



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
Y DE LA SALUD ANIMAL

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN LÁCTEA EN OVEJAS EN UN SISTEMA
ORGÁNICO A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL

PRESENTA

JUAN CARLOS ÁNGELES HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:

MANUEL GONZÁLEZ RONQUILLO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

AURORA HILDA RAMÍREZ PÉREZ

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. AGOSTO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
Y DE LA SALUD ANIMAL

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN LÁCTEA EN OVEJAS EN UN SISTEMA
ORGÁNICO A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL

PRESENTA

JUAN CARLOS ÁNGELES HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:

MANUEL GONZÁLEZ RONQUILLO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

AURORA HILDA RAMÍREZ PÉREZ

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. AGOSTO 2017

Índice

| | |
|---|------------|
| Agradecimientos | I |
| Resumen | II |
| Abstract | IV |
| Publicaciones | VI |
| Lista de cuadros | X |
| Lista de figuras | XIV |
| CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS DE LA LECHE OVINA Y FACTORES QUE LA AFECTAN: UN META-ANÁLISIS Y META-REGRESIÓN | |
| Producción de leche ovina en México y el mundo..... | 2 |
| Materiales y métodos..... | 9 |
| Resultados y discusión..... | 11 |
| Conclusión..... | 27 |
| Bibliografía..... | 28 |
| CAPÍTULO II. PRODUCCIÓN ORGÁNICA DE LECHE DE OVEJA | |
| Resumen..... | 34 |
| Introducción..... | 35 |
| Ganadería orgánica..... | 36 |
| Producción de leche orgánica..... | 42 |
| Producción de leche orgánica de oveja..... | 38 |
| Producción de leche orgánica de oveja en México..... | 41 |
| Conclusiones..... | 42 |

| | |
|---|-----|
| Referencias..... | 43 |
| CAPÍTULO III. MANEJO EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE OVINA ORGÁNICA | |
| Resumen..... | 49 |
| Introducción..... | 49 |
| Producción orgánica de leche ovina..... | 52 |
| Conclusiones..... | 61 |
| Referencias..... | 68 |
| CAPÍTULO IV. PRODUCCIÓN LÁCTEA Y MODELACIÓN DE LA CURVA DE LACTACIÓN | |
| Producción láctea..... | 72 |
| Curva de lactación..... | 79 |
| Modelación de la curva de lactación..... | 82 |
| CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL MODELO DE WOOD PARA EL ANÁLISIS DE CURVAS DE LACTACIÓN DE OVEJAS BAJO UN SISTEMA ORGÁNICO | |
| Resumen..... | 115 |
| Introducción..... | 115 |
| Materiales y métodos..... | 116 |
| Resultados..... | 117 |
| Discusión..... | 118 |
| Conclusiones..... | 120 |
| Agradecimientos..... | 120 |
| Referencias..... | 120 |

CAPÍTULO VI. APLICACIÓN DE UN MODELO MECANÍSTICO PARA ANALIZAR LOS FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA CURVA DE LACTACIÓN EN OVEJAS LECHERAS EN MÉXICO

| | |
|---------------------------|-----|
| Resumen..... | 123 |
| Introducción..... | 123 |
| Materiales y métodos..... | 125 |
| Resultados..... | 126 |
| Discusión..... | 130 |
| Conclusiones..... | 133 |
| Referencias..... | 133 |

CAPÍTULO VII. EFECTO DEL CRUZAMIENTO SOBRE LA PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LECHE DE OVEJA BAJO UN MANEJO ORGÁNICO

| | |
|---------------------------|-----|
| Resumen..... | 152 |
| Introducción..... | 157 |
| Materiales y métodos..... | 153 |
| Resultados..... | 153 |
| Discusión..... | 154 |
| Conclusiones..... | 155 |
| Agradecimientos..... | 155 |
| Referencias..... | 156 |

CAPÍTULO VIII. EFECTO DEL PESO VIVO PRE Y POSTPARTO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE LECHE DE OVEJAS EAST FRIESIAN

| | |
|--|------------|
| Resumen..... | 158 |
| Introducción..... | 158 |
| Materiales y métodos..... | 159 |
| Resultados..... | 160 |
| Discusión..... | 162 |
| Conclusiones..... | 166 |
| Agradecimientos..... | 166 |
| Referencias..... | 167 |
| CAPITULO IX. CONCLUSIONES GENERALES..... | 169 |
| CAPITULO X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 175 |
| CAPITULO XI. APÉNDICES..... | 193 |

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincera gratitud a mi director de tesis el Dr. Manuel González Ronquillo por el continuo apoyo en mi formación Doctoral; por sus oportunas observaciones, consejos y estimulantes discusiones.

Además, quiero agradecer al resto de mi comité tutorial: la Dra. Hilda Ramírez Pérez, por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo y al mismo tiempo regalarme su amistad; al Dr. Octavio Castelán, por sus valiosos comentarios y observaciones que permitieron ampliar mi investigación hacia distintas perspectivas.

Muchas gracias al Dr. Benito Albarrán, Dr. Hugo Montaldo e Ing. Pablos Hach por compartir conmigo su pasión en la modelación matemática y estadística. Gracias a los amigos que conocí en el camino (Elías Vázquez, Virgilio Ambriz, Augusto Lizarazo y Mireya Juárez).

Mi reconocimiento a mis padres y resto de mi familia por su apoyo y soporte. Finalmente, quisiera agradecer a mi querida Lili, por su paciencia, amor, motivación y acompañarme de la mano a través de esta aventura.

GRACIAS

Resumen

La modelación de la curva de lactación provee de información útil para el mejoramiento del manejo nutricional, reproductivo y económico de los sistemas de producción de leche; además, permite la predicción de rendimientos lácteos futuros y el ajuste de lactaciones incompletas, indispensable en programas de mejoramiento genético. Los sistemas de producción de leche de oveja es un actividad pecuaria importante en regiones de Asia y el Mediterráneo. En Latinoamérica el desarrollo de la ovinocultura enfocada en la producción de leche presenta un desarrollo incipiente, apuntando a la diversificación de los productos ofrecidos y buscando alternativas para brindarles un valor agregado, entre ellas destaca la implementación de sistemas orgánicos de producción pecuaria. La producción y composición química de la leche ovina puede ser modificada a través del manejo nutricional, principalmente mediante la manipulación de la relación Forraje:Concentrado y la adición de grasas protegidas en la ración, como lo muestra la revisión analítica del Capítulo I. Los sistemas de producción orgánicos, debido a las regulaciones necesarias para su certificación, muestra niveles y patrones de producción que difieren a los mostrados en sistemas convencionales. Por tal motivo, es necesario al análisis de las curvas de lactación de estos sistemas ovinos mediante la modelación matemática. En el Capítulo V un modelo empírico de curva de lactación fue aplicado a lactaciones ovinas en sistemas orgánicos, mostrando un ajuste razonable, sin embargo tuvo dificultades en el ajuste de rendimientos de curvas atípicas de lactación. Los modelos mecanísticos de curva de lactación proveen una aproximación biológica del proceso de lactación, a través de la interpretación de sus parámetros, lo cual permite explicar parcialmente la dinámica celular mamaria y como ésta se ve afectada por factores ambientales tales como rebaño, número de parto, tipo de parto y época de parto (Capítulo VI). El grupo genético presentó efectos significativos ($P < 0.05$) sobre la producción y composición química de la leche de ovejas en sistemas orgánicos; además, diferencias en el patrón de curva de lactación entre grupos genéticos fueron observados, principalmente en el parámetro b del modelo de Wood, que

representa la fase de ascenso de la curva de lactación (Capítulo VII). En el capítulo VIII un modelo mecanístico fue utilizado para analizar el efecto del peso vivo sobre la producción láctea en ovejas East Friesian, concluyendo que el peso vivo durante la gestación y lactación es un indicador adecuado, a nivel de granja, para mejorar los rendimientos productivos en ovejas lecheras. La modelación de la curva de lactación permite analizar los diversos factores que afectan el proceso de producción láctea en sistemas ovinos. La elección del modelo de ajuste de curva dependerá de los objetivos iniciales, características de la base de datos y profundidad en la comprensión del proceso biológico; sin embargo, el conocimiento del elegante proceso de síntesis de leche es necesario para la interpretación adecuada de los modelos empíricos y mecanísticos.

Abstract

The modeling of the lactation curve provides useful information for improving the nutritional, reproductive and economic management of milk production systems; In addition, it allows the prediction of future milk yields and fit of incomplete lactations, indispensable in genetic breeding programs. Sheep milk production systems are a major livestock activity in regions of Asia and Mediterranean. In Latin America, the development of dairy sheep flocks shows an incipient development, focus at the diversification of products offered and seeking alternatives to provide them with an added value, among them the implementation of organic livestock production systems. The production and chemical composition of ovine milk can be modified through nutritional management, mainly by manipulating the Forage:Concentrate ratio and the addition of protected fat in the ration, as shown in the analytical review of Chapter I. The organic production, due to the necessary regulation for its certification, shows levels and patterns of production that differ from those shown in conventional systems. For this reason, it is necessary to analyze the lactation curves of these sheep systems through mathematical modeling. In Chapter V an empirical model of lactation curve was applied to ovine lactations in organic systems, showing a reasonable fit, however had difficulties in fit yields of atypical lactation curves. The mechanistic models of lactation curve provide a biological approach to the lactation process, through the interpretation of its parameters, which partially explains the mammary cell dynamics and as it is affected by environmental factors such as flock, number of lambing, type of lambing and season of lambing (Chapter VI). The genetic group showed significant effects ($P < 0.05$) on the production and chemical composition of sheep milk in organic systems; In addition, differences in the lactation curve pattern between genetic groups were observed, mainly in parameter b of the Wood model, which represents the rise phase of the lactation curve (Chapter VII). In Chapter VIII a mechanistic model was used to analyze the effect of live weight on dairy production in East Friesian sheep, concluding that live weight during gestation and lactation is an adequate indicator, at farm level, to improve yields of dairy sheep.

The modeling of the lactation curve allows analyzing the various factors affecting the milk production process in sheep systems. The choice of the curve-fitting model will depend on the initial objectives, database characteristics and depth in the understanding of the biological process; however, knowledge of the elegant process of milk synthesis is necessary for the proper interpretation of empirical and mechanistic models.

Publicaciones

Artículos científicos

- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Radic, S., Vera-Arias, M.A., Echeverría-Pérez, R., Castelán-Ortega, O.A., Ramírez-Pérez, A.H., Ronquillo, M.G. 2017. Effect of live weight pre- and post-lambing on milk production of East Friesian sheep. *Italian Journal of Animal Science*.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Pérez-Ramirez, A.H., Pérez-Rocha, J.M., Ronquillo, M.G. 2014. Production of organic sheep milk. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17, 49-62.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán, O.A.O., Albarran-Portillo, B., Montaldo, H., Ronquillo, M.G. 2014. Application of the Wood model to analyze lactation curves of organic dairy sheep farming. *Animal Production Science*. 54, 1609–1614
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán, O.A.O., Ramirez-Perez, A.H., Ronquillo, M.G. 2014. Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Animal Production Science*. 54, 1641–1645.

Capítulo de libro

- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán O.A.O., Radic, S., Ángeles, S.C., Ramírez-Pérez, A.H., Ronquillo, M.G. 2016. *Organic Dairy Sheep Production Management*. En: Organic Farming. ISBN 978-953-51-4582-0. Intech Press.

Resúmenes en congresos internacionales

- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Radic Schilling, S., Vera Arias, A.M., Echeverría P., Castelán, O.O.A., Gonzalez Ronquillo, M. Mechanistic model to analyze the effect of body weight and milk production in dairy sheep. 67th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Belfast. Ireland.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Radic S., Vera, A.M.A, Echeverría P., Castelán, O.O.A., Ronquillo, M.G. Relationship between body weight and milk production in dairy sheep. Proceedings of British Society of Animal Science. 2016 Advances in Animal Biosciences, Chester, UK.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Radic S.S., Vera A.M.A., Echeverría P., Castelán O.O.A., González R.M., Ramírez-Perez. A.H. 2015. Efecto del peso vivo pre y post-parto sobre la producción láctea y patrones de la curva de lactación en ovejas East Friesian. XXIV Congreso de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal (ALPA). Puerto Varas, Chile.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Albarrán-Portillo, B., Ramirez-Perez, A.H., Lizarazo-Chaparro A.C., Castelán, O.A.O., Ronquillo, M.G. 2015. Application of a mechanistic model to analyse the environmental factors that affect lactation curves of dairy sheep. Proceedings of the British Society of Animal Science, Chester, UK.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Ronquillo M.G. 2014. Comparing the milk production and characteristics of lactation curves, in organic and conventional dairy sheep farms in Mexico. International Symposium on Food Safety and Quality: Applications of Nuclear and Related Techniques. IAEA. Vienna Austria. 10–13 November 2014.
- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán, O.A.O., Albarrán-Portillo, B., Montaldo, H., Ronquillo. M.G. Application of the Wood model to analyze lactation curves of organic dairy sheep farming. 2014. International Symposium on the Nutrition of Herbivores/International Symposium on Ruminant Physiology (ISNH/ISRP). Canberra Australia.

- **Ángeles-Hernández, J.C.,** Castelán O.A.O., Ramirez-Perez, A.H., Ronquillo, M.G. 2014. Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. International Symposium on the Nutrition of Herbivores/International Symposium on Ruminant Physiology (ISNH/ISRP). Canberra Australia.
- **Ángeles-Hernández, J.C.,** Solis G.D., Ronquillo M.G., Ramirez-Perez, A.H., Angeles-Campos, S. 2014. Milk production and characteristics of lactation curve in dairy sheep and their crosses in Mexico. JAM ADSA-ASAS Meeting, Kansas City USA. 20-24 July 2014. Journal of Dairy Science, (97) E supp.1.
- **Ángeles-Hernández, J.C.,** Ronquillo, G.M., Albarrán-Portillo, B. Gutiérrez, J.H., Rocha-Malcher, J.P. (2013) Application of Wood model to lactations curves of dairy ewes in an organic production system (Abstract). JAM ADSA-ASAS Meeting, Indianapolis, USA. J Animal Sci. Vol. 91, E-Suppl. 2.

Resúmenes en congresos nacionales

- **Ángeles-Hernández, J.C.,** Radic S.S., Vera A.M.A., Echeverría P., Castelán O.O.A., González R.M., Ramírez-Perez. A.H. 2016. Efecto del peso vivo, numero y tipo de parto sobre la producción láctea y forma de las curvas de lactación de ovejas East Friesian. Reunión Nacional de Investigaciones Pecuarias. Querétaro.
- **Ángeles-Hernández, J.C.,** Castelán O.O.A., González R.M., Ramírez-Perez. A.H. 2016. Efecto de la relación forraje: concentrado sobre la producción y composición química de la leche ovina: un meta-análisis. Reunión Nacional de Investigaciones Pecuarias. Querétaro.

Resultados adicionales durante la formación doctoral

- **Ángeles-Hernández, J.C.**, Valdes-Medina, K., Zetina, A., Castelán, O.A.O., Ronquillo, M.G. 2017. Ensiling on chemical composition and in vitro fermentation in rabbits of different forages. *Ciencia Rural*. 47, 1-8.
- Ronquillo, M.G, **Ángeles-Hernández, J.C.** 2016. Antibiotic and synthetic growth promoters in animal diets: Review of impact and analytical methods. *Food Control*. 72, 255-267.

Lista de cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1.1. Algunas unidades de producción de leche ovina en México..... | 4 |
| Cuadro 1.2. Composición química promedio de la leche ovina..... | 5 |
| Cuadro 1.3. Comparación de la composición química de diferentes especies... | 6 |
| Cuadro 1.4. Efecto de la relación forraje:concentrado sobre la producción y composición láctea en ovejas..... | 12 |
| Cuadro 1.5. Efecto de la inclusión de grasa protegida sobre la producción y composición láctea en ovejas..... | 18 |
| Cuadro 2.1. Producción láctea total (PLT), producción al pico de lactación (PPL) y tiempo al pico de lactación (TPL) de diferentes genotipos en sistemas convencionales y orgánicos..... | 42 |
| Cuadro 3.1. Estándares de la producción orgánica..... | 53 |
| Cuadro 3.2. Producción láctea y composición química de ovejas lecheras en sistemas de producción orgánica y convencional..... | 54 |
| Cuadro 3.3. Características de la curva de lactación y parámetros del modelo de Wood de lactaciones de ovejas lecheras en sistemas orgánicos y convencionales..... | 57 |
| Cuadro 3.4. Características importantes en los procesos de selección en ovejas lecheras en sistemas orgánicos..... | 58 |
| Cuadro 4.1. Modelo de Wood ajustando lactaciones en diversas especies, | |

| | |
|--|-----|
| grupos genéticos y manejo..... | 95 |
| Cuadro 4.2. Parámetros del modelo de Wood estimados de lactaciones en distintos grupos genéticos ovinos..... | 90 |
| Cuadro 4.3. Características de la curva de lactación en ovinos calculadas utilizando el modelo de Wood..... | 94 |
| Cuadro 4.4. Formas teóricas de la curva de lactación que pueden ser ajustadas por el modelo de Wilmink..... | 95 |
| Cuadro 4.5. Parámetros de distintas versiones simplificadas del modelo de Pollott (2000) ajustando lactaciones de ovinos y bovinos..... | 107 |
| Cuadro 5.1. Comparación entre la producción láctea total (PLT), pico de lactación (PL) y tiempo al pico de lactación observada y estimada usando el modelo de Wood en curvas de lactación típicas y atípicas de ovejas lecheras en un sistema orgánico..... | 117 |
| Cuadro 5.2. Media y desviación estándar de los parámetros de Wood para curvas de lactación típicas y atípicas de ovejas lecheras en un sistema orgánico..... | 118 |
| Cuadro 6.1. Influencia de los efectos analizados sobre las características de la curva de lactación y parámetros del modelo de Pollott..... | 127 |
| Cuadro 6.2. Efecto de tipo de parto sobre la producción láctea y parámetros del modelo de Pollott..... | 129 |
| Cuadro 7.1. Producción y composición química de leche de ovejas East Friesian (EF), EF x Suffolk (EF x SF) y EF x Pelibuey (EF x PL) bajo un | |

| | |
|--|-----|
| sistema orgánico..... | 154 |
| Cuadro 7.2. Medias de los parámetros estimados del modelo de Wood y características de la curva de lactación de acuerdo a su grupo genético, East Friesian (EF), EF x Suffolk (EF x SF) y EF x Pelibuey (EF x PL)..... | 154 |
| Cuadro 8.1. Medias de mínimos cuadrados de la producción láctea (PL) y peso vivo (PV) en relación con el mes de lactación, número de parto y tipo de parto en ovejas East Friesian..... | 160 |
| Cuadro 8.2. Efecto del peso vivo de ovejas lecheras sobre la producción láctea y parámetros del modelo de Pollott..... | 163 |
| Cuadro S1. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la producción láctea (L) en respuesta a la relación forraje:concentrado..... | 194 |
| Cuadro S2. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la concentración de lactosa (g/100 g) en respuesta a la relación forraje:concentrado..... | 195 |
| Cuadro S3. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de proteína (g/100 g) en respuesta a la relación forraje: concentrado..... | 196 |
| Cuadro S4. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de | |

grasa (g/100 g) en respuesta a la relación forraje: concentrado..... 197

Cuadro S5. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de CLA (mg/g AGM) en respuesta a la relación forraje: concentrado..... 198

Cuadro S6. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la producción láctea (L) en respuesta a la adición de grasa protegida. 199

Cuadro S7. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de proteína (g/100g) en respuesta a la adición de grasa protegida..... 201

Cuadro S8. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de grasa (g/100g) en respuesta a la adición de grasa protegida..... 203

Cuadro S9. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y numero de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de CLA (mg/g AGM) en respuesta a la adición de grasa protegida..... 205

