



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**EVALUACIÓN INICIAL DEL USO DEL PROBLEMA INVERSO EN EL ESTUDIO DE LA  
PARTICIÓN DE LA ENERGÍA EN OVINAS GESTANTES**

**SONIA TINAL ORTIZ**

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2018



## COLEGIO DE POSTGRADUADOS

Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas  
Campeche-Córdoba-Montecillo-Puebla-San Luis Potosí-Tabasco-Veracruz

### CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe Sonia Tinal Ortiz, alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor Luis Manuel Vargas Villamil, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Evaluación inicial del uso del problema inverso en el estudio de la partición de la energía en ovinas gestantes y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

H. Cárdenas, Tabasco, a 19 de enero de 2018.

Sonia Tinal Ortiz  
Firma

Dr. Luis Manuel Vargas Villamil  
Vo. B6. Profesor Consejero

La presente tesis titulada: **"Evaluación inicial del uso del problema inverso en el estudio de la partición de la energía en ovinas gestantes"** realizada por la alumna: **Sonia Tinal Ortiz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO  
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. LUIS MANUEL VARGAS VILLAMIL

ASESOR



DR. JUAN MANUEL ZALDÍVAR CRUZ

ASESOR



DR. OMAR HERNÁNDEZ MENDO

ASESOR



DR. LEONEL AVENDAÑO REYES

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO 31 DE ENERO, 2018

# EVALUACIÓN INICIAL DEL USO DEL PROBLEMA INVERSO EN EL ESTUDIO DE LA PARTICIÓN DE LA ENERGÍA EN OVINAS GESTANTES

Sonia Tinal Ortiz, MC.

Colegio de Postgraduados, 2018

## RESUMEN

Los animales obtienen energía mediante el consumo de alimentos, la cual utilizan para cubrir sus requerimientos y llevar a cabo sus funciones fisiológicas, metabólicas y reproductivas. Un aporte insuficiente podría ser perjudicial para la producción. En este trabajo se empleó la metodología llamada problema inverso, en la que se busca optimizar los datos para explicar y predecir los comportamientos del sistema en estudio. Para tal fin, se desarrolló un modelo inverso de múltiples parámetros y se ajustó a curvas de datos obtenidos de datos de composición corporal (CC) de ovejas gestantes y no gestantes. El problema inverso permitió una evaluación detallada de los procesos que ocurren en los animales cuando se restringe el alimento. También el ajuste de múltiples curvas permitió obtener valores de parámetros de utilidad para la evaluación de los procesos de deposición de energía y degradación de compuestos orgánicos. Además, durante el ajuste se obtuvo simultáneamente la solución numérica de múltiples curvas que describen el fenómeno de forma integral, así como, el cálculo de variables auxiliares que nos ayudan a evaluar la eficiencia energética de los animales.

**Palabras clave:** Problema inverso, partición de la energía, ovinas gestantes.

# INITIAL EVALUATION OF THE USE OF THE INVERSE PROBLEMA IN THE STUDY OF THE ENERGY PARTITIONING IN PREGNANT SHEEP

Sonia Tinal Ortiz, MC.

Colegio de Postgraduados, 2018

## ABSTRACT

Animals obtain energy through the consumption of feed, which they use to cover their needs and carry out their metabolic, physiological, and reproductive functions. Insufficient input could be detrimental to production. We use a methodology called inverse problem, which seeks to optimize the data to explain and predict the behavior of the system under study. For this purpose, an inverse multi-model was developed and fitted to data curves obtained from body composition data of pregnant and non-pregnant sheep. The inverse problema allowed a detailed evaluation of the processes that occur in animals when feed is restricted. Also, the adjustment of multiple curves permitted to obtain parameter values of utility for the evaluation of energy deposition and organic degradation processes. In addition, during the adjustment, the numerical solution of multiple curves that describe the phenomenon in an integral way was simultaneously obtained, as well as the calculation of auxiliary variables that helps us to evaluate the energy efficiency of the animals.

**Keywords: Inverse problem, energy partition, pregnant sheep.**

## DEDICATORIA

A mis padres: **Rocio Ortiz Escobar y D. Alejandro Tinal Núñez**, quienes siempre han apoyado mis decisiones y proyectos, me dan ánimos para seguir en los tiempos difíciles y a quienes les agradeceré eternamente la persona que hicieron de mí.

Al amor de mi vida, el hombre que sin esperarlo llego a mi vida para darme felicidad y amor sincero en el momento indicado, quien ha estado conmigo apoyándome y compartiendo nuestros mejores momentos y por el cual mi vida ha tenido un mejor rumbo, quien ha confiado en mí en todo momento, me ha apoyado incondicionalmente y alentado a seguir creciendo: **Manuel Fabián Oseguera Soberano**

A mi hermana **Sofía**, quien fue la persona que me animo a tomar este reto, me demostró en ella misma que si se podía, pero había que esforzarse al máximo.

A mi prima quien en vida me demostró que todo lo que te propones se puede lograr con esfuerzo y dedicación, que no importa cuánto tiempo te tardes, pero la satisfacción de haberlo logrado es tu mejor estímulo para ir por mas, que tus metas propuestas hay que concluir las siempre con orgullo sabiendo que cada esfuerzo ha valido la pena.

**Margarita Carreta Ortiz (†)**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios quien hizo que esta nueva oportunidad llegara a mi vida y me ha mostrado el camino a tomar para mejorar mis proyectos de vida.

Al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco y a los maestros que me apoyaron a lo largo de mi formación académica

A CONACYT por brindarme el sustento económico para mi formación de maestría.

Al Dr. Luis Manuel Vargas Villamil, quien me apoyo en mi formación académica, me guió y fue persistente en mi preparación, además le agradezco por creer en mi para realizar y concluir este proyecto.

Dr. Alfonso Juventino Chay Canul quien formo parte de mi preparación y me proporciono los datos de sus investigaciones para la elaboración de este estudio.

Al Dr. Ulises Macías Cruz del Instituto de Ciencias Agrícolas UABC, a quien le doy gracias por haber proporcionado los datos para la construcción de la investigación y que además fue participe en mi formación y conocimientos académicos.

Al Dr. Leonel Avendaño Reyes, Dr. Juan Manuel Zaldívar Cruz y al Dr. Omar Hernández Mendo quienes forman parte de mi consejo particular y quienes me brindaron su apoyo para concluir satisfactoriamente la tesis, además de su apoyo en situaciones académicas y en brindarme conocimientos de utilidad en mi investigación.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>ix</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Generalidades .....	3
2.2. Problema Inverso .....	3
2.3. Gestación en las ovejas .....	4
2.4. Programación fetal .....	5
2.5. Espacio Uterino .....	6
2.6. Alimentación de las ovejas gestantes y su importancia .....	6
2.7. Partición de la energía .....	8
2.8. Eficiencia de la energía en la alimentación .....	8
2.8.1. Energía bruta .....	10
2.8.2. Energía digestible .....	10
2.8.3. Energía metabolizable .....	11
2.8.4. Energía neta .....	11
2.9. Incremento calórico .....	12
2.10. Requerimiento energético en ovejas gestantes .....	13



2.11.	Factores que afectan la partición de la energía durante la gestación .....	14
3.	OBJETIVOS .....	16
3.1.	General .....	16
3.2.	Particulares .....	16
4.	HIPÓTESIS .....	17
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
5.1.	Tratamientos .....	19
5.2.	Metodología del problema inverso .....	22
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
6.1.	Comportamiento del consumo de energía .....	28
6.2.	Comportamiento de las funciones metabólicas.....	29
6.3.	Comportamiento del peso real calculado .....	30
6.4.	Comportamiento de las funciones fisiológicas .....	33
6.5.	Comportamiento de las funciones reproductivas. ....	35
6.6.	Eficiencia de la utilización de la energía.....	41
6.7.	Representación del incremento calórico .....	42
6.8.	Evaluación de la partición de la energía con el problema inverso:.....	42
7.	CONCLUSIONES.....	46
8.	LITERATURA CITADA.....	47

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Eficiencia de utilización de EM para mantenimiento ( $k_m$ ) en ovinos de pelo de acuerdo a Chay-Canul, et al. (2016).....	10
<b>Cuadro 2.</b> Partición de la energía metabolizable en ovejas en el primer tercio de la gestación para la evaluación de la restricción del alimento. ....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ingredientes y composición química de la dieta experimental (en base a materia seca MS) usada por Macías (2015) y ofrecidas durante los periodos pre y post-empadre. ....	20
---	----

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Esquema del diseño de tratamientos de acuerdo a la base de datos de (Macías, 2015).....	21
<b>Ilustración 2.</b> Consumo de energía Mcal/día.....	28
<b>Ilustración 3.</b> Comportamiento del peso vivo (PV) .....	29
<b>Ilustración 4.</b> Representación del peso real calculado en ovejas del experimento .....	30
<b>Ilustración 5.</b> Comportamiento de la canal.....	31
<b>Ilustración 6.</b> Comportamiento de los cambios de peso de CPPC (cabeza, piel, pata y cola).....	32
<b>Ilustración 7.</b> Comportamiento de los cambios de peso en cada uno de los tratamientos para vísceras, intestino y sangre. ....	33
<b>Ilustración 8.</b> Comportamiento del cambio de energía en vísceras, intestino y sangre	34
<b>Ilustración 9.</b> Comportamiento del crecimiento uterino .....	35

**Ilustración 10.** Cambio de energía en el útero, glándula mamaria y feto ..... 36

**Ilustración 11.** Comportamiento del feto durante el primer tercio de la gestación..... 38

**Ilustración 12.** Comportamiento del cambio de peso de la glándula mamaria después del empadre. .... 39

**Ilustración 13.** Comportamiento de la producción de calor. .... 40

**Ilustración 14.** Eficiencia de la utilización de la energía ..... 41

**Ilustración 15.** Comportamiento del incremento calórico en relación al consumo de energía. .... 42

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo los sistemas de producción de rumiantes estudian los requerimientos de energía de los animales durante sus diferentes etapas productivas, esto con la finalidad de predecir el suministro de alimento que será necesario para cubrir dichos requerimientos en las diferentes especies (Ku, 1995).

El total de la energía que consumen los animales a través de los alimentos se utiliza para satisfacer un conjunto de procesos fisiológicos, metabólicos, y reproductivos como son: regulación térmica, mantenimiento, gestación, lactancia y cambio de peso. Por lo tanto, significa que un aporte insuficiente de energía provocará una reducción en la fertilidad de las ovejas, fallas en la reproducción, menor producción de leche diaria, acortamiento del periodo de lactancia, pérdida de peso y mayor susceptibilidad a las enfermedades parasitarias (Herrera, *et al.* 2010).

Uno de los principales gastos económicos de los productores de ovino es el sustento de la alimentación durante la gestación de las borregas, por lo que se requiere desarrollar métodos eficientes para estimar el uso y gasto de energía de tal manera que se puedan optimizar los requerimientos energéticos.

Chay-Canul, *et al.* (2016) mencionan que la producción ovina nacional en el trópico ocupa un lugar importante, pero que son pocos los experimentos que se han realizado hasta ahora para determinar los requerimientos de energía y conocer las necesidades de nutrientes y la eficiencia en la que se utilizan los recursos alimenticios para poder optimizar la productividad y alcanzar un comportamiento productivo esperado.

Para el caso de los ovinos la información es escasa, ya que existen hoy en día pocos informes que demuestren las necesidades energéticas en sus diferentes etapas fisiológicas como son crecimiento, gestación y lactancia, siendo de vital importancia para mantener una buena producción (Chay-Canul, *et al.* 2016).

En México se han hecho pocos experimentos para conocer los requerimientos de mantenimiento y ganancia de peso, así como la eficiencia con la que la energía metabolizable (EM) es utilizada. Esta información puede ayudar a mejorar la eficiencia

productiva de los ovinos y por consiguiente mejorar la rentabilidad de las explotaciones de esta especie (Chay-Canul, *et al.* 2016).

Como se mencionó anteriormente, no se encuentra bien estudiada la utilización de la energía en ovinos y es por ello que el objetivo del presente estudio es analizar, mediante el uso del problema inverso con datos reales, la partición de la energía en ovinas gestantes, optimizando así la utilización de la energía y reducir costos de producción.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Generalidades**

En México hay registrados alrededor de 53,000 unidades de producción ovina, las que se encuentran distribuidas en todo el país: en el centro el 53%, 24% en el sur-sureste y 23% en el norte (Peña, *et al.* 2013). En el año 2012, se produjeron 57,691 ton/año de carne de ovinos, representando la carne ovina el 0.95% de la producción de carne nacional y el 1.8% de las carnes rojas (Castelán, 2014).

La población ovina del país ha ido aumentando cada año, habiendo en 2008 alrededor de 7.7 millones de cabezas, calculándose un aumento del 50% en la última década. La producción ovina tiende a crecer en zonas con pastos naturales o inducidos, donde existe un costo de producción, así como en regiones agrícolas con praderas irrigadas, con mayores costos de producción. Una de las razones por las cuales existe una tasa de crecimiento moderada o negativa en algunos estados, son los altos costos de producción (Castro Marin & Gerrero Cardenas, 2010).

### **2.2. Problema Inverso**

Vargas (2003) menciona que los modelos matemáticos representan aproximadamente la realidad, y que estos son desarrollados con la finalidad específica para ayudar a comprender las relaciones que existen entre los datos y esta realidad, con el fin de mejorar nuestro conocimiento como el que se estudia en el presente trabajo.

Por otro lado, Menke (1989) menciona que un problema inverso es una metodología matemática utilizada para obtener información que es útil a partir de modelos y datos. Esta información extraída se puede representar como valores numéricos con propiedades del sistema de nuestro entorno y que se analizan de manera integral.

El enfoque inverso es capaz de mejorar la comprensión de los sistemas biológicos sin necesidad de dividir un sistema biológico, permitiendo un estudio integral del sistema (Vargas *et al.* 2014).

De acuerdo a lo anterior, la metodología del problema inverso estudia la optimización de los parámetros para explicar y poder predecir un comportamiento de un sistema biológico mediante la obtención de las relaciones entre variables y los valores de los parámetros del mismo sistema (Vargas *et al.* 2014).

El problema inverso tiene como objetivo llegar a conclusiones útiles, como podría ser el mejoramiento de la producción en base a la optimización del uso de la energía en ovejas gestantes.

### **2.3. Gestación en las ovejas**

La etapa de gestación es un proceso reproductivo que comienza con la fecundación, que consiste en la unión del espermatozoide con el óvulo para la formación de un cigoto, finalizando con el parto (Hafez, 2007). El periodo que comprende la gestación en los ovinos es en promedio de 150 días (Carrillo, *et al.* 1997). Durante este periodo se distinguen tres etapas sobre el desarrollo y crecimiento del producto: 1) etapa de huevo o cigoto, 2) etapa embrionaria y 3) etapa fetal (Hafez, 2007).

