & Stevens, C. E. (1973). Bicarbonate secretion by the glandular sacculles of the llama stomach. *The Cornell veterinarian*, 63, 436-445.
- Engelhardt, W. v., Haarmeyer, P., Kaske, M., & Lechner-Doll, M. (2005). Chewing activities and oesophageal motility during feed intake, rumination and eructation in camels. *Journal of Comparative Physiology B*, 117-124.
- Engelhardt, W., Dycker, C., & Lechner-Doll, M. (2007). Absorption of short-chain fatty acids, sodium and water from the forestomach of camels. *Journal of Comparative Physiology B*. 177.
- Engelhardt, W., Weyreter, H., Heller, R., Lechner-Doll, M., Schwartz, H. J., Rutagwenda, R., & Schultka, W. (1986). daptation of indigenous sheep, goats

and camels in harsh grazing conditions. Vienna: International Atomic Energy Agency.

Espiritu, E. L. (2019). Descripción de la anatomía topográfica de las áreas de auscultación y percusión cardiaca y pulmonar de la alpaca (*Vicugna pacos*). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

FAO. (junio de 2005). Proyecto de Cooperación Técnica en apoyo a la crianza y aprovechamiento de los Camélidos Sudamericanos en la Región Andina. Situación Actual De Los Camélidos Sudamericanos En Perú. Perú: FAO. Obtenido de [https://tarwi.lamolina.edu.pe/~emellisho/zootecnia\\_archivos/situacion%20alpcas%20peru.pdf](https://tarwi.lamolina.edu.pe/~emellisho/zootecnia_archivos/situacion%20alpcas%20peru.pdf)

Fernández, C., López, M. C., & Lachica, M. (2015). Low-cost mobile open-circuit hood system for measuring gas exchange in small ruminants: from manual to automatic recording. *Journal of Agricultural Science* (2015), 153, 1302–1309, 1302.

Fernández-Baca, S. (1991). Avances y perspectivas del conocimiento de los camélidos sudamericanos. Santiago, Chile.

Fernández-Baca, S. (2005). Situación actual de los camélidos sudamericanos en Perú. (Proyecto de cooperación técnica de la FAO para el apoyo a la crianza y aprovechamiento de los camélidos sudamericanos en la Región Andina). Proyecto de cooperación técnica TCP/RLA/2914-. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Fowler, M. (1998). *Medicine and surgery of South American Camelids. Llama, Alpaca, Vicuña, Guanaco*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- Fowler, M. (2008). Behavioral clues for detection of illness in wild animals: Models in camelids and elephants. In: *Zoo and Wild Animal Medicine Current Therapy (Sexta ed.)*. St. Louis, Missouri: Elsevier Saunders.
- García, W., Martín, F. S., Novoa, C., & Franco, L. E. (2002). Engorde de llamas bajo diferentes regímenes alimenticios. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*.
- Hafez, E., & Dyer, I. (1972). *Desarrollo y Nutrición Animal*. Zaragoza, Esparta: Editorial Acribia.
- Haynes, M., Kung, K.-J., Brandt, J., Yongping, Y., & Waller, D. (2014). Accelerated climate change and its potential impact on Yak herding livelihoods in the eastern Tibetan plateau. *Climatic Change*, 123, 147–160. doi:10.1007/s10584-013-1043-6
- Heller, R., Cercasov, V., & Engelhardt, W. (1986). Retention of fluid and particles in the digestive tract of the llama (*Lama guanacoe f. glama*). *Comp. Biochem physiol*, 4, 687- 691.
- Heller, R., Gregory, P. C., & Engelhardt, W. (1984). Pattern of motility and flow of digesta in the forestomach of the Llama (*Lama guanaco f. glama*). *Journal Composition Physiology*, 154.

- Huareccallo Maquera, J. C. (2017). Efecto del nivel de consumo sobre la digestibilidad y valor energético de concentrado fibroso en llamas y alpacas. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- IFAD. (2007). Livestock and climate change. Obtenido de <http://www.ifad.org/lrkm/factsheet/cc.pdf>
- INEI. (2012). Instituto Nacional De Estadística E Informática. Obtenido de IV Censo Nacional Agropecuario 2012: <http://censos.inei.gob.pe/cenagro/tabulados/>
- Larico, H. (12 de mayo de 2019). Obtenido de La Alpaca: Recurso genético del Perú, su importancia científica, crianza y potencial mundial de su fibra como emblema de Puno.: <https://sicreesinnovas.com/la-alpaca-recurso-genetico-del-peru-su-importancia-cientifica-crianza-y-potencial-mundial-de-su-fibra-como-emblema-de-puno/>
- López, A., & Raggi, L. (1992). Requerimientos nutritivos de camélidos sudamericanos: Llamas (*Lama glama*) y alpacas (*Lama Pacos*). *Archive medician veterinary*, 121-130.
- 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(3), 295-301.
- Machaca, M., Quispe, C., & Castro, A. (2015). Efecto de dos dietas fibrosas en la producción de metano en alpacas. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 17(3), 441. <https://doi.org/10.18271/ria.2015.159>