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Distribución geográfica de la producción de leche ovina..... | 3 |
| Figura 1.2. Diagrama de bosque de la producción de leche (L/día) para los estudios enfocados a la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras..... | 12 |
| Figura 1.3. Diagrama de bosque del contenido de lactosa (g/100 g) para los estudios enfocados a la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras..... | 13 |
| Figura 1.4. Diagrama de bosque del contenido de proteína (g/100 g) para los estudios enfocados a la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras..... | 14 |
| Figura 1.5. Diagrama de bosque del contenido de grasa (g/100 g) en leche para los estudios enfocados a la comparación de raciones basadas en forrajes vs. concentrado en ovejas lecheras..... | 15 |
| Figura 1.6. Diagrama de bosque del contenido de CLA (mg/g de ácidos grasos) en leche para los estudios enfocados a la comparación de raciones basadas en forrajes vs. concentrado en ovejas lecheras..... | 16 |
| Figura 1.7. Grafico de embudo del efecto de la relación F:C sobre la producción láctea y composición química de la leche ovina..... | 17 |
| Figura 1.8. Diagrama de bosque de la producción láctea (L) para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras..... | 20 |

| | |
|--|----|
| Figura 1.9. Diagrama de bosque del contenido de grasa (g/100g) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras..... | 21 |
| Figura 1.10. Efecto del nivel de inclusión sobre el tamaño del efecto de contenido de grasa..... | 22 |
| Figura 1.11. Diagrama de bosque del contenido de proteína (g/100 g) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras..... | 23 |
| Figura 1.12. Efecto del nivel de inclusión de grasa protegida sobre el tamaño del efecto de contenido de grasa..... | 24 |
| Figura 1.13. Diagrama de bosque del contenido de CLA (mg/g de ácidos grasos) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras..... | 25 |
| Figura 1.14. Efecto del nivel de inclusión sobre el tamaño del efecto de contenido de CLA..... | 26 |
| Figura 1.15. Grafico de embudo del efecto de la adición de grasa protegida sobre la producción láctea y composición química de la leche ovina..... | 27 |
| Figura 2.1. Distribución regional de superficie de tierra utilizada en la agricultura orgánica..... | 35 |
| Figura 2.2. Diferentes formas de curva de lactación y patrones de producción láctea en relación a la época del año en ovejas F1 en un sistema de producción orgánico..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.3. Diferentes parones de producción de razas lecheras especializadas y animales F1 en un sistema de producción orgánico..... | 43 |
| Figura 3.1. Países con mayor superficie de tierra dedicada para a la agricultura orgánica..... | 50 |
| Figura 3.2. Países con mayor número de productores orgánicos certificados... | 51 |
| Figura 3.3. Curvas de lactación de acuerdo a la época de parto en ovejas lecheras bajo un manejo orgánico..... | 56 |
| Figura 3.4. Curva de lactación de ovejas lecheras en sistemas orgánicos y convencionales..... | 56 |
| Figura 3.5. Efecto del grupo genético sobre la producción láctea y composición química de ovejas lecheras bajo un sistema orgánico..... | 60 |
| Figura 4.1. Representación esquemática del desarrollo mamario y lactación desde la etapa embrionaria hasta la involución..... | 73 |
| Figura 4.2. Desarrollo de la glándula mamaria en mamíferos..... | 75 |
| Figura 4.3. Factores que contribuyen a los cambios en la producción láctea y persistencia durante la lactación..... | 78 |
| Figura 4.4. Características de la curva de lactación..... | 79 |
| Figura 4.5. Producción láctea y número de células epiteliales secretoras mamarias de ovejas Sarda..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.6. Diferentes patrones de producción láctea en ovejas de acuerdo al grupo genético y sistema de producción..... | 81 |
| Figura 4.7. Modelación matemática..... | 83 |
| Figura 4.8. Complementariedad de las clasificaciones de los modelos matemáticos..... | 86 |
| Figura 4.9. Descomposición del modelo de Wood (1967)..... | 92 |
| Figura 4.10. Representación de una curva típica de lactación a través del modelo desarrollado por Grossman y Koops (2003)..... | 99 |
| Figura 4.11. Representación gráfica de la aproximación compartamental de la glándula mamaria desarrollada por Neal y Thorney (1983)..... | 102 |
| Figura 4.12. Representación esquemática de los patrones de crecimiento de la glándula mamaria durante la gestación (A) y la lactación (B)..... | 103 |
| Figura 4.13. Representación esquemática de biología de la glándula mamaria durante la gestación y 40 semanas de lactación (Pollott 2000b)..... | 105 |
| Figura 4.14. Partición de las células secretoras mamarias y la dinámica de interacción de sus componentes..... | 110 |
| Figura 4.15. Partición de las células secretoras mamarias y la dinámica de interacción de sus componentes..... | 117 |
| Figura 5.1. Curvas típicas y atípicas de lactación ajustadas utilizando el modelo de Wood del promedio de los datos de ovejas lecheras bajo un | |

| | |
|--|-----|
| sistema orgánico..... | 117 |
| Figura 5.2. Residuales derivados de ajuste de modelo de Wood para el promedio de los datos de curvas típicas y atípicas de lactación en ovejas lecheras bajo un sistema orgánico..... | 118 |
| Figura 6.1. Efecto del número de parto sobre la producción láctea total y potencial máximo de secreción en ovejas lecheras..... | 128 |
| Figura 6.2. Efecto del número de parto sobre la producción láctea total, tasa relativa de crecimiento y muerte celular mamaria en ovejas lecheras..... | 128 |
| Figura 6.3. Coeficientes de correlación de Pearson entre las características de la curva de lactación y los parámetros del modelo de Pollott..... | 129 |
| Figura 7.1. Efecto sobre la producción láctea de los grupos genéticos ovinos East Friesian (EF), EF x Suffolk (EF x SF) y EF x Pelibuey (EF x PL) bajo un sistema orgánico..... | 154 |
| Figura 8.1. Producción láctea y peso vivo durante el periodo de gestación y lactación de ovejas East Friesian..... | 161 |
| Figura 8.2. Relación entre la producción láctea total y el peso vivo al empadre, mitad de gestación, parto, inicio, mitad y final de la lactación de ovejas East Friesian | 161 |
| Figura 8.3. Curvas de lactación de acuerdo al número de parto, tipo de parto y peso al empadre y parto de ovejas East Friesian..... | 162 |

CARACTERÍSTICAS DE LA LECHE OVINA Y FACTORES QUE LA AFECTAN: UN META-ANÁLISIS Y META-REGRESIÓN

Trabajo presentado parcialmente en: Reunión Nacional de Investigaciones Pecuarias. **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán O.O.A., González R.M., Ramírez-Perez. A.H. 2016. Efecto de la relación forraje:concentrado sobre la producción y composición química de la leche ovina: un meta-análisis. Queréaro, México.

1. Características de la leche ovina y factores que la afectan: un meta-análisis y meta-regresión.

1.1. Producción de leche ovina en México y el mundo.

Existe un incremento continuo en la demanda a largo plazo de productos, principalmente como resultado del crecimiento poblacional y del aumento del consumo mundial per cápita del leche, el cual alcanzó los 111.3 kg en el 2015 y se estima aumentará un 12.5 % para el 2025 (IDF 2016). La producción mundial de leche de todas las especies ha seguido una tendencia a la alza en décadas recientes, alcanzando en el 2015 aproximadamente las 818 millones de toneladas (IDF 2016). El mayor porcentaje de esta producción láctea deriva de la industria lechera bovina (81.8 %), seguida por búfalas (14.2 %), cabras (2.3 %) y finalmente las ovejas participan con un 1.3 %, registrando en 2014 un producción de 10,429,155 toneladas (FAOSTAT 2014).

La industria lechera ovina está marcadamente regionalizada y se encuentra asociada con una longeva tradición de producción y consumo de derivados lácteos, principalmente quesos (Figura 1). La región asiática se ubica como la mayor zona geográfica productora de leche ovina con un 43.8 % de la producción mundial, albergando los dos principales países productores: China (1,131,779.68 ton) y Turquía (855,282.68 ton). La región del mediterráneo aporta el 32.8 % de la producción mundial, en la cual Grecia (742,487.95 ton) e Italia (637,544.68 ton) lideran la industria lechera ovina europea, ubicándose como el tercero y cuarto productor mundial, respectivamente. El continente africano produce casi una cuarta parte del inventario lechero ovino internacional (23 %), con sistemas de producción de subsistencia en países como Somalia (459,604.05 ton) y Sudan (455,157.89 ton), ubicados dentro de los primeros diez países productores a nivel mundial. El continente americano tiene una muy discreta participación en la producción mundial de leche de oveja (0.4 %), en donde solamente dos países, Perú y Ecuador, cuentan con datos oficiales de productividad (FAOSTAT 2014).

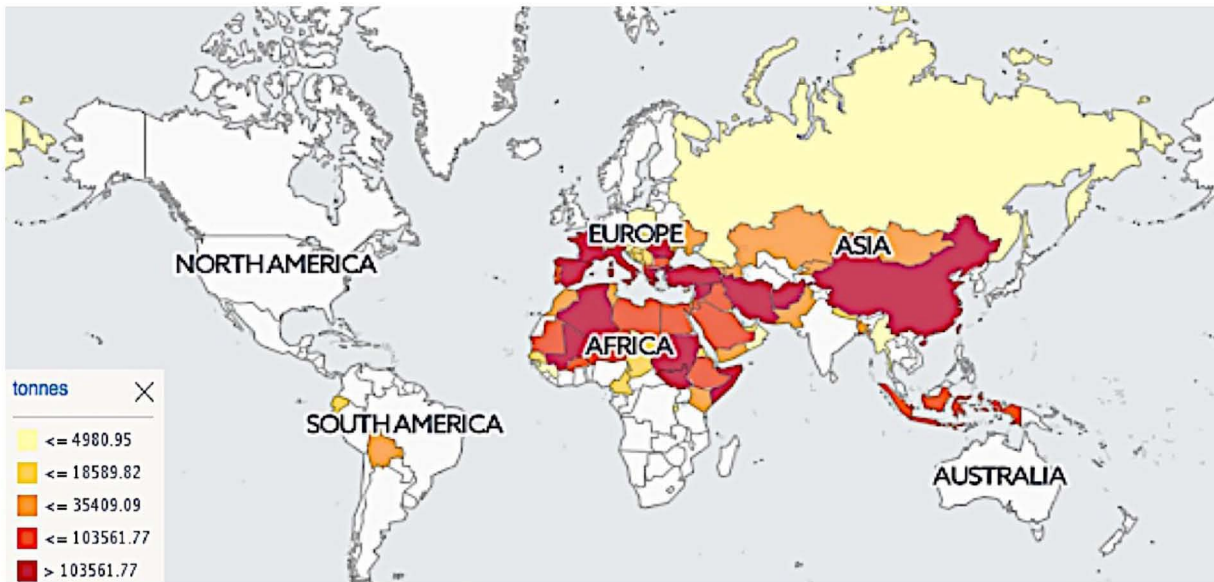


Figura 1. Distribución geográfica de la producción de leche ovina (FAOSTAT, 2016).

La producción de leche ovina es una actividad poco conocida en México y por lo tanto carente de tradición productiva e industrial. De Rancourt y Carrère (2011), mencionan que la producción láctea en los países de Norteamérica no es significativa, estimando que México, E.U.A. y Canadá cuentan con aproximadamente 200 explotaciones dedicadas exclusivamente a la producción de leche con menos de 10,000 ovejas (Berger et al. 2010). En México no existen datos oficiales acerca del comportamiento de los sistemas de producción de leche ovina, sin embargo, datos de asociaciones de productores estiman que en el 2010 existían 20 explotaciones con potencial para ordeñar ovejas con un inventario aproximado de 6,000 animales distribuidos en los estados de Coahuila, Guanajuato, Edo. de México, Puebla, Querétaro y Veracruz; algunas de las explotaciones ovinas lecheras más destacadas son mencionadas en el Cuadro 1. En el 2009 el estado de Querétaro fue el que presentó la mayor producción con 30,000 litros (Malcher 2010). En este mismo estado se estableció la primera asociación de ovejas lecheras denominada “Productores de Leche y Derivados de Oveja S.A. de C.V.” uniendo a trece productores e integrando la marca colectiva “Del Rebaño”.

Cuadro 1. Algunas unidades de producción de leche ovina en México.

| Nombre | Ubicación |
|---------------------------------|------------------|
| Rancho Santa Marina | Querétaro |
| Rancho San Josemaría | Querétaro |
| Quesos del Rebaño | Querétaro |
| Rancho San Francisco de Mariana | Querétaro |
| Escuela de Pastores | Estado de México |
| Rancho Tierra Nueva | Puebla |

1.2. Leche de oveja: características fisicoquímicas y propiedades nutricionales

Las características particulares en la composición química de la leche de oveja, principalmente en relación a sus elevados niveles de sólidos totales y proteína, hacen especialmente idónea su transformación en yogurt y queso (Cuadro 2); por lo cual, cerca del 95 % de la leche ovina es convertida en derivados lácteos, los cuales además adquieren una connotación regional de origen y calidad (Bencini & Pulina 1997; Boyazoglu & Morand-Fehr 2001); Por tal motivo, cuando nos referimos a calidad de la leche de oveja debemos concentrarnos principalmente en su capacidad de poder ser transformada en productos lácteos de alta calidad, generar altos rendimientos de estos productos por litro de leche y asegurar la inocuidad de estos alimentos (Bencini & Pulina 1997), de esta manera pueden distinguirse tres tipos de “calidad” al analizar productos de origen animal (Boyazoglu & Morand-Fehr 2001):

- Calidad higiénica y sanitaria
- Calidad dietética y nutricional
- Calidad gustativa y gastronómica

Cuadro 2. Composición química promedio de la leche ovina (recopilación de datos de 86 referencias de 1973 a 2005; Raynal-Ljutovac *et al.* 2008).

| | Sólidos totales % | Grasa % | Proteína % | Caseínas % | Lactosa % |
|--------|------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Media | 18.1 | 6.82 | 5.59 | 4.23 | 4.88 |
| Mínimo | 14.4 | 3.60 | 4.75 | 3.72 | 4.11 |
| Máximo | 20.7 | 9.97 | 7.20 | 5.01 | 5.51 |

Las características únicas de la leche de oveja han sido discutidas en extensas revisiones de literatura (Jandal 1996; Bencini & Pulina 1997; Boyazoglu & Morand-Fehr 2001; Bencini *et al.* 2010; Albenzio *et al.* 2016), en las cuales la calidad de la leche ovina es evaluada en términos de sus propiedades tecnológicas y de coagulación. Elevadas concentraciones de proteína, grasa y sólidos totales en leche están asociados con altos rendimientos en la elaboración de derivados lácteos, por consiguiente, los estudios antes mencionados concluyen que la leche de oveja tiene rendimientos superiores en comparación con la leche de cabra y vaca debido a su composición química superior (Cuadro 2).

La diferencias en la composición entre la leche ovina y la producida por bovinos y caprinos determinan sus propiedades de coagulación láctea. La coagulación láctea es una de las características más importantes en la elaboración de quesos, el cual se ve afectado por las siguientes propiedades de la leche: pH, concentración de caseína, cantidad de Ca por caseína y concentración de otros minerales; propiedades que definen las diferencias en el tiempo de coagulación, tasa de coagulación, firmeza de la cuajada y cantidad de cuajo utilizado (Haenlein & Wendorff 2006). La leche de oveja generalmente produce coágulos mas firmes como resultado de los niveles superiores de caseína; además cuajar a mayor velocidad que la leche bovina y caprina (Jandal 1996).

La proteínas de la leche incluyen caseínas y proteínas del suero; las caseínas son una familia de fosfoproteínas sintetizadas en la glándula mamaria en respuesta a hormonas

lactogénicas (Selvaggi et al. 2014), que representan la mayor fracción proteínica de la leche ovina (76 - 83 %)(Park et al. 2007). La heterogeneidad de las caseínas esta determinada principalmente por la presencia de variantes genéticas, se reconocen cuatro variantes genéticas de las caseínas: α_{s1} -CN, α_{s2} -CN, β -CN y κ -CN. La leche ovina presenta mayores concentraciones de las cuatro variantes de caseínas en comparación con la leche ovina y caprina (Selvaggi et al. 2014). Las proteínas de suero de la leche ovina representan del 17 % al 22 % del contenido total de proteína; el 75 % de las proteínas de suero son albuminas (α - lactoalbúmina y β -lactoglobulina), con elevado contenido del fenotipo AA de β -lactoglobulina, el cual ha demostrado proveer de mayor eficiencia en la manufactura de queso ovino (Amigo et al. 2000).

Cuadro 3. Comparación de la composición química de diferentes especies (recopilación de datos de Jandal 1996; Park et al. 2007; Raynal-Ljutovac et al. 2008).

| Componente | Ovino | Caprino | Bovino | Humano |
|------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
| Grasa (%) | 7.9 | 3.8 | 3.6 | 4.0 |
| Solidos no grasos (%) | 12.0 | 8.9 | 9.0 | 8.9 |
| Lactosa (%) | 4.9 | 4.1 | 4.7 | 6.9 |
| Proteína (%) | 6.2 | 3.4 | 3.2 | 1.2 |
| Caseína (%) | 4.2 | 2.4 | 2.6 | 0.4 |
| Albumina-globulina (%) | 1.0 | 0.6 | 0.6 | 0.7 |
| NNP (%) | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0.5 |
| Cenizas (%) | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.4 |
| Calorías/ml | 105 | 70 | 69 | 68 |
| Ca (mg) | 1950-2000 | 1260 | 1200 | 320 |
| P (mg) | 1240-1580 | 970 | 920 | 150 |
| Cl (mg) | 1100-1120 | 1600 | 1100 | 450 |
| Na (mg) | 440-580 | 380 | 450 | 200 |
| K (mg) | 1360-1400 | 1900 | 1500 | 550 |
| Mg (mg) | 180-210 | 130 | 110 | 40 |
| Zn (μ g) | 5200-7470 | 3400 | 3800 | 3000 |
| Fe (μ g) | 720-1222 | 550 | 460 | 600 |
| Cu (μ g) | 400-680 | 300 | 220 | 360 |
| Mn (μ g) | 53-90 | 80 | 60 | 30 |
| Yodo (μ g) | 104 | 80 | 70 | 80 |
| Se (μ g) | 31 | 20 | 30 | 20 |

| | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| Vitamina A(mg) ¹ | 0.8 | 0.04 | 0.04 | 0.06 |
| Vitamina D (µg) | 0.18 | 0.06 | 0.08 | 0.06 |
| Vitamina E(mg) ² | 0.11 | 0.04 | 0.11 | 0.23 |
| Vitamina B1 (mg) ³ | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.02 |
| Vitamina B2 (mg) ⁴ | 0.35 | 0.14 | 0.17 | 0.03 |
| Vitamina B3 (mg) ⁵ | 0.42 | 0.20 | 0.09 | 0.16 |
| Vitamina B5 (mg) ⁶ | 0.41 | 0.31 | 0.34 | 0.18 |
| Vitamina B6 (mg) ⁷ | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.01 |
| Vitamina B8 (µg) ⁸ | nd | 2.0 | 2.0 | 0.70 |
| Vitamina B9 (µg) ⁹ | 5.0 | 1.0 | 5.3 | 5.2 |
| Vitamina B12 (µg) ¹⁰ | 0.71 | 0.06 | 0.35 | 0.04 |

NNP, nitrógeno no proteico; ¹retinol; ²tocoferol; ³tiamina; ⁴riboflavina; ⁵niacina; ⁶ácido pantoténico; ⁷piridoxina; ⁸biotina; ⁹ácido fólico; ¹⁰cobalamina.

En décadas recientes ha existido un incremento en el interés de alimentos con propiedades nutricionales específicas. Las ventajas nutricionales de la leche de ovejas sobre las demás especies no deriva de su contenido de proteína, minerales o vitaminas; la superioridad como alimento funcional estriba en su contenido lipídico, mas específicamente en su perfil de ácidos grasos; los productos ovinos han recibido atención directa debido a la posibilidad de poder ser enriquecidos con ácidos grasos potencialmente benéficos para la salud, especialmente ácido vaccénico (VA, C18:1 t11), c9,t11CLA, también llamado ácido ruménico, y ácido α -linoléico (ALA, C18:3, n3). La leche de oveja, en comparación con la leche de vaca, contiene de 3 a 4 veces la cantidad de VA y CLA c9T11 (Albenzio et al. 2016).

El consumo de ácido linoléico conjugado (CLA) tiene una amplia gama de efectos fisiológicos en estudios biomédicos en modelos animales (Griinari et al. 2000). Muchos de estos efectos pueden representar beneficios positivos en la salud humana, tales como: prevención de cáncer, aterogénesis, lípido-peroxidación diabetes y obesidad, además de la modulación en la respuesta inmune (Chilliard et al. 2000; Atti et al. 2006; Park et al. 2007; Tsiplakou et al. 2010). El nombre genérico de CLA es un término que contempla todos lo isómeros posicionales y geométricos del ácido linoléico, los cuales poseen un sistema conjugado de dobles enlaces. El isómero c9,t11CLA es el

responsable de los efectos nutraceuticos, siendo el mas abundante y representado entre el 78-89 % del CLA en la leche ovina (Tsiplakou et al. 2010).

La leche de pequeños rumiantes y sus derivados son la mayor fuente de CLA para la alimentación humana (Atti et al. 2006). Jahreis *et al.* (1999) realizaron un estudio comparativo del contenido de CLA de muestras de leche de ovino, bovino y caprino mostrando las siguientes concentraciones: 1.08 %, 1.01 % y 0.65 % del total de ácidos grasos, respectivamente. Los valores superiores de contenido de CLA de leche ovina en comparación con leche caprina se confirman con estudios en sistemas orgánicos (1.3 vs. 0.6 %) y convencionales (1.1 vs. 0.6 %)(Tsiplakou et al. 2010). Es limitada la bibliografía que reporte comparaciones de CLA entre leche ovina y bovina; sin embargo, las concentraciones de CLA en leche de oveja antes mencionadas son superiores al valor medio de 0.58 % reportado por Glasser et al. (2008), resultado de un meta-análisis comprendiendo un total de 145 experimentos. A pesar de las diferencias reportadas entre especie y grupo genético, los factores determinantes en la concentración de CLA en rumiantes están asociados con el manejo nutricional. Las condiciones de manejo particulares de los rebaños ovinos determina oscilaciones estacionales en las concentraciones de CLA debido a la variabilidad en la disponibilidad y calidad de forraje (Mel'uchová et al. 2008).

El mejoramiento de las características nutricionales de la leche ovina, principalmente en relación a su perfil de ácidos grasos, ha direccionado la investigación animal hacia el estudio de los factores que afectan su composición química, los cuales además determinan el rendimiento y calidad de los productos lácteos derivados de la misma (Bencini et al. 2010). Dentro de los factores que afecta la producción y composición química de la leche ovina podemos enunciar: factores genéticos (raza y grupo genético), número de células somáticas, número de células microbianas, factores fisiológicos (edad, número de parto, etapa de lactación, peso de la oveja y tipo de parto), factores de manejo (técnicas de ordeño, frecuencia e intervalo de ordeño y manejo del destete), factores ambientales y manejo nutricional (Bencini et al. 2010).

El contenido de grasa es el componente que cuantitativa y cualitativamente presenta mayor variabilidad (Raynal-Ljutovac et al. 2008); el factor mas importante dentro de las variables intrínsecas y extrínsecas que modulan el perfil de ácidos grasos en leche es el manejo nutricional (Park et al. 2007; Gómez-Cortés et al. 2009). Este importante factor ha sido estudiado a profundidad con resultados importantes y significativos, principalmente en la relación forraje:concentrado de la ración y la suplementación con grasas protegidas (Raynal-Ljutovac et al. 2008). El objetivo del presente estudio es analizar sistemáticamente el efecto de algunos factores nutricionales que tienen un efecto importante sobre la composición química de la leche ovina mediante la utilización de la información bibliográfica existente.

2. Materiales y métodos

Dos meta-análisis fueron realizados para analizar los principales factores nutricionales asociados con modificaciones sobre la producción y composición química de la leche de oveja.

2.1. Meta-análisis F:C.

Se llevó a cabo un meta-análisis con el objetivo de analizar el efecto de inclusión de forraje y concentrado (F:C) en las raciones de ovejas destinadas a la producción de leche sobre la producción láctea, contenido de grasa y contenido de ácido linoléico conjugado (CLA). La búsqueda de la literatura científica fue realizada utilizando PubMed, Google Scholar, ScienceDirect, Scirus y CAB; además de la identificación de otros estudios de la lista de referencias de los artículos revisados. Las búsquedas se basaron en las siguientes palabras clave: *forage, concentrate, pasture, milk yield, dairy sheep, milk composition, CLA y rumenic acid.*

Los criterios de inclusión y exclusión siguieron los procedimientos establecidos por Lean *et al.* (2014), los cuales incluyen: artículos por revisión en revistas indexadas;

especificar el proceso de aleatorización; estudios enfocados en la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado; contener suficiente información para determinar el tamaño del efecto para las variable dependientes (ejemplo: número de animales por tratamiento); una medición cuantitativa del tamaño del efecto (ejemplo: medias de mínimos cuadrados); una medición de variabilidad (desviación estándar o error estándar) para cada efecto estimado, tratamiento o grupo control. Las variables obtenidas utilizadas en el meta-análisis incluyeron: producción láctea diaria promedio (kg/día o l/día), cantidad de FDN de las raciones (g/kg MS), concentración de CLA en leche (mg/g de ácidos grasos), contenido de grasa en leche (g/kg). El CLA tiene diversos isómeros, sin embargo, para fines del presente estudio nos referimos como CLA al isómero c9, t11, debido a que es el único isómero del cual existe evidencia de propiedades benéficas en la salud y nutrición humana.