Durante las dos primeras etapas de crecimiento del producto destaca el desarrollo embrionario y la formación de la placenta. El primero; es el proceso de formación de un nuevo individuo a partir de la célula huevo (cigoto), que inicia después que se ha dado la fecundación (Rahman, *et al.* 2008). En el cigoto ocurren una serie de divisiones celulares que dan como resultado células hijas, las cuales reciben el nombre de blastómeros, y al conjunto de 16 a 32 blastómeros se les denomina mórula, con lo cual el proceso de segmentación llega a su término (Spencer & Bazer, 2004; Rahman, *et al.* 2008). La mórula se forma alrededor del día 6 posterior a la fecundación, e inicia el proceso de compactación para dar origen al blastocito. Este blastocito es diferenciado por una cavidad llena de líquido denominado blastocele y dos grupos celulares (Hafez, 2007): 1) células del embrioblasto, las cuales darán origen al embrión, y 2) células trofoblásticas, que dan origen a la placenta. Entre los días 8 y 9 posterior a la fecundación, ya con el blastocito en la luz del útero, la zona pelúcida se rompe y el embrión es liberado, lográndose el primer contacto celular entre el trofoblasto y el epitelio uterino materno. Cuando el embrión ya se encuentra liberado se inicia una fase de elongación y

crecimiento. Finalmente, en ovinos, en el día 16 de gestación; se inicia la fijación y formación de la placenta (Spencer & Bazer, 2004).

El proceso de gestación se establece y es controlado por mecanismos endocrinos. La progesterona es la principal hormona que interviene, porque se encarga de regular el medio uterino para el establecimiento del embrión y su mantenimiento (Spencer & Bazer, 2004), así como también de inhibir la liberación de prostaglandinas, que impiden la regresión del cuerpo lúteo.

El objetivo de la producción ovina es obtener el mayor número de corderos destetados por ovejas reproductoras. Una de las razones por las cual se pone énfasis en este índice, es porque dichos corderos serán los futuros remplazos reproductivos, los cuales se seleccionarán para cumplir con el objetivo de producción de carne, leche y lana (Pereyra, *et al.* 2011).

#### **2.4. Programación fetal**

La programación fetal es un proceso de adaptación en los que la nutrición y algunos factores ambientales afectan las vías de desarrollo en la etapa de crecimiento prenatal, ocasionando cambios en el metabolismo posnatal y susceptibilidad a enfermedades crónicas en la etapa adulta (Reyes & Carrocera, 2015).

La restricción alimenticia de las ovejas por debajo de los niveles recomendados de nutrientes en los periodos de pre y post apareamiento temprano ha facilitado entender las consecuencias fisiológicas de la desnutrición periconcepcional. La razón de las consecuencias fisiológicas que tienen las crías al nacer parece ser mediada a través de una mayor estimulación del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HPA), la cual es inducida por la desnutrición durante la concepción (Edwards & McMillen, 2002). De igual forma el eje fetal de HPA podría originar el acortamiento del período de gestación en embarazos únicos debido a activación temprana del parto (Bloomfield, *et al.* 2003).

El crecimiento y el desarrollo fetal subóptimo como consecuencia de bajos aportes de energía en la gestación generan menor productividad, sobre todo en periodos de restricción nutricional como la sequía. Esto conlleva a que la placenta no tenga la



capacidad de adaptarse a estas dificultades ambientales, por lo tanto, el desarrollo del feto se verá afectado por la limitación y transporte de nutrientes, ya que la preñez es una etapa especialmente sensible a la restricción de energía debido a la demanda de los requerimientos de nutrientes por la madre y el feto.

La programación fetal indica que las alteraciones en la nutrición fetal y el estado endocrino afectan el desarrollo, modifican irreversiblemente la estructura y el metabolismo y, como resultado, intervienen en la susceptibilidad del feto hacia la enfermedad. Por lo tanto, cuando existe una limitante en la disponibilidad de nutrientes se provoca un crecimiento, gestación, lactación y desarrollo inadecuados (Dunlap, *et al.* 2015).

## **2.5. Espacio Uterino**

El crecimiento del feto depende de factores genéticos, celulares, nutricionales, de crecimiento y hormonales tanto de origen fetal como maternal (Gardner, *et al.* 2007). Entre estos factores se encuentra la capacidad o espacio que tiene el útero de la oveja, la cual es importante para que el producto pueda desarrollarse y obtener un peso óptimo al nacimiento (Gardner, *et al.* 2007).

También el tamaño de la camada puede afectar el espacio uterino reduciendo el crecimiento fetal y peso óptimo al nacimiento. Se ha observado en algunos trabajos que cuando el tamaño de la camada aumenta el peso individual de los fetos disminuye por falta de espacio uterino (Gardner, *et al.* 2007). Los pesos promedios al nacimiento de mellizos representan el 87% del peso de corderos únicos.

## **2.6. Alimentación de las ovejas gestantes y su importancia**

Granja, *et al.* (2012), afirman que la nutrición es un factor importante que modifica el desempeño reproductivo en los mamíferos. Por ello, la nutrición es un factor significativo a tomarse en cuenta en la toma de decisiones dentro de los sistemas de producción ganadera. Un adecuado manejo de nutrientes será el punto clave para el mantenimiento de la productividad en los sistemas ganaderos, pues estos son de gran influencia en los

parámetros reproductivos, así como del estado metabólico y nutricional de la oveja reproductora.

Los resultados de la nutrición sobre el crecimiento y desarrollo del embrión/feto se manifiestan de diferente manera, dependiendo del momento en que la nutrición se altere. Un estado nutricional insuficiente en los primeros 30 días de gestación podrían provocar incremento en pérdidas embrionarias, por lo cual el nivel o eficiencia nutricional en esta etapa de la gestación debe ser de tal manera en que la borrega pueda mantener su peso con ligeras ganancias de peso (Pérez, 2016).

Durante los primeros dos tercios de gestación ocurre el proceso de diferenciación de los tejidos y órganos del feto, mientras que en el último tercio de la gestación se produce un proceso de desarrollo responsable del 70% del peso al nacer de la cría. Durante este proceso la demanda de energía ovina aumenta 60% en relación al primer periodo de gestación (NRC, 2007).

El 70% del desarrollo fetal sucede en el último tercio de la gestación, por lo que la productividad, peso al nacimiento y vigor de supervivencia del cordero va a depender de la alimentación en esta etapa de la gestación, además para que exista un crecimiento fetal adecuado al nacer y la cría tenga vigorosidad, el estado nutricional de la madre debe ser adecuado para que se cubran sus requerimientos sin afectar a la cría (Pedernera, *et al.* 2014). En dicha etapa los requerimientos nutricionales de las ovejas aumentan, y la energía metabolizable es uno de los nutrientes más demandados para apoyar el crecimiento fetal y el metabolismo materno (Vicente-Pérez, *et al.* 2015). Una adecuada aportación de este nutriente en el periodo de gestación permitirá que se obtengan buenas ganancias de peso, pesos altos al nacimiento en las crías y mayor sobrevivencia de los corderos después del parto.

En este sentido, la glucosa es un metabolito de gran importancia para la hembra gestante; representa el principal sustrato energético a nivel cerebral, siendo importante para la síntesis de triglicéridos, concentración muscular, síntesis de glucosa en glándula mamaria y, en general, aporta energía al feto (Pereyra, *et al.* 2011).

Al final de la gestación se incrementan los requerimientos, ya que aproximadamente el 85% del crecimiento fetal ocurre en las últimas seis semanas de gestación. Los requerimientos energéticos de las demandas fetales en las gestaciones avanzadas aumentan sobre los de mantenimiento hasta en 150% en ovejas de gestación simple y en 200% con gestaciones dobles (Pereyra, *et al.* 2011).

La restricción nutricional intrauterina afecta el desarrollo del feto, por lo tanto, si se administra una adecuada alimentación a las ovejas durante el parto, se obtendrán mejores condiciones corporales al momento del parto y en los primeros quince días de lactancia. Por el contrario, si ocurre una restricción en la ingesta de nutrientes podría ocasionar pérdidas en las reservas corporales y, en consecuencia, los animales reducirán su productividad (Castro, *et al.* 2012).

## **2.7. Partición de la energía**

Está comprobado que existen varios sistemas de energía que relacionan el valor energético de los alimentos con los requerimientos de energía de los animales como son: el total de nutrientes digestibles, sistemas de energía metabolizable y sistemas de energía neta. Todos los sistemas energéticos tienen un objetivo final que es predecir el comportamiento animal con el más alto grado de precisión. La EN (energía neta) es el concepto más preciso para describir los requerimientos de energía en rumiantes (Ku, 1995). Sin embargo, también se sabe que muchos de los sistemas energéticos tienen varias limitantes cuando son aplicados a nivel práctico en la producción ganadera.

## **2.8. Eficiencia de la energía en la alimentación**

En rumiantes se utilizan alimentos o subproductos tanto energéticos como proteicos, que contienen alto valor nutritivo y cantidades suficientes de aminoácidos, así estos pueden corregir el aporte energético-proteico en las dietas de baja calidad nutricional, con la finalidad de aumentar la ganancia de peso, calidad y conformación de la canal. Una adecuada alimentación influirá de manera positiva sobre los rendimientos y composición de la canal, mostrando un mayor diámetro del ojo de la costilla y aumento en los niveles de grasa intramuscular (Núñez, *et al.* 2007).

Los forrajes proveen más de las tres cuartas partes de la energía digestible, pero cuando la alimentación de los ovinos es de solo forrajes, de baja calidad (menor al 7% de PC), la ingestión de la energía resulta insuficiente para que los ovinos obtengan los niveles de producción adecuados, tanto para la ganancia diaria de peso como para la calidad en la canal (Núñez, *et al.* 2007) y parámetros reproductivos. Esto es consecuencia de que las bacterias en el rumen no tienen la facilidad de digerir rápidamente la fibra y el bolo alimenticio es retenido más tiempo en el rumen. Para corregir esto se deben proporcionar algunos suplementos que contengan porcentajes adecuados de proteína y energía. Para la suplementación energética es importante conocer el contenido energético de los nutrientes y estudiar la eficiencia de la distribución de la energía en el animal.

La proteína tiene un valor energético de 5.66 Mcal/Kg, donde cada kg de proteína tisular (excepto pelo y lana) se asocia con 3.5 a 4 veces su peso de agua, lo que proporciona que 1 Kg de tejido muscular sin grasa es solo alrededor de 1.194 Mcal. Por lo contrario, la grasa, contiene 9.386 Mcal/kg lo que significa que la misma cantidad de EM que se depositaria en 1 kg de grasa, serían, energéticamente hablando, 8 kg de musculo libre de grasa (Webster, 1977).

La eficiencia de la utilización de energía metabolizable para mantenimiento (EMm) ( $k_m$ ) significa la energía metabolizable (EM) que se puede transformar en energía neta (EN) para cubrir los requerimientos de mantenimiento de los animales, lo cual no se transforma en producto (aumento de peso, crecimiento, etc.) pero participa en los procesos metabólicos, fisiológicos y reproductivos. Debido a lo anterior, la eficiencia ( $k$ ) de utilización de la energía de los alimentos tiene impacto económico y la manera para determinarla es mediante la eficiencia de la conversión alimenticia (Chay-Canul, *et al.* 2016), evaluación de la partición de la energía, o determinación de la eficiencia energética.

De acuerdo a Chay-Canul, *et al.* (2016) el valor medio de  $K_m$  es de 0.66 en ovinos machos de pelo corto, con dietas de calidad media, sin embargo, independientemente de la dieta y raza en promedio tiene un valor 0.60 (cuadro 1).

**Cuadro 1** Eficiencia de utilización de EM para mantenimiento ( $k_m$ ) en ovinos de pelo de acuerdo a Chay-Canul, *et al.* (2016).

<b>Raza o genotipo</b>	<b><math>K_m</math></b>
Morada Nova machos en crecimiento	0.67
Santa Inés machos en crecimiento	0.7
Santa Inés machos en crecimiento	0.66
Santa Inés machos castrados, crecimiento y pastoreo	0.66
Santa Inés machos en crecimiento	0.66
½ Dorper x ½ Santa Ines	0.63
Media	0.66
Desviación estándar	0.023
Coefficiente de variación	3.39

### **2.8.1. Energía bruta**

La energía bruta (EN) es la energía contenida en el alimento y que se libera en el animal en forma de calor oxidando dichos alimentos. La eficiencia de utilización de energía bruta (EB) en los rumiantes está determinada por complicadas interacciones entre las características físicas y químicas del alimento, los procesos digestivos en el tracto gastrointestinal (TGI) y las actividades metabólicas que están asociadas con el mantenimiento y crecimiento del animal. En algunos procesos como prehensión, digestión, absorción, transporte y metabolismo de los nutrientes se pierden algunas proporciones de la EB, (Ku, 1995).

### **2.8.2. Energía digestible**

Del total de energía bruta contenida en un alimento, una parte es perdida en las heces, de la que el animal no dispone para su uso. Entonces tenemos que, a la energía total que el animal consume (ED), se le debe restar esa energía que elimina en las heces; la energía que queda disponible después de este descuento, y que el animal contiene en su organismo se le llama energía digestible (ED). Su valor va a depender de la digestibilidad de los forrajes o suplementos que el animal consume (Castellaro, *et al.* 2015)

### **2.8.3. Energía metabolizable**

La energía metabolizable (EM) es la parte de energía que se pierde en forma de calor (orina, heces y gases). Esta energía proviene del alimento que el animal tiene disponible para sus procesos metabólicos. Ya que se pierde la energía en forma de calor queda disponible para el funcionamiento de los tejidos del cuerpo, mantenimiento, crecimiento, gestación y producción de leche la EM (NRC, 2007)

Asimismo, es la condición donde el animal no sufre cambios en su composición corporal, es decir que mientras se cubra este requerimiento el animal se encuentra en un estado donde no tiene pérdidas o ganancias de energía en sus tejidos corporales, ya que cubre sus necesidades de mantenimiento (Chay-Canul, *et al.* 2016).

Es importante mencionar que cuando existe una deficiencia de energía metabolizable el animal moviliza sus reservas corporales, sobre todo la grasa para así continuar con sus funciones vitales y, lo cual puede provocar cambios o trastornos metabólicos, reproductivos y una baja eficiencia de producción (Chay Canul, *et al.* 2011)

### **2.8.4. Energía neta**

Al ser restada a la EM el incremento térmico o ICA del alimento, se obtiene la energía neta (EN). La energía neta de los alimentos, se define como la cantidad de energía que está disponible para ser utilizada por el animal para su mantenimiento corporal y las distintas formas de producción. La energía para el mantenimiento se utiliza para realizar trabajo en el organismo mediante, principalmente, la utilización de ATP, abandonándolo en forma de calor (McDonald, *et al.* 2011), por lo que tanto el incremento calórico como la EN de mantenimiento producen calor. En el organismo del animal queda almacenada o se elimina, como energía química, la fracción de energía empleada para crecimiento, cebo, producción de leche, huevos o lana, etc. Esta energía empleada para dichas funciones es denominada retención de energía.

## 2.9. Incremento calórico

El ICA puede ser definido como el incremento que sucede en la producción de calor del animal, el cual se expresa en Mcal, por cada unidad que aumente el consumo de EM. El total del ICA determina la proporción de EM que el animal tendrá disponible para sus procesos de mantenimiento y para el crecimiento de sus tejidos muscular y adiposo (Ku, 1995).

El incremento calórico de alimentación, se origina por la energía al hacer el trabajo mecánico de prehensión, masticación y propulsión del alimento hacia el tracto gastrointestinal del animal. Para el caso de rumiantes, el ICA aumenta cuando la dieta se formula a base de forrajes, a diferencia de cuando la dieta se formula a base de concentrados, esto puede ser tanto para abajo como arriba de los niveles de alimentación del mantenimiento (Ku, 1995).