- Marca Choque, U. S., & Roque Huanca, B. (2019). Producción de metano en camélidos sudamericanos domésticos y su efecto en la salud pública. *Revista de investigaciones de la escuela de posgrado*, 1016-1027.
- Marín, J. C., Zapata, B., Gonzáles, B. A., Bonacic, C., Wheeler, J. C., Casey, C., & Spotorno, A. E. (2007). Sistemática, taxonomía y domesticación de alpacas y llamas: nueva evidencia cromosómica y molecular. *Revista Chilena en Historia Natural*.
- Michelutti, N., Wolfe, A., Cooke, C., Hobbs, W., Vuille, M., & Smol, J. (2015). Climate Change Forces New Ecological States in Tropical Andean Lakes. *PloS one*, 10(2). doi: 10.1371/journal.pone.0115338
- Monge, C., & León-Velarde, F. (1991). Physiological Adaptation to High Altitude: Oxygen Transport in Mammals and Birds. 1135-1172.
- Montes, C. (2000). Los Camélidos. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/4313/T-1218.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nelson, A. B., Tillman, A. D., Gallup, W. D., & MacVicar, R. (1954). A Modified Metabolism Stall for Steers. *Journal of Animal Science*, 13(2), 504-510. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1954.132504x>
- NRC. (1985). *Nutrient Requirements of Sheep, Sixth Revised Edition*. Washington, D.C.: National Academy Press.

- Obregón Cruz, A. B. (2022). Consumo y digestibilidad de cuatro raciones con diferente contenido de fibra de alpacas (*Vicugna pacos*). Maestría en Nutrición. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Pinares-Patiño, C. S. (2017). Cambio Climático y Ganadería en los Andes Peruanos: Intensificación sostenible. III Conferencia de gases de efecto invernadero en sistemas agropecuarios de Latinoamérica, 1-58. Uruguay: Gala 2017.
- Puccio, G. (22 de agosto de 2016). Fomentan la Producción de Llamas y Alpacas sin generar Impacto Ambiental. Agencia Leloir.
- Quispe Alanguía, C. P. (2015). Efecto del concentrado fibroso sobre el rendimiento productivo y las emisiones de metano entérico (CH<sub>4</sub>) en alpacas (*Vicugna pacos*) en el Centro Experimental Quimsachata INIA-Puno. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna, Tacna.
- Ramírez Aruquipa, J. E. (2017). Efecto del nivel de consumo de alimento sobre la retención de energía en llamas y alpacas. Tesis de pregrado. Universidad Nacional del altiplano: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Puno, Perú.
- Ramírez Aruquipa, J. E., Quispe Colque, E. E., Medina Suca, J. G., & Roque Huanca, B. (2019). Efecto del procesamiento forrajero en la respuesta animal y la producción de metano en alpacas y llamas. Revista de investigaciones de la escuela de posgrado, 1350-1357.
- Reiner, R. J., Farfan, F. C., & Craddock, B. F. (1987). Forage intake of alpacas grazing Andean rangeland in Perú. *Journal of Animal Science*, 64:868-871.

- Roa Vega, M., & Céspedes Sanabria, D. (2011). Digestibilidad de forrajes arbóreos en bovinos utilizando jaulas metabólicas. *Revista Sistemas De Producción Agroecológicos*, 2(2), 25-36. doi: <https://doi.org/10.22579/22484817.578>
- Rossi, C. (marzo de 2004). Camélidos Sudamericanos. Obtenido de ZOE Comunidad Agropecuaria: [https://zoetecnocampo.com/Documentos/camelidos\\_rossi.htm](https://zoetecnocampo.com/Documentos/camelidos_rossi.htm)
- Ruiz, D. (2012). Efecto del Pienso Sobre el Comportamiento de Cabras Lecheras en el Interior de una Cámara Dinámica. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Ruiz, J., Gutiérrez, G., & Velarde, R. (2004). Producción y Comercialización de los Productos de los Pequeños Rumiantes y Camélidos Sudamericanos en el Perú. Comercialización de los Productos de los Pequeños Rumiantes y Camélidos Sudamericanos en Latinoamérica.
- Ruiz, M. E., & Ruiz, S. E. (1992). Ruminant Nutrition Research: Methodological Guidelines (Vol. 23). Agroamerica.
- San Martin, F. (1987). Comparative forage selectivity and nutrition of South American camelids and sheep. Ph.D. Dissertation. Lubbock, Texas, EE. UU: Texas Tech University.
- San Martín, F. (1996). Nutrición en alpacas y llamas. Fondo Contravalor Perú-Suiza, CISA/IVITA, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional de Mayor San Marcos.