2.2. Meta-análisis grasas protegidas

El objetivo de esta revisión analítica de literatura científica existente para establecer el efecto de la suplementación con grasas protegidas en la ración de ovejas lecheras sobre el contenido de grasa, proteína y CLA en leche. La revisión bibliográfica se realizó utilizando los mismos buscadores de literatura científica que el anterior meta-análisis. Las búsquedas se basaron en las siguientes palabras clave: *fat supplementation, rumen protected fat, Ca salt, milk yield, dairy sheep, fat acid profile, CLA, rumenic acid, calcium soaps*. Los criterios de inclusión y exclusión fueron similares a los del meta-análisis previo, añadiendo que los estudios seleccionados deberían de especificar la dosis de grasa protegida utilizada y la naturaleza química de la misma.

Un análisis de meta-regresión fue utilizado para explorar las fuentes de heterogeneidad de las respuestas en la adición de grasas protegidas. El nivel de inclusión de grasa protegida en las dietas (g/día) fue identificada *a priori* como un factor que podría influir en la respuesta del tratamiento examinado. Los sesgos de publicación fueron investigados utilizando grafico de embudo, la cual es un gráfico de dispersión del efecto

estimado en cada estudio contra una medida de precisión de cada estudio. El error estándar fue elegido como la medida de presión y fue asignado al eje vertical (Y).

La heterogeneidad de los resultados entre ensayos fue cuantificado utilizando el estadístico I^2 , el cual describe el porcentaje de la variación total entre estudios que se debe a la heterogeneidad mas allá que al azar (Lean et al. 2009); este estadístico es calculado de acuerdo a la siguiente formula:

$$I^2 = \frac{Q-(k-1)}{Q} \times 100 \quad (1)$$

En donde Q es el estadístico de heterogeneidad Ji cuadrada y $k-1$ son los grados de libertad. Un valor superior a 50 % puede ser considerado como una heterogeneidad substancial; este estadístico es influenciado de menor manera por el número de ensayos analizados. El paquete **meta** (Schwarzer 2016) del programa R package fue utilizado para llevar a cabo los presentes meta-análisis. El método propuesto por Hedges (1981) fue utilizado para calcular el tamaño del efecto (diferencia media). La estimación de los efectos fijos y aleatorios se calcularon con la metodología descrita por Dersimonian y Laird (1986).

3. Resultados y discusión

3.1. Relación F:C

El número de estudios analizados, la diferencia media bruta para las variables analizadas, el tamaño del efecto, el valor de P del modelo aleatorio y la heterogeneidad estimada se muestran en el cuadro 4. La revisión de literatura comprendió únicamente artículos en revistas indexadas publicados entre 1994 y 2014. Un total de 20 estudios enfocados en el análisis del efecto de la relación F:C sobre la producción y composición química de la leche de oveja fueron identificados. De estos estudios entre 8 y 15, dependiendo de la variable analizada, cumplieron con los criterios de inclusión

(cuadro 4). La base de datos incluye información de la producción láctea, composición química, grupo genético, medias mínimo cuadráticas del grupo control y experimental y medidas de dispersión (error estándar o desviación estándar). Las razones de exclusión de los estudios identificados fueron principalmente: no especificar el procedimiento de aleatorización o diseño experimental, no reportar alguna medida de dispersión y tratarse de artículos de revisión.

Cuadro 4. Efecto de la relación forraje:concentrado sobre la producción y composición láctea en ovejas.

| Item | Número de estudios (n) | Diferencia media | Tamaño del efecto | Valor de p ¹ | I ² |
|-------------------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------------|
| Producción láctea (L) | 12 | -0.087 | -0.14 | 0.0012 | 90.5 |
| Contenido de grasa (%) | 12 | 0.32 | 0.31 | 0.001 | 87.6 |
| Contenido de proteína (%) | 11 | -0.085 | -0.08 | 0.22 | 95.6 |
| Contenido de lactosa (%) | 8 | -0.06 | -0.065 | 0.02 | 89.4 |
| Contenido de CLA ² | 15 | 2.28 | 2.16 | 0.004 | 97.8 |

I², estadístico de la heterogeneidad estimada; ¹modelo aleatorio. ²mg/g de ácidos grasos.

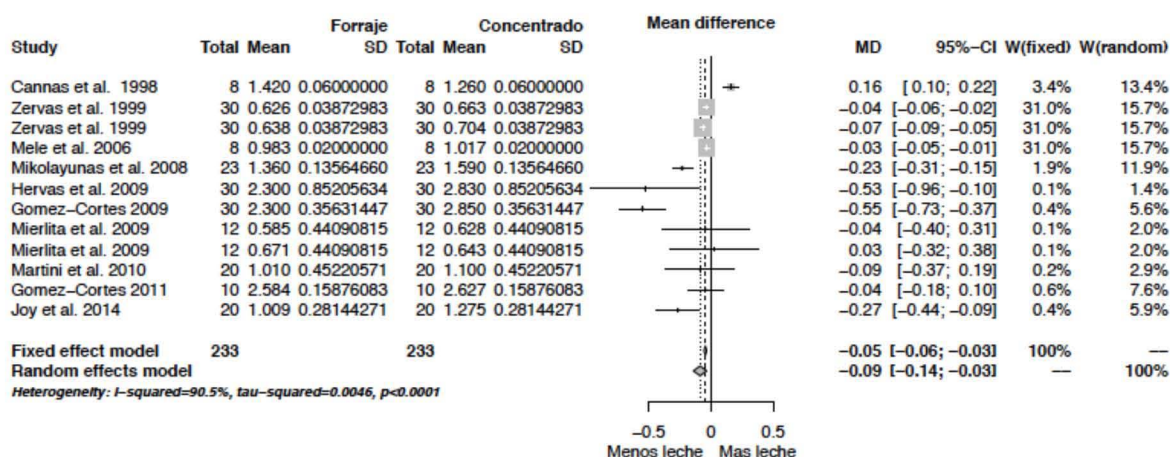


Figura 2. Diagrama de bosque de la producción de leche (L/día) para los estudios enfocados la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras.

Los resultados de la tabla 1 y el diagrama de bosque (Figura 2) muestran que la alimentación con base en forraje en ovejas lecheras resulta en una disminución en la producción láctea en el orden de 0.087 L cuando se compara con animales alimentados con dietas basadas en concentrados. Raciones basadas en forraje se caracterizan por una mayor cantidad de fibra (FDN y FDA) y menor contenido de carbohidratos no estructurales (azúcares y almidón), en comparación con raciones basadas en concentrado (Mierlita et al. 2009). Mikolayunas *et al.* (2008) refiere que la suplementación con concentrado en las raciones ovinas puede incrementar la energía disponible para el crecimiento de microorganismos ruminales, estimulando la producción de precursores gluconeogénicos, como el propionato destinado para la síntesis de lactosa en la glándula mamaria, lo cual coincide con los resultados del meta-análisis de la concentración de lactosa (figura 3).

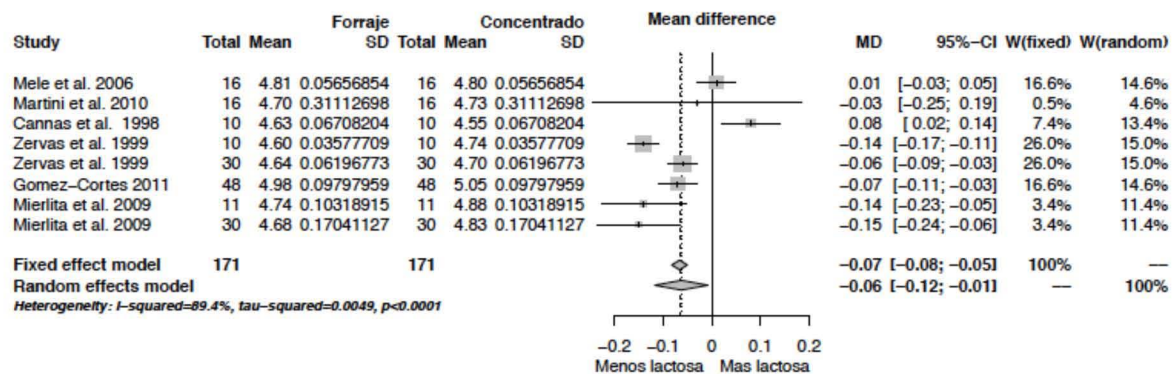


Figura 3. Diagrama de bosque del contenido de lactosa (g/100 g) para los estudios enfocados en la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras.

El incremento en la proporción de concentrado en la dieta está asociado con mayores niveles de ingestión de alimento; un elevado nivel de ingesta de alimento, especialmente al inicio de la lactación, resulta en una mejora en la producción láctea durante este periodo; ubicando al nivel de consumo como uno de los factores principales que influyen en los rendimientos lácteos. Sin embargo, el impacto de la utilización de concentrados en las raciones de ovejas lecheras sobre la composición química de la leche dependerá en parte del nivel de producción láctea. Morand-Fehr *et*

al. (2007) señalan que ovejas con bajos rendimientos, la suplementación con concentrado incrementará entre un 50 a 60 % los rendimientos lácteos, sin una variación significativa en la composición química de la leche.

En la mayoría de los estudios contemplados en esta revisión analítica existió una reducción en el contenido de proteína en leche en animales alimentados con dietas altas en forraje (-0.085 g/100 g)(Figura 4); sin embargo, no existe evidencia suficiente para concluir que este efecto es significativo (P=0.22)(Cuadro 4). Probablemente otros factores, además de la relación F:C, deben ser contemplados en el modelo de análisis principalmente en relación a la cantidad de proteína ofrecida en la ración. Jenkins y McGuire (2006) refieren que la reducción en la proporción de forraje en la dieta de vacas lecheras incrementa el contenido y rendimiento de proteína. Estos autores concluyen que este fenómeno se relaciona con la cantidad de carbohidratos rápidamente fermentables consumidos, los cuales determinan una mayor síntesis de propionato y proteína microbiana generando una señalización metabólica, principalmente un incremento en la concentración de insulina, para producir mas leche y proteína.

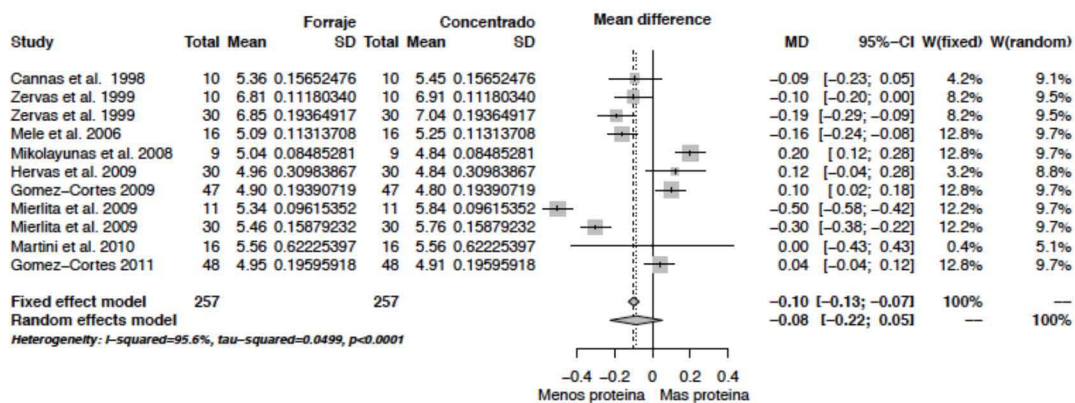


Figura 4. Diagrama de bosque del contenido de proteína (g/100 g) para los estudios enfocados en la comparación de raciones basadas en forrajes vs concentrado en ovejas lecheras.

El contenido de grasa fue significativamente mayor (>0.32 g/kg; $P<0.001$) en ovejas con alimentación basada en forraje (Cuadro 4); lo cual coincide con lo señalado por Morand-Fehr *et al.* (2007) refiriendo que el contenido de grasa en leche disminuye cuando se incrementa la cantidad de concentrado ingerido. Además, cuando el balance energético es positivo, gracias a una mejoría en el nivel de ingesta o energía consumida, el contenido de grasa disminuye linealmente y el contenido de proteína aumenta. La población microbiana del rumen es capaz de degradar y fermentar los carbohidratos y proteínas de la dieta para producir ácidos grasos volátiles (VFA). Los más importantes VFA son el acetato, propionato y butirato; acetato y butirato son los precursores de los ácidos grasos de cadena corta y mediana sintetizados en la glándula mamaria. El incremento de la cantidad de concentrado en la dieta es la forma más eficiente de aumentar la producción de propionato a nivel ruminal, lo cual limita el flujo de los precursores para la síntesis de grasa hacia la glándula mamaria. Además, la disminución en la proporción de fibra en la ración resulta en una menor relación acetato:butirato (Chilliard *et al.* 2000).

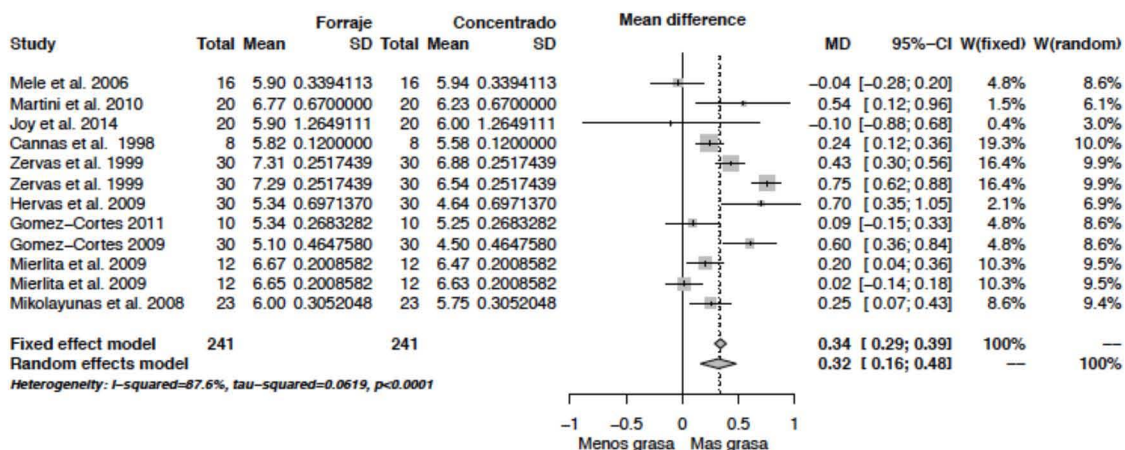


Figura 5. Diagrama de bosque del contenido de grasa (g/100 g) en leche para los estudios enfocados en la comparación de raciones basadas en forrajes vs. concentrado en ovejas lecheras.

En décadas recientes la evolución de la demanda de los consumidores ha determinado que se preste atención a características relacionadas con la seguridad alimentaria,

inocuidad y valor nutricional de los derivados lácteos. El consumo de CLA se ha asociado con potenciales beneficios en la salud humana, atribuyéndoles efectos positivos tales como: anticarcinogénico, antiaterogénico, antidiabético y antiadipogénicos. Los productos derivados de rumiantes son una fuente importante de CLA para los humanos, con concentración especialmente importantes en la leche y sus derivados (Atti et al. 2006).

Entre los factores que afectan la concentración de CLA en leche, la nutrición animal se sitúa como la mas importante. La inclusión de forraje en las raciones de ovejas lecheras mostró un efecto significativo ($P < 0.001$) sobre la concentración de CLA con una diferencia media bruta de 2.28 mg/g en comparación con raciones basadas en concentrado (Figura 6). En el rumen los lípidos de los alimentos son hidrolizados en el rumen, produciéndose ácidos grasos libres y glicerol, y la mayoría de los ácidos grasos insaturados (UFA) son disponibles para la biohidrogenización. Diversos factores influyen en la tasa y extensión de la biohidrogenización ruminal de los AGI. El consumo de dietas altas en concentrado comparado con dietas altas en forrajes reducen la biohidrogenización (Kucuk et al. 2001), aparentemente debido a la reducción del pH ruminal limitando la lipólisis, por lo tanto la hidrogenización ocurre solamente en los ácidos grasos libres.

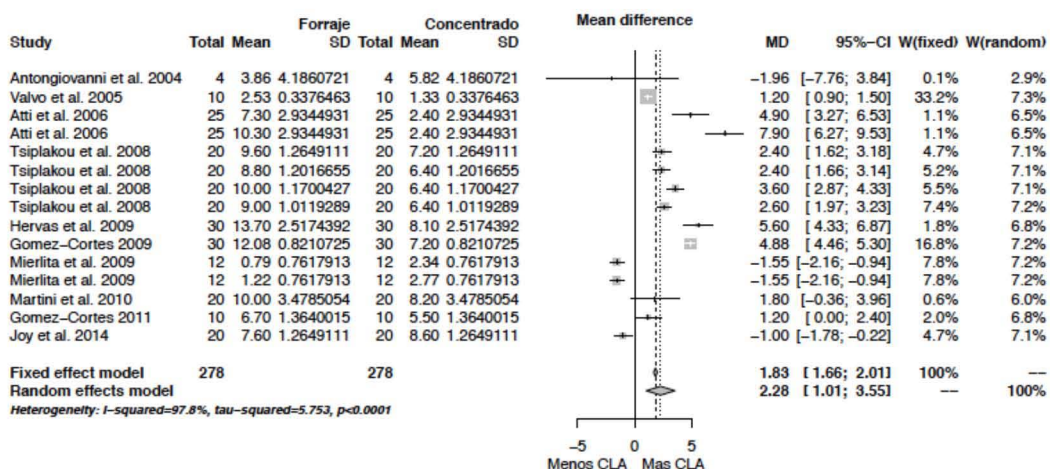


Figura 6. Diagrama de bosque del contenido de CLA (mg/g de ácidos graso metilados) en leche para los estudios enfocados en la comparación de raciones basadas en forrajes vs. concentrado en ovejas lecheras.

Ácido ruménico (RA, cis-9 trans-11 C18:2), es el isómero mas importante del CLA desde el punto de vista nutricional; RA es producido como un intermediario en la biohidrogenización del ácido linoléico (C18:2) y por la síntesis endógena de ácido vaccénico (VA, trans-11 C18:1)(Gómez-Cortés et al. 2009). Los forrajes, especialmente pastos jóvenes, contiene cantidades importantes de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA). El elevado contenido de C18:3 de los pastos jóvenes y el bajo contenido de fibra probablemente interactúan para incrementar la producción de CLA y sus precursores C18:1. El ácido linoléico de los forrajes es hidrogenizado en el rumen y produce VA, que es usado como precursor en la síntesis de CLA en el tejido adiposo y glándula mamaria gracias a la Δ^9 desaturasa, la cual tiene mayor actividad en la glándula mamaria de animales en lactación (Griinari et al. 2000; Morand-Fehr et al. 2007)

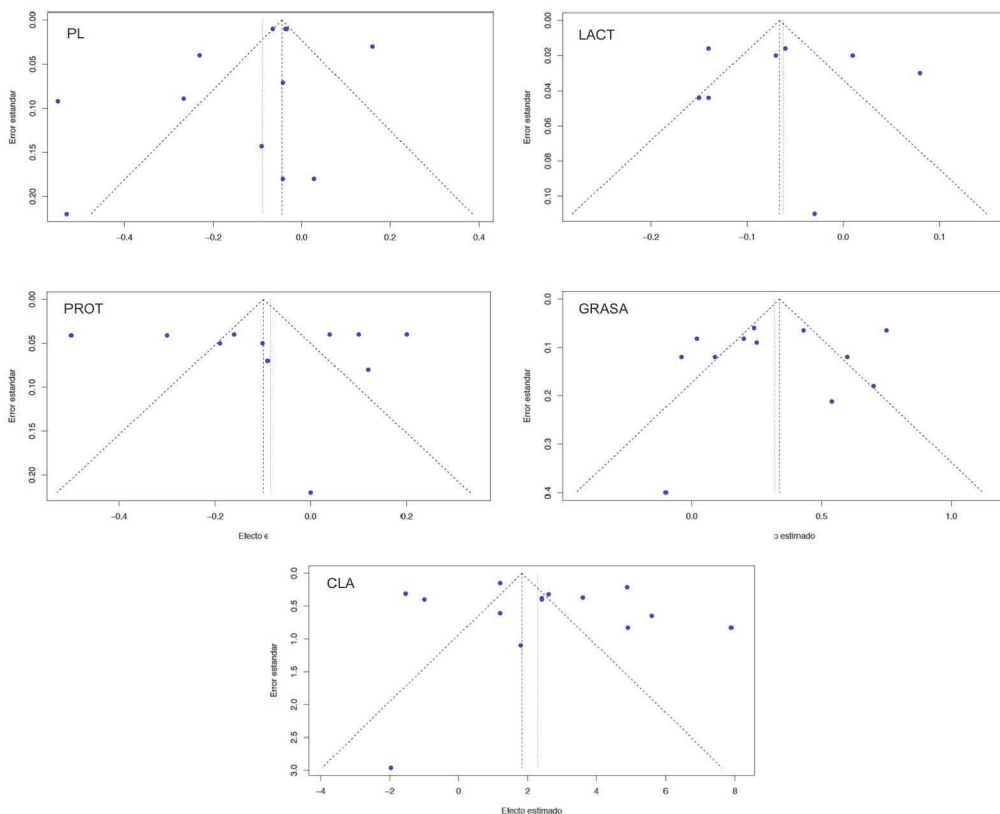


Figura 7. Grafico de embudo del efecto de la relación F:C sobre la producción láctea y composición química de la leche ovina. PL, producción láctea; Lact, contenido de lactosa (%); Prot, proteína; CLA, ácido linoléico conjugado.

Los diagramas de bosque demuestran la consistencia en la respuesta como efecto de la relación F:C, con la posible excepción en el contenido de proteína, en el cual se muestra variabilidad marcada en la respuesta, lo cual posiblemente determinó la falta de significancia del modelo aleatorio para esta variable ($P=0.22$). Los gráficos de embudo son presentados en la figura 7, en las cuales no se muestra una asimetría sustancial en ninguna de las características analizadas. En el Cuadro 4 se reporta la heterogeneidad estimada; la cual fue elevada en la mayoría de las variables, por lo cual es necesario investigar las fuentes de la misma a través del uso de meta-regresión.

3.2 Grasas protegidas

Fueron identificados un total de 55 ensayos relacionados con la adición de grasas protegidas en la alimentación de ovejas lecheras; el número de estudios analizados, la diferencia media para las variables analizadas, el tamaño del efecto, el valor de P del modelo aleatorio, la heterogeneidad estimada y los valores de meta-regresión se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Efecto de la inclusión de grasa protegida sobre la producción y composición láctea en ovejas.

| Item | Número de estudios (n) | Diferencia media | Tamaño del efecto | Valor de P ₁ | I ² | Efectos significativos meta-regresión |
|-------------------------------|------------------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Producción láctea (L) | 37 | 0.03 | 0.022 | 0.03 | 88.0 | |
| Contenido de grasa (%) | 40 | 0.21 | 0.41 | 0.005 | 95.9 | Nivel de inclusión (0.005) |
| Contenido de proteína (%) | 39 | -0.085 | -0.22 | 0.001 | 98.5 | |
| Contenido de CLA ² | 37 | 0.70 | 0.72 | 0.001 | 99.3 | Nivel de inclusión (0.003) |

I^2 , estadístico de la heterogeneidad estimada; ¹modelo aleatorio. ²mg/g de ácidos grasos.