En el caso de rumiantes, se toman en cuenta cuatro factores importantes que contribuyen al ICA los cuales son los siguientes:

1. Las pérdidas de energía que son provocadas a causa del consumo y rumia del alimento.
2. Las pérdidas de energía que ocurren en el proceso de fermentación ruminal.
3. Las pérdidas de energía que se presentan en las vísceras que son drenadas por la vena porta ocurren por el trabajo metabólico que ejercen (VDVP).
4. Las pérdidas de energía que se originan cuando no existe una buena utilización de nutrientes absorbidos a nivel celular (AGV).

El costo energético del consumo por gramo de alimento es menor en ovejas que se alimentan con mayor rapidez; se estima que el costo energético del consumo podría significar el 2 al 3% de la producción de calor diario del animal. Por lo tanto, se dice que el costo energético del consumo es afectado evidentemente por la velocidad en que la oveja ingiere su alimento (Ku, 1995).

## **2.10. Requerimiento energético en ovejas gestantes**

Como se menciona anteriormente, en las regiones tropicales de México, se conoce poco referente a los requerimientos energéticos y su eficiencia de utilización de energía en borregas que se encuentran en producción. También se encuentran pocos estudios que indiquen el nivel de consumo de EM (CEM) sobre cambios en peso vivo (PV) y condición corporal (CC); así como el contenido energético de los tejidos musculares y grasos. Chay Canul, *et al.* (2011) señalan, que los requerimientos de energía que sobresalen en el estudio de la utilización de energía son los de mantenimiento y producción. Para el de mantenimiento mencionan que representa la parte importante del requerimiento diario de los animales que se encuentran en producción.

Un consumo insuficiente de energía limita el crecimiento en ovinos jóvenes y ocasiona también mayor edad a la pubertad, limitación y reducción de la fertilidad, reducción en la producción de leche y aumento de la susceptibilidad a los nematodos. Para el caso de los animales adultos, cuando obtienen una ingesta de energía insuficiente para el mantenimiento, empiezan a hacer uso de sus reservas corporales de energía, tomando la grasa en primer lugar, y cuando esto supera las limitantes, pueden ocurrir afecciones metabólicas, como el desarrollo de cetosis. También ocurre cuando la ovina se encuentra al final de su gestación y al principio de la lactancia y no cubre sus requerimientos energéticos (Chay-Canul, *et al.* 2016).

Además, cuando las hembras se encuentran en lactancia y no cuentan con suficiente ingesta de energía metabolizable (MEI), pierden peso corporal y condición corporal, reduciendo su rendimiento productivo (Chay Canul, *et al.* 2011).

Al menos en el caso de los sistemas de producción de carne de bovino, las hembras en etapa reproductiva son las que exigen la mayor demanda de energía, ya que se estima que entre el 65-75% de la (EM) es usada por las madres, y de esta energía el 70% se destina a los costos del requerimiento energético para el mantenimiento, lo que hace esperar que en ovinos la situación sea similar (Chay, 2011).



Es importante mencionar que hoy en día, los modelos actuales que se encuentran determinando las necesidades de energía para las ovejas se han basado en condiciones ambientales templadas, utilizando raciones de concentrado para razas de lana, desconociéndose los requerimientos de energía de ovejas de pelo en el trópico, las cuales son alimentadas bajo pastoreo y con alto contenido de fibra (Chay- Canul, *et al.* 2016).

### **2.11. Factores que afectan la partición de la energía durante la gestación**

Actualmente, los recursos principales para la producción animal (tierra y agua) se encuentran limitados en muchas regiones del mundo, por lo que es necesario que las determinaciones de requerimientos nutricionales para los animales sean más precisas y de esta forma evitar la pérdida de recursos naturales del medio ambiente. Por otro lado, se ha encontrado que los requerimientos energéticos de los animales se ven afectados por factores tales como: el nivel de consumo, raza, genotipo, sexo, peso a la madurez, estado fisiológico, condiciones ambientales, estrés, actividad física que realizan (como caminar largas distancias para adquirir sus alimentos), parasitismo y composición corporal (Chay Canul, *et al.* 2011).

Durante el tercer tercio de la gestación, los requerimientos nutricionales de las ovejas aumentan, por lo que cuando la oveja recibe adecuadamente el suministro de sus nutrientes, sobre todo en el periodo de gestación, se puede obtener una adecuada ganancia de peso, asegurar pesos altos al nacimiento en las crías y evitar mortalidad de las crías durante la etapa posnatal. Sin embargo, debido a la reducción en la capacidad ruminal que se da por el crecimiento del feto dentro del vientre materno (80%), el consumo de alimento puede verse comprometido durante las últimas semanas antes al parto. Por esta razón, el crecimiento fetal y los pesos al nacimiento de las crías se ven afectados, ya que los requerimientos nutricionales, y principalmente el aporte de energía, no son cubiertos en su totalidad (Vicente-Pérez, *et al.* 2015)

Otra razón para que no se cubran los requerimientos energéticos durante la gestación son las altas temperaturas, ya que, las ovejas disminuyen su consumo de alimento y utilizan parcialmente la energía para disipar la carga de calor corporal por medio del

mecanismo de termorregulación, incrementándose los requerimientos energéticos de mantenimiento (Vicente-Pérez, *et al.* 2015).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

Aplicar la metodología de problema inverso en la partición de la energía en ovejas sujetas a cuatro diferentes dietas.

#### **3.2. Particulares**

- Evaluar y analizar matemáticamente una base de datos obtenidas en un estudio previo en ovinas gestantes (Macías, 2015), con el objetivo de buscar la mejor estrategia para desarrollar un modelo inverso.
- Desarrollar un modelo matemático para ser utilizado en la evaluación de la partición de la energía en ovinas gestantes.
- Evaluar la partición de la energía con el modelo inverso desarrollado.
- Evaluar la capacidad del modelo para evaluar la partición de la energía en ovinas gestantes.

#### **4. HIPÓTESIS**

El problema inverso facilita la evaluación de la partición de la energía en ovinas gestantes.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos obtenidos de un estudio previo (Macías, 2015), realizado en el Instituto de Ciencias Agrícolas, de la UABC, localizado en el Valle de Mexicali, Baja California, México, con el objetivo de evaluar el efecto de la restricción nutricional de ovejas gestantes, alrededor de la concepción sobre el estado corporal y metabolismo materno post-concepción, la condición fisiológica de la madre y el desarrollo reproductivo temprano (feto, glándula mamaria y útero) en ovejas Katahdin x Pelibuey. De igual forma, se utilizó la base de datos obtenidos por (Chay, 2014), sobre condición corporal, peso vivo, peso de vísceras, canal, grasa, piel, pata, cola, útero y ubre para obtener las composiciones corporales teóricas, previas a la gestación, de las ovejas gestantes sacrificadas y evaluadas por (Macías, 2015). Para tal fin, se seleccionaron de la base de datos de (Chay, 2014), una oveja no gestante por cada oveja gestante de la base de datos de (Macías, 2015), considerando que ambas ovejas tuvieran canales con pesos similares.

El trabajo se realizó en el Colegio de Postgraduados del Campus Tabasco, ubicado en H. Cárdenas Tabasco, México. La finalidad del estudio fue obtener con los datos existentes de ambos experimentos descritos anteriormente, una evaluación de la partición de la energía en ovinas gestantes mediante la construcción matemática de un modelo inverso. La restricción nutricional (RN) que se evaluó en este trabajo consistió en 40% del consumo de (MS) en relación al grupo testigo, el cual se alimentó con el 100% de requerimiento nutricional acorde al (NRC, 2007), usando la dieta experimental de mantenimiento EM= 2.0 Mcal/kg MS y PC= 9.5% (Tabla 1), la cual se formuló con heno picado de alfalfa y pasto Sudán en una proporción 20:80.

Las ovejas se pesaron cada 10 días durante todo el experimento (que duró 106 días) para ajustar el consumo de MS. La disponibilidad de agua fue a libre acceso. Diariamente se ofreció alimento en la mañana (7:00 h; 60%) y en la tarde (17:00 h; 40%) acorde a los esquemas de tratamientos que se describen a continuación:

## 5.1. Tratamientos

**Tratamiento 1 (TT):** sin restricción nutricional pre y post- empadre. La cantidad de alimento que se ofreció, en base a MS, fue de 2.1 y 2.5% de su PV para el periodo pre-empadre y post-empadre, respectivamente (Ilustración 1).

**Tratamiento 2 (RR):** Restricción nutricional durante 30 días pre-empadre y 50 días post-empadre. La cantidad de alimento ofrecido en base a MS a ovejas con RN durante todo el periodo pre y post empadre fue de 1.26 y 1.5% de su PV respectivamente, (Ilustracion1)

**Tratamiento 3 (RT):** restricción nutricional durante 30 días pre-empadre. La RN fue en los 30 días previos a la concepción (pre-empadre), ofreciendo en base a MS a las ovejas 1.26% de su PV. Lo cual en el post- empadre no hubo RN, por lo cual se ofreció de consumo en base a MS el 2.5% del PV de las ovejas, (Ilustración 1).

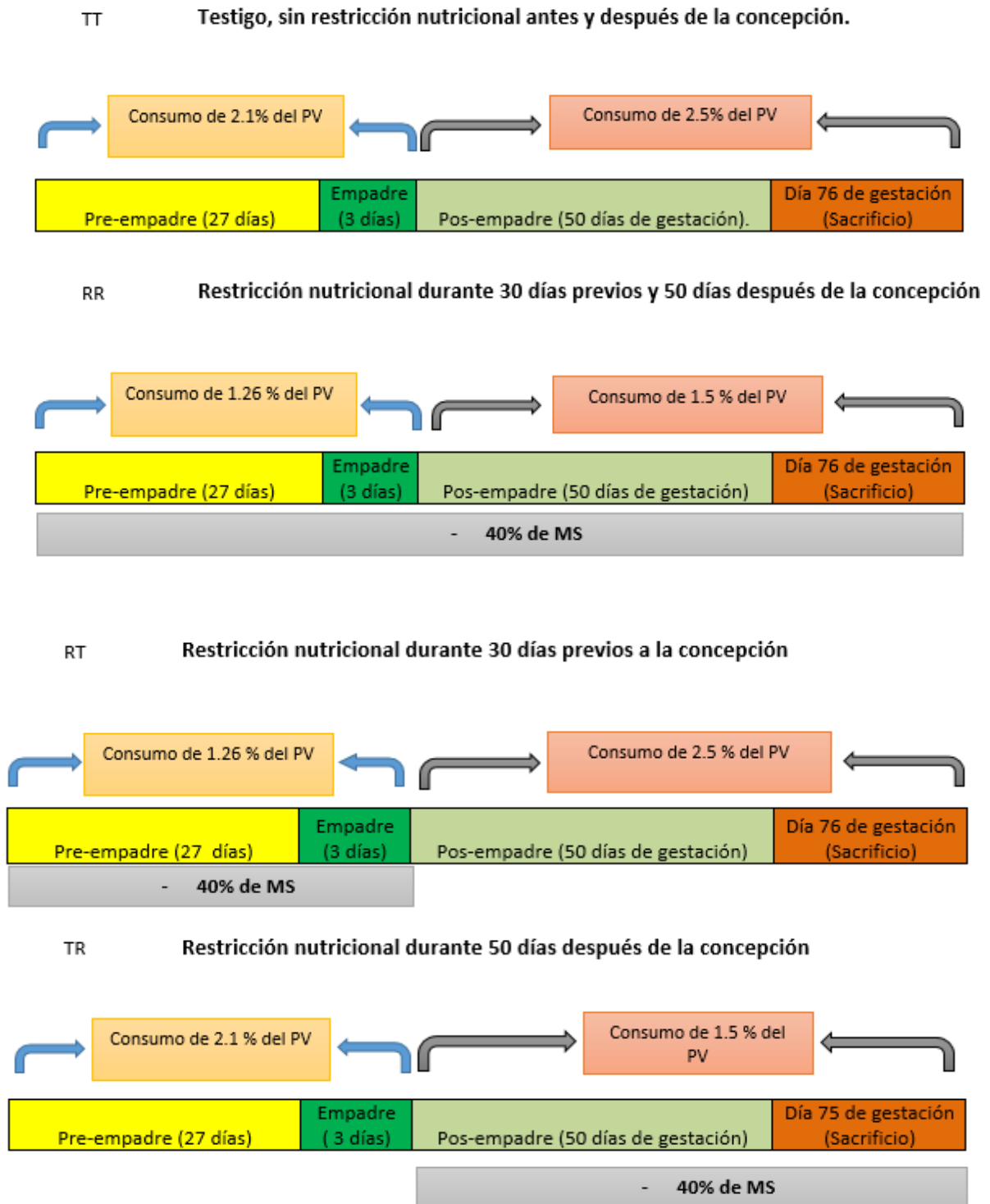
**Tratamiento 4 (TR)** restricción nutricional durante 50 días post-empadre. La RN fue en la etapa post-empadre ofreciendo un consumo en base a MS a las ovejas siendo 1.5% del PV. Antes del empadre no hubo RN por lo cual se ofreció el 2.1% del PV de la oveja, (Ilustración 1).

**Tabla 1.** Ingredientes y composición química de la dieta experimental (en base a materia seca MS) usada por Macías, (2015) y ofrecidas durante los periodos pre y post-empadre.

<b>Ingredientes (g/kg de MS)</b>	<b>Pre- empadre</b>	<b>Post-empadre</b>
Heno de sudan	850	800
Heno de alfalfa	150	200
<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>		
Materia seca (g/kg)	922	923
Materia orgánica (g/kg de MS)	865	862
Proteína cruda (g/kg de MS)	85	93
Extracto etéreo (g/kg de MS)	12	12
Fibra detergente neutra (g/kg de MS)	613	642
NDT (g/kg de MS)	560	543
ED (Mcal/kg de MS)	2.4	2.4
EM(Mcal/kg de MS)	2.0	2.0

Se calculó nutrientes digestibles totales ( $NDT = 91.0246 - [0.571588 \times FDN]$ ; Cappelle *et al.*, 2001), energía digestible ( $ED = NDT \times 0.044$ ; NRC, 1985) y energía metabolizable ( $EM = ED \times 0.82$ , NRC, (1985)

**Ilustración 1.** Esquema del diseño de tratamientos de acuerdo a la base de datos de Macías, (2015).





## 5.2. Metodología del problema inverso

Con la finalidad de evaluar la partición de la energía de ovejas gestantes y la eficiencia de la utilización, se desarrolló un modelo inverso donde se describió el comportamiento de los cambios en pesos de las fracciones orgánicas que componen el PV de las ovejas gestantes. Además, se describe las ganancias y pérdidas de estas fracciones en términos de PV y energía. La descripción de la energía se obtuvo multiplicando las ganancias de PV de las fracciones por constantes obtenidas de literatura sobre concentraciones de estas fracciones (Rattray *et al.*, 1974; Webster, 1977; Mantecon *et al.*, 1985). Cuando no se pudo obtener dicha información, se calculó a partir de la composición química de las fracciones orgánicas obtenidas por Chay, (2014), y valores energéticos de los compuestos químicos publicados (Webster, 1977). Para el caso específico de la fracción CPPC (cabeza, piel, pata y cola), la concentración energética promedio que se utilizó fue un valor arbitrario cercano a los valores de concentraciones de energía de estas fracciones de ovejas y rumiantes publicados por el Sistema Mexicano de Alimentos y Equivalentes (Lizaur, et al., 2008). También se integraron los valores que describen el flujo de energía desde y hacia las fracciones orgánicas de las ovejas gestantes y feto para describir variables relacionadas a la evaluación de la producción del calor, eficiencia energética e índice calórico (variables calor, eficiencia y  $\dot{Q}_{\text{CalorConsumoE}}$ ). Finalmente, se sumaron las fracciones orgánicas para obtener el peso del animal sin alimento y líquidos corporales, llamándose a esta variable  $\text{PesoRealCalculado}$ , el cual fue utilizado para calcular PV promedio de cada tratamiento al multiplicarlo con un índice promedio de peso vacío obtenido del estudio experimental por Chay, (2014).