- San Martín, F. (1999). Nutrición y Alimentación de Camélidos Sudamericanos. En A. Cardozo, & A. Zapata, Seminario de Reproducción y Nutrición de Camélidos Sudamericanos (págs. 10-15). La Paz: Unepca.
- San Martín, F. A. (1991). Alimentación y Nutrición. Capítulo VII (213-262). En S. Fernández-Baca, Avances y perspectivas del conocimiento de los Camélidos Sudamericanos (pág. 429). Santiago, Chile: FAO.
- San Martín, F., & Bryant, F. C. (1987). Nutrición de los camélidos sudamericanos: estado de nuestro conocimiento. Programa Colaborativo de Apoyo a la Investigación en Ruminantes menores, 67.
- San Martín, F., & Bryant, F. C. (1989). Nutrition of domesticated South American llamas and alpacas. *Small Ruminant Research* 2, 191-216.
- Sato, A., & Montoya, L. (1989). Anatomía macroscópica del aparato digestivo de la alpaca (*Lama pacos*). *Boletín Técnico* N° 6, 19.
- Skidmore, J. A. (2011). Reproductive physiology in female old-world camelids. *Animal Reproduction Science*. 124(3-4), 148-154.
- Torres, G., Arbaiza, T., Carcelén, F., & Lucas, O. (2009). "Comparación de las técnicas in situ, in vitro y enzimática (celulosa) para estimar la digestibilidad de forrajes". *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 20(1): 5–9.
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. En *Journal Of Geophysical Research*, VOL. 114. doi: <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>

- Van-Saun, R. J. (2006). Nutrient Requirements of South American Camelids: A Factorial Approach. *Small Ruminant Research*, 165–86.
- Vélez Marroquin, V. M., Cabezas García, E. H., Antezana Julian, W., Estellés Barber, F., Franco, F. E., & Pinares-Patiño, C. S. (2022). Design, Operation, and Validation of Metabolism Crates for Nutrition Studies in Alpacas (*Vicugna pacos*). *Small Ruminant Research*, 209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106660>
- Wang, J.-L., Lan, G., Wang, G.-X., Li, H.-Y., & Xie, Z.-M. (2000). Anatomical Subdivisions of the Stomach of the Bactrian Camel (*Camelus bactrianus*). *Journal Of Morphology* 245, 161-167.
- Wheeler, J. C. (1982). Aging llamas and alpacas by their teeth. *Llama World*, 1, 12-17.
- Wheeler, J. C. (1991). Origen, evolución y status actual. En S. Fernández-Baca, *Avances y perspectivas del conocimiento de los Camélidos Sudamericanos* (pág. 429). Santiago de Chile: FAO.
- Wheeler, J. C. (1995). Evolution and present situation of the South American Camelidae. *Biological Journal of the Linnean Society*.
- Yaranga, R. M. (2009). Alimentación de camélidos sudamericanos y manejo de pastizales. (pág. 36). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú - Facultad de Zootecnia.

# ANEXOS

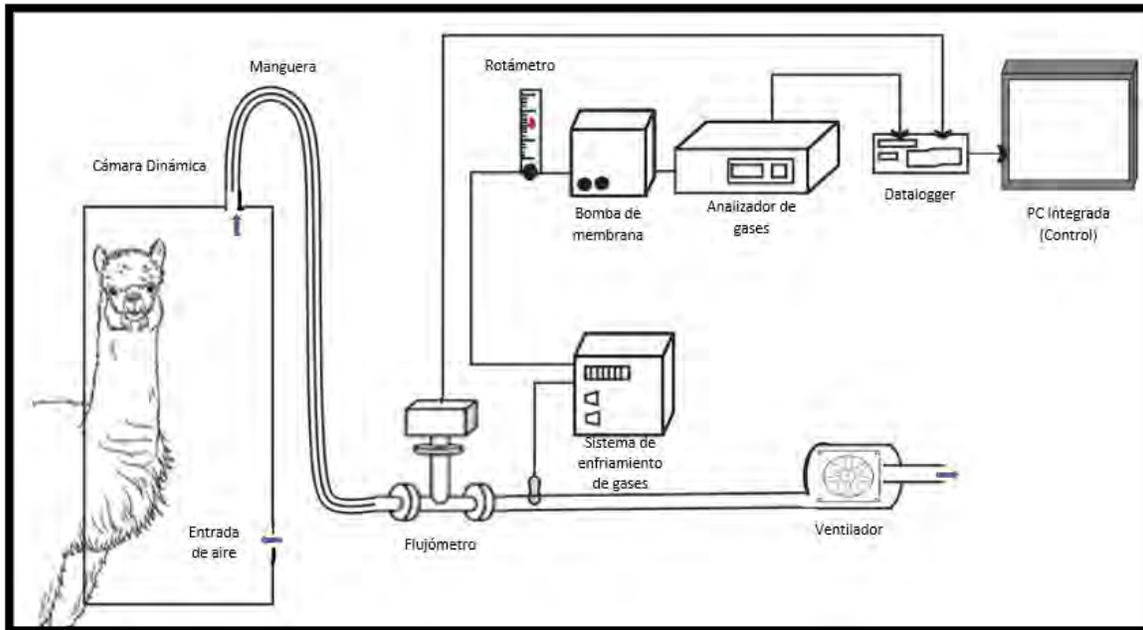
## Anexo 1. Biometría en alpacas adultas