Los estudios analizados comprenden ensayos realizados entre 1992 a 2014; los estudios que no cumplieron con uno o mas criterios de inclusión definidos previamente fueron excluidos del análisis. En relación a los valores de CLA, los valores reportados como porcentaje fueron transformados en mg/100 g de ácidos grasos, para poder utilizar la diferencia media bruta como unidad de medición del tamaño del efecto. El efecto de la adición de grasas protegidas fue significativo en las cuatro variables respuesta analizadas (Cuadro 5); sin embargo, existieron diferencias en la homogeneidad del efecto de la adición de grasa protegida entre variables, el efecto entre estudios fue mas homogéneo para el contenido de proteína y CLA, como se observa en los diagrama de bosque (Figura 11 y 13). En el presente estudio existió un efecto positivo de la adición de grasa protegida sobre la producción láctea ovina (0.04; $P=0.03$)(Figura 8).

La adición de grasa en las dietas de ovejas lecheras tiene como objetivos 1) incrementar la concentración de energía de la dieta, 2) incrementar el contenido de grasa en leche, y 3) modificar el perfil de ácidos grasos de la grasa en leche. Los ácidos grasos protegidos mediante jabones cálcicos son considerados como grasa inerte en el rumen, que ha mostrado incrementar la energía total consumida; sin embargo, algunos estudios reportan un efecto opuesto, debido a que una elevada inclusión de grasa en las raciones, rica en PUFA, puede disminuir la digestión de fibra, reduciendo la ingestión de alimento y la disponibilidad de energía (Lurueña-Martinez et al. 2010). La protección de las grasas mediante su saponificación es un intento por suprimir o disminuir sus efectos negativos sobre la digestibilidad de la fibra, además de proporcionar una fuente de PUFA a nivel abomasal (Perez Alba et al. 1997).

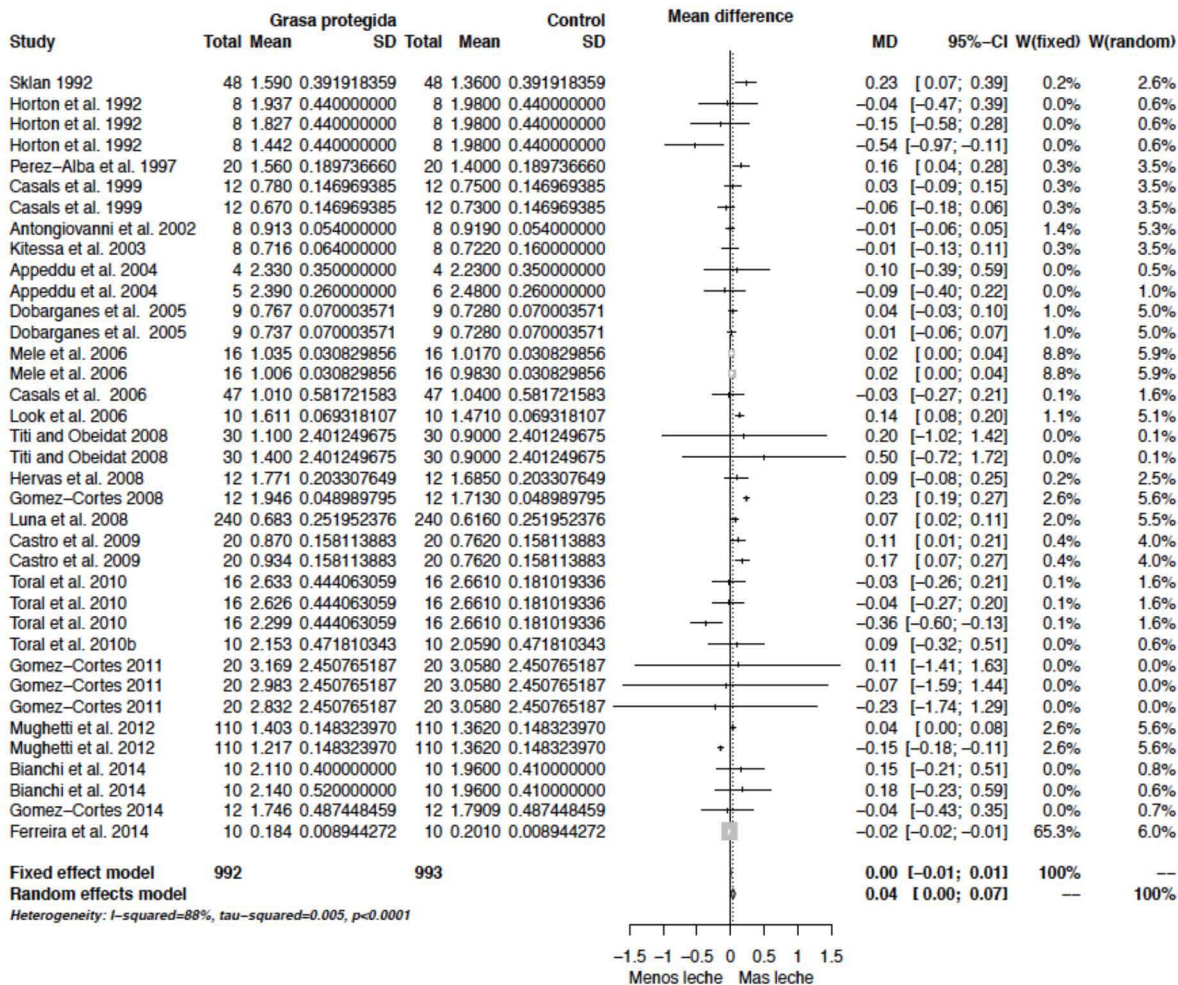


Figura 8. Diagrama de bosque de la producción láctea (L) para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepeso en raciones para ovejas lecheras.

La adición de grasas protegidas en los estudios analizados presentaron un efecto positivo sobre el contenido de grasa en leche con una diferencia media de 0.21 g/100g en comparación con el grupo control (Figura 9). Sin embargo, es evidente la variabilidad en la respuesta en el contenido de grasa en relación con la suplementación de grasa en la ración; el tamaño del efecto dependerá de la dosis de suplementación, valor energético de la ración, contenido de grasa en la dieta basal, nivel de producción de leche, fase de la lactación y estatus nutricional de las ovejas (Casals et al. 1999; Titi & Obeidat 2008).

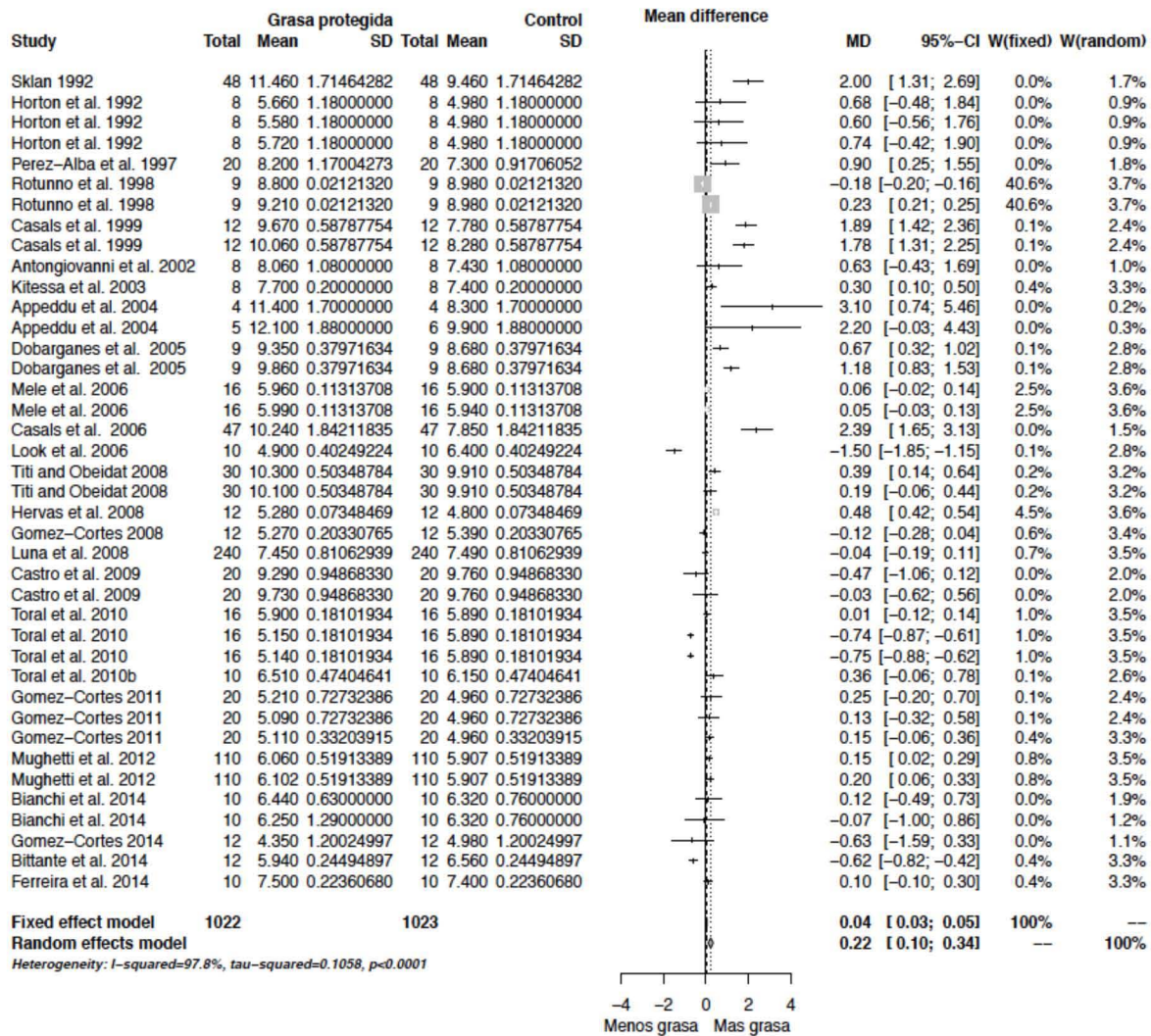


Figura 9. Diagrama de bosque del contenido de grasa (g/100g) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras.

Con la finalidad de determinar el efecto del nivel de inclusión de grasa protegida en las raciones de ovejas lecheras sobre la concentración de grasa en leche se llevó a cabo una meta-regresión. El procedimiento de meta-regresión permite explicar parte de la heterogeneidad y obtener un estimador de la relación entre el contenido de grasa y el nivel de inclusión; la cual fue positiva entre ambas variables (0.005; P=0.007), lo cual significa que dentro del universo poblacional analizado existe un aumento en la

concentración de grasa en leche conforme se incrementa la cantidad de grasa protegida adicionada (Figura 10).

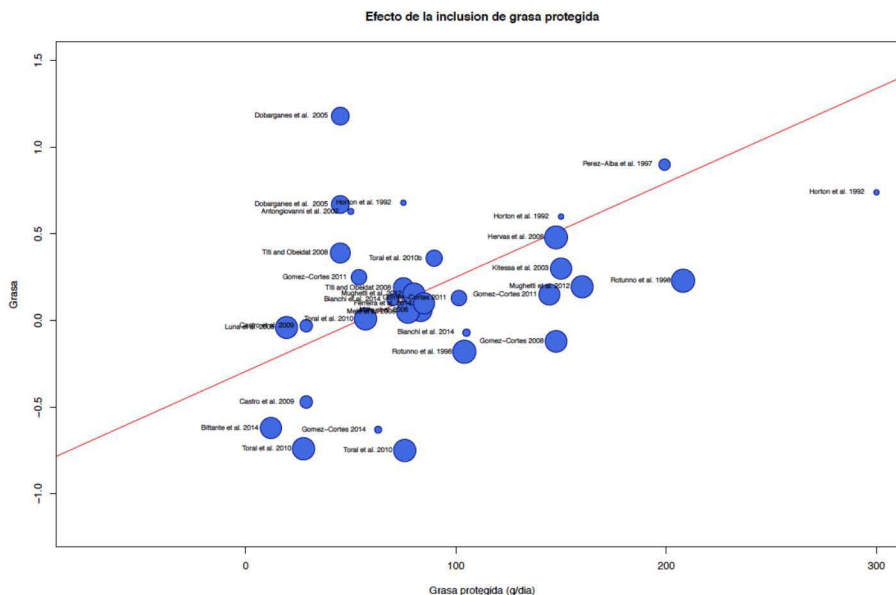


Figura 10. Efecto del nivel de inclusión sobre el tamaño del efecto de contenido de grasa.

En estudios previos la falta de respuesta hacia la suplementación de grasas protegidas sobre el contenido de grasa en leche se asocia a un efecto de dilución debido al incremento en la producción láctea como respuesta a la mejora en la disponibilidad de energía en la ración (García et al. 2005). La etapa de lactación es otro factor que podría estar relacionada con el uso de grasas protegidas, ya que existe evidencia que los triacilgliceroles se transfieren mas eficientemente de la ración hacia la leche en el principio de la lactación, conforme esta última avanza mas ácidos grasos son usados para ser almacenados en el tejido adiposo (Casals et al. 1999).

Una reducción significativa ($P < 0.001$) en la concentración de proteína en leche fue observada en las ovejas suplementadas con grasas protegidas (Figura 11) y esta asociada con el nivel de suplementación de la misma (Figura 12). La diferencia media fue de 0.085 g/kg de proteína en leche de ovejas suplementadas. Wang *et al.* (2007) señalan que la reducción en la concentración de proteína en leche de animales suplementados con grasas protegidas es producto de un efecto de dilución, esto debido

a que existe un aumento en la producción láctea pero la síntesis de proteína se mantiene al mismo nivel. La disminución en la concentración de proteína ha sido hipotetizada debido a la disminución en la disponibilidad de glucosa, desarrollo de resistencia a la insulina, incremento en la eficiencia en la producción láctea y reducción en los niveles de somatotropina plasmática (Casper & Schingoethe 1989; Wu & Huber 1994). Además, Cant *et al.* (1993) señalan que la adición de grasas protegidas reduce el flujo sanguíneo a la glándula mamaria, impidiendo el aumento de absorción de amino ácidos esenciales.

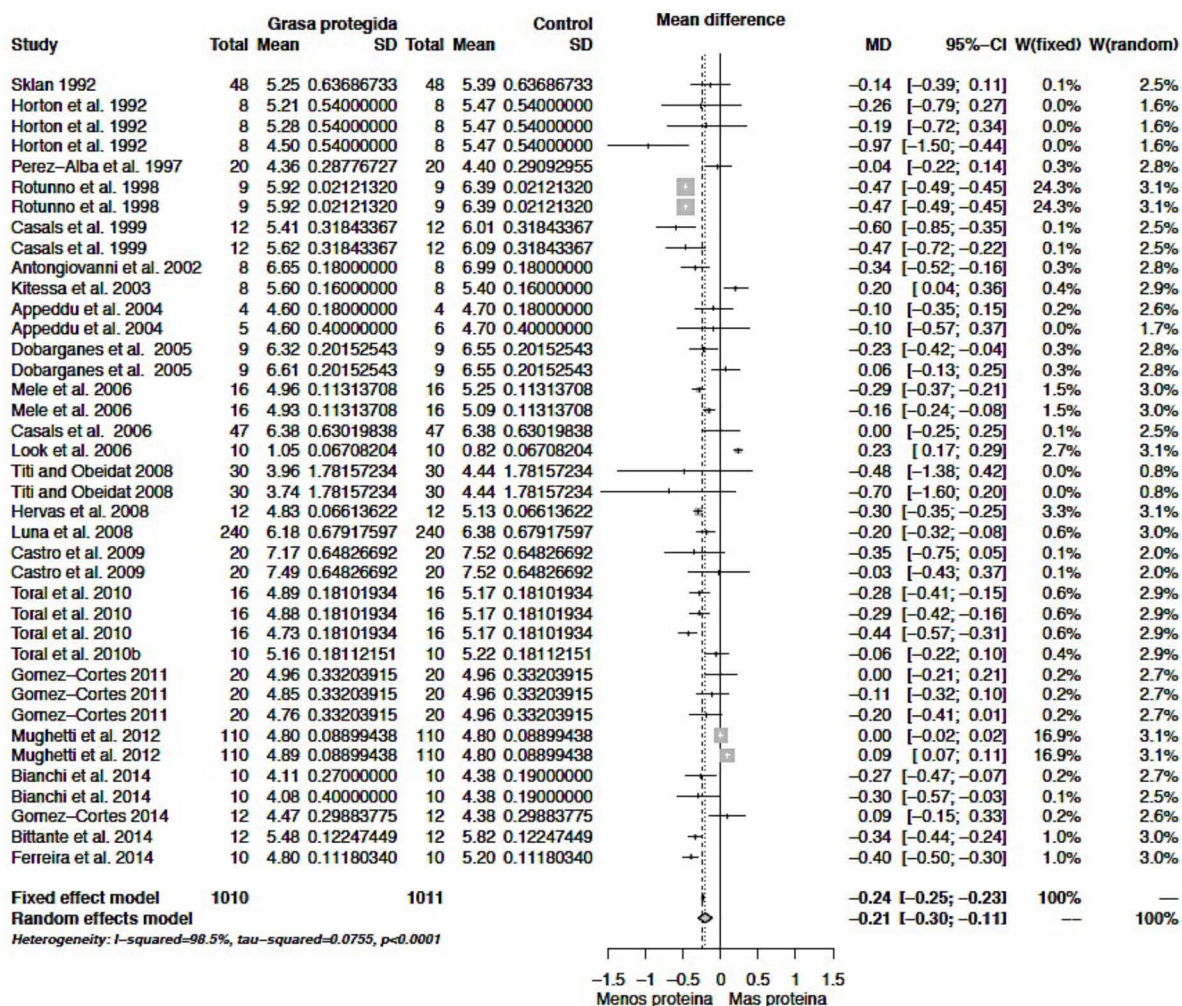


Figura 11. Diagrama de bosque del contenido de proteína (g/100 g) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras.

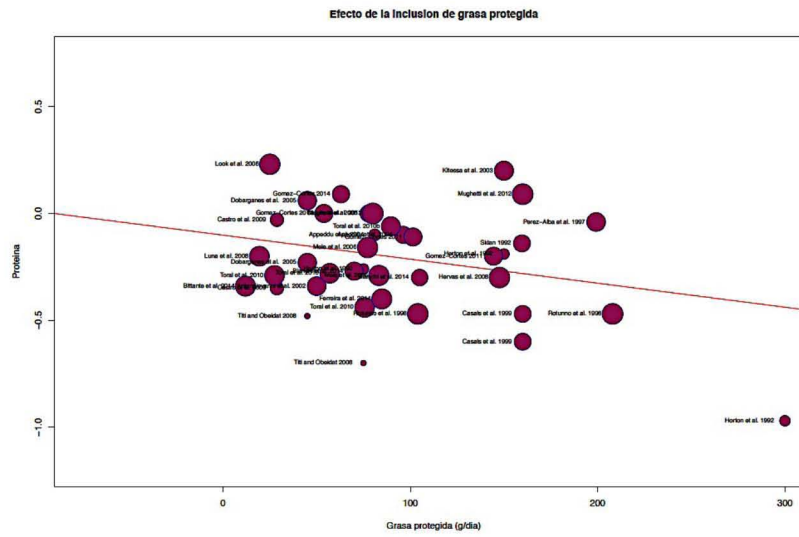


Figura 12. Efecto del nivel de inclusión de grasa protegida sobre el tamaño del efecto de contenido de proteína.

La adición de grasas protegidas en las raciones analizadas resultó en un aumento substancial en la concentración de CLA en leche (0.7 mg/g)(Figura 13). En general, las grasas protegidas ricas en ácido linoléico y linolénico presentan un efecto importante sobre la concentración de CLA, existiendo una clara respuesta dependiente de la dosis de suplementación como lo muestra los resultados de la meta-regresión, en donde existió una relación positiva (0.003) y significativa ($P=0.001$) entre el contenido de CLA y el nivel de inclusión (Figura 14). Estos resultados coinciden con los reportados por Nudda *et al.* (2014), quienes señalan que existe una asociación lineal positiva ($R^2=0.78$) entre la cantidad suplementada de ácido linoléico y linolénico y la concentración de CLA en leche de oveja; además, refuerza lo señalado por Bauman *et al.* (1999) quienes refieren que los niveles elevados de ácido linoléico en la ración inhiben irreversiblemente la hidrogenación del ácido vaccénico (trans 11, 18:1), favoreciendo su flujo hacia duodeno, lo cual resulta en el aumento de sustratos para la síntesis de CLA en la glándula mamaria.

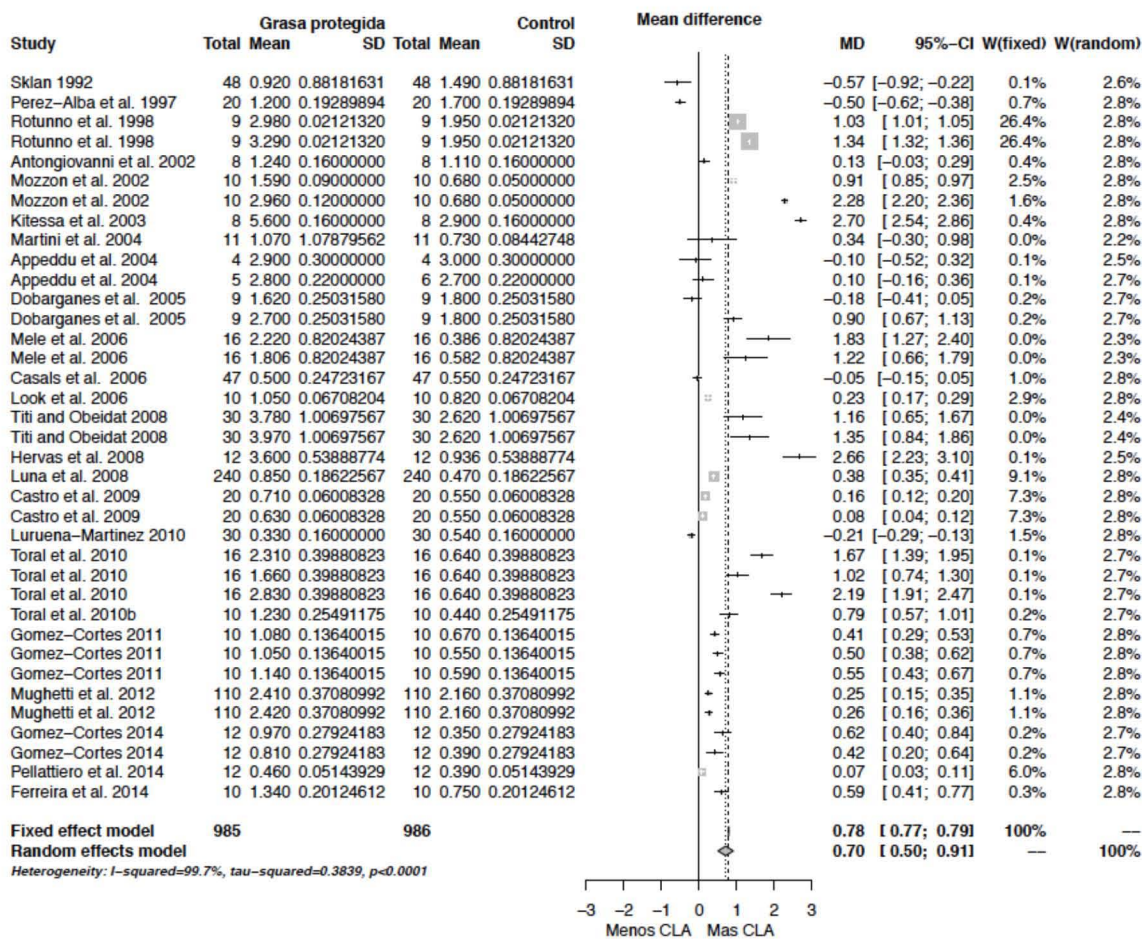


Figura 13. Diagrama de bosque del contenido de CLA (mg/g de ácidos grasos metilados) en leche para los estudios enfocados en la adición de grasa de sobrepaso en raciones para ovejas lecheras.