El modelo fue ajustado matemáticamente a las medias de las variables obtenidas a partir de las bases de datos de los trabajos de Macías, (2015) y Chay, (2014). Durante el ajuste, se utilizaron los valores de consumo de MS como variables de entrada, seleccionándose las variables siguientes para el ajuste de curvas: A) Variables de estado relacionadas a factores metabólicos, PV, peso de la MS de la canal, de la grasa y CPPC (cabeza, piel, patas y cola). B) Variables de estado relacionadas a factores fisiológicos, peso de la MS de las vísceras, del intestino vacío y de la sangre. Variables de estado relacionadas a factores reproductivos, peso de la MS de la glándula mamaria, del útero vacío y del feto.

Las curvas de consumo de la MS se integraron al modelo como variable de entrada. Los parámetros se ajustaron mediante un multi-ajuste, los cuales fueron: A) Parámetros relacionados a factores metabólicos, ganancia de peso de la MS de la canal, de la grasa y de la CPPC. B) Parámetros relacionados a factores fisiológicos, ganancia de peso de la MS de las vísceras, del intestino vacío y de la sangre. C) Parámetros relacionados a factores reproductivos, ganancia de peso de la MS de glándula mamaria, del útero vacío y del feto.

El modelo se desarrolló con el programa Stella VI y posteriormente se exportó al programa Berkeley Madonna, donde se ajustó al modelo utilizando el método Rosenbrock (stiff), con un tiempo inicial de 0 y un final de 76, que corresponde al tiempo de gestación en ovinos (155 días) evaluado en este experimento. El intervalo de tiempo fue DTMIN= 1e6 y el DTMAX= 1, con una tolerancia de 0.01. No se consideraron ponderaciones para ninguna variable de estado durante el ajuste, los valores iniciales de las variables de estado fueron obtenidos en el momento de la optimización del modelo, al igual que los valores de las variables que describen la producción del calor, eficiencia energética e índice calórico. Los promedios de los valores iniciales y finales de las curvas de las variables auxiliares ConsumoE, FlujoNegativo; CambioEnergíaCPPC, CambioEnergíaIntestinoV, CambioEnergíaVisceras, CambioEnergíaSangre, CambioEnergíaUtero y CambioEnergíaFeto, fueron obtenidos para la evaluación final de la partición de la energía y la eficiencia energética de la energía metabolizable.

El modelo está compuesto del siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dGlandula}{dt} = CambioGlandula$$

$$\frac{dCPPC}{dt} = CambioCPPC$$

$$\frac{dUteroV}{dt} = CambioUteroV$$

$$\frac{dSangre}{dt} = CambioSangre$$

$$\frac{dFeto}{dt} = CambioFeto$$

$$\frac{dCanal}{dt} = CambioCanal$$

$$\frac{dVisceras}{dt} = CambioVisceras$$

$$\frac{dGrasa}{dt} = CambioGrasa$$

$$\frac{dIntestinoV}{dt} = CambioIntestinoV$$

$$\frac{dEnergia}{dt} = ConsumoE - Calor - CambioEnergiaCanal - CambioEnergiaVisceras - CambioEnergiaGlandula - CambioEnergiaUteroV - CambioEnergiaFeto - CambioEnergiaCPPC - CambioEnergiaGrasa - CambioEnergiaIntestinoV - CambioEnergiaSangre$$

### Restricciones:

Vísceras  $\geq 0$ ; Canal  $\geq 0$ ; Glándula  $\geq 0$ ; CPPC  $\geq 0$ ; ÚteroV  $\geq 0$ ; Sangre  $\geq 0$ ; Feto  $\geq 0$ ; Grasa  $\geq 0$ ; IntestinoV  $\geq 0$

### Ecuaciones auxiliares:

$$CambioGlandula = gGlandula * Glandula$$

$$CambioUteroV = gUteroV * UteroV$$

$$CambioCPPC = gCPPC * CPPC$$

$$CambioCanal = gCanal * Canal$$

$$PesoRealCalculado = Glándula + UteroV + Feto + Canal + Visceras + CPPC + Grasa + IntestinoV + Sangre$$

$$PesoVivo = PesoRealCalculado / iCarne$$

$$CambioVisceras = gVisceras * Visceras$$

$$CambioIntestinoV = gIntestinoV * IntestinoV$$

$$CambioEnergiaIntestinoV = eIntestinoV * CambioIntestinoV$$

$$CambioGrasa = gGrasa * Grasa$$

$$CambioGlandula = gGlandula * Glandula$$

$$ConsumoE = ConsumoMS * ConcEnergia$$

$$CambioEnergiaCanal = (CambioCanal * MSCanal * PCCanal * ePC)$$

$$+(\text{CambioCanal} * \text{MSCanal} * \text{EECanal} * eEE)$$

$$\text{CambioEnergiaCPPC} = eCPPC * \text{CambioCPPC}$$

$$\text{CambioFeto} = gFeto * \text{Feto}$$

$$\text{CambioEnergiaFeto} = eFeto * \text{CambioFeto}$$

$$\text{CambioEnergiaGlandula} = eGlandula * \text{CambioGlandula}$$

$$\text{CambioEnergiaGrasa} = eGrasa * \text{CambioGrasa}$$

$$\text{CambioSangre} = gSangre * \text{Sangre}$$

$$\text{CambioEnergiaSangre} = eSangre * \text{CambioSangre}$$

$$\text{CambioEnergiaUteroV} = eUteroV * \text{CambioUteroV}$$

$$\text{CambioEnergiaVisceras} = (\text{CambioVisceras} * \text{MSVisceras} * \text{PCVisceras} * ePC)$$

$$+(\text{CambioVisceras} * \text{MSVisceras} * eEVisceras * eEE)$$

$$\text{Calor} = \text{ConsumoE} - \text{CambioEnergiaCanal} - \text{CambioEnergiaCPPC} - \text{CambioEnergiaFeto}$$

$$- \text{CambioEnergiaGlandula} - \text{CambioEnergiaGrasa} - \text{CambioEnergiaIntestinoV} -$$

$$\text{CambioEnergiaSangre} - \text{CambioEnergiaUteroV} - \text{CambioEnergiaVisceras}$$

$$i\text{CalorConsumoE} = \text{Calor} / \text{ConsumoE}$$

$$\text{PositivoCEGL} = \text{IF CambioEnergiaGlandula} > 0 \text{ THEN CambioEnergiaGlandula ELSE } 0$$

$$\text{PositivoCEU} = \text{IF CambioEnergiaUteroV} > 0 \text{ THEN CambioEnergiaUteroV ELSE } 0$$

$$\text{PositivoCEF} = \text{IF CambioEnergiaFeto} > 0 \text{ THEN CambioEnergiaFeto ELSE } 0$$

$$\text{PositivoCEC} = \text{IF CambioEnergiaCanal} > 0 \text{ THEN CambioEnergiaCanal ELSE } 0$$

$$\text{PositivoCEV} = \text{IF CambioEnergiaVisceras} > 0 \text{ THEN CambioEnergiaVisceras ELSE } 0$$

PositivoCECPPC = IF CambioEnergiaCPPC > 0 THEN CambioEnergiaCPPC ELSE 0

PositivoCEGR = IF CambioEnergiaGrasa > 0 THEN CambioEnergiaGrasa ELSE 0

PositivoCEI = IF CambioEnergiaIntestinoV > 0 THEN CambioEnergiaIntestinoV ELSE 0

PositivoCES = IF CambioEnergiaSangre > 0 THEN CambioEnergiaSangre ELSE 0

FlujoPositivo = PositivoCEC+PositivoCECPPC+PositivoCEF+PositivoCEGL

+PositivoCEGR+PositivoCEI+PositivoCES+PositivoCEU+PositivoCEV

FlujoNegativo = Calor-ConsumoE-FlujoPositivo

Eficiencia = FlujoPositivo/(ConsumoE+FlujoNegativo)

EnergiaDisponible = ConsumoE+FlujoNegativo

**Valores iniciales:**

gGlandula=.00001

gUteroV=.00001

gCPPC= .00001

gCanal= .00001

gVisceras= .00001

gFeto= .00001

gGrasa= .00001

gSangre= .00001

eGrasa= 7.5

eSangre= 1.02

eUteroV= 0.84

eIntestinoV= 1

ePC= 5.664

eEE= 9.393

eCPPC= 2

eFeto= 0.45

eGlandula= 2.97

PCCanal= .3871

EECanal= .566082

MSCanal= 0.4533

MSVisceras= 0.4961

PCVisceras= .2070

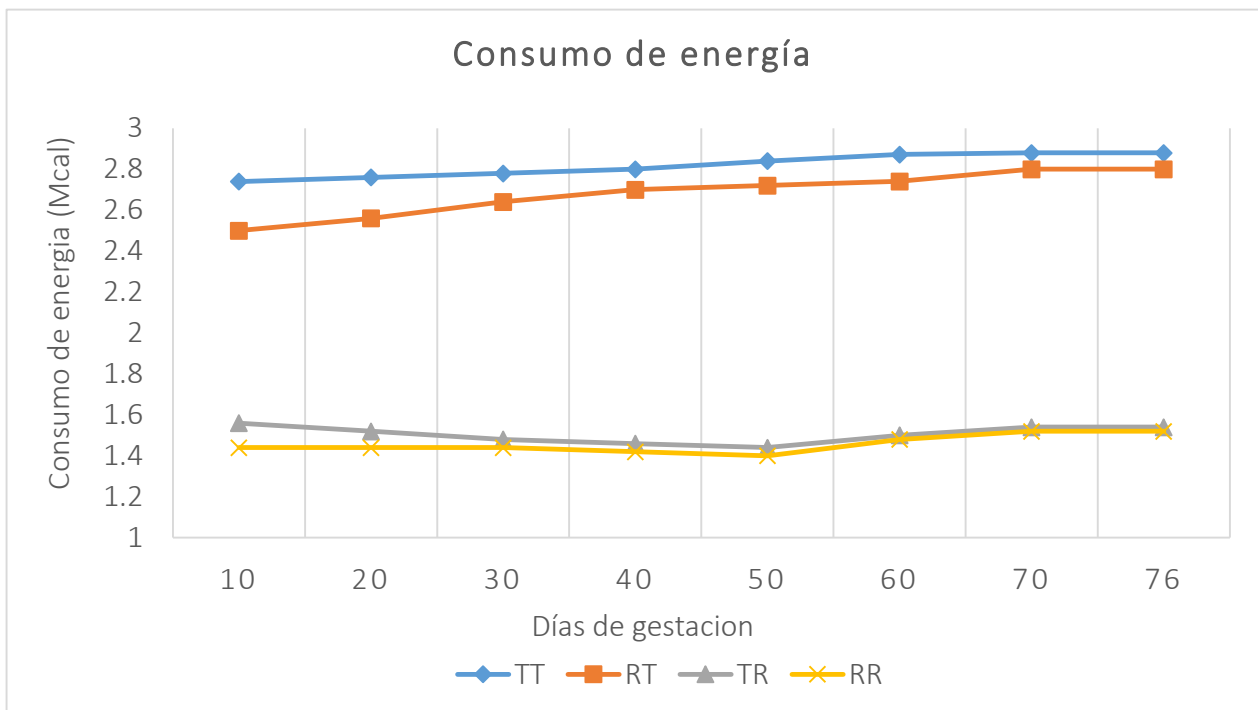
EEVisceras= .7519

ConcEnergía= 2

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La energía que consumen los animales es utilizada para el funcionamiento de los diferentes procesos metabólicos, fisiológicos y reproductivos. Por lo tanto, un aporte insuficiente de energía en cualquiera de los procesos antes mencionados podría llegar a reflejar bajar la productividad que la especie tiene como finalidad (Herrera, *et al.* 2010). Por lo que es importante agrupar el efecto que tiene la restricción nutricional en las funciones metabólicas, fisiológicas y reproductivas para poder evaluar los efectos de restricciones en el alimento.

### 6.1. Comportamiento del consumo de energía



**Ilustración 2.** Consumo de energía Mcal/día

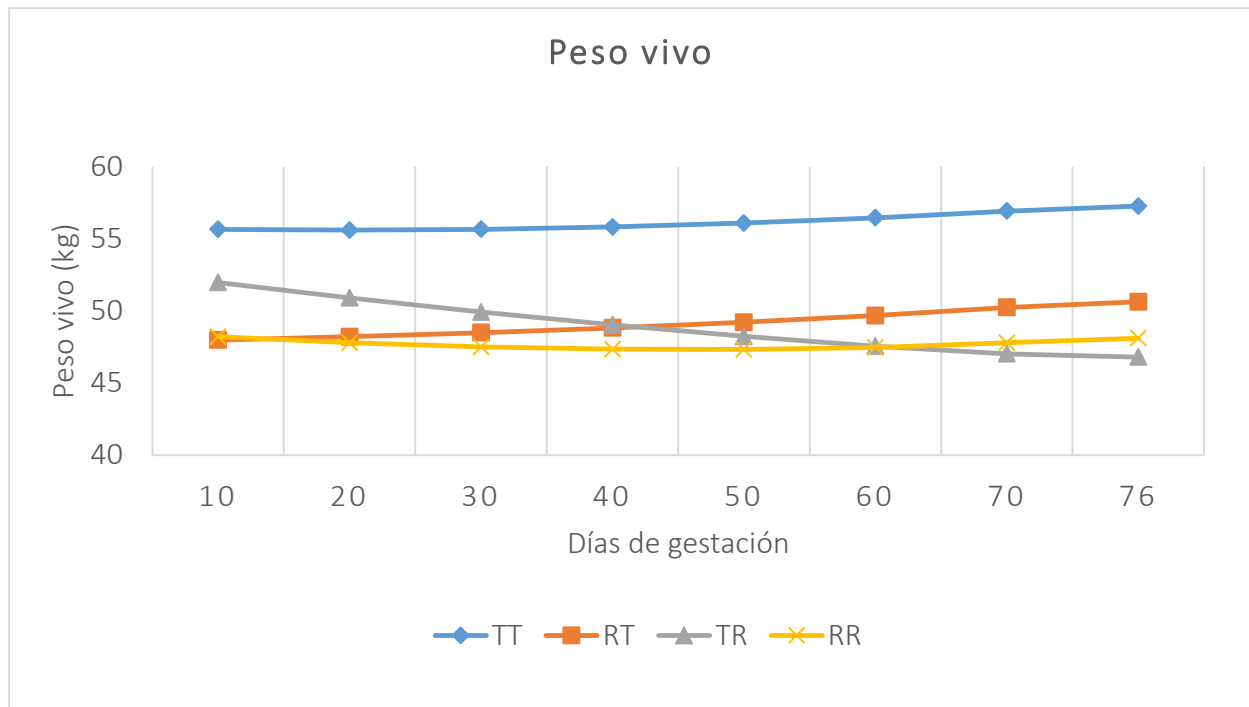
**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

Se muestra el consumo de energía para cada uno de los tratamientos con promedios de 2.819, 2.683, 1.505 y 1.458 Mcal/día para los tratamientos TT, RT, TR y RR, respectivamente. Se observa que RT y RR tienen el mismo consumo de energía por lo tanto se encuentran por debajo a lo que se describe en la NRC, (2007), donde el requerimiento de energía para gestación gemelar con un peso vivo promedio de 60 kg es

de 2.89 Mcal/día y para mantenimiento es de 2.01 Mcal/kg. Los TT y RT fueron los que cubrieron dichos requerimientos al tener un promedio de 2.819 Mcal/día en consumo de energía. Los demás tratamientos estuvieron por debajo del promedio para mantenimiento y gestación.