## Anexo 2. Sistema móvil para análisis de gases



### Anexo 3. Esquema del sistema móvil de respirometría de circuito abierto



### Anexo 4. Equipos del sistema analizador de gases



Flujómetro



Enfriador de gases



Ventilador



Rotámetro y válvula



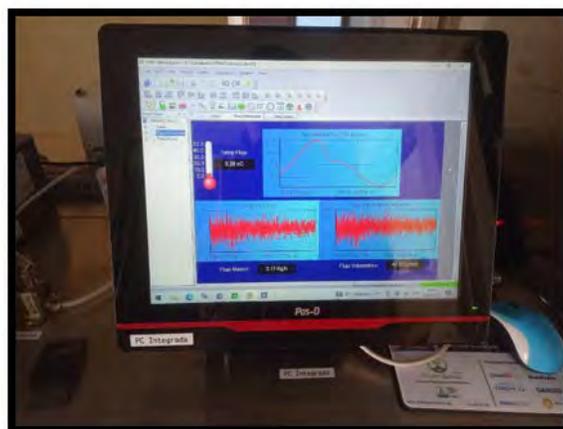
Bomba de membrana



Analizador de gases

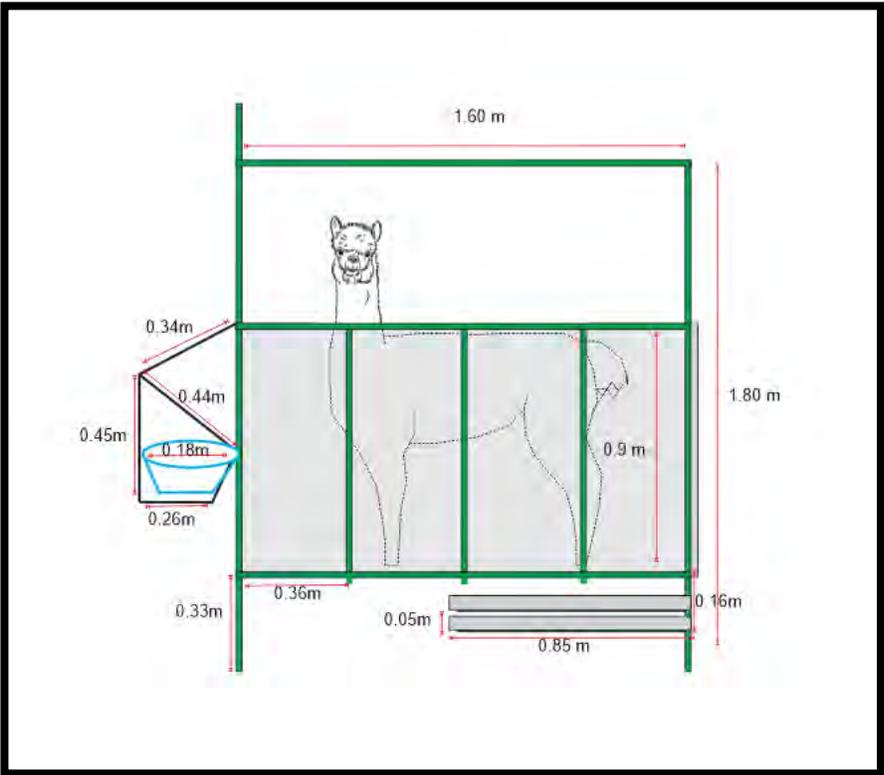


Datalogger

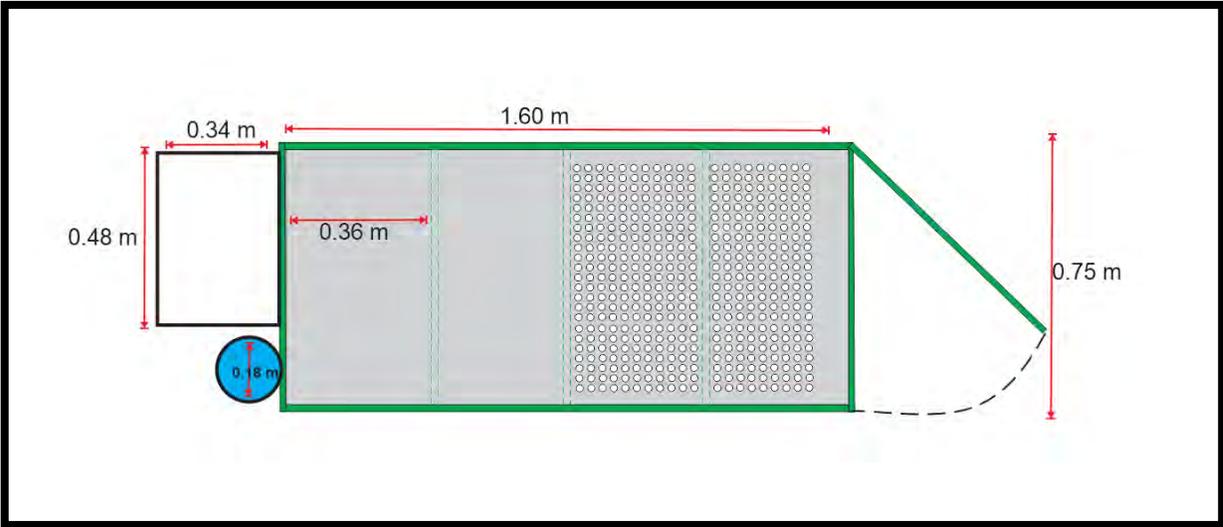


PC Integrada

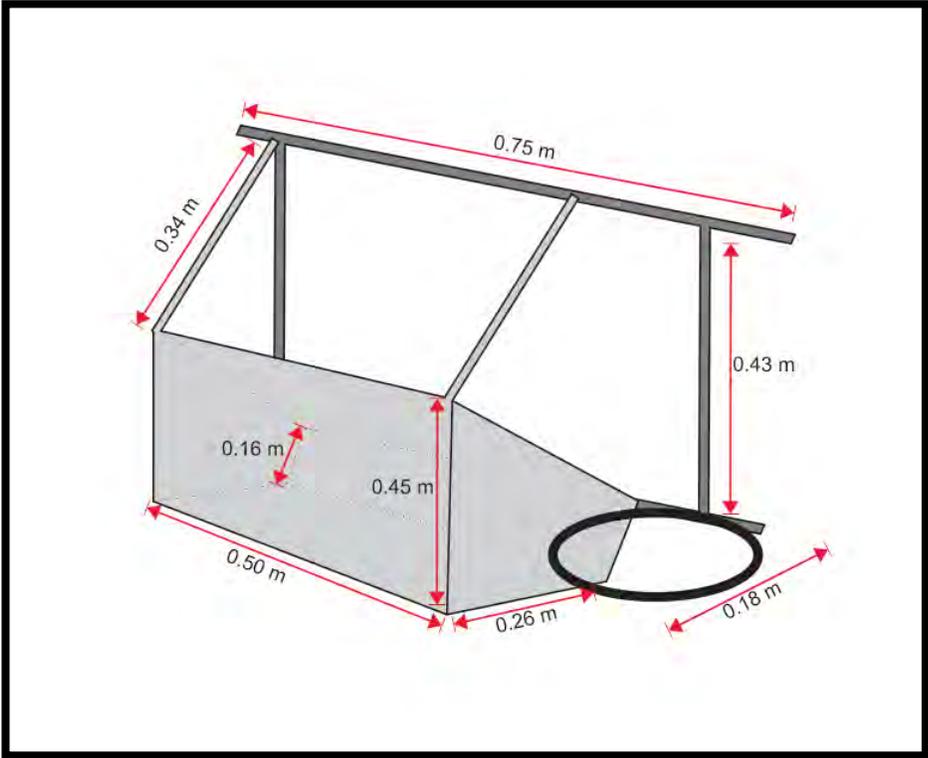
**Anexo 5.** Dimensiones y características de la jaula metabólica (vista lateral)



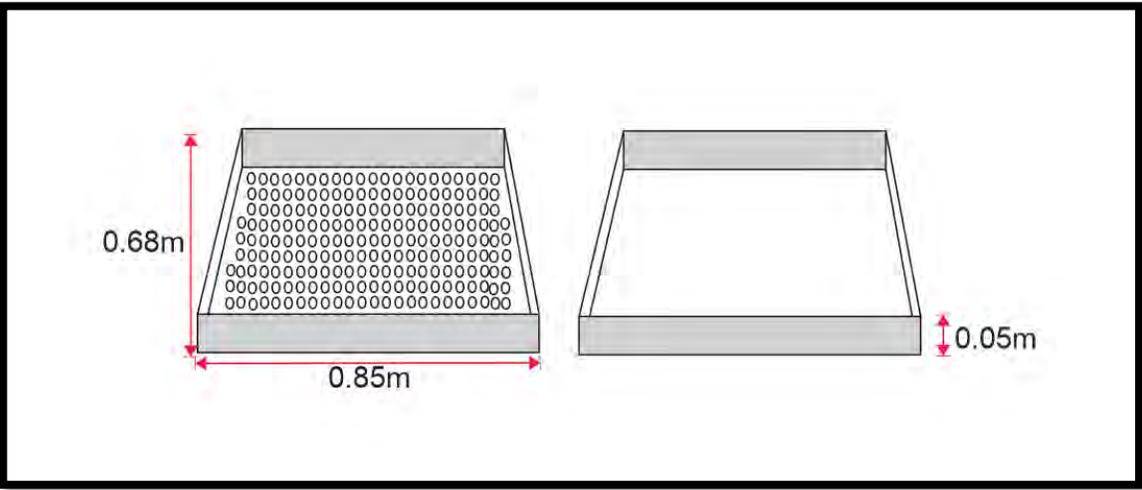
**Anexo 6.** Dimensiones y características de la jaula metabólica (vista superior)