Sin embargo, los efectos de la suplementación de grasa en la dieta son limitados por dos aspectos importantes: el límite de inclusión no debe exceder de 5-7 % de materia seca (especialmente de grasa rica en PUFA) debido a que dosis excesivas inhiben la fermentación ruminal y como consecuencia una baja de la eficiencia de utilización de macronutrientes y fibra. Segundo, la elevada tasa de biohidrogenización ruminal que determina que en promedio el 85 % de los lípidos esterificados salgan del rumen parcial o completamente hidrogenados (Hiller 2014). Por lo cual estrategias adicionales a la protección ruminal de las grasas deben ser consideradas para mejorar el perfil de lípidos en la leche ovina, como pueden ser: mejoramiento genético, utilización de

modificadores del metabolismo, uso de extractos de plantas (saponinas y taninos) que inhibe biohidrogenación, utilización de modificadores del ambiente ruminal (ionoforos), etc.

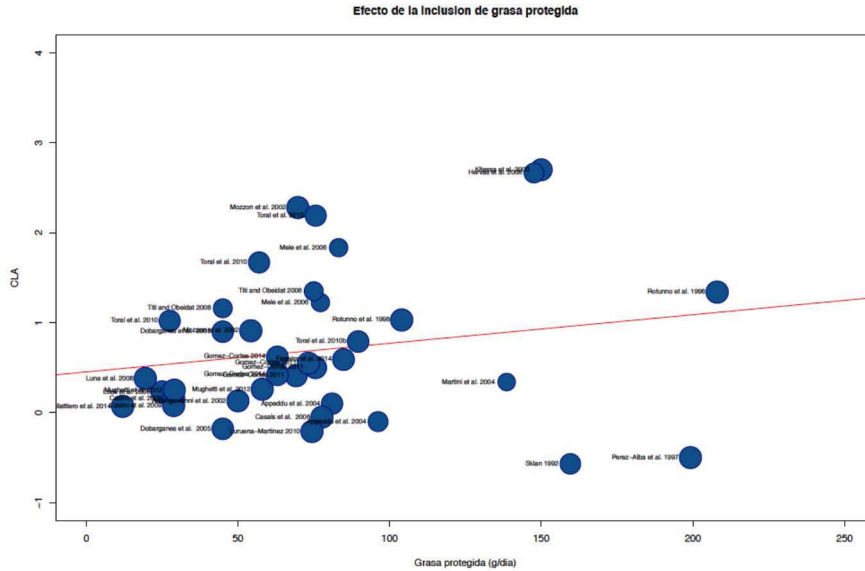


Figura 14. Efecto del nivel de inclusión sobre el tamaño del efecto de contenido de CLA.

De acuerdo a los diagrama de bosque se muestra mayor homogeneidad del efecto de grasa protegida en el contenido de proteína y de CLA (Figura 11 y 13). Los gráficos embudo se presentan en la Figura 15, en las cuales no se muestra una asimetría marcada en ninguna de las características analizadas; sin embargo, se observa que gran parte de los ensayos utilizados en el análisis del contenido de CLA salen de las líneas de contorno de significancia $P < 0.05$, sin embargo no hubo asimetría sustancial en los estudios. Sterne *et al.* (2011) señalan que cuando se observa una marcada asimetría y los estudios salen de las líneas de contorno de significancia, esta asimetría podría ser producto de sesgos de publicación, aunque otras posibles explicaciones tendrían que ser consideradas.

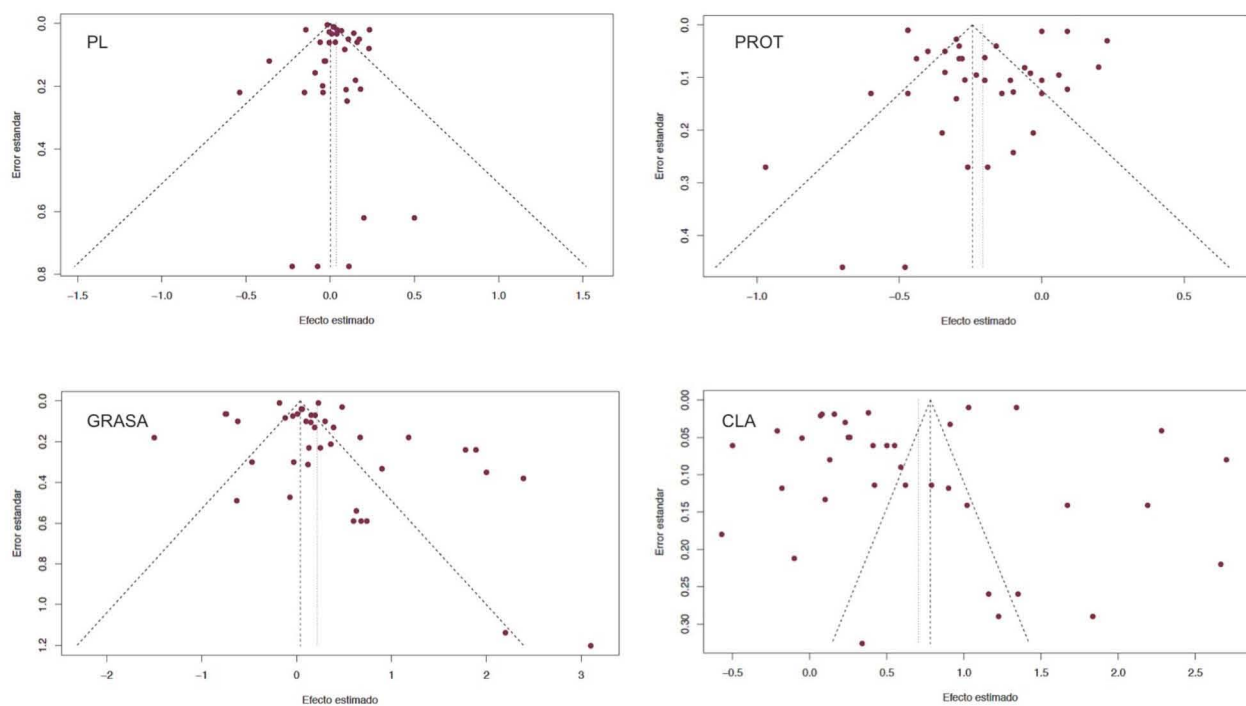


Figura 15. Grafico de embudo del efecto de la adición de grasa protegida sobre la producción láctea y composición química de la leche ovina. PL, producción láctea; Lact, contenido de lactosa (%); Prot, proteína; CLA, ácido linoléico conjugado.

4. Conclusión

La producción láctea y composición química de la leche ovina puede ser modificada a través de la manipulación de las raciones en ovejas lecheras. El nivel de inclusión de forraje y concentrado en las raciones ovinas muestra un efecto marcado sobre las características analizadas, excepto en la concentración de proteína. El nivel de energía disponible en las raciones podría explicar los rendimientos lácteos superiores en las raciones basadas en concentrado. La mayor disponibilidad de ácidos grasos poli-insaturados en las dietas basadas en forraje explican en parte la mayor concentración de grasa protegida y CLA. Además, las raciones basadas en concentrado pueden tener un efecto negativo sobre el ambiente ruminal, con detrimento en el proceso de biohidrogenización y la síntesis de ácidos grasos poli-insaturados.

La inclusión de grasas protegidas tienen un efecto substancial en la producción láctea, contenido de grasa, proteína y CLA. Sin embargo, la respuesta a la adición de grasas protegidas muestra una elevada heterogeneidad, principalmente en el contenido de CLA, por lo cual es necesario la búsqueda de fuentes de variación. EL proceso de meta-regresión demuestra que el efecto de la adición de grasa protegida en las variables analizadas es dependiente, en parte, del nivel de inclusión. Sin embargo, estudios mas profundos son necesarios para identificar otras fuentes de variación en la respuesta a la relación F:C y adición de grasas protegidas.

5. Bibliografía

Albenzio M, Santillo A, Avondo M, Nudda A, Chessa S, Pirisi A, Banni S. 2016. Nutritional properties of small ruminant food products and their role on human health. *Small Rumin Res.* 135:3–12.

Amigo, L, Recio I, Ramos M. 2000. Genetic polymorphism of ovine milk proteins: its influence on technological properties of milk -a review. *Int Dairy J.* 10:135–149.

Atti N, Rouissi H, Othmane MH. 2006. Milk production, milk fatty acid composition and conjugated linoleic acid (CLA) content in dairy ewes raised on feedlot or grazing pasture. *Livest Sci.* 104:121–127.

Bauman DE, Baumgard LH, Corl B a., Griinari JM. 1999. Biosynthesis of conjugated linoleic acid in ruminants. *Proc Am Soc Anim Sci [Internet].* 77:1-NaN-15. Available from: <http://jas.fass.org/cgi/content/abstract/77/E-Suppl/1-ae>

Bencini R, Pulina G. 1997. The quality of sheep milk: a review. *Aust J Exp Agric.* 37:485–504.

Bencini R, Stanislao Atzori A, Nudda A, Battacone G, Pulina G. 2010. 13 – Improving the quality and safety of sheep milk. [place unknown]: Woodhead Publishing Limited. Available from: <http://dx.doi.org/10.1533/9781845699437.3.347>

Berger YM, Thomas DL, Foran M, Lara J. 2010. Le secteur des brebis laitières au Canada, Mexique et Etats Unis d'Amérique. In: Séminaire Int sur la Trait la Prod laitière des brebis. France: UPRA; p. 1–2.

Boyazoglu J, Morand-Fehr P. 2001. Mediterranean dairy sheep and goat products and

their quality: A critical review. *Small Rumin Res.* 40:1–11.

Cant JP, Depeters EJ, Baldwin RL. 1993. Mammary Uptake of Energy Metabolites in Dairy-Cows Fed Fat and Its Relationship to Milk Protein Depression. *J Dairy Sci* [Internet]. 76:2254–2265. Available from: [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77400-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77400-7)

Casals R, CAJA G, Such X, Torre C, CALSAMIGLIA S. 1999. Effects of calcium soaps and rumen undegradable protein on the milk production and composition of dairy ewes. *J Dairy Res* [Internet]. 66:177–191. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033135138&partnerID=tZOtx3y1>

Casper DP, Schingoethe DJ. 1989. Model to describe and alleviate milk protein depression in early lactation dairy cows fed a high fat diet. *J Dairy Sci* [Internet]. 72:3327–35. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2628449>

Chilliard Y, Ferlay a, Mansbridge R, Doreau M. 2000. Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. *Ann Zootech.* 49:181–205.

Dersimonian R, Laird N. 1986. Meta-Analysis in Clinical Trials*. *Control Clin Trails.* 7:177–188.


FAOSTAT. 2014. Livestock Primary [Internet]. [cited 2017 Apr 6]. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>

García CD, Hernández MP, Cantalapiedra G, Salas JM, Merino J a. 2005. Bypassing the rumen in dairy ewes: the reticular groove reflex vs. calcium soap of olive fatty acids. *J Dairy Sci* [Internet]. 88:741–7. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15653540>

Glasser F, Ferlay A, Chilliard Y. 2008. Oilseed Lipid Supplements and Fatty Acid Composition of Cow Milk: A Meta-Analysis. *J Dairy Sci* [Internet]. 91:4687–4703. Available from: <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-0987>

Gómez-Cortés P, Frutos P, Mantecón a R, Juárez M, de la Fuente M a, Hervás G. 2009. Effect of supplementation of grazing dairy ewes with a cereal concentrate on animal performance and milk fatty acid profile. *J Dairy Sci* [Internet]. 92:3964–72. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19620680>

Griinari JM, Corl BA, Lacy SH, Chouinard PY, Nurmela K, Bauman DE. 2000.

Conjugated Linoleic Acid Is Synthesized Endogenously in Lactating Dairy Cows by  J Nutr. 130:2285–2291.

Haenlein GFW, Wendorff WL. 2006. Sheep milk. In: Park YW, Haenlein GFW, editors. *Handb Milk Non-Bovine Mamm*. Victoria: Blackwell Publishing; p. 137–194.

Hedges L V. 1981. Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect size and Related Estimators. *J Educ Behav Stat* [Internet]. [cited 2016 Aug 15]; 6:107–128. Available from: <http://jeb.sagepub.com/cgi/doi/10.3102/10769986006002107>

Hiller B. 2014. Recent developments in lipid metabolism in ruminants - the role of fat in maintaining animal health and performance. *Anim Prod Sci*. 54:1549–1560.

IDF. 2016. The world dairy situation. *Int Dairy Fed*. 485:1–6.

Jahreis G, Fritsche J, Kraft J. 1999. Species dependent, seasonal, and dietary variation of conjugated linoleic acid in milk. In: *Adv Conjug linoleic acid Res*. [place unknown]; p. 215–225.

Jandal JM. 1996. Comparative aspects of goat and sheep milk. *Small Rumin Res*. 22:177–185.

Jenkins TC, McGuire M a. 2006. Major advances in nutrition: impact on milk composition. *J Dairy Sci* [Internet]. 89:1302–1310. Available from: [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72198-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72198-1)

Kucuk O, Hess BW, Ludden P a, Rule DC. 2001. Effect of forage:concentrate ratio on ruminal digestion and duodenal flow of fatty acids in ewes. *J Anim Sci*. 79:2233–2240.

Lean IJ, Rabiee AR, Duffield TF, Dohoo IR. 2009. Invited review: Use of meta-analysis in animal health and reproduction: methods and applications. *J Dairy Sci* [Internet]. 92:3545–65. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19620636>

Lean IJ, Thompson JM, Dunshea FR. 2014. A meta-analysis of zilpaterol and ractopamine effects on feedlot performance, carcass traits and shear strength of meat in cattle. *PLoS One*. 9:1–28.

Lurueña-Martinez MA, Palacios C, Vivar-Quintana AM, Revilla I. 2010. Effect of the addition of calcium soap to ewes' diet on fatty acid composition of ewe milk and subcutaneous fat of suckling lambs reared on ewe milk. *Meat Sci* [Internet]. 84:677–683. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.11.002>

M. De Rancourt, Carrère L. 2011. Milk sheep production systems in Europe: Diversity

and main trends. *Options Méditerranéennes Séries A Mediterr Semin* [Internet]. 100:107–111. Available from: <http://om.ciheam.org/om/pdf/a100/00801490.pdf>

Malcher JPR. 2010. Producción de leche de oveja y su valor agregado. In: *Reun del Com Nac del Sist Prod Ovinos* [Internet]. CDMX. Available from: http://spo.uno.org.mx/wp-content/uploads/2011/07/jprm_producciondelecheyvaloragregado.pdf

Mel'uchová B, Blaško J, Kubinec R, Górová R, Dubravská J, Margetín M, Soják L. 2008. Seasonal variations in fatty acid composition of pasture forage plants and CLA content in ewe milk fat. *Small Rumin Res.* 78:56–65.

Mierlita D, Maurescu CM, Ban SD, Lup F. 2009. Effects of Energy and Protein Content in the Diet on Milk Yield and Milk Fatty Acid Profile in Dairy Ewes. *Bull UASVM Anim Sci Biotechnol.* 66:67–73.

Mikolayunas CM, Thomas DL, Albrecht KA, Combs DK, Berger YM, Eckerman SR. 2008. Effects of Supplementation and Stage of Lactation on Performance of Grazing Dairy Ewes1. *J Dairy Sci.* 91:1477–1485.

Morand-Fehr P, Fedele V, Decandia M, Le Frileux Y. 2007. Influence of farming and feeding systems on composition and quality of goat and sheep milk. *Small Rumin Res.* 68:20–34.

Nudda A, Battacone G, Neto OB, Cannas A, Helena A, Francesconi D, Atzori AS, Pulina G. 2014. Feeding strategies to design the fatty acid profile of sheep milk and cheese. 43:445–456.

Park YW, Juárez M, Ramos M, Haenlein GFW. 2007. Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. *Small Rumin Res.* 68:88–113.

Perez Alba LM, De Souza Cavalcanti S, Perez Hernandez M, Martinez Marin A, Fernandez Marin G. 1997. Calcium soaps of olive fatty acids in the diets of Manchega dairy ewes: effects on digestibility and production. *J Dairy Sci* [Internet]. 80:3316–3324. Available from: [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76307-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76307-0)

Raynal-Ljutovac K, Lagriffoul G, Paccard P, Guillet I, Chilliard Y. 2008. Composition of goat and sheep milk products: An update. *Small Rumin Res.* 79:57–72.

Schwarzer G. 2016. meta: General Package for Meta-Analysis.

Selvaggi M, Laudadio V, Dario C, Tufarelli V. 2014. Investigating the genetic

polymorphism of sheep milk proteins: A useful tool for dairy production. *J Sci Food Agric.* 94:3090–3099.

Sterne JAC, Sutton AJ, Ioannidis JPA, Terrin N, Jones DR, Lau J, Carpenter J, Rücker G, Harbord RM, Schmid CH, et al. 2011. Recommendations for examining and interpreting funnel plot asymmetry in meta-analyses of randomised controlled trials. *BMJ* [Internet]. 343:d4002. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21784880>

Titi HH, Obeidat BS. 2008. Effects of Ca salt supplementation on milk yield and composition and on lamb growth rate of Awassi ewes. *Livest Sci* [Internet]. 119:154–160. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2008.03.013>

Tsiplakou E, Kotrotsios V, Hadjigeorgiou I, Zervas G. 2010. Differences in sheep and goats milk fatty acid profile between conventional and organic farming systems.

Wang C, Liu JX, Yuan ZP, Wu YM, Zhai SW, Ye HW. 2007. Effect of level of metabolizable protein on milk production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J Dairy Sci* [Internet]. 90:2960–2965. Available from: <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-129>

Wu Z, Huber J. 1994. Relationship between dietary fat supplementation and milk protein concentration in lactating cows: A review. *Livest Prod Sci* [Internet]. [cited 2016 Aug 14]; 39:141–155. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301622694901805>

CAPÍTULO II

PRODUCCIÓN ORGÁNICA DE LECHE DE OVEJA

Artículo publicado: **Ángeles-Hernández, J.C.**, Pérez-Ramirez A.H, Pérez-Rocha, J.M., Ronquillo. M.G. 2014. Production of Sheep Milk. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17, 49-62.



Revisión [Review]

PRODUCCIÓN ORGÁNICA DE LECHE DE OVEJA
ORGANIC PRODUCTION OF SHEEP MILK

**Juan Carlos Ángeles-Hernández¹, Aurora Hilda Pérez-Hernández²,
Javier Malcher-Pérez-Rocha³ and Manuel González-Ronquillo^{4*}**

¹*Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud y Producción Animal,
Universidad Nacional Autónoma de México.*

²*Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica, Facultad de Medicina
Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México.
Av. Universidad 3000. México, D.F. 04510.*

³*Ovinos Especializados en leche S.P. de R.L., Rancho Santa Marina,
El Marqués Querétaro.*

⁴*Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote,
Toluca, México. CP.50000. Email: mrg@uaemex.mx*

**Corresponding autor*

RESUMEN

Los sistemas de producción orgánicos se basan en procesos naturales, aprovechamiento de recursos locales y disminución en la degradación del suelo. La efectividad de la producción de leche de los sistemas orgánicos vs los sistemas de producción convencionales es un tema abierto a debate. Son diversos los estudios en los cuales se observa un efecto positivo de los sistemas orgánicos de producción de leche de oveja en relación al bienestar y salud animal, calidad de los productos e impacto ambiental. No obstante, algunos autores citan rendimientos lácteos inferiores, así como mayor susceptibilidad a condiciones medioambientales comparados con los obtenidos en sistemas convencionales. Los menores rendimientos en los sistemas orgánicos de producción de leche de oveja, están relacionados con el limitado aporte nutricional, el bajo potencial genético, así como las cambiantes condiciones medioambientales. Estos sistemas ovinos son principalmente un método de producción para un mercado específico que ofrece productos con calidad Premium y elevados estándares de calidad en sus procesos de producción. Por lo que una empresa ovina orgánica de producción de leche debe ser considerada viable en la medida que presente un balance positivo a nivel de sostenibilidad global, es decir, que sea socialmente benéfica, económicamente viable y medioambientalmente responsable.

Palabras clave: Ovejas; producción de leche; sistema orgánico.

SUMMARY

Organic production systems are based on natural processes, leveraging local resources and decreasing in soil degradation. Effectiveness of milk production of organic systems vs. conventional production systems is a subject open to debate. There are various studies in which there is a positive effect of organic systems in relation to the welfare and animal health, product quality and environmental impact. However, some authors report lower milk yields production and increased susceptibility to environmental conditions compared with those obtained in conventional systems. The lower milk yields in organic systems in Dairy sheep's production, are related to the limited nutritional value, low genetic potential, and the changing environmental conditions. These systems are mainly a production method for a specific market with premium quality products and high standards in their production processes. Thus, a company organic Dairy sheep production should be considered viable when present a positive global sustainability level, that is socially beneficial, economically viable and environmentally responsible.

Key words: sheep; milk production; organic system.