## 6.2. Comportamiento de las funciones metabólicas

### ➤ Comportamiento del peso vivo



**Ilustración 3.** Comportamiento del peso vivo (PV)

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

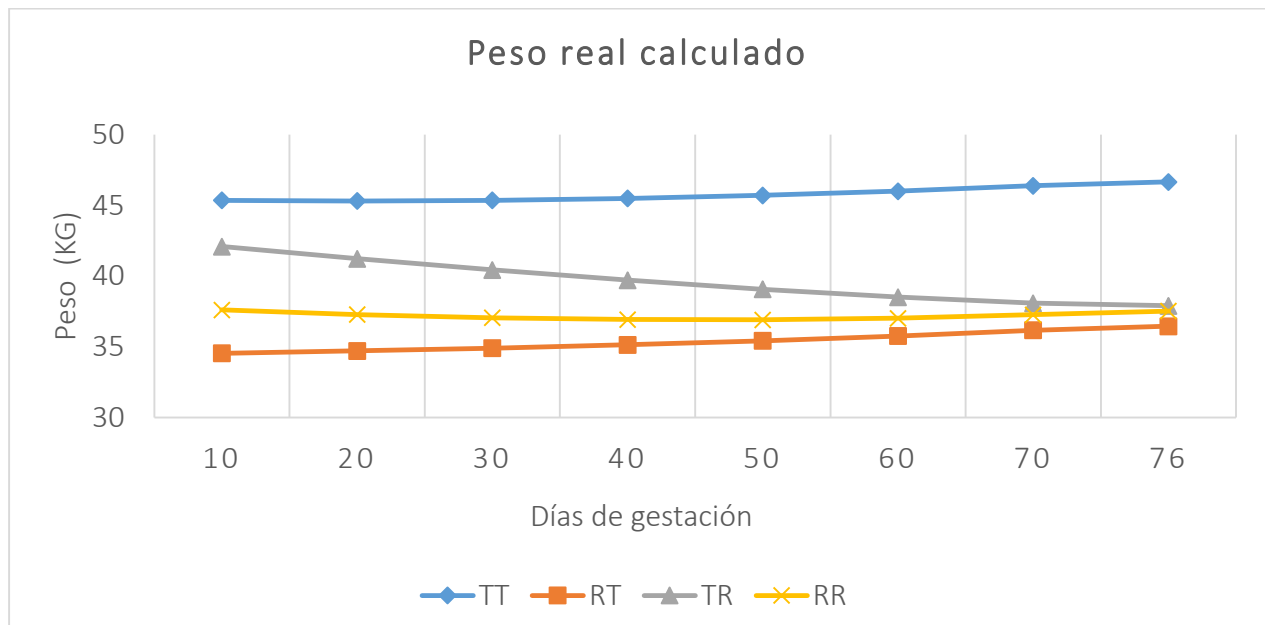
En la ilustración 3 se muestra el comportamiento del peso vivo de las borregas durante todo el periodo del experimento. El tratamiento testigo (TT) fue superior a todos los tratamientos con restricciones (RT, TR y RR), de los cuales el tratamiento TR a diferencia de RT y RR disminuyó su peso después del empadre. Por lo tanto, en todos los tratamientos que tuvieron restricción existió una limitante en la disponibilidad de nutrientes con respecto a sus necesidades productivas, la cual podría provocar un crecimiento, gestación, lactación y desarrollo del embrión inadecuado (Dunlap, *et al.* (2015; Perez, 2016). Sin embargo, el tratamiento testigo y dos de los tratamientos con



restricción (RT y RR) aumentaron de peso, lo cual podría significar un ajuste en la eficiencia energética que reduzca el efecto de la restricción de alimento. En el caso de TR, la restricción se dio, a diferencia de los otros tratamientos con restricción, después del empadre, por lo que es posible que los animales no tuvieron tiempo para adaptarse a la dieta.

### 6.3. Comportamiento del peso real calculado

➤ Peso real calculado

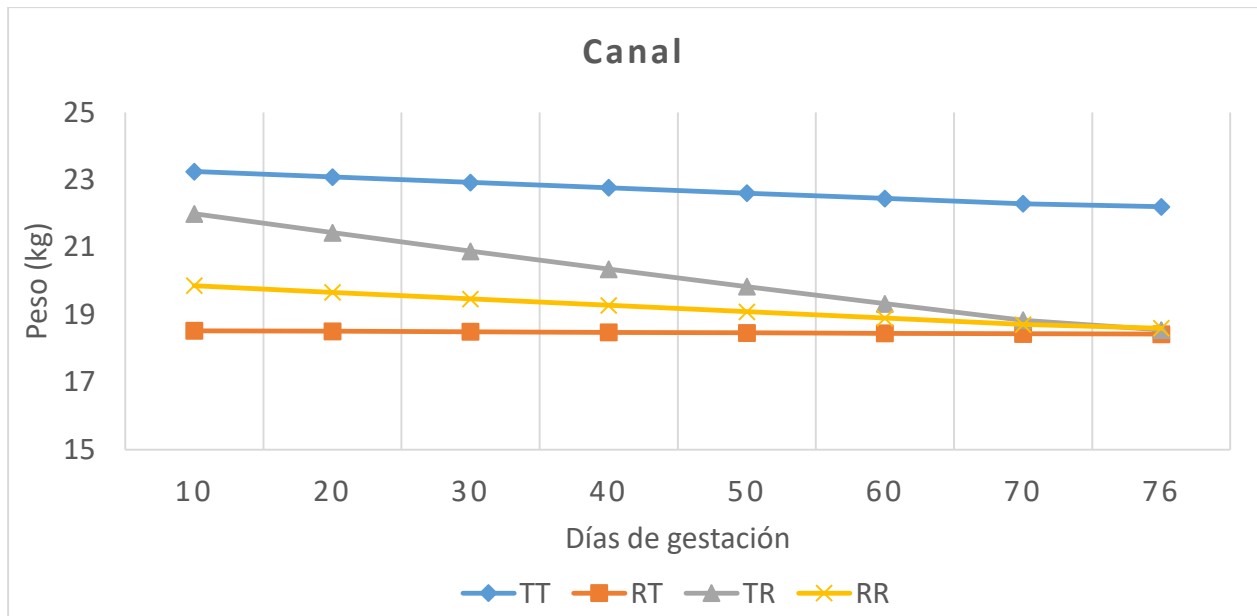


**Ilustración 4.** Representación del peso real calculado en ovejas del experimento

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la Ilustración 4 se puede observar que el TT, fue el que tuvo mayor peso en comparación a los tratamientos con RN, mientras que el tratamiento RT tuvo menor peso. En comparación con el PV de la ilustración 3 el comportamiento es similar siendo TT el que gana más peso debido a que no presenta restricción nutricional. Es importante resaltar, que al igual que los pesos de la canal (Ilustración 5), los pesos de los animales con restricción tienden a un valor único de convergencia. Parece ser que las hembras gestantes tienen un límite en su capacidad de reducción de la masa corporal.

➤ Comportamiento de la canal

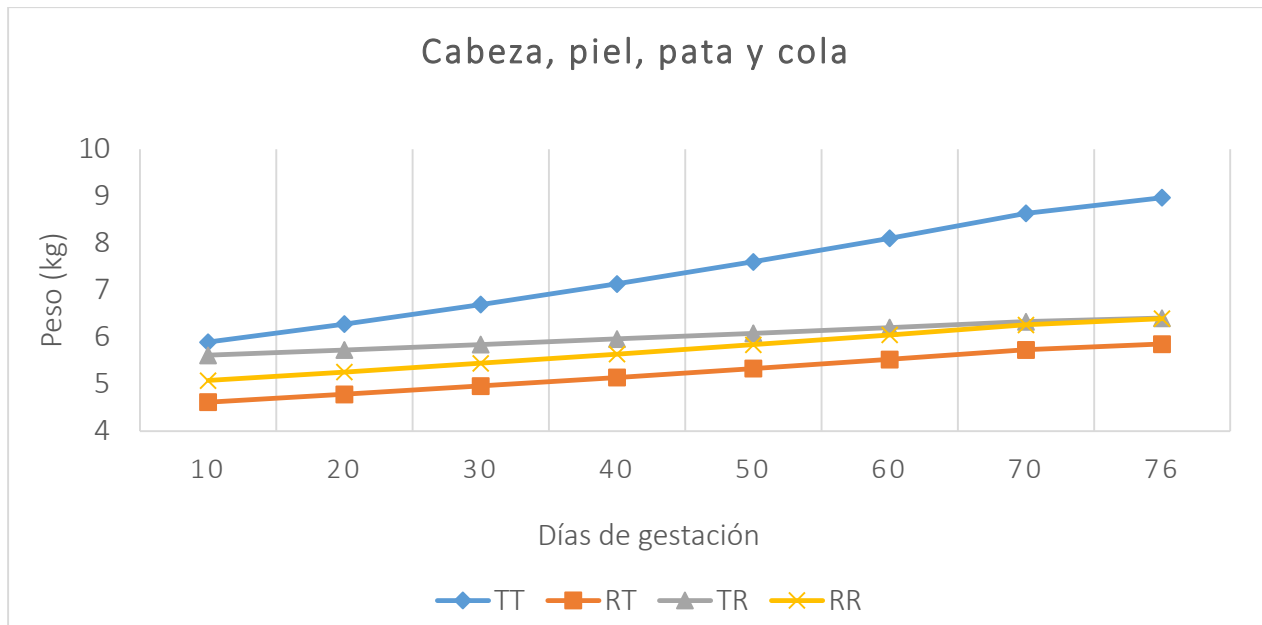


**Ilustración 5.** Comportamiento de la canal

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la ilustración 5 se observa que la canal de los tratamientos con restricción (RT, TR y RR) mostraron pérdida del peso de la canal al igual que TT, quien presentó las canales más pesadas, siendo su pérdida de peso menor en comparación a los otros tratamientos. (Núñez, *et al.* 2007) mencionan que un adecuado sistema de alimentación es importante para aumentar la ganancia de peso, calidad y conformidad de la canal, y que influirá de manera positiva sobre los rendimientos y composición de la canal. La disminución del peso de la canal del (TT), muestra que la dieta no cubría los requerimientos de nutrientes en las hembras gestantes, aunque el PV aumentó durante el inicio de la gestación por lo que en este tipo de trabajos es importante la evaluación de las canales para profundizar en los cambios metabólicos que ocurren en las ovejas.

➤ Comportamiento de CPPC (cabeza, piel, pata y cola)

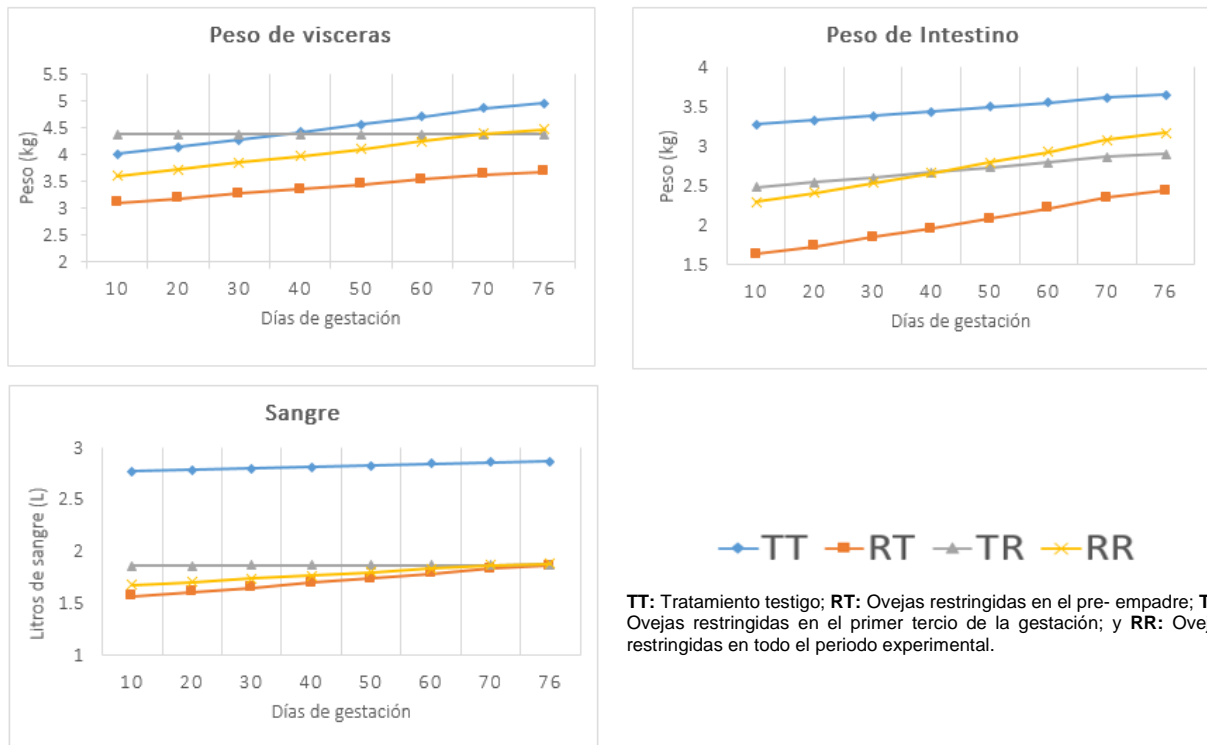


**Ilustración 6.** Comportamiento de los cambios de peso de CPPC (Cabeza, piel, pata y cola).

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la ilustración 6 se muestra como el TT tuvo ganancias de peso en comparación a RT, TR y RR, siendo RT el que obtuvo menor aumento en sus pesos de cabeza, piel, pata y cola. Esto podría deberse a que el flujo de energía estaba concentrado en sustentar y cumplir los requerimientos de gestación siendo que CPPC es de menor importancia para la madre ya que no genera gasto de energía en estas partes de su anatomía.