**Anexo 7.** Dimensiones y características del comedero y del soporte para bebedero



**Anexo 8.** Dimensiones y características de la bandeja colectora de heces (izquierda) y bandeja colectora de orina (derecha)



**Anexo 9.** Estructura final de la jaula metabólica



**Anexo 10.** Estructuras de la jaula metabólica



Estructura del piso de la jaula metabólica



Plataforma principal de la jaula metabólica



Bandeja para colección de heces



Bandeja de colección de orina



Sistema colector de heces y orina

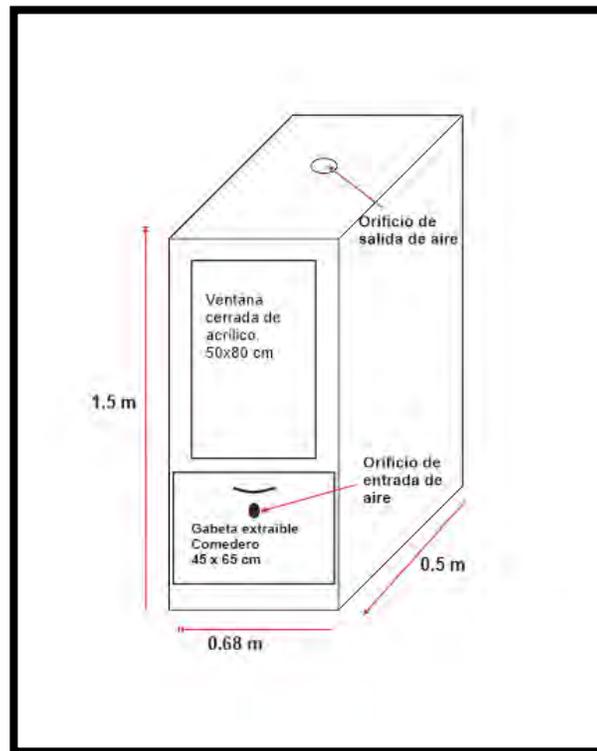


Soportes para el comedero y bebedero

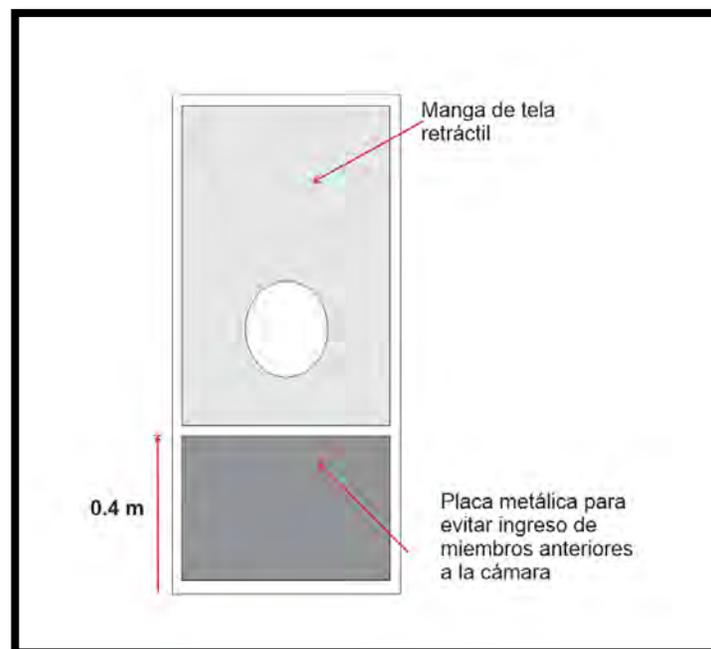


Comedero y bebedero

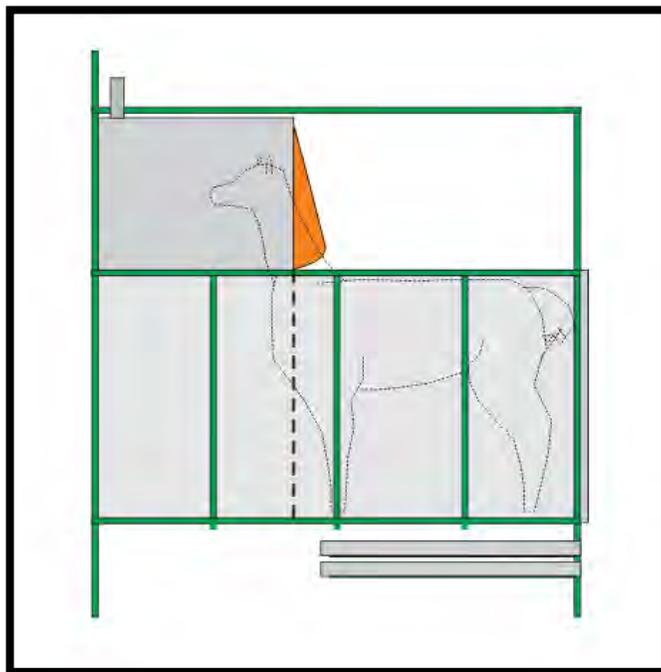
**Anexo 11.** Dimensiones y características de la cámara dinámica (vista frontal)