INTRODUCCIÓN

Los granjas orgánicas pueden ser definidas como una aproximación de la ganadería y la agricultura cuyo objetivo es generar sistemas de producción integrales, humanos, ambiental y económicamente sustentables (Siardos, 2002). Existe extensa y diversificada evidencia bibliográfica que refiere que los sistemas orgánicos pueden proveer una amplia gama de beneficios, incluyendo impactos positivos sobre la tasa de empleo, mejoramiento de condiciones medioambientales y favorecer el desarrollo de las economías locales y regionales (Lobley et al., 2013).

El establecimiento de sistemas orgánicos de producción, particularmente los sistemas de producción de leche, comprende múltiples modificaciones de los patrones de producción y comercialización, los cuales determinan las diferencias en rendimientos lácteos, el sobreprecio de los productos orgánicos y de manera más discutida, en la calidad nutricional y beneficios a la salud humana de la leche y sus derivados.

El objetivo de este estudio fue analizar la información bibliográfica disponible relacionada con la producción de leche ovina en sistemas orgánicos y así determinar la manera en cómo los sistemas de producción orgánicos impactan sobre los parámetros productivos, calidad de la leche ovina y sus derivados, así como el impacto social, económico y ambiental. Finalmente, se analizaron los datos disponibles de la incipiente producción de leche orgánica de oveja en México.

AGRICULTURA ORGÁNICA

La agricultura orgánica es apenas una pequeña rama de la actividad económica, sin embargo, está adquiriendo importancia considerable en el sector agrícola de muchos países (Figura 1), independientemente de su nivel de desarrollo. En Austria y Suiza, la agricultura orgánica ha llegado a representar hasta un 10 % del sistema alimentario y en Estados Unidos, Francia, Japón y Singapur se están registrando tasas de crecimiento anual superiores al 20 % (Willer y Kilcher, 2009).

Además, esta actividad se presenta como una oportunidad de incrementar la rentabilidad de los sistemas locales de producción y mejorar las condiciones socioeconómicas de los sectores dedicados a la producción de alimentos en países en desarrollo (Nardone et al., 2004; Lombey et al., 2009; 2013). Aun cuando existen países con una industria de productos orgánicos consolidada, ningún país en la actualidad es capaz de autosatisfacer sus demandas de productos orgánicos durante todo el año, por lo cual, muchos países en desarrollo han comenzado a exportar con éxito productos orgánicos (FAO, 1999).

La comisión del Codex Alimentarius (1999/2001) define a la agricultura orgánica como: “*un sistema global de gestión de la producción que fomenta y realza la salud de los agroecosistemas, inclusive la diversidad, los ciclos y la actividad biológica del suelo*”. Hace hincapié en la utilización de prácticas de gestión, con preferencia en la no utilización de insumos sintéticos agrícolas. Esto se consigue aplicando, siempre que es posible, métodos agronómicos, biológicos y mecánicos, en contraposición a la utilización de materiales sintéticos, para desempeñar cualquier función específica dentro del sistema.

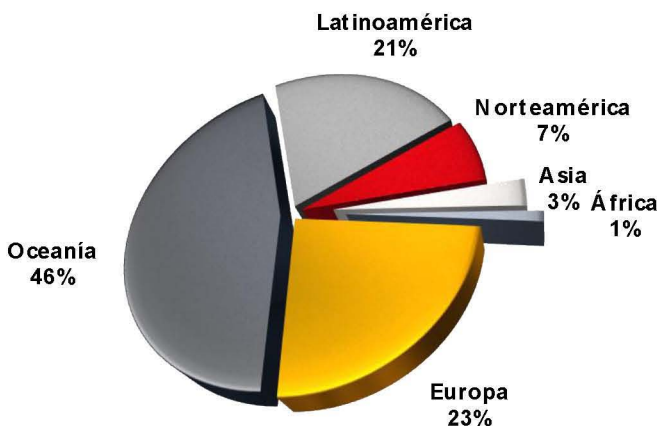


Figura 1. Distribución regional de superficie de tierra utilizada en la agricultura orgánica (Nardone et al., 2004).

Esta definición engloba claramente al medio ambiente, el uso apropiado de los recursos locales, manejo holístico de la agricultura orgánica y un papel central de suelo en los sistemas de producción (Siardos, 2002).

La INFOAM (2003) (International Federation of Agriculture Movement), amplía su definición ubicando al suelo y a la actividad humana como ejes motores del proceso de producción con un enfoque holístico, definiendo la agricultura orgánica de la siguiente manera:

Es un sistema agrícola que promueve la correcta producción en términos medioambientales, sociales y económicos de alimentos, fibras, etc.

En estos sistemas, la fertilidad del suelo es vista como la clave para una producción exitosa. Trabajando con las propiedades y características naturales de las plantas, animales y paisaje, los productores orgánicos ayudan a optimizar la calidad en todos los aspectos de la agricultura y medio ambiente (INFOAM, 2003).

Esta última definición establece de manera más puntual algunas de las pautas principales con las que trabajan los sistemas orgánicos; la INFOAM señala cuatro principios fundamentales de la producción orgánica (INFOAM, 2005):

- i. Principio de salud. La agricultura orgánica debe sostener y promover la salud del suelo, planta, animal, humano y el planeta como un elemento único e indivisible.
- ii. Principio de ecología. La agricultura orgánica debe basarse en sistemas y ciclos ecológicos vivos, trabajar con ellos, emularlos y ayudar a sostenerlos.
- iii. Principio de equidad. La agricultura orgánica debe estar basada en relaciones que aseguren equidad con respecto al ambiente común y a las oportunidades de vida.
- iv. Principio de precaución. La agricultura orgánica debe ser gestionada de una manera responsable y con precaución para proteger la salud y el bienestar de las generaciones presentes, futuras y el ambiente.

La agricultura convencional tiene la tendencia a controlar las condiciones de producción en pro de maximizar el rendimiento de los animales, por medio de la utilización de grandes cantidades de insumos y razas especializadas (Greer et al., 2008; Nauta y Spengler-Neff, 2011); en contraste, la agricultura orgánica, está basada en los procesos naturales, aprovechamiento de recursos locales y en completar ciclos biológicos, lo cual implica equilibrio más que control y un uso menos intensivo del suelo (Nauta et al., 2009; Nauta y Spengler-Neff, 2011). Por tal motivo, las definiciones de agricultura orgánica

engloban tanto las actividades agrícolas como ganaderas, ya que sus principios se basan en el manejo sistemático y holístico de la producción.

GANADERÍA ORGÁNICA

La INFOAM (2005) define la producción ganadera orgánica como un *“sistema basado en la relación armónica entre la tierra, plantas y animales, en el respeto a las necesidades fisiológicas y del comportamiento del ganado y en la alimentación con piensos orgánicos o con recursos naturales como forraje”*.

La producción ganadera orgánica requiere de agroecosistemas complejos y de diversidad en los cultivos; de una transición de monocultivos a asociaciones y de una óptima integración espacial y temporal de sus componentes (Weller, 1996). En este sentido, la ganadería orgánica, envuelve cambios radicales en los procesos de producción relacionados con mayor atención a la salud y bienestar animal, conservación del ambiente y calidad e inocuidad de los alimentos (Benoit y Veysset, 2003; Blair, 2011). Las actuales legislaciones y procesos de certificación incluyen especificaciones para el alojamiento de los animales, manejo nutricional y reproductivo, tamaño de rebaño y carga animal, prevención de enfermedades y tratamientos veterinarios (Ronchi y Nardone, 2003).

Los sistemas de producción de rumiantes juegan un papel importante en muchas granjas orgánicas debido a su intervención en los procesos de reciclaje de nutrientes y a la transformación eficiente de componentes vegetales a productos para consumo humano con elevado valor nutricional (Ronchi y Nardone, 2003); en particular los rebaños ovinos orgánicos promueven el desarrollo de zonas geográficas agroclimáticas desfavorables y económicamente deprimidas (Acero et al., 2004; Toro-Mujica et al., 2011a). La industria porcina y avícola desempeña un papel de menor impacto en la ganadería orgánica, solo la producción de huevo tiene un lugar importante en algunos países (Hermansen, 2001).

Los estándares internacionales para la certificación internacional de productos orgánicos son: (1) IFOAM Estándares Básicos y Criterios (2005) y (2) la ISO 65:1996, siendo considerada ésta última como la guía más importante para la certificación orgánica (Blair, 2011). En México los procesos de certificación y regulación de la producción ganadera orgánica aún no están completamente definidos en todos los sectores productivos.

Un primer esfuerzo encaminado a la estandarización de estos métodos de producción en México ocurre en 2006, cuando se publica la “La ley de Productos Orgánicos” que establece las pautas de conversión, producción, procesamiento, elaboración, preparación y procesos de comercialización y certificación de los productos orgánicos.

La Unión Europea (EU, 1999), el Codex Alimentarius (2001) y la IFOAM (2005) determinan de manera general algunos principios básicos en los que se basa la ganadería orgánica, dentro de los que destacan:

1. La densidad animal está limitada a dos unidades animal por hectárea.
2. Está prohibido el uso de aminoácidos sintéticos y promotores del crecimiento.
3. Se permite que un máximo de 10% del total de materia seca consumida por el animal provenga de alimentos originados en sistemas convencionales.
4. La dieta debe contener al menos un 60% de forraje.
5. No se permite utilización de medicamentos alopáticos en animales en línea de producción.

PRODUCCIÓN DE LECHE ORGÁNICA

El interés por la producción de leche en sistemas orgánicos ha aumentado de manera considerable, ligado a la preocupación por el impacto ambiental y el bienestar animal en los sistemas convencionales de producción (Sato et al., 2005).

Pérez et al. (2009) señalan que uno de los sistemas de producción orgánica más grandes y complejos es la producción lechera, debido a la enorme cantidad de

innovaciones tecnológicas dirigidas a esta actividad, lo cual lo convierte en un sistema difícil de transformar a partir de la producción convencional. Esta situación genera varios desafíos a los productores, entre los que destacan el uso racional de los recursos y garantizar la viabilidad de las explotaciones, dado que una sobreexplotación o uso inadecuado de los factores de producción generan graves problemas económicos, sociales y medioambientales (Toro-Mujica et al., 2011b).

La producción lechera orgánica es un complejo ganadero que aspira a producir leche de alta calidad nutritiva, practicando métodos de producción que rechazan el empleo de productos agroquímicos manufacturados, compuestos artificiales, pesticidas, reguladores del crecimiento y aditivos a los forrajes, y que funcionan mediante rotación de cultivos y reciclado de residuos orgánicos (Weller, 1996; Pérez et al., 2009).

El objetivo principal de estos sistemas productivos es reducir la dependencia a insumos externos (Newman y Weller, 2004), generalmente mediante la disminución en el uso de concentrados en la alimentación de los animales, con una producción láctea con base a forrajes (Padel, 2000; Boelling, et al., 2003). Sin embargo, esto los hace más susceptibles a los factores climáticos y a las variaciones en la disponibilidad y calidad de forraje a través del año, lo que se refleja en los rendimientos lácteos (Sato et al., 2005; Angeles-Hernandez et al., 2013) (Figura 2). Por otro lado, estos sistemas deben cumplir con los requisitos que establecen las empresas certificadoras para aspirar a contar con el etiquetado de alimento orgánico.

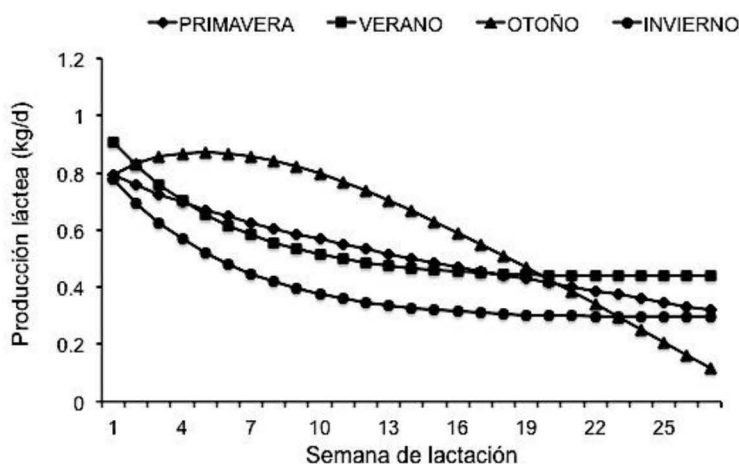


Figura 2. Diferentes formas de curva de lactación y patrones de producción láctea en relación a la época del año en ovejas FI en un sistema de producción orgánico (Ángeles-Hernández et al. 2013).

La efectividad de los sistemas de producción de leche orgánica comparados con los sistemas convencionales en términos de bienestar animal, protección ambiental y calidad e inocuidad de los alimentos producidos está abierto a debate, muchas investigaciones realizadas principalmente en condiciones experimentales dan cuenta de una gran diversidad de resultados.

El estado sanitario de animales en sistemas orgánicos se ha utilizado como un indicador del impacto de estos métodos de producción. Hardeng y Edge (2001) señalan que desordenes metabólicos como cetosis e hipocalcemia son menos frecuentes en sistemas orgánicos. Busato *et al.* (2000) reportan que la prevalencia de mastitis subclínica en sistemas orgánicos en Suiza fue menor que la media nacional.

Sin embargo, estudios parasitológicos asocian a los sistemas orgánicos de producción de leche en ovejas (Lindqvist *et al.*, 2001) y vacas (Svensson *et al.*, 2000) con elevada prevalencia parasitaria. También se sugiere que la elevada tasa de desecho en sistemas orgánicos de producción de leche se deba a infecciones intramamarias y problemas reproductivos (Animal Health Institute, 1998).

Lund y Algiers (2003) realizaron una extensa revisión de las investigaciones disponibles acerca de este tema y concluyen que el estado sanitario de los sistemas convencionales no es mejor que los sistemas orgánicos (excepto por las enfermedades parasitarias), por lo contrario, la tendencia es que la salud y bienestar de los animales en sistemas orgánicos es igual o mejor que los sistemas convencionales.

PRODUCCIÓN DE LECHE ORGÁNICA DE OVEJA

La producción de leche ovina en sistemas orgánicos se ubica principalmente en el continente Europeo, esto debido a su larga tradición de producción y consumo de productos derivados de la leche de oveja, así como por la demanda por parte del mercado local de productos originados en sistemas amigables con el ambiente y socialmente responsables (Rochi y Nardone, 2003; de Boer, 2003).

La ganadería orgánica se ubica como una alternativa para las explotaciones ovinas, que aprovechando las características semi intensivas de sus sistemas permiten la obtención de externalidades positivas medioambientales y sociales y la generación de un valor agregado a sus productos (Lobley *et al.*, 2009; Toro-Mujica, 2011b).

Algunos autores señalan que la conversión de sistemas de producción convencionales a sistemas

orgánicos de producción en pequeños rumiantes parece ser menos complicada en términos de manejo en comparación con otras especies; debido a que estos sistemas de crianza requieren pocos insumos, manifiestan una adecuada adaptación a condiciones medioambientales y geográficas hostiles y elevada eficiencia en el aprovechamiento de los recursos disponibles en pastoreo (Wright *et al.*, 2002; Degen, 2007; Shrestha, 2011).

Dentro de los aspectos con mayor impacto en los sistemas de producción ovinos lecheros destacan:

- i. El manejo del pastoreo.
- ii. El control y prevención de enfermedades parasitarias.
- iii. Producción y provisión de alimentos orgánicos a los animales (Ronchi y Nardone, 2003).

Esta capacidad de adaptación a diversas condiciones agroclimáticas determina que también el comportamiento productivo sea muy variable (Alifakiotis, 1990; Haenlein y Wendorff, 2006). Las diferencias en los rendimientos lácteos entre zonas geográficas y entre producciones pueden ser atribuidas a un desbalance de energía y proteína, debido principalmente a la variabilidad en la cantidad y calidad de forraje disponible a través del año y la falta de suplementación con un alimento balanceado orgánico (Blair, 2011).

Por tal motivo los sistemas lecheros ovinos orgánicos requieren de un proceso de adecuación que les permita mejorar su comportamiento técnico-productivo, económico, social y medioambiental. Una empresa ovina orgánica de producción de leche debe ser considerada viable en la medida que presente un balance positivo a nivel de sustentabilidad global, es decir, que sea socialmente beneficiosa, económicamente viable y medioambientalmente responsable (Toro-Mujica *et al.*, 2011b).

Impacto de los sistemas orgánicos sobre la producción láctea y calidad de la leche

Una clara comparación entre la calidad de los productos orgánicos y convencionales es difícil de establecer, debido a la gran variación entre los sistemas de producción, relacionado entre otras cosas con el grado de intensificación, manejo nutricional y razas utilizadas (Newman y Weller, 2004).

Se acepta de manera general que los rendimientos lácteos por unidad de tierra y por unidad animal son usualmente inferiores en los sistemas orgánicos de producción de leche (Greer *et al.*, 2008). Tsiplakou *et al.* (2010) señalan rendimientos lácteos inferiores en un 28 % de ovejas en un sistema orgánico,

comparados con un sistema convencional. Sin embargo, algunos estudios señalan comportamientos productivos opuestos, Pirisi et al. (2002) concluyen que ovejas Sardas en un sistema orgánico presentaron rendimientos lácteos significativamente superiores ($P < 0.001$) en primavera e invierno en comparación con ovejas en sistemas convencionales, esto debido a la menor carga animal, mayor disponibilidad de forraje por animal y mejor calidad de los forrajes en los sistemas de pastoreo orgánicos.

La información acerca de calidad y composición química de la leche de ovejas en sistemas orgánicos y convencionales, contrasta de manera importante. Diversos estudios reportan que productos originados en sistemas orgánicos contienen concentraciones mayores de proteína (Palupi et al., 2011), ácidos grasos benéficos para la salud humana y algunas vitaminas del complejo B en comparación con sistemas convencionales (Bisig et al. 2007; Heins et al., 2013a).

Tsiplakou et al. (2010) refieren diferencias en la composición química de leche de oveja entre sistemas convencionales y orgánicos, mencionan un alto valor nutricional de la leche ovina orgánica debido a la mayor concentración de MUFA, PUFA, alfa-LNA, alfa-LNA, cis-9, trans-11 CLA y omega 3 en comparación con sistemas convencionales.

Las mayores concentraciones de CLA y otros ácidos grasos promotores de la salud humana en leche ovina orgánica está determinada por las diferencias en el régimen de alimentación entre sistemas orgánicos y convencionales (Toledo et al., 2002; Tsiplakou et al., 2010; Palupi et al., 2012), la cual establece una mayor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados en la dieta de rumiantes bajo un sistema de producción orgánico, favoreciendo la formación de CLA a través de la biohidrogenación por las bacterias ruminales (Jahreis et al., 1997; Bergamo et al., 2003; Bisig et al., 2007).

Los sistemas orgánicos de producción de leche ovina se basan en el aprovechamiento de recursos locales, lo cual determina en gran medida las estrategias de alimentación, esto contribuye a la elevada diversificación. Heins et al. (2013b) establecen diferencias en los rendimientos lácteos, consumo voluntario y perfil de ácidos grasos en sistemas orgánicos en pastoreo con diferentes niveles de suplementación de granos, concluyendo que la leche de vacas con una alimentación basada únicamente en el consumo de forraje contiene un perfil de ácidos grasos que puede proveer beneficios sobre la salud humana, al compararse con leche de vacas alimentadas con raciones con baja (2.72 kg/vaca/día) y alta (5.44 kg/vaca/día) cantidad de grano en la dieta.

En relación a residuos químicos, los alimentos orgánicos presentan menor cantidad de pesticidas que los alimentos convencionales, aunque a los alimentos orgánicos no se les pueden considerar como libres de pesticidas, debido a la presencia de residuos en los alimentos por la contaminación ambiental (Kouba, 2003).

Por otro lado, Sundrum (2001) concluye que las características de calidad de los productos con relación a la higiene, contenidos nutricionales, propiedades sensoriales y tecnológicas no son muy diferentes entre ambos sistemas de producción. De la misma manera Kouba (2003) menciona que los sistemas de producción orgánicos no poseen las condiciones necesarias para garantizar la ausencia de contaminantes como pesticidas, micotoxinas, bacterias, parásitos, etc.

La preferencia de los consumidores de productos orgánicos hacia estos productos no está totalmente relacionada con sus características saludables en términos de los valores nutricionales, estas preferencias se asocian con la disminución de riesgos de contaminación por pesticidas, residuos farmacológicos o uso de fertilizantes minerales (Weller, 1996; Hermansen, 2001).

Otros factores que promueven el consumo de productos orgánicos se basan en principios y valores; diversos estudios en Europa y EU muestran que los consumidores deciden comprar productos orgánicos al asociarlos con productos saludables y expresan su interés en los beneficios sobre el medio ambiente y bienestar animal de los sistemas de producción utilizados para generar sus alimentos (Dimitri y Greene, 2000; Vega y León et al., 2006; Zander y Hamm, 2010; Gerrard et al., 2012).

Viabilidad económica de los sistemas orgánicos de producción de leche de oveja.

La ovinocultura lechera orgánica juega un papel importante desde el punto de vista social, económico y ecológico, fundamentado en la estrecha relación con la fijación de la población rural y el equilibrio medioambiental, basados en el aprovechamiento de zonas de difícil acceso y recursos escasos, lo cual permite la revalorización del territorio y contribuir a la reducción del impacto ambiental (Toro-Mujica, 2011a), además, de que favorece la generación de empleos, promueve vínculos más estrechos a la economía local, la reconexión de productores con los consumidores y la obtención de importantes ingresos a la economía local derivados de exportaciones (Lobley et al., 2013).

Sin embargo características específicas de los sistemas orgánicos determinan una disminución de la estabilidad y rentabilidad de este sector, dentro de las que destacan: la elevada susceptibilidad a condiciones medioambientales, el bajo nivel de mejora genética, la necesidad de mejora de los canales de comercialización (Toro-Mujica, 2011b).

Los precios competitivos de los productos orgánicos han jugado un papel importante en la extensión del interés de estos sistemas de producción (Siardos, 2002). Los alimentos orgánicos frecuentemente reciben un sobre precio cuando se comparan con productos derivados de sistemas convencionales (Offermann y Nielberg, 2000), lo que refleja las diferencias en costos de producción, mayor disposición de los consumidores de productos orgánicos de pagar el sobreprecio con relación a productos convencionales y divergencias en los canales de comercialización y mercadotecnia (Kristensen y Thamsborg, 2002).

La magnitud de este sobreprecio depende del producto ofrecido y de la demanda de alimentos orgánicos de cada país (Padel y Lampkin, 1994; Offermann y Nielberg, 2000). En Europa el valor agregado de la leche ovina orgánica certificada varía en rangos que van de un 8 a 36 % (Offermann y Nielberg, 2000a; Kristensen y Thamsborg, 2002), en Nueva Zelanda el sobreprecio fluctúa en un 51 % (Christensen y Saunders, 2003), en Estados Unidos varía de un 47 a 76 % (Dimitri y Greene, 2000) y en México de 20 a 30 %.