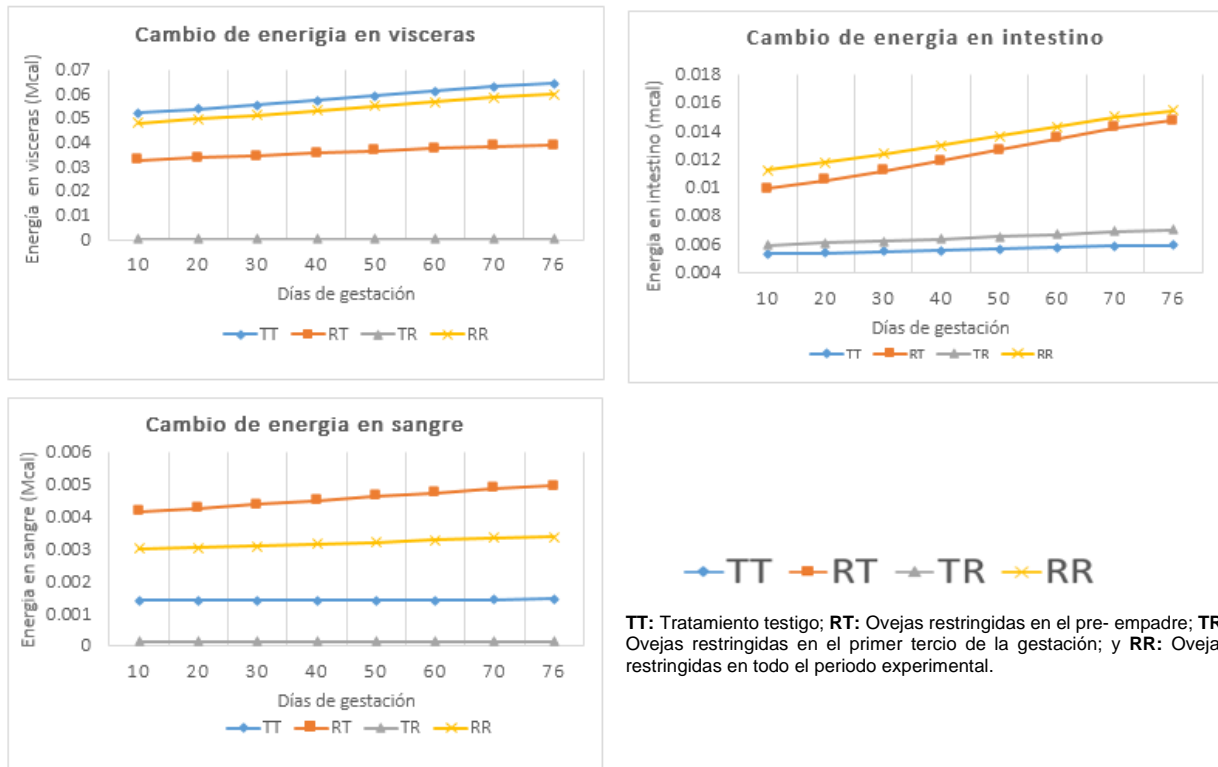
## 6.4. Comportamiento de las funciones fisiológicas



**Ilustración 7.** Comportamiento de los cambios de peso en cada uno de los tratamientos para vísceras, intestino y sangre.

En este trabajo se consideró que el cambio en vísceras, intestino y sangre puede ser un reflejo de los cambios fisiológicos en el animal ya que están íntimamente relacionados con procesos digestivos, nutricionales, hormonales, etc. En este sentido en la ilustración 7 se ve expresado el cambio de peso donde se observa que en cada uno de los tratamientos el que obtuvo mayor peso fue (TT) ya que no tuvo restricción nutricional. En todos los casos, los tratamientos siguieron el mismo patrón de incremento hasta el final del experimento. Con excepción del tratamiento TR en el caso de las vísceras y sangre. Es importante mencionar que el tratamiento testigo siempre obtuvo los pesos más altos en todos los tratamientos, tanto para las vísceras, intestino y sangre.

➤ Comportamiento del cambio de energía de vísceras, intestino y sangre

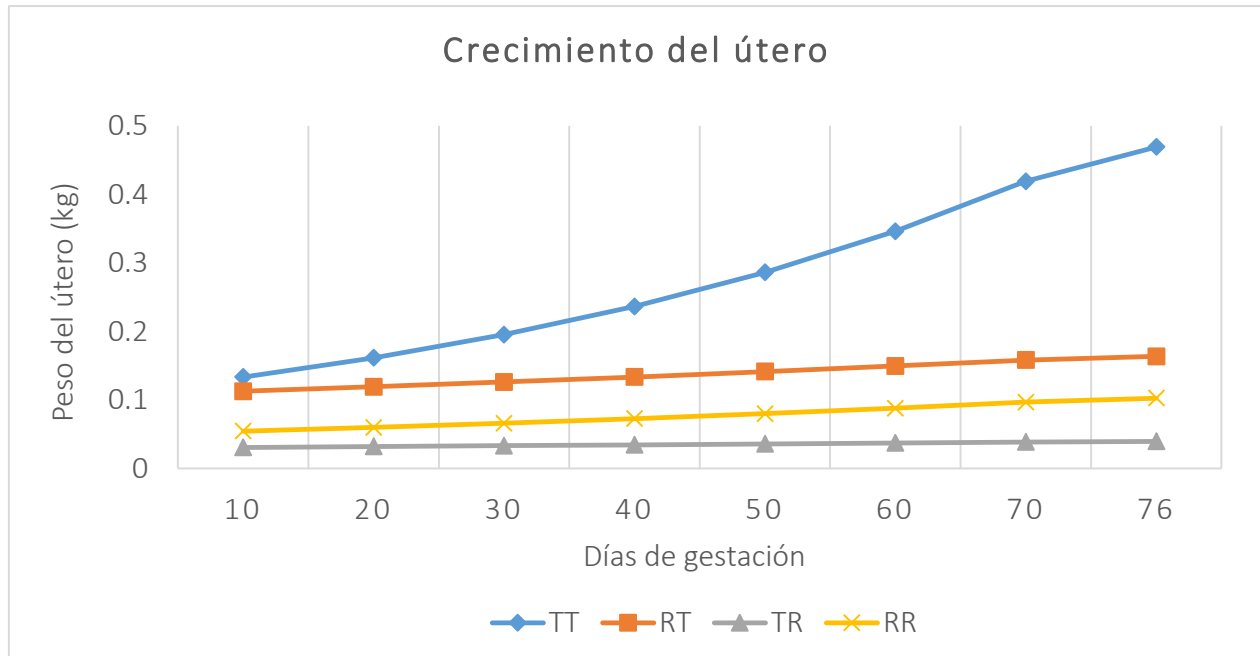


**Ilustración 8.** Comportamiento del cambio de energía en vísceras, intestino y sangre.

El tratamiento TR fue el que menor energía en sangre obtuvo (datos no publicados), esto podría deberse a que las ovejas no contaban desde el inicio del experimento con un volumen y calidad de sangre correcto para su salud, por otra parte el tratamiento RT fue el que mayor nivel de energía obtuvo y el TT tuvo menores niveles de energía en sangre que RT y RR pero mayores que TR, por lo tanto las borregas requirieron cubrir sus necesidades después del empadre, sin embargo no fueron adecuadas de acuerdo a Mantecon, *et al.* (1985), quienes encontraron un nivel de energía en sangre de 1.02 Mcal/kg, siendo los resultados de los cuatro tratamientos inferiores a este promedio. Lo anterior, podría deberse a que la nutrición que se le proporcione a los animales sabiendo los balances de materia y energía en dieta es importante y básico para que el animal pueda utilizar de manera eficiente cubriendo sus necesidades (Mantecon, *et al.* 1985).

## 6.5. Comportamiento de las funciones reproductivas.

### ➤ Comportamiento del crecimiento uterino

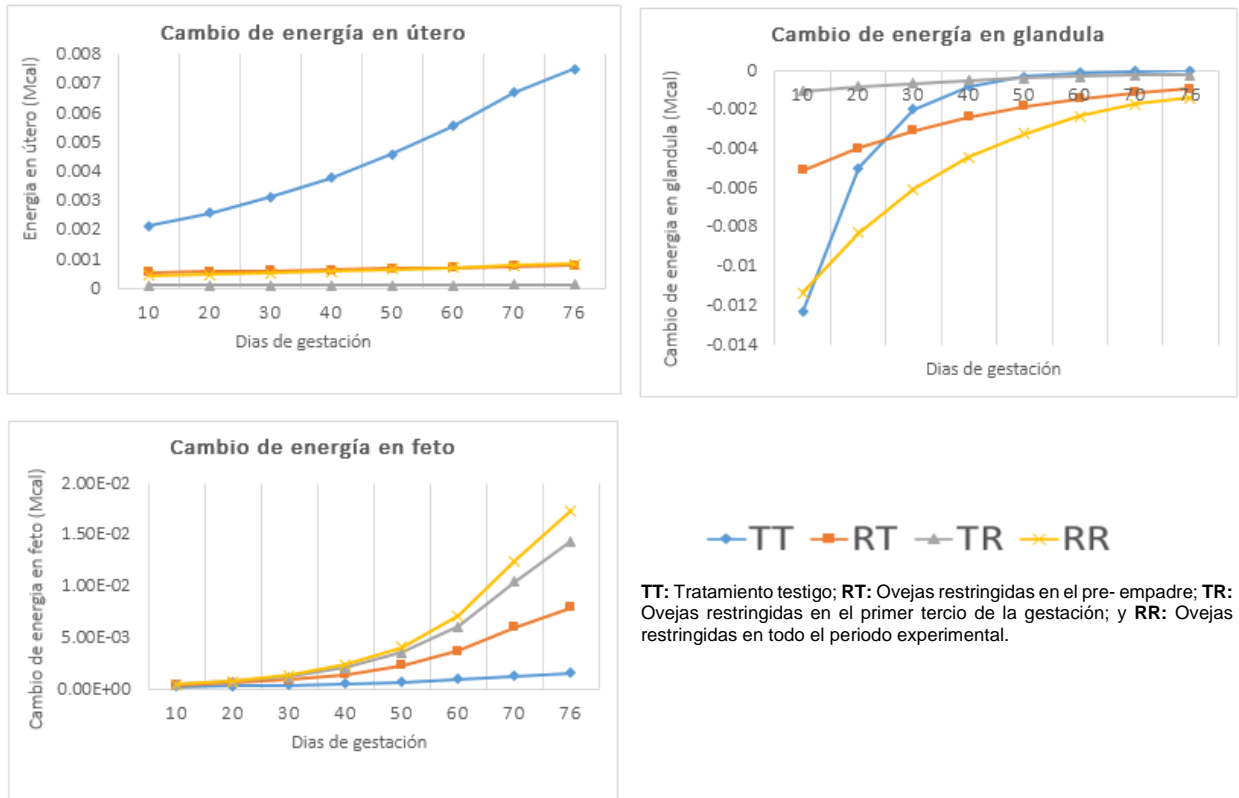


**Ilustración 9.** Comportamiento del crecimiento uterino

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la ilustración 9 se muestra como después del empadre en el día 40 las ovejas empiezan a ocupar mayor espacio en el útero, donde ya se encuentran en etapa de gestación gemelar; el tratamiento testigo (TT) a diferencia de RT, TR y RR mostraron un mayor crecimiento uterino, lo que probablemente estará relacionado con Gardner, *et al.* (2007), quienes indican que el crecimiento y desarrollo del feto dependerá de la capacidad uterina y este del factor nutricional que la madre reciba.

➤ Cambio de energía en el útero, glándula mamaria y feto



**Ilustración 10.** Cambio de energía en el útero, glándula mamaria y feto.

En la ilustración 10 se muestra el cambio de energía en útero y como mantuvo necesidad energética ya que solo en el tratamiento testigo (TT) aumento a partir de la gestación, donde el embrión requiere un suministro de energía por lo cual, el útero debe estar en condiciones para el desarrollo del feto. Rattray, *et al.* (1974) reportaron en sus estudios una energía en el útero para gestaciones múltiples de 0.00083979 Mcal/gr, por lo tanto, los tratamientos RT, TR y RR están muy por debajo de los niveles de energía, y TT es el que más se acerca aumentando hasta el día 76 ya que cuenta con una dieta sin restricción y puede aprovechar los nutrientes para las necesidades de producción que requiere el feto para su crecimiento.

Rattray, *et al.* (1974), muestran en sus resultados que la energía contenida en ubres para gestación múltiple corresponde a 0.00297 Mcal/gr lo que significa que en el presente trabajo los tratamientos se vieron afectados significativamente como consecuencia de la

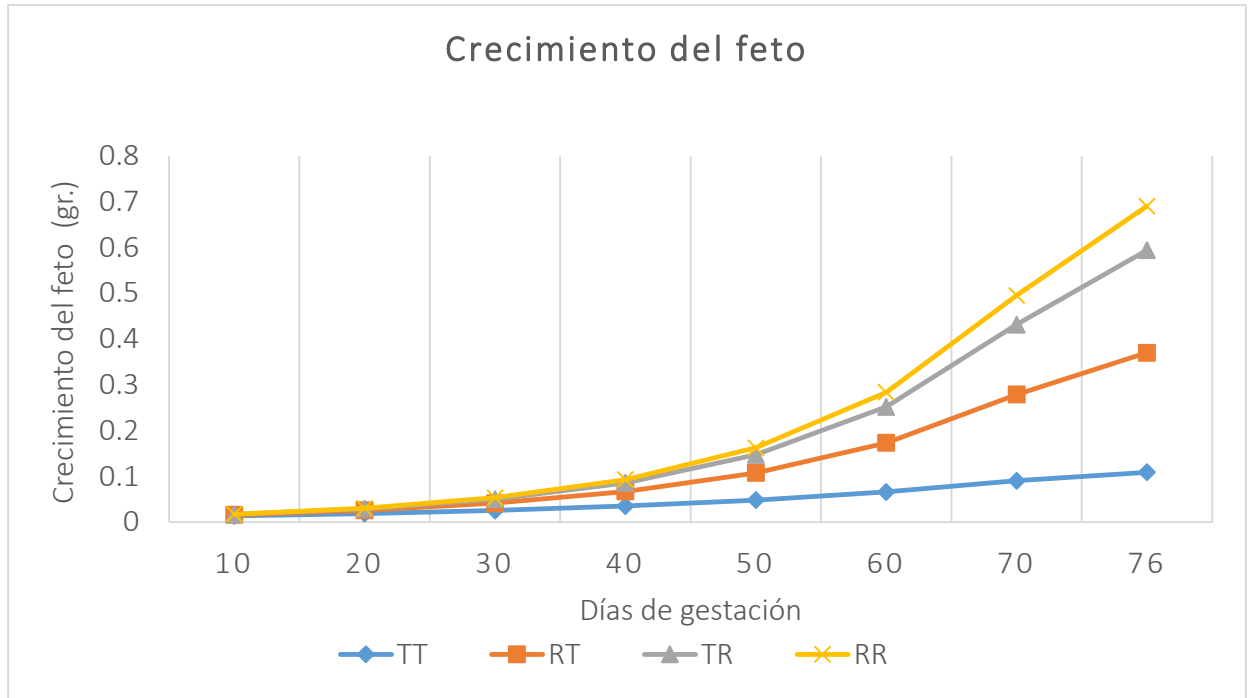
restricción de alimento con valores promedio de -0.003, -0.002, -0.001 y -0.005 para TT, RT, TR y RR respectivamente. Lo anterior es como consecuencia de la disminución del contenido de energía en ubres en todos los tratamientos, siendo TR el menos afectado ya que se mantiene constante sobre el mismo nivel de energía durante casi todo el tratamiento (datos sin publicar).

De acuerdo a lo observado anteriormente con el comportamiento de los cambios de energía en útero, feto y ubre podemos recalcar lo que menciona Canul, (2011), que, durante la etapa de gestación, las hebras ocupan mayor energía para cumplir con sus requerimientos y que se considera que el 65 al 75% de la energía metabolizable (EM) es usada por las madres, y de dicha energía el 70% es destinada a los costos del requerimiento energético para el mantenimiento, dejando poca energía para los procesos reproductivos.