**Anexo 12.** Dimensiones y características de la cámara dinámica (vista posterior)



**Anexo 13.** Representación de la cámara dinámica acoplada a la jaula metabólica



**Anexo 14.** Estructura final de la cámara dinámica



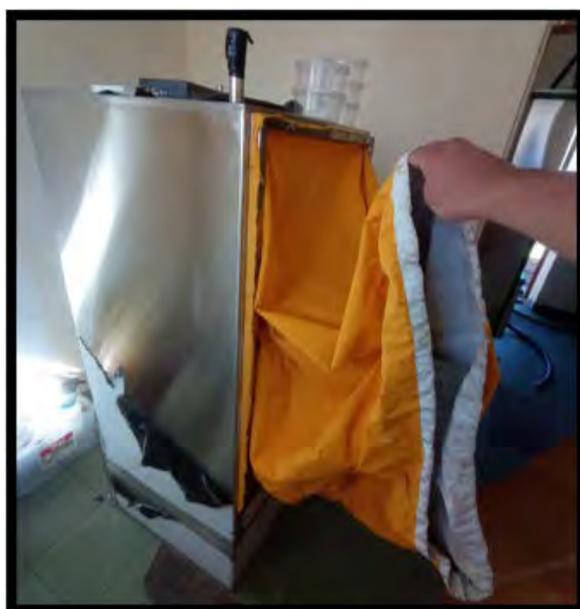
**Anexo 15. Estructuras de la cámara dinámica**



Gaveta para el suministro de alimento y agua



Ventana fija de acrílico



Manga de tela impermeable

**Anexo 16.** Cámara dinámica acoplada a la jaula metabólica



**Anexo 17.** Pesaje de los animales



**Anexo 18.** Preparación del alimento y agua para el suministro a los animales en jaulas metabólicas y cámara dinámica



Preparación de alimento y agua



Suministro de alimento y agua en jaulas metabólicas



Preparación del alimento y agua para suministro en cámara dinámica



Suministro de alimento y agua en cámara dinámica

**Anexo 19.** Control del alimento y agua rechazados de la etapa de validación de jaulas metabólicas



**Anexo 20.** Control de las excreciones de heces y orina de la etapa de validación de jaulas metabólicas



Colecta de heces de la bandeja colectora



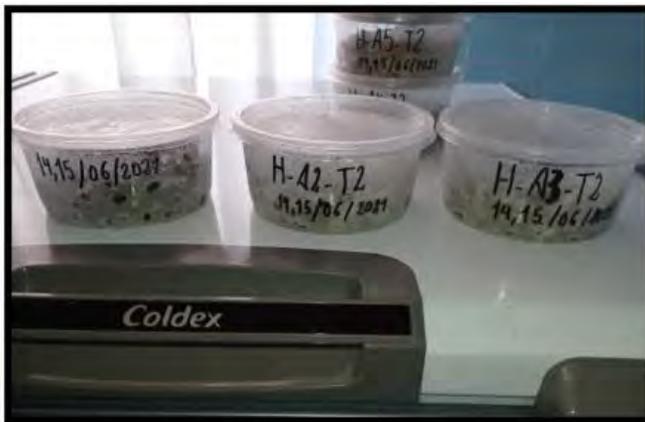
Colecta de orina de la bandeja colectora