Toro-Mujica (2011b) analizó la rentabilidad de sistemas ovinos lecheros orgánicos en la región de la Mancha, España, señalando que esta se ve disminuida debido a la elevada utilización de alimentación suplementaria al pastoreo, además de los elevados costos de mano de obra, los bajos rendimientos lácteos por oveja y al bajo precio del cordero; Heins et al. (2013b) indican este mismo fenómeno en vacas lecheras en sistemas orgánicos. Sin embargo, la subsistencia de estos sistemas se explica por el sobreprecio de los productos finales (principalmente quesos) y la elevada utilización de mano de obra familiar, ubicándose como una fuente de trabajo para productores con bajo nivel de formación.

Los costos de producción en sistemas orgánicos de producción de leche ovina difieren de manera importante con relación a los sistemas convencionales (Offermann y Nielberg, 2000b), por un lado se puede esperar una reducción de los costos variables debido a la restricción en el uso de insumos externos; Gerrard et al. (2012) y Moakes et al. (2012) señalan que los costos relacionados con el uso de fertilizantes y cuidado del cultivo son significativamente superiores

en los sistemas convencionales, además de ser sistemas más intensivos utilizando mayor cantidad de granos.

Sin embargo, si la producción de forraje y concentrados de la granja orgánica no satisfacen las necesidades de consumo de los animales, los precios de estos insumos alimenticios externos originados en sistemas orgánicos se elevan en un rango de 40 a 86% comparados con los forrajes y granos producidos en sistemas convencionales (Nix, 2011; Lampkin et al., 2011; Gerrard et al., 2012) con lo cual la balanza costo beneficio se ve afectada.

Heins et al. (2013b) examinaron el efecto del nivel de suplementación con granos (solo forraje, baja y alta suplementación con granos) en las raciones de vacas lecheras en sistemas orgánicos evaluando la producción de leche, peso vivo, la condición corporal y la rentabilidad; indicando que las vacas que consumen 100% pastura tuvieron menor producción, pero fueron más rentables debido a los elevados costos económicos que conlleva la suplementación con granos.

Lobley et al. (2013) establecen que los rebaños ovinos orgánicos emplean más gente en comparación con los sistemas convencionales, de la misma manera Padel y Lampkin (1994) y Siardos (2002) determinan que las horas de trabajo en granja son superiores en un 10 a 50 % en sistemas orgánicos, lo cual ocasiona un aumento en los costos por sueldos y salarios, ubicándose como el gasto que más repercute en los costos totales de producción (Greer et al., 2008).

Offermann y Nielberg (2000b) y Gerrard et al. (2012) señalan que algunos costos fijos son presumiblemente superiores en rebaños ovinos lecheros orgánicos (ej. arrendamiento o depreciación de terreno al manejar menor carga animal), además de un gasto adicional por concepto de certificación (Greer et al., 2008). Sin embargo, Gerrard et al. (2012) señalan que los rebaños orgánicos ovinos manifiestan gastos inferiores en rubros como la adquisición de animales, depreciación de maquinaria y manejo agronómico de los cultivos.

La rentabilidad de los sistemas orgánicos de producción de leche de oveja depende de la correcta aplicación de los principios de ganadería orgánica y del balance positivo entre el sobreprecio del producto en el mercado local y los costos de producción (principalmente costos de alimentación y mano de obra). Por lo tanto es de vital importancia el generar estrategias que favorezcan la comercialización de los productos orgánicos, además de la aplicación de técnicas que optimicen la productividad de estos

sistemas, sin alejarse de sus principios básicos de equilibrio ecológico y mínimo impacto ambiental.

Impacto ecológico de los sistemas orgánicos de producción de leche de oveja

El impacto ambiental de la agricultura y ganadería es un tema de interés creciente por parte de los agentes que regulan las políticas de mercado, investigadores, productores agropecuarios, consumidores y de la sociedad en general (Gerrard et al., 2012). En este sentido el objetivo de los sistemas orgánicos es la utilización de estrategias de producción que minimicen el impacto ambiental y a su vez optimicen la generación de alimentos que promuevan la salud humana y la seguridad alimentaria (Hansen et al., 2001; Kristensen y Thamsborg, 2002).

Hass y Köpke (1994) evaluaron el impacto medioambiental de los sistemas orgánicos de producción de leche orgánico y convencional, destacando que el manejo orgánico tiene un claro beneficio en reducir la contaminación ambiental en comparación con los sistemas convencionales. Este efecto positivo sobre el medio ambiente justifica en gran medida la continuidad del soporte financiero que reciben las granjas orgánicas en algunos países (European Commission: Agriculture and Rural Development, 2011).

La amplia diversidad de los sistemas orgánicos y convencionales determina que también las metodologías e instrumentos de medición varíen ampliamente, como consecuencia de esto las conclusiones de los estudios que analizan el impacto ambiental de estos sistemas divergen de manera importante.

Gerrard et al. (2012) utilizaron metodologías que mediante el análisis de datos financieros, principalmente los relacionados con los costos de alimentación, fertilizantes y agroquímicos, les permitieron obtener indicadores ambientales que estiman el impacto ecológico de sistemas orgánicos y convencionales, concluyendo que los sistemas convencionales efectúan un manejo más intensivo de la tierra al presentar mayor carga animal y maximización de los rendimientos de los cultivos a través de la utilización de fertilizantes y agroquímicos.

De Boer (2003) indica que la producción orgánica de leche puede reducir el calentamiento global por la reducción de emisiones de dióxido de carbono, óxido nítrico y el uso reducido de pesticidas y agroquímicos; además, de que estos sistemas de producción manifiestan un consumo

significativamente menor de agua en comparación con sistemas convencionales (Wood et al., 2006) Sin embargo existe evidencia que apunta a que el uso directo de energía, la emisión de gases de efecto invernadero (N₂O, SO₂ y CH₄) (Wood et al., 2006) y uso del suelo por tonelada de leche (de Boer, 2003) son mayores en los sistemas orgánicos comparados con sistemas convencionales.

PRODUCCIÓN DE LECHE ORGÁNICA DE OVEJA EN MÉXICO

En México, el sector orgánico agropecuario se ha caracterizado por un crecimiento sostenido en las últimas dos décadas, con una tasa anual de crecimiento de la tierra dedicada a este sistema de producción cercana al 30%, pasando de 23,265 ha en 1996 a 403,268 en el 2007, con más de 128,819 productores (Gómez-Cruz et al. 2009). La producción agrícola representa la gran mayoría de extensión dedicada a la producción orgánica en México con un 91.6 % de superficie total; Gómez-Cruz et al. (2009) señalan que la producción pecuaria orgánica en México se encuentra en etapas de desarrollo inicial, enfocando en un mercado local y generando mecanismos de comercialización.

La producción de leche en sistemas orgánicos en México se ha dirigido casi exclusivamente a la producción de leche de vaca; Pérez et al. (2009) señalan que la producción de leche orgánica es una actividad incipiente; no obstante, existen en el país marcas certificadas de leche orgánica y sus derivados.

Habitualmente, en los rebaños ovinos lecheros orgánicos la producción de leche se dirige casi en su totalidad a la elaboración de quesos (Novotná et al., 2009), por lo cual la calidad de la leche ovina no solo está determinada por el contenido de nutrientes, sino también por las características de manufactura de sus derivados (Pugliese et al., 2000). Por lo que rebaños ovinos orgánicos dedicados a la producción de leche, encaminan sus esfuerzos a la producción de alimentos con altos estándares de calidad, además de trabajar en la búsqueda de animales con buenas aptitudes en producción láctea y adecuada adaptación al medio ambiente, a través de la cruce de razas locales, principalmente con aptitudes cárnicas, (Pelibuey, Black Belly, Suffolk) con razas especializadas en producción de leche (ej. East Friesian y Lacaune).

En relación al genotipo de los animales manejados en los sistemas orgánicos, la Unión Europea (EU, 1999) recomienda la utilización de “animales capaces de adaptarse a las condiciones ambientales locales y resistencia a las enfermedades” y de preferencia la utilización de razas indígenas o locales; sin embargo, la gran mayoría de los sistemas de producción de

leche orgánica utilizan razas especializadas, las cuales bajo las condiciones propias de un sistema orgánico (relacionado principalmente con la energía suministrada en la alimentación) no manifiestan su potencial genético.

Los rendimientos lácteos promedio de sistemas orgánicos ovinos en México son de aproximadamente 89.8 kg/lactación (Angeles-Hernandez *et al.*, 2013), los cuales son inferiores al compararse con sistemas convencionales de producción láctea y al utilizar razas especializadas; sin embargo, coinciden con rendimientos de rebaños ovinos orgánicos de producción láctea en Grecia y España (Tabla 1).

El patrón de producción de ovejas F1 en un sistema de producción orgánico analizado a través de la forma de la curva de lactación (Figura 3) es muy similar al observado en animales F1 (cruzamientos de razas no especializadas en leche) en Estados Unidos (Sakul y Boylan, 1992) y a los rendimientos de ovejas Awassi en un sistema de producción extensivo (clima semidesértico) y sin un programa de mejoramiento genético (Dag *et al.*, 2005); confirmando lo mencionado anteriormente, que los bajos rendimientos de los sistemas orgánicos se encuentran relacionados con el potencial genético de animales, así como por los factores medio ambientales, principalmente los relacionados con la disponibilidad de alimento.

Además, la utilización de razas locales no especializadas en producción láctea en los sistemas

orgánicos no permite la obtención de rendimientos lácteos que conceda a estos rebaños ser económicamente rentables (Figura 3). Por lo cual se debe trabajar en el desarrollo de genotipos especializados en estos sistemas de producción, con características de mayor resistencia a las enfermedades y elevados parámetros de calidad en la leche, sin sacrificar del todo los rendimientos lecheros.

CONCLUSIONES

La producción orgánica no es un método de producción que pueda resolver toda problemática de la industria lechera ovina y en general del sector pecuario; es primeramente un sistema de producción dirigido a un mercado específico ofreciendo productos con calidad Premium y elevados estándares de calidad en sus procesos de producción, además de un manejo altamente calificado; asimismo de ser un sistema encaminado al aprovechamiento integral de los recursos naturales y conservación del equilibrio ecológico.

La producción de leche de oveja orgánica, requiere de líneas específicas de investigación encaminadas a desarrollar metodologías de producción, distribución y comercialización de sus productos; enfocados principalmente al mejoramiento genético, medicina preventiva, manejo nutricional y promoción de sus características nutricionales y de origen particulares.

Tabla 1. Producción láctea total (PLT), producción al pico de lactación (PPL) y tiempo al pico de lactación (TPL) de diferentes genotipos en sistemas convencionales y orgánicos.

| | PLT (l) | PPL (l) | TPL (días) | Referencia |
|-----------------------------|---------|---------|------------|--|
| Sistema convencional | | | | |
| Comisana | | | | |
| Otoño | 136 | 1.4 | 10.5 | |
| Invierno | 94 | 1.8 | 15.0 | Portolano <i>et al.</i> (1996) |
| Maseese | 173 | 1.9 | 17.8 | Franci <i>et al.</i> (1999) |
| Awassi (Intensivo) | 506 | 3.4 | 45.0 | Pollott y Gootwine (2001) |
| Awassi (Extensivo) | 107 | 0.9 | 26.8 | Dag <i>et al.</i> (2005) |
| Sistema orgánico | | | | |
| Manchega | 97 | - | - | Toro-Mujica <i>et al.</i> (2011c) |
| Autóctonas (Grecia) | 84 | - | - | Tzouramani <i>et al.</i> (2011) |
| F1 México | 89 | 0.9 | 25.3 | Ángeles-Hernández <i>et al.</i> (2013) |

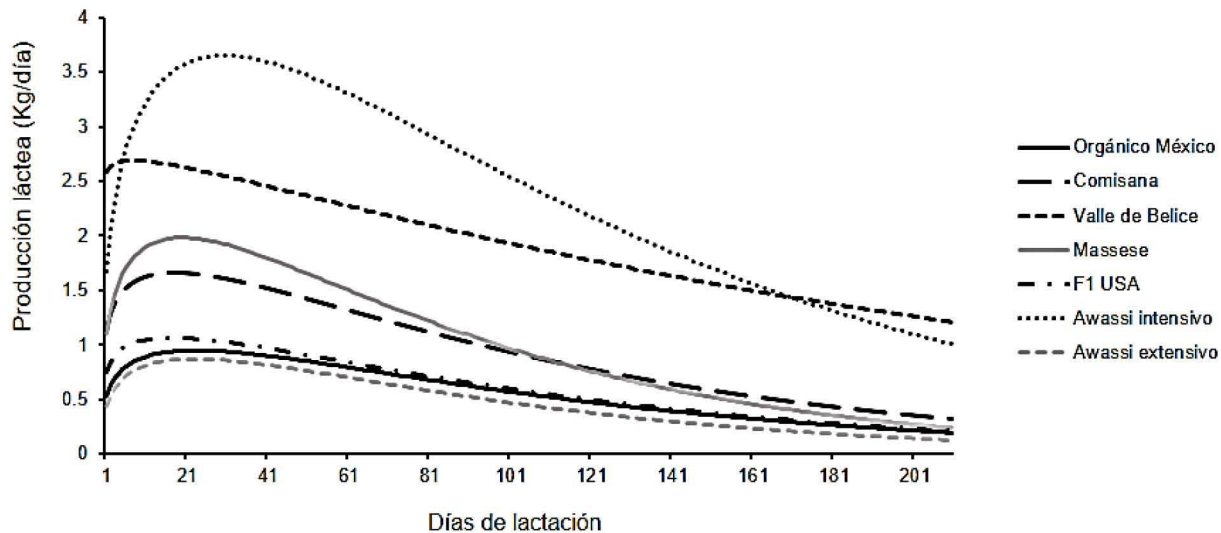


Figura 3. Diferentes patrones de producción de razas lecheras especializadas y animales F1 en un sistema de producción orgánico. *Curvas obtenidas a partir de los parámetros del modelo de Wood (1967) para cada raza. La ecuación de este modelo es $Y = at^b e^{-ct}$; la duración en días fue arbitraria solo para ejemplificar los patrones de producción.*

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por el proyecto UAEM 3643/2013 E, y Fundación produce 197. “Transferencia de tecnología para la producción de leche de oveja y su transformación en derivados a ovinocultores del Estado de México”. El M en C. Angeles Hernández recibió una beca del CONACyT para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

Acero, R., García, A., Ceular, N., Artacho, C., Martos, J. 2004. Methodological approach concerning costs determination in farms. *Archivos de Zootecnia*. 53: 91–94

Alifakiotis, T.A. 1990. Characteristics and management of reproduction of small ruminants in Mediterranean countries. *Proc. EAAP Symp. Livestock in the Mediterranean cereal production systems, Rabat–Morocco. 7-10 Octubre 1990.* pp. 161–166.

Angeles-Hernandez, J. C., Albarran-Portillo, B., Gonzalez, A. G., Salas, N. P., & Gonzalez-Ronquillo, M. 2013. Comparison of mathematical models applied to f1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation

curve parameter. *Asian Australasian Journal of Animal Science*. 26(8):1119-1126

Animal Health Institute, 1998. Antibiotic resistance. *AHI Quarterly*, vol. 19. Animal Health Institute, Washington, DC. p. 2.

Benoit, M. and Veysset, P. 2003. Conversion of cattle and sheep suckler farming to organic farming: adaptation of the farming system and its economic consequences. *Livestock Production Science*. 80:141-152

Bergamo P., Fedele E., Iannibelli L., Marzillo G. 2003. Fat-soluble vitamin contents and fatty acid composition in organic and conventional Italian dairy products. *Food Chemistry*. 82:625–63

Bisig, W., Eberhard, P., Collomb, M., Rehberger, B. 2007. Influence of processing on the fatty acid composition and the content of conjugated linoleic acid in organic and conventional dairy products- a review. *Lait*, 87:1-19.

Blair, R. 2011. Aims and principles of organic cattle production. In: Blair, R. (ed) *Nutrition and Feeding of Organic Cattle*. CAB International, UK. pp. 5-27.

Boelling, D., Groen, A.F., Sorensen, P., Madsen, P., Jensen, J. 2003. Genetic improvement of

- livestock for organic farming systems. *Livestock Production Science*. 80: 79-88.
- Busato, A., Trachsel, P., Schallibaum, M., Bluma, J.W. 2000. Udder health and risk factors for subclinical mastitis in organic dairy farms in Switzerland. *Preventive Veterinary Medicine*. 44:204-220.
- Codex Alimentarius Commission. 1999/ 2001. Guidelines for the Production, Processing, Labelling and Marketing of Organically Produced Foods. CAC/GL 32-1999/Rev 1, 2001, Rome, Italy.
- Christensen, V., Saunders, C. 2003. Economic analysis of issues concerning organic dairy farming. AERU Research Report No 257, Lincoln, New Zealand: AERU, Lincoln University.
- Dag, B., Keskin, I., Mikailsoy, F. 2005. Application of different models to the lactation curves on unimproved Awassi ewes in Turkey. *South African Journal of Animal Science*. 35:238-243
- de Boer, J.M.I. 2003. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livestock Production Science*. 80:69-77.
- Degen, A.A. 2007. Sheep and goat milk in pastoral societies. *Small Ruminant Research*. 68:7-19.
- Dimitri, C., Greene, C. 2000. Recent growth patterns in the US organic foods market. *Agriculture information bulletin*, 777.
- EU. 1999. EC Council Regulation No 1804/1999 of July 1999, Supplementing Regulation (EEC) No 2092/91 on Organic Production of Agricultural Products and Indications Referring thereto on Agricultural Products and Foodstuffs to Include Livestock Production. www.europe.eu.int/eur-lex/en. (Accessed 18.11.2012).
- European Commission: Agriculture and Rural Development (2011) http://ec.europa.eu/agriculture/cappost2013/egalproposals/index_en.htm. [Accessed 18.11.2013].
- FAO (1999) Agricultura Orgánica Comité de Agricultura, 15 Periodo de sesiones. COAG/99/9, Rome, Italy.
- Franci, O., Pugliese, C., Acciaioli, G., Parisi, G., Lucifero, M. 1999. Application of two models to the lactation curve of Massese ewes. *Small Ruminant Research*. 31:91-96.
- Gerrard, C.L., Padel, S., Moakes, S. 2012. The use of farm business survey data to compare the environmental performance of organic and conventional farms. *International Journal of Agricultural Management*. 2:5-16.
- Greer, G., Kaye-Blake, W., Zellman, E., Parsonson-Ensor, C. 2008. Comparison of the financial performance of organic and conventional farms. *Journal of Organic Systems*, 3(2):18-28.
- Gomez, C.M.A., Schwentesius, R.R., Gomez, T.L., Ortigoza, R.J. Nelson, E. 2009. Latin America: Mexico. In Willer, H. Kilcher, L. (eds.). *The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2009*. INFOAM, pp. 216-218.
- Haas, G., Köpke, U. 1994. Vergleich der Klimarelevanz Ökologischer und Konventioneller Landwirtschaft. In: Enquete-Kommission 'Schutz der Erdatmosphäre' des Deutschen Bundestages. Studienprogramm. Bd. 1. *Economia*, Bonn, Alemania. p. 99.
- Haenlein, G.F.W., Wendorff, L.W. 2006. Sheep Milk. In: Park, W.Y. and Haenlein F.W.G. (eds). *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals*. Blackwell Publishing, EUA. pp. 45-68.
- Hansen, B., Alrøe, H. F., Kristensen, E. S. 2001. Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 83(1):11-26.
- Hardeng, F., Edge, V.L. 2001. Mastitis, ketosis, and milk fever in 31 organic and 93 conventional Norwegian dairy herds. *Journal of Dairy Science*. 84:2673-2679.
- Heins, B.J., Paulson, J.C., Endres, M.I., R.D. Moon. 2013a. Effect of organic grain supplementation on pasture and total mixed ration dry matter intake and fatty acid profiles of organic dairy cows. *Join Annual Meeting, ADSA-ASAS*. Indianapolis, Indiana.
- Heins, B.J., Paulson, J.C., Endres, M.I., R.D. Moon. 2013b. Effect of organic grain supplementation on production, body weight, body condition score, and profitability of organic dairy cows. *Join Annual Meeting, ADSA-ASAS*. Indianapolis, Indiana.
- Hermansen, J.E. 2001. Organic livestock production systems and appropriate development in relation to public expectation. *Proc. 52nd*

- EAAP meeting. Budapest, 26-29 August 2001. pp. 1-28.
- IFOAM. 2003. IFOAM Annual Report 2002. International Federation of Organic Agriculture Movements, Tholey- Theley, Alemania. www.ifoam.org/about_ifoam/inside_ifoam/pdfs/IFOAM_Annual_Report_2002.pdf (Accessed 06.08.2012)
- IFOAM (2005). The principles of organic agriculture. International Federation of Organic Agriculture Movements, Bonn, Alemania. www.ifoam.org/about_ifoam/principles/index.html. (Accessed 19.10.2012).
- Jahreis G., Fritsche J., Steinhard H. 1997. Conjugated linoleic acid in milk fat: High variation depending on production system. *Nutrition Research*. 17:1479-1484
- Kouba, M. 2003. Quality of organic animal products. *Livestock Production Science*. 80:33-40.
- Kristensen, E.S., Thamsborg, S.M. 2002. Future European market for organic products from ruminants. In: Kyriazakis, I., Zervas, G. (eds.), *Organic meat and milk from ruminants* Wageningen Academic Publishers, Netherlands.
- Lampkin, N., Measures, M., Padel, S. 2011. *The Organic Farm Management Handbook 2011/12* (9th Edition). Newbury: ORC.
- Lindqvist, Å., Ljungström, B., Nilsson, O., Waller, P.J. 2001. The dynamics, prevalence and impact of nematode parasite infections in organically raised sheep in Sweden. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 42:377-389.
- Lobley, M., Butler, A., Winter, M. 2013. Local organic food for local people? Organic marketing strategies in England and Wales. *Regional Studies*. 47(2): 216-228.
- Lobley, M., Butler, A., Reed, M. 2009. The contribution of organic farming to rural development: An exploration of the socio-economic linkages of organic and non-organic farms in England. *Land Use Policy*. 26:723-735.
- Lund, V., Alger, B. 2003. Research on animal health and welfare in organic farming: literature review. *Livestock Production Science*. 80:55-68.
- Nardone, A., Zervas, G., Rochi, B. 2004. Sustainability of small ruminant organic systems of production. *Livestock Production Science*. 90:27-39.
- Nauta, W. and Spengler-Neff, A. 2011. An organic perspective on reproduction and breeding methods. LIB-ECO-AB Symposium, Wageningen, Netherlands, 15-16 march 2011.
- Nauta, W.J. 2009. Selective breeding in organic dairy production. PhD Thesis. Wageningen University. Holanda.
- Newman, J., Weller, R.F. 2004. Producciones de leche ecológica comparando dos explotaciones lecheras. In: Younie, D. and Wilkinson, J.M. (eds). *Ganaderia Ecologica*. Acibia, Spain. pp. 79-99.
- Nix, J. 2011. *John Nix Farm Management Pocketbook 2012* (42nd edition). Agro Business Consultants Ltd.
- Novotná, L., Kuchtík, J., ustová, K., Zapletal, D., Filip, R. 2009. Effects of lactation stage and parity on milk yield, composition and properties of organic sheep milk. *Journal of Applied Animal Research*. 36(1):71-76.
- Offermann, F., Nielbarg, H. 2000. Economic Performance of Organic Farms in Europe. *Organic Farming in Europe: Economics and Policy*, Volumen 5. University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.
- Offermann, F., Nieberg, H. 2000b. Economic performance of organic farms in europe'. *organic farming in europe: economics and policy*. 5.
- Offermann, F., Nielberg, H. 2000a. Prices. In: *Organic Farming in Europe: Economics and Policy*, Vol. 5, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. pp.198.
- Padel, S. 2000. Proc. of the Third NAHWOA Workshop, Hovi, M and Bouilhol, M. (eds). Clermont-Ferrand, 21-24 October 2000. pp. 121-135.
- Padel, S., Lampkin, N. 1994. Farm-Level Performance of Organic Farming Systems. An overview. In Lampkin, N. And S. Padel. (eds), *The economics of Organic Farming*. Wallingford: CAB International, 201-221.
- Palupi, E., Jayanegara, A., Ploeger, A., Kahl, J. 2012. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 92(14):2774-2781.
- Pérez, B.L., Esquivel, C.G., Molina, O.M., Hernández, A.H. 2009. Importancia económica y normatividad de la producción de leche orgánica. In: Hernandez, L.A.G. and