Rattray, *et al.* (1974), mencionan que las necesidades energéticas de la preñez aumentan significativamente solo en el último trimestre de gestación y que antes de este los requerimientos de energía del feto son muy bajos. En el caso de gestaciones dobles, como es el caso de las gestaciones estudiadas, los requerimientos de energía serían mayores que en gestaciones simples. Por lo tanto, lo que se muestra en la figura 10 donde el crecimiento fetal y su requerimiento energético aumenta a partir del día 60 apoya lo que dicen Rattray, *et al.* (1974), que, si cumplen los requerimientos de mantenimiento materno, entonces los requisitos de energía fetal se cubrirán antes de que se produzca la deposición de energía materna. Siendo el tratamiento RR con mayor aumento de energía mediante el crecimiento fetal y TT no tuvo un aumento significativo esto podría deberse a que el 85% del desarrollo fetal sucede en el último tercio de la gestación y es donde el requerimiento nutricional es demandado para cubrir el aporte energético (Pereyra, *et al.* 2011).



➤ Comportamiento del feto durante el primer tercio de gestación

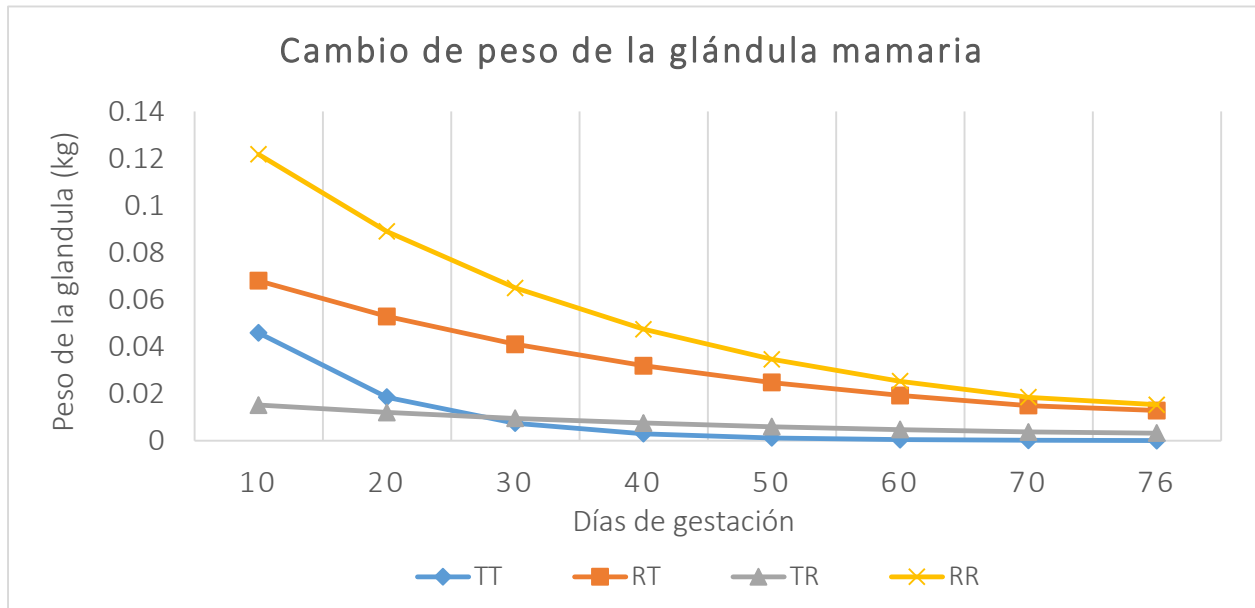


**Ilustración 11.** Comportamiento del Feto durante el primer tercio de la gestación

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la ilustración 11 se muestra el crecimiento del feto desde el día 40 hasta el 76, tiempo que vendría representando el primer tercio de gestación. Se puede observar que los fetos que tuvieron mayor peso fueron los del tratamiento restringido (RR) y el tratamiento testigo (TT), el cual no tuvo restricción nutricional y se mantuvo por debajo de los demás, esto podría deberse a que las ovejas fisiológicamente hacían uso de los nutrientes para destinarlos a la cría. Según Perez, (2016), el crecimiento y desarrollo del feto son los resultados de la nutrición que recibe la madre, donde un estado nutricional insuficiente en los primeros 30 días de gestación podrían llegar a provocar pérdidas embrionarias y bajo peso embrionario, por lo tanto, la eficiencia nutricional en esta etapa debe hacer que la borrega mantenga ligeras ganancias de peso para cubrir sus necesidades de mantenimiento, lo cual no ocurrió en ningún de los tratamientos según se discutió previamente.

➤ Comportamiento del cambio de peso en glándula mamaria

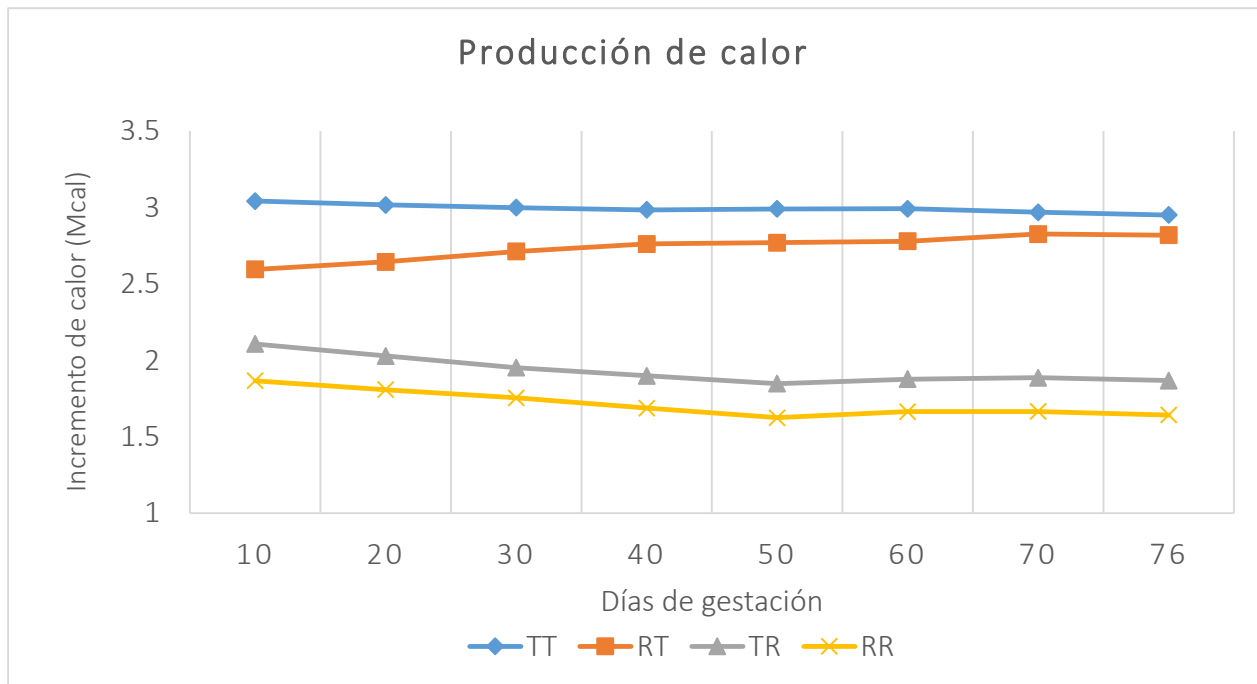


**Ilustración 12.** Comportamiento del cambio de peso de la glándula mamaria después del empadre.

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

Según Rattray *et al.* (1974), las ovejas alimentadas en niveles de nutrición más alto deberían tener mayor aumento de peso en glándulas mamarias ya que es un efecto sobre el contenido de grasa o la cantidad de tejido secretor o secreciones en la ubre. En la última etapa de gestación parte del aumento de peso de la ubre se debe a la acumulación de secreciones. Sin embargo, el tratamiento TT, sin restricción, no presentó glándulas con mayor peso. En la ilustración 12 se puede observar que el peso de la glándula mamaria disminuye después del empadre en todos los tratamientos, lo que podría significar que el nivel de nutrición que reciben las ovejas no satisface los requerimientos necesarios para cubrir la necesidad de la glándula para aumentar y ser eficiente, lo cual está en concordancia con la disminución del peso de la canal observada previamente.

➤ Comportamiento de la producción de calor



**Ilustración 13.** Comportamiento de la producción de calor.

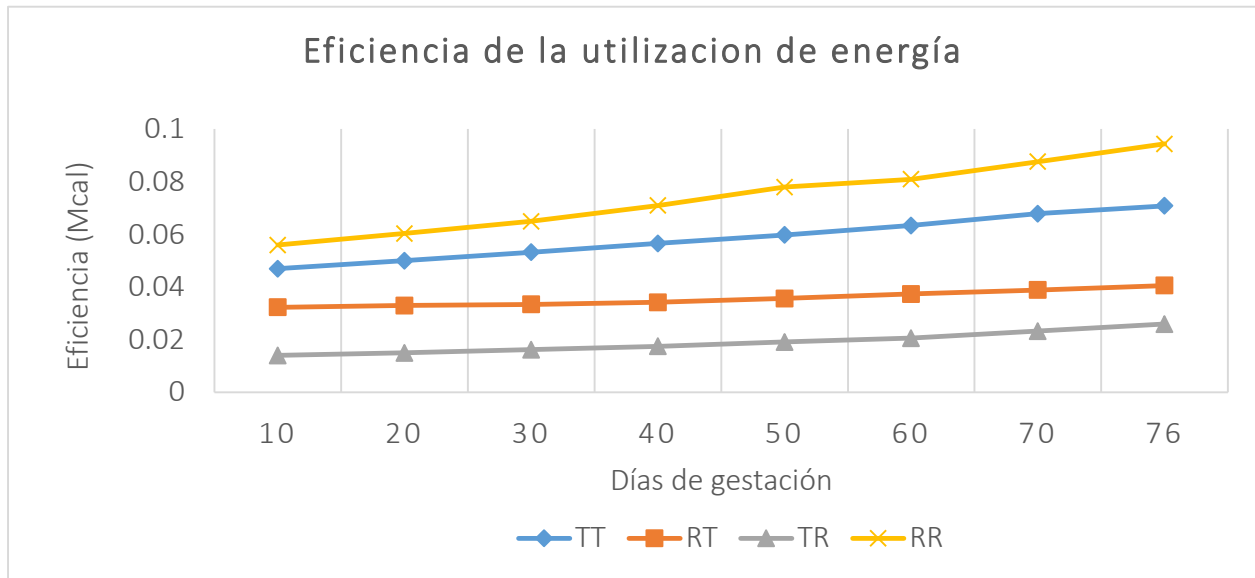
TT: Tratamiento testigo; RT: Ovejas restringidas en el pre- empadre; TR: Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y RR: Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

La eficiencia de la utilización de la energía se puede medir tanto arriba ( $K_i$ ), como abajo ( $K_m$ ) del consumo para mantenimiento, la cual está determinada por el ICA. A su vez, el total del ICA determina la cantidad de EM que el animal puede tener disponible para sus procesos de mantenimiento y producción (Ku, 1995), todo lo anterior esté ligado a la producción total de calor del animal. Por lo tanto, la producción de calor es el inicio de cualquier estudio de balance de energía.

Como se muestra en la ilustración 13, el calor del TT es superior a los tratamientos con RN y se mantiene constante con una ligera disminución hasta el final del experimento, sin embargo se observa que RT aumenta con intenciones de emparejarse al TT, mientras que para TR y RR el calor es menor, lo cual puede estar relacionado a una disminución del ICA, describiendo, probablemente, una mayor eficiencia para todos los tratamientos con restricción, confirmando un ajuste en la eficiencia de los tratamientos con restricción con respecto al testigo, o un consumo superior para TT.

## 6.6. Eficiencia de la utilización de la energía

### ➤ Eficiencia de la utilización de energía



**Ilustración 14.** Eficiencia de la utilización de la energía.

TT: Tratamiento testigo; RT: Ovejas restringidas en el pre-empadre; TR: Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y RR: Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

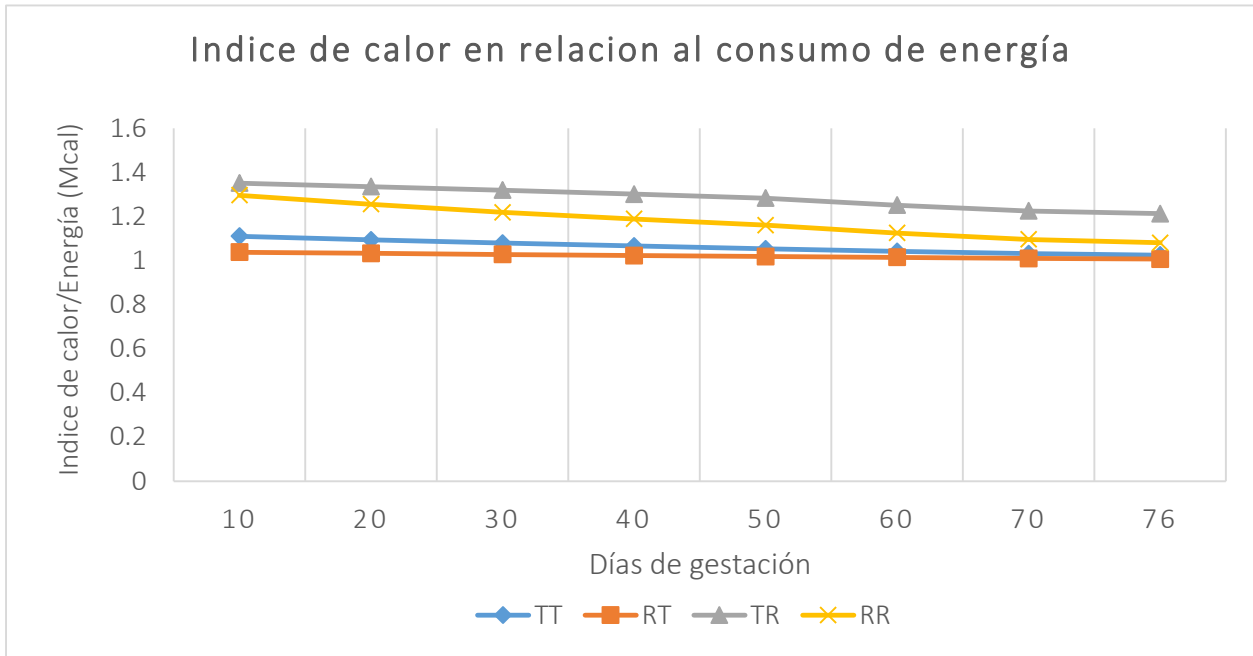
En la ilustración 14 se muestra por cada tratamiento obtenido en este trabajo que la utilización de energía fue en promedio 0.059, 0.036, 0.019 y 0.074 para TT, RT, TR y RR respectivamente. Donde los tratamientos TT y RR tienen la mejor respuesta de acuerdo a la eficiencia de energía. Es importante mencionar que, en el presente trabajo, la eficiencia simulada con el modelo es la razón de la energía que se deposita en el animal con respecto al total de la energía consumida más la que se obtiene de la degradación de los compuestos orgánicos en la oveja. Esto deja, aproximadamente, 95% de la energía obtenida por las ovejas gestantes para gastos de mantenimiento y producción. Si a esta energía se le resta lo obtenido por Chay-Canul, *et al.* (2016) donde se menciona que, independientemente de la dieta que se utilice la  $K_m$  (eficiencia de mantenimiento) en promedio es de 0.66, restan 30% de energía (interna y externa) para los procesos reproductivos. Lo anterior, en el presente estudio, es a costa de la energía obtenida por la degradación del músculo de la canal, grasa, útero y glándula mamaria.

Finalmente, es importante mencionar que en todos los casos la eficiencia energética mejoró durante el período de gestación estudiado, sin embargo la eficiencia fue mucho

menor en el tratamiento RR, que como se ha discutido anteriormente tiene un comportamiento diferente a los otros tratamientos con restricción.