Colecta de heces de las bolsas colectoras



Cuantificación de la orina producida



Almacenamiento de las muestras de heces



Almacenamiento de las muestras de orina

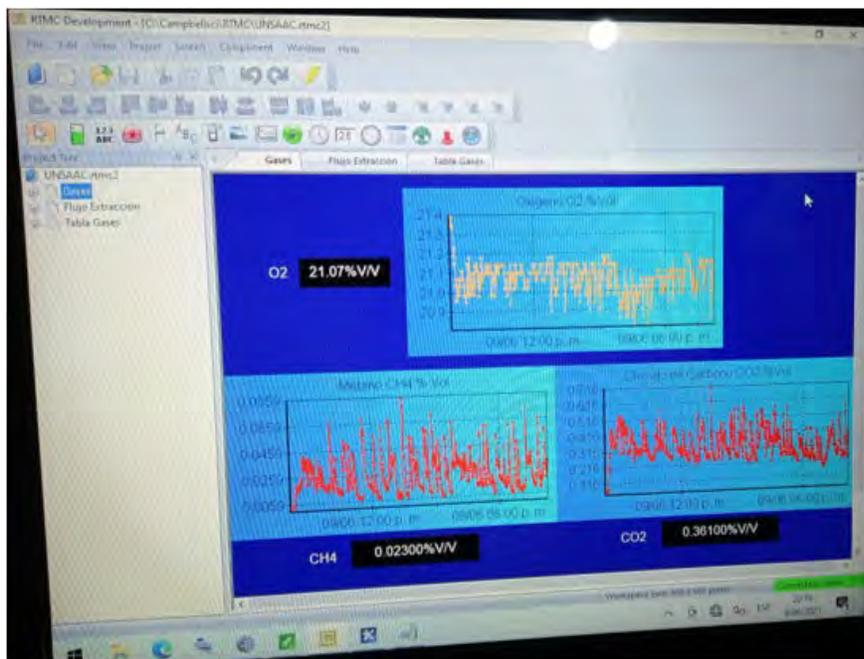
**Anexo 21.** Evaluación de las emisiones y consumo de gases en la etapa de validación de cámara dinámica



Alpaca en evaluación de emisión y consumo de gases



Alpaca dentro de la cámara dinámica



Control de la emisión y consumo de gases

## Anexo 22. Control de la frecuencia cardiaca



## Anexo 23. Registro de alimento ofrecido y rechazado en la etapa experimental del estudio

| Alimento Ofrecido (g) |       |        | Alimento Rechazado (g) |        |       |        |       |        |       |        |       |        |
|-----------------------|-------|--------|------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
|                       |       |        | Día 1                  |        | Día 2 |        | Día 3 |        | Día 4 |        | Día 5 |        |
| JM                    | Heno  | Pellet | Heno                   | Pellet | Heno  | Pellet | Heno  | Pellet | Heno  | Pellet | Heno  | Pellet |
| 1                     | 589.8 | 252.8  | 134.1                  | 33.0   | 57.2  | 29.0   | 78.6  | -      | 109.3 | -      | 102.5 | 69.8   |
| 2                     | 650.2 | 278.7  | 23.1                   | -      | 3.3   | -      | 3.8   | -      | 1.0   | -      | 2.4   | -      |
| 3                     | 587.7 | 251.9  | 4.1                    | -      | 9.1   | -      | 5.0   | -      | 2.0   | -      | 1.7   | -      |
| 4                     | 608.1 | 260.6  | 4.1                    | -      | 2.7   | -      | 7.0   | -      | 4.1   | -      | 3.7   | -      |
| 5                     | 681.7 | 292.1  | 83.6                   | 12.6   | 45.5  | -      | 7.2   | 3.6    | 6.3   | -      | 5.5   | -      |

Donde: JM, jaula metabólica

**Anexo 24.** Registro de la excreción de heces y orina obtenidos en la etapa experimental del estudio

| JM | Día 1                      |       | Día 2 |       | Día 3  |       | Día 4 |       | Día 5  |       |
|----|----------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
|    | Excreción de Heces y Orina |       |       |       |        |       |       |       |        |       |
|    | Heces                      | Orina | Heces | Orina | Heces  | Orina | Heces | Orina | Heces  | Orina |
| 1  | 633.7                      | 240.0 | 638.0 | 275.0 | 647.4  | 310.0 | 622.8 | 258.0 | 537.4  | 200.0 |
| 2  | 1238.9                     | 400.0 | 649.3 | 490.0 | 1289.6 | 390.0 | 909.9 | 270.0 | 1253.9 | 460.0 |
| 3  | 724.0                      | 66.0  | 831.8 | 170.0 | 665.0  | 166.0 | 829.8 | 330.0 | 743.6  | 36.0  |
| 4  | 1009.0                     | 300.0 | 817.0 | 290.0 | 808.2  | 340.0 | 693.8 | 360.0 | 975.5  | 330.0 |
| 5  | 924.5                      | 210.0 | 569.9 | 250.0 | 846.4  | 280.0 | 919.4 | 210.0 | 950.5  | 390.0 |

Donde: JM, jaula metabólica

**Anexo 25.** Registro de la evolución del peso vivo

| Jaula Metabólica | Mantenimiento                |      |       |
|------------------|------------------------------|------|-------|
|                  | 40 gMS/kg PV <sup>0.75</sup> |      |       |
|                  | Pi                           | Pf   | Pi-Pf |
| 1                | 43.2                         | 43.2 | 0     |
| 2                | 49.2                         | 49   | 0.2   |
| 3                | 43                           | 44.4 | -1.4  |
| 4                | 45                           | 46.4 | -1.4  |
| 5                | 52.4                         | 53   | -0.6  |
| Promedio         | 46.6                         | 47.2 | -0.64 |
| SD               | 4.11                         | 3.92 | 0.75  |