### 6.7. Representación del incremento calórico

- Comportamiento del calor en relación al consumo de energía



**Ilustración 15.** Comportamiento del incremento calórico en relación al consumo de energía.

**TT:** Tratamiento testigo; **RT:** Ovejas restringidas en el pre- empadre; **TR:** Ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación; y **RR:** Ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

En la relación calor consumo de energía se puede observar que existió una disminución de la producción de calor en todos los casos definido en este trabajo, como la energía consumida menos los cambios de energía en el organismo de la oveja, tanto positivo como negativo. La disminución en la producción de calor puede considerarse como una adaptación energética tanto a la RN como a la gestación gemelar, haciendo el sistema biológico de las ovejas más eficientes en ambos casos.

### 6.8. Evaluación de la partición de la energía con el problema inverso:

En el cuadro 2 se puede apreciar los valores medios de la partición de la energía metabolizable para cada uno de los tratamientos obtenidos con la metodología de

problema inverso propuesto en el presente trabajo. En el cuadro se puede observar que el tratamiento TR fue el que más tuvo que hacer uso de la energía almacenada para cubrir sus requerimientos de energía (0.42 Mcal/día, 0.18%), lo que confirma una vez más que los animales de este tratamiento tuvieron problemas para cubrir sus requerimientos. Sin embargo, todos los animales tuvieron que hacer uso de este recurso para cubrir sus requerimientos, incluido el TT.

Es importante resaltar que el tratamiento RT es el que presentó la menor disminución de sus reservas (0.06 Mcal/días, 0.029%), inclusive menor que lo encontrado con TT (0.018 Mcal/día, 0.063%), lo cual puede estar relacionado a un aumento de la eficiencia energética como consecuencia de una mayor disminución del peso de la canal en el tratamiento RT que fue discutido previamente, y que puede generar una disminución de los requerimientos de energía de mantenimiento por las ovejas. Probablemente, este fenómeno no se ve reflejado en el tratamiento RR, ya que, aunque su producción de calor es la más baja de todas (1.68 Mcal/día), su bajo consumo impide un balance adecuado de nutrientes.

En términos absolutos, el testigo, TT, fue el que mejor aportó recursos energéticos para cumplir con todas sus funciones corporales (0.16 Mcal/día, 0.058%), sin embargo, en términos relativos, el tratamiento con restricción antes y después de empadre (0.12 Mcal/día, 0.075%) fue el que tuvo el valor más alto cuando se consideran todas las deposiciones de energía. No es de extrañarse si se considera que en términos absolutos tiene una degradación alta de compuestos orgánicos, compensada por bajo requerimientos de mantenimiento como consecuencia de una canal pequeña, que fue reducida durante el periodo de restricción previo al empadre.

El tratamiento TR, en términos absolutos y relativos, fue el que más problemas presentó para aportar energía para el conjunto de las funciones metabólicas, fisiológicas y reproductivas de las ovejas (0.838 Mcal/día, 0.016%). Lo que seguramente, repercutirá en sus parámetros reproductivos. Lo anterior puede ser una consecuencia directa de la restricción alimenticia o por dificultades para realizar las funciones fisiológicas, ya que el mayor aporte energético en este rubro para los otros animales (70% aproximadamente), fue para las vísceras, entre ellos el hígado. En todos los otros tratamientos con restricción,

los valores absolutos y relativos fueron ligeramente menores a los encontrados para el tratamiento TT, pero similares entre ellos. Los tratamientos RT y RR tuvieron sus mayores diferencias en la deposición de energía en CPPC que por su poca participación en otras funciones corporales puede no representar un problema para la producción.

**Cuadro 2.** Partición de la energía metabolizable en ovejas en el primer tercio de la gestación para la evaluación de la restricción del alimento.

<b>Tratamientos:</b>	<b>TT</b>	<b>RT</b>	<b>TR</b>	<b>RR</b>
Consumo (Mcal/d)	2.59	2.02	1.93	1.37
Degradación de compuestos	0.18	0.06	0.42	0.21
Consumo + Degradación (Mcal/d)	2.77	2.08	2.35	1.58
Producción de calor (Mcal/d)	-2.81	-2.09	-2.39	-1.68
Perdida de energía de CPPC (Mcal/d)	-0.09	-0.037	-0.024	-0.04
Perdida energética de órganos relacionados a funciones fisiológicas (Mcal/d)	-0.065	-0.052	-0.0066	-0.070
Perdida energética de órganos relacionados a funciones reproductivas (Mcal/d)	-0.0054	-0.0046	-0.007	.0009
Degradación de compuestos (%)	0.063	0.029	0.18	0.13
Producción de calor (%)	-101	-100	-101	-106
Perdida energética de CPPC (%)	-3.25	-1.78	-1.02	-2.50
Perdida energética de órganos relacionados a funciones fisiológicas (%)	-2.35	-2.50	-0.028	-4.40
Perdida energética de órganos relacionados a funciones reproductivas (%)	-0.20	-0.22	-0.30	-0.57
Error	3.99627	2.81503	2.88446	1.58492

**TT:** testigo, **RT:** ovejas restringidas en el pre-empadre, **TR:** ovejas restringidas en el primer tercio de la gestación y **RR:** ovejas restringidas en todo el periodo experimental.

Finalmente, es importante mencionar que el problema inverso que se implementó en el presente trabajo permitió una evaluación detallada de los procesos que ocurren en los animales cuando se restringe el alimento, ya que mediante el ajuste de múltiples curvas se puede no solo obtener valores de parámetros de utilidad para la evaluación de los procesos de deposición de energía o degradación de compuestos orgánicos, sino simultáneamente obtener la solución numérica de múltiples curvas que describen el fenómeno como un todo. También, el cálculo de variables auxiliares que ayuden a evaluar la eficiencia energética de los animales. Lo anterior no se puede lograr únicamente con una evaluación estadística o una hoja de cálculo, ya que implica un sistema de ecuaciones diferenciales y un multi-ajuste, así como operaciones logísticas.



## 7. CONCLUSIONES

El uso de la metodología del problema inverso es una metodología de utilidad para la evaluación de la estimación de la partición y eficiencia de la energía en las ovejas gestantes. Mediante esta metodología se comprobó que la energía no se pierde en un sistema, solo se transforma para ser usada donde se tenga deficiencia.

Se comprobó también que la dieta experimental, incluido el tratamiento testigo, fue incapaz de cubrir los requerimientos de la madre para aportar el flujo necesario para que la cría se desarrolle en un ambiente sano, aun cuando se presentaron signos de mejoras en la utilización de la energía. El tratamiento testigo fue el que menos problemas tuvo para cubrir los requerimientos necesarios para sus funciones metabólicas, fisiológicas y reproductivas, siendo el tratamiento con restricción, únicamente en la gestación, el que mayores problemas tuvo para cubrir sus requerimientos con probables efectos en sus funciones orgánicas, incluida la reproductiva.

El tratamiento con restricción pre empadre fue el más balanceado con respecto a la eficiencia energética, cobertura de requerimientos y movilización de depósitos, a diferencia del tratamiento con restricción pre y post empadre, que, aunque tuvo niveles altos de eficiencia y no presentó efectos significativos en sus funciones orgánicas, presentó una gran movilización de reservas que pudiera afectar en etapas tardías de gestación.

## 8. LITERATURA CITADA

Arteaga C. J. D. (2014). Situación actual del mercado de los productores Ovinos. Hermosillo, Sonora, México.

Bloomfield, F. H., Oliver, M. H., Hawkins, P., Campbell, M., Phillips, D. J., Gluckman, P. D., Challis, R. G. J. & Harding, J. E. (2003). A periconceptional nutritional origin for noninfectious preterm birth. *Science* 300(5619), 606-606.

Castro, F. A. B. D., Ribeiro, E. L. D. A., Mizubuti, I. Y., Silva, L. D. D. F. D., Barbosa, M. A. A. D. F., Sousa, C. L. D., Paiva F. H. P. D. & Koritiaki, N. A. (2012). Influence of pre and postnatal energy restriction on the productive performance of ewes and lambs. *Revista brasileira de zootecnia*, 41(4), 951-958.

Carrillo, L., Segura-Correa, J. C., & Sarmiento, F. (1997). Algunos factores que determinan el periodo de gestación en ovejas de pelo. *Revista biomed.* 8, 15-20.

Castellaro, G. G., Orellana, C. M., & Escanilla, J. P. (2015). Manual básico de nutrición y alimentación de ganado ovino. 4-56. Chile.

Castro Marín, J. M., & Guerrero Cárdenas, A. (2010). Ovinocultura para pequeños y medianos productores en la Península de Yucatán. *FIRA*, 10, 63.

Chay-Canul, A. J. (2011). Partición de la energía en borregas Pelibuey adultas alimentadas con tres niveles de energía en el trópico. Mérida, Yucatán, México.

Chay-Canul, A. J., Magaña-Monforte, J. G., Chizzotti, M. L., Piñeiro-Vázquez, A. T., Canul- Solís, J. R., Ayala-Burgos, A. J., Ku-Vera J. C. & Tedeschi, L. O. (2016). Requerimientos energéticos de ovinos de pelo en las regiones tropicales de Latinoamérica. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 7(1).

Chay-Canul, A. J., Ayala-Burgos, A. J., Kú-Vera, J. C., Magaña-Monforte, J. G., & Tedeschi, L. O. (2011). The effects of metabolizable energy intake on body fat depots of adult Pelibuey ewes fed roughage diets under tropical conditions. *Tropical animal health and production*, 43(5), 929-936.

Dunlap, K. A., Brown, J. D., Keith, A. B., & Satterfield, M. C. (2015). Factors controlling nutrient availability to the developing fetus in ruminants. *Journal of animal science and biotechnology*, 6(1), 16.

Edwards, L. J., & McMillen, I. C. (2002). Impact of maternal undernutrition during the periconceptional period, fetal number, and fetal sex on the development of the hypothalamo-pituitary adrenal axis in sheep during late gestation. *Biology of reproduction*, 66(5), 1562-1569.

Gardner, D. S., Buttery, P. J., Daniel, Z., & Symonds, M. E. (2007). Factors affecting birth weight in sheep: maternal environment. *Reproduction*, 133(1), 297-307.

Garrett, W. N., Meyer, J. H., & Lofgreen, G. P. (1959). The comparative energy requirements of sheep and cattle for maintenance and gain. *Journal of animal science*, 18(2), 528-547.

Yury Tatiana Granja, S., Jefferson Cerquera, G., & Omar Fernández, B. (2012). Factores nutricionales que interfieren en el desempeño reproductivo de la hembra bovina. *Revista colombiana de ciencia animal-RECIA*, 4(2), 458-472.

Hafez, E. S. E., & Hafez, B. (2007). Reproducción e inseminación artificial en animales. McGraw-hill.

Herrera, J., Jordán, H., & Senra, A. F. (2010). Aspectos del manejo y alimentación de la reproductora ovina Pelibuey en Cuba. Instituto de Ciencia Animal. *Revista cubana de ciencia agrícola*, 44(0), 3.

Vera, J. C. K. (1995). El incremento calórico de alimentación en los rumiantes. *Revista veterinaria*. México, 26(3), 263-269.

Cal-Pereyra, L., Benech, A., Da Silva, S., Martin, A., & González-Montaña, J. R. (2011). Metabolismo energético en ovejas gestantes esquiladas y no esquiladas sometidas a dos planos nutricionales: Efecto sobre las reservas energéticas de sus corderos. *Archivos de medicina veterinaria*, 43(3), 277-285.

Pérez Lizaur, A. B., Palacios González, B., Castro Becerra, A. L., & Flores Galicia, I. (2008). *Sistema mexicano de alimentos equivalentes*. México.

Macey, R., Oster, G., & Zahnley, T. (2010). Berkeley Madonna user's guide versión 8.3.18. Berkeley. *Department of molecular and celular biology*. University of california.

Mantecón, A. R., Peláez, R., & Ovejero, F. (1985). Composición química y contenido energético de los corderos de raza churra a los dos días de edad. *Facultad de medicina veterinaria y zootecnia de León* 31, 161-169.

McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (2011). Nutrición animal. (7), 235-259. Acribia.

Menke, W. geophysical Data Analysis. "Discrete Inverse Theory" 1989. Orlando, Florida. *Academic press*. Xii, 260.

Ngwerume, F., & Mao, I. L. (1992). Estimation of residual energy intake for lactating cows using an animal model. *Journal of dairy science*, 75(8), 2283-2287.

CSIRO. (2007). Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO publishing.

Núñez, A. C., Mencio, P. R., Renteria, I. D., Solís, A. S., & Ortega, M. L. (2007). Influencia de la suplementación sobre la ganancia de peso y calidad de la canal en borregos Dorper/Katahdin. *Revista UDO agrícola*, 7(1), 245-251.

Pedernera, M., Vázquez, R., Orihuela, J., Aguirre, V., Flores, F. L. Pérez, & Romero, D. L. (2014). Efecto de la suplementación nutricional durante el último tercio de la gestación en el comportamiento del cordero en ovejas de raza santa cruz. *Asociación peruana de reproducción animal*, 4(1), 96-98.

Partida de la Peña, J. A., Braña Varela, D., Jiménez Severiano, H., Ríos Rincón, F. G., & Buendía Rodríguez, G. (2013). Producción de carne ovina.

Pérez, A. J. (2016). Restricción nutricional en el periodo periconcepcional y desarrollo fetal temprano en ovejas de pelo. Bermejillo, Durango, México.

Rahman, A. N. M. A., Abdullah, R. B., & Wan-Khadijan, W. E. (2008). Gametogenesis, fertilization, and early embryogenesis in mammals with special reference to goat: A review. *Journal of biology science*, 8(7), 1115-1128.

Rattray, P. V., Garrett, W. N., East, N. E., & Hinman, N. (1974). Growth, development and composition of the ovine conceptus and mammary gland during pregnancy. *Journal of animal science*, 38(3), 613-626.

Reyes, R. B., & Carrocera, L. F. (2015). Programación metabólica fetal. *Perinatología y reproducción humana*, 29(3), 99-105.

Spencer, T. E., & Bazer, F. W. (2004). Conceptus signals for establishment and maintenance of pregnancy. *Reproductive biology and endocrinology*, 2(1), 49.

Stella, I. (2018). *Systems thinking for educational research*. Recuperado el 17 de 01 de 2018, de <http://www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx>

Vicente-Pérez, R., Avendaño-Reyes, L., Álvarez, F. D., Correa-Calderón, A., Meza-Herrera, C. A., Mellado, M., Quintero J. A., & Macías-Cruz, U. (2015). Comportamiento productivo, consumo de nutrientes y productividad al parto de ovejas de pelo suplementadas con energía en el parto durante verano e invierno. *Archivos de medicina veterinaria*, 47(3), 301-309.

Vargas-Villamil, L. M., & Tedeschi, L. O. (2014). Potential integration of multi-fitting inverse problem and mechanistic modelling approaches to applied research in animal science: a review. *Animal production science*, 54(12), 1905-1913.

Vargas-Villamil, L. M. (2003). Desarrollo de un modelo dinámico mecanístico para la estimación de parámetros de crecimiento bacteriano ruminal mediante una técnica de doble ajuste. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Yucatán (México).

Webster, A. J. F. (1977). Selection for leanness and the energetic efficiency of growth in meat animals. *Proceedings of the nutrition society*, 36(1), 53-59.