- Pérez, L.B. (eds). Producción sustentable calidad y leche orgánica. Universidad Autónoma Metropolitana, México. pp. 85-105.
- Pirisi, A. Piredda, G., Sitzia, M., Fois, N. 2002. Organic and conventional systems: composition and cheese-making aptitude of Sarda ewes' milk. In: Kyriazakis, I. and Zervas, G. (eds). Organic meat and milk from ruminants. Wageningen Academic Publishers, Holanda. pp. 143-146.
- Pollott, G.E., Gootwine, E. 2001. A genetics analysis of complete lactation milk production in improved awassi sheep. *Livestock Production Science*. 71:37-47.
- Portolano, B., Spatafora, F., Bono, G., Margiotta, S., Todaro, M., Ortoleva, V., Leto, G. 1996. Application of the Wood model to lactation curves of Comisana sheep. *Small Ruminant Research*. 24:7-13.
- Pugliese, C., Acciaioli, A., Rapaccini, S., Parisi, G., Franci, O. 2000. Evolution of chemical composition, somatic cell count and renneting properties of the milk of Massese ewes. *Small Ruminant Research*, 35(1):71-80.
- Ronchi, B., Nardone, A. 2003. Contribution of organic farming to increase sustainability of Mediterranean small ruminant livestock systems. *Livestock Production Science*. 80:17-31.
- Sakul, H., Boylan, W.J. 1992. Lactation curves for several US sheep breeds. *Animal Production*. 54:229-233.
- Sato, K., Bartlett, P.C., Erskine, R.J. Kaneene, J.B. 2005. A comparison of production and management between Wisconsin organic and conventional dairy herds. *Livestock Production Science*. 93:105-115.
- Shrestha, J.N.B. 2011. Sheep. In: Fuquay J.W., Fox P.F. and McSweeney P.L.H. (eds). *Encyclopedia of Dairy Science*. Elsevier. Reino Unido. pp. 67-76.
- Siardos, G.C. 2002. The impact of organic agriculture in socio-economic structures. In: Kyriazakis, I., Zervas, G. (eds.). *Organic meat and milk from ruminants*. Wageningen Academic Publishers.
- Sundrum, A. 2001. Organic livestock farming: a critical review. *Livestock Production Science*. 67:207-215.
- Svensson, C., Hesse, A., Höglund, J. 2000. Parasite control methods on organic and conventional dairy herds in Sweden. *Livestock Production Science*. 66:57-59.
- Toledo, P., Anders, A., Björck, L. 2002. Composition of raw milk from sustainable production systems. *International Dairy Journal*. 12:75-80.
- Toro-Mujica, P., Garcia, A., Gomez-Castro, A.G., Acero, R., Perea, J. Rodriguez-Estevez, V., Aguilar, C., Vera, R. 2011a. Technical efficiency and viability of organic dairy sheep farming systems in a traditional area for sheep production in Spain. *Small Ruminant Research*. 100:89-95.
- Toro-Mujica, P. 2011b. Análisis técnico, económico y social de los sistemas ovino lechero ecológicos de Catilla La Mancha: eficiencia y sustentabilidad. Tesis de Doctorado. Universidad de Cordoba, Spain.
- Toro-Mujica, P., Garcia, A., Gomez-Castro, J., Perea, V., Rodriguez-Estevez, E., Angon, C. 2011c. Organic dairy sheep farms in south-central Spain: typologies according to livestock management and economic variables. *Small Ruminant Research*. doi: 10.1016/j.smallrumres.2011.11.005.
- Tsiplakou, E., Kotrotsios, V., Hadjigeorgiou, I., Zervas, G. 2010. Differences in sheep and goats milk fatty acid profile between conventional and organic farming systems. *Journal of Dairy Research*. 77:343-349.
- Tzouramani, I., Sintori, A., Lontakis, A., Karanikolas, P., Alexopoulos, G. 2011. An assessment of the economic performance of organic dairy sheep farming in Greece. *Livestock Science*. 14:136-142.
- Vega y León, S., Herrera, M.C., Tolentino, R.G., Hernández, L.A.G., González, G.D. 2006. Un aporte sobre la industria láctea orgánica y la innovación tecnológica. *Revista Mexicana de Agronegocios*. Volumen X, numero 19.
- Weller, R.F. 1996. Granjas Lecheras. In: Phillips, C.J.C. (ed). *Avances de la ciencia de la producción de leche*. Acribia, Spain. pp. 343-363.
- Willer, H. Kilcher, L. (Eds.) 2009. *The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2009*. INFOAM,
- Wood, P.D.P. 1967. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*. 216:164-165.

- Wood, R., Lenzen, M., Dey, C., Lundie, S. 2006. A comparative study of some environmental impacts of conventional and organic farming in Australia. *Agricultural systems*, 89(2):324-348.
- Wright, I.A., Zervas, G., Louloudis, L. 2002. The development of sustainable farming systems and the challenges that face producers in the EU. In: Kyriazakis, I. and Zervas, G. (eds). *Organic meat and milk from ruminants*. Wageningen Academic Publishers. Holanda. pp. 27-37.
- Zander, K., Hamm, U. 2010. Consumer preferences for additional ethical attributes of organic food. *Food Quality and Preference*. 21:495–503.

Submitted November 23, 2012 – Accepted November 08, 2013
Revised received April 01, 2014

CAPÍTULO III

MANEJO EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE OVINA ORGÁNICA

Capítulo de libro publicado: **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán O.A.O., Radic, S., Ángeles, S.C., Ramírez-Pérez, A.H., Ronquillo, M.G. 2016. *Organic Dairy Sheep Production Management*. In: ORGANIC FARMING. ISBN 978-953-51-4582-0. Intech Press.

Organic Dairy Sheep Production Management

Juan C. Angeles Hernandez, Octavio A. Castelan Ortega,
Sergio Radic Schilling, Sergio Angeles Campos, A. Hilda Ramirez Perez and
Manuel Gonzalez Ronquillo

Additional information is available at the end of the chapter

<http://dx.doi.org/10.5772/61458>

Abstract

Organic production systems are based on natural processes, the use of local feed resources, and the maintenance of biodiversity in all senses. Several studies have noted the positive effects of organic sheep milk production systems on animal welfare, animal health, product quality, and environmental impact. On the other hand, it has been reported that dairy sheep organic farms show lower milk yields and increase the susceptibility to environmental impacts compared with conventional farms. The standards that regulate feeding management in organic systems are one of the most critical factors that influence milk production performance. Lower milk production is also associated with poor ability to adapt specialized dairy breeds to organic management, low genetic potential for milk production in native and local breeds, and elevated dependence on environmental conditions. However, the aim of organic dairy production is not to reach maximum dairy productivity but rather to integrate animal and crop production and to develop a symbiotic relationship between recyclable and renewable resources; furthermore, organic production positively affects the employment rate and quality of life in rural communities. Organic dairy sheep production is one means of improving the balance between society's demand for food and the ecological impact of the agro-alimentary industry.

Keywords: Sheep, milk production, organic system, sustainability

1. Introduction: A brief overview of organic farming

Society's demand for foodstuffs is growing at a higher rate than current levels of production due to population growth and the rise in average income. According to the FAO, "food security exists when all the people, at all times, have physical, social and economic access to sufficient, safe and nutritious food." Over the last few years, some consumers have expressed increasing

concern regarding the origins of their food, its social and ecological impacts, and the fairness of its production. These customers prefer organic products, based on their perception that organic farming generates benefits associated with animal welfare, food quality, food safety, environmental concerns, and community development [1].

Due to its agro-ecological and holistic approaches and the competitive prices for organic products in the market, organic farming has developed into a small but important sector in agricultural production [2]. In 2012 alone, the “organic market” was worth approximately 50 billion euros. The International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) [3] reported that in 2012 some 37.5 million hectares of land were dedicated to organic agriculture, which represented 0.87% of total agricultural land. Australia is the country with the largest area used in organic agriculture, with 12 million hectares, followed by Argentina (3.19 million ha) and the USA (2.2 million ha) (Figure 1).

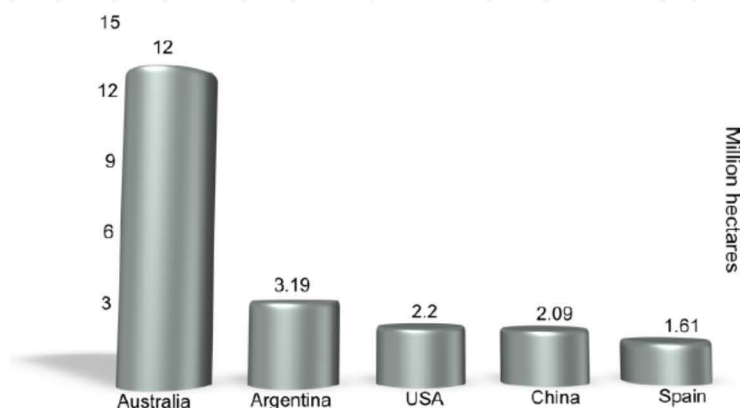


Figure 1. Countries with the largest areas of land dedicated to organic agriculture [4].

The quantity of land dedicated to organic agriculture appears to be small; however, at the local level in several countries, the impact of organic systems is very important. Although smallholder farms grow 70% of the world’s food, 50% of those without food security are small-scale farmers from underdeveloped and developing countries [5]. Smallholder organic farmers from developing countries account for 73% of land certified for organic production [3]. These producers use organic techniques in soil and water and holistic management, practices that allow them to be productive, achieve food security, and increase their incomes. Ayuya et al. [6] note that organic certified smallholders are less likely to suffer multidimensional poverty compared with conventional producers.

There are an estimated two million certified organic farmers worldwide; of this total, producers in developing countries account for 80%: 34% in Africa, 29% in Asia, and 17% in Latin America [7]. The countries with the highest numbers of organic producers are India (650,000 producers), Uganda (189,610 producers), and Mexico (169,703 producers) [5] (Figure 2). Some countries, such as India, Ethiopia, Mexico, and Uganda, have promoted the participation of smallholder

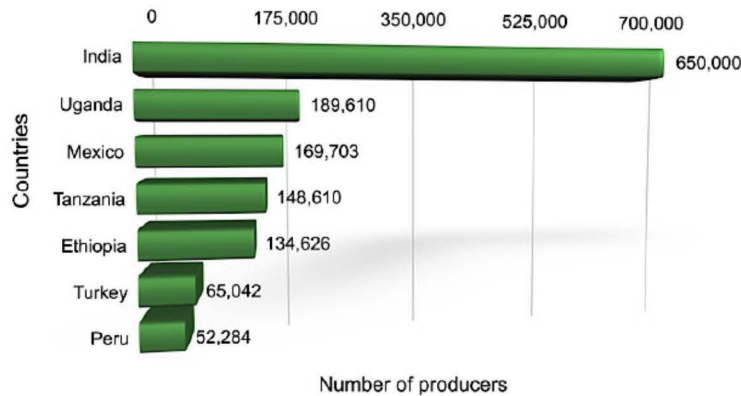


Figure 2. Countries with the largest number of certificated organic producers (adapted from [4]).

farmers in the organic market, through certification schemes such as “group certifications” and the so-called participatory guarantee systems, which link organic producers to international and domestic markets. Organic agriculture, therefore, represents an option to improve agro-ecological, social, and economic conditions in developing countries and emerging markets.

The cycle of production–consumption of certified organic products can be observed mainly in regions with high purchasing power, where consumers are able to pay the price premium of such products. In this sense, the main consuming countries of organic products are industrialized countries; the leader in organic food retail sales is the USA, with 22,590 million euros annually, followed by Germany (€7,040 million/year), France (€4,004 million/year), Canada (€2,136 million/year), and the UK (€1,950 million/year). Developed countries also have the highest consumption per capita of organic products, led by Switzerland (€189.1/year), Denmark (€165.8/year), and Luxembourg (€143.0/year) [4].

1.1. Organic livestock production

Organic livestock production is a holistic system aimed at the integration of animal and crop production and the development of a symbiotic relationship of recyclable and renewable resources [8–10]. The grassland and grazing areas used by organic livestock activity represent two-thirds (27 million hectares) of agricultural organic land; this reflects the importance of animal production within the organic production industry [4].

Organic livestock farming involves radical changes in production processes related with major attention to health and animal welfare, environmental conservation, quality, and food safety [10]. The diversity of organic livestock farms relies not only on natural local resources, animals used, climatic conditions, products manufactured, and commercialization but also on the production and farming strategies of each organic farmer.

Verhoog et al. [11] distinguish three types of organic farmers. In the “non-chemical approach,” the producers are pragmatic organic farmers who formally follow organic farming standards but continue to have a conventional problem-solving approach with economic motives to conversion. The second type of producers follow the so-called “agro-ecological approach,” with a more systematic approach and closed cycles; they focus on efficient production without causing damage to ecosystems. Finally, the “integrity approach” farmers develop farms where soil, plants, animals, and the farm as a whole are regarded as an organism with an intrinsic value. Each organic farming approach will determine different feed, breeding, reproduction, and health requirements.

Some of the positive effects of organic livestock practices are promoting sustainable land use, improving animal welfare and increasing product quality. The methods used exert a positive effect on biodiversity and ecological balance. Furthermore, organic management may contribute to the safeguarding of agricultural functions, with positive effects on the employment rate and the quality of life in rural communities [12, 13]. For these reasons, organic livestock farming can improve the balance between the demand for human food and the ecological impact of the agro-alimentary industry.

2. Organic dairy sheep production

Milk and dairy products constitute a high share of all organic products sales, positioned in second place behind only fruits and vegetables, and in first place for animal products, with 15% of total organic sales [14]. Sheep milk production has an important economic role in industrial countries due to high prices for dairy products, mainly cheese. Additionally, sheep milk represents a source of high quality protein and calcium in arid areas, especially for hungry or malnourished people [15].

Organic dairy sheep farms represent a system focused on producing high-quality nutritious milk, by implementing production methods that reject the use of agrochemical products, artificial compounds, pesticides, growth promoters, and forage additives and that utilize crop rotation and the reuse of organic residues. In some countries, such as Spain or Greece, organic dairy sheep systems are an essential factor for rural development for three reasons: their low environmental impact, their use of autochthonous breeds, and the diversity of transformation of milk and manufacturing processes [16].

According to Perez et al. [17], milk production is one of the most complex systems in organic production, which complicates the conversion from conventional to organic production. This is due to the large quantity of technological innovations that have been developed within the industry. However, several other authors claim that conversion from conventional to organic production systems in small ruminants appears to be less complicated in terms of management when compared with other farm species. This situation may be mainly because the management of sheep feeding does not differ dramatically between organic and conventional production systems [18–20].

Sheep have several characteristics that promote the transition process, such as easy management, effective adaptation to diverse environmental, geographic and climatic conditions, and

high efficiency in the use of available sources of grazing [19, 20]. These characteristics conform with the management practices suggested by organic standards, which dictate that feeding must be based on extensive grazing and that supplementary feed should come from organic farms (certified feed industry) [21].

Organic dairy sheep farms are generally located in harsh environments, where dairy cattle production is not feasible. Organic dairy sheep nutrition is based on grazing in natural pastures and using winter fodder crops; therefore, the seasonal effects on milk sheep production are strong. The grazing system of organic dairy sheep farms promotes the continuity of traditional pastoral systems, which is the key to the sustainability of rural areas, the conservation of traditional systems of production, and the preservation of cultural heritage [22].

| Location | Name of regulation | Date of publication | References |
|---------------------------|---|--|------------------------------|
| <i>Global or regional</i> | | | |
| FAO-WHO | <i>The Guidelines for the Production, Processing, Labeling and Marketing of Organically Produced Foods (Codex Guidelines)</i> | 1999 | [23] |
| INFOAM | <i>Standard for Organic Production and Processing</i> | August 12, 2012 | [3] |
| EAC ¹ | <i>East African Organic Products Standard, EAS 456:2007</i> | April, 2007 | [24] |
| EU ² | <i>Council Regulation (EC) No 834/2007 on organic production and labeling of organic products with regard to organic production, labeling and control</i> | June 28, 2007 | [25] |
| <i>Continent</i> | <i>Country</i> | | |
| America | Argentina | <i>National Law 25.127. Ecological, Biological and Organic Production</i> | September 8, 1999 [26] |
| | Brazil | <i>Law No. 10.831 and decree No. 6.323 (2007)</i> | December 23, 2003 [27] |
| | Chile | <i>Law 20.089 from National System of Organic Products Certification</i> | December 12, 2005 [28] |
| | Costa Rica | <i>Law of Development, Promotion and Foment of the Organic Agricultural activity. No. 8591</i> | August 14, 2007 [29] |
| | Mexico | <i>Law of Organic Products</i> | February 7, 2006 [30] |
| | United States | <i>National Organic Program</i> | December 21, 2000 [31] |
| Africa | Tunisia | <i>Law on Organic Agriculture No. 99-30</i> | April 5, 1999 [32] |
| | Uganda | <i>Uganda Organic Standard (UIOS)</i> <i>East African Organic Products Standards</i> | 2004 April, 2007 [24, 33] |
| Asia | Japan | <i>Japanese Agricultural Standards for Organic Livestock Products</i> | October 27, 2005 [34] |
| | India | <i>National Programme for Organic Production (NPOP)</i> | May, 2001 [35] |
| Oceania | Australia | <i>National Standard for Organic and Bio-Dynamic Produce. Edition 3.4</i> | July 1, 2009 [36] |
| | New Zealand | <i>Technical Rules for Organic Production. MAF Standard OP3,</i> | June, 2011 [37] |

¹EAC, East African Community, ²EU, Europe Union

Table 1. Organic production standards.

The technical challenges faced by organic dairy sheep producers are regulated by international and regional standards, such as EU regulation No. 834/2007 [25], IFOAM standard for organic production and processing [3], Basic Standards and Codex Guidelines [23], and local regulations in each country (Table 1). Sheep milk production under organic management within defined standards entails challenges in feed, reproductive management, breeding, health, and welfare practices.

2.1. Feed management in organic dairy sheep farming

Organic dairy sheep systems involve extensive management, with high levels of nutrient self-sufficiency and efficient nutrient utilization. This livestock system requires management strategies with highly complex crop rotation to produce both forage and concentrate feed. Regardless of production system type (conventional or organic), the lactation process in dairy sheep requires feed rations with high levels of nutrients during mammogenesis, lactogenesis, and lactation [38]. Bencini and Pulina [39] have estimated that to produce a liter of sheep's milk with 7% fat content requires 7.1 mega joules of metabolizable energy (MJ) of ME).

| Country | Breed | DMY (kg/day) | Fat % | Protein % | SNF% | TS% | References |
|--------------------------------|------------------------|--------------|-------|-----------|-------|-------|------------|
| <i>Organic management</i> | | | | | | | |
| Italy | Sardinian | 1.23(1) | 6.74 | 5.7 | - | - | [42] |
| Italy | Sardinian | 1.44 | 6.46 | 5.61 | 10.65 | 17.11 | [43] |
| Czech Republic | ¹ Crossbred | 0.82(1) | 7.94 | 6.49 | 12.25 | 20.19 | [44] |
| Greece | Karagouniko | 1.1 | 6.8 | 5.7 | 11.6 | 18.5 | [45] |
| USA | ² Crossbred | - | 8.69 | 6.33 | 12.19 | 20.88 | [46] |
| Czech Republic | East Friesian | 1.03 | 6.65 | 5.30 | 11.1 | 17.75 | [47] |
| | East Friesian (EF) | 0.56 | 6.63 | 5.14 | 10.2 | 16.85 | |
| Mexico | EFxPelibuey | 0.39 | 8.03 | 5.33 | 10.6 | 18.71 | [48] |
| | EFxSuffolk | 0.55 | 6.98 | 5.29 | 10.4 | 17.42 | |
| <i>Conventional management</i> | | | | | | | |
| Spain | Churra | 1.0(1) | 6.54 | 5.7 | 12.03 | 18.57 | [49] |
| Israel | Awassi Assaf | 2.77 | 4.68 | 5.13 | - | - | [50] |
| Italy | Valle del Belice | 1.58 | 7.32 | 5.69 | - | - | [41] |
| Czech Republic | East Friesian | 0.87 | 8.0 | 5.71 | 11.59 | 17.86 | [51] |
| Spain | Lacaune | 1.04 | 6.14 | 4.89 | 9.85 | 15.99 | [52] |

DMY, total milk yield; DMY, daily milk yield. SNF, Solids non-fatty; TS, Total solids, ¹First lambing crossbred ewes, Lacaune (50%), East Friesian (37.5%) and Improved Wallachian (12.5%). ²Crossbred ewes Lacaune X East Friesian.

Table 2. Milk production and composition of dairy sheep in organic and conventional production systems.

The energy and protein content in dairy sheep rations must be adequate and sufficient to support maintenance requirements as well as milk production [40]. Pulina et al. [41] note that energy intake is the most important factor that influences milk production and composition, followed by protein and fiber content of the diet. An adequate amount of energy in dairy sheep diets increases glucose content in the blood, which promotes the synthesis of lactose, the activation of mammary and systemic regulators (insulin, IGF, thyroid and neurohormones, etc.), and the increased uptake of milk precursors (glucose, acetate, butyrate, amino acids, NEFA, vitamins, and minerals) [41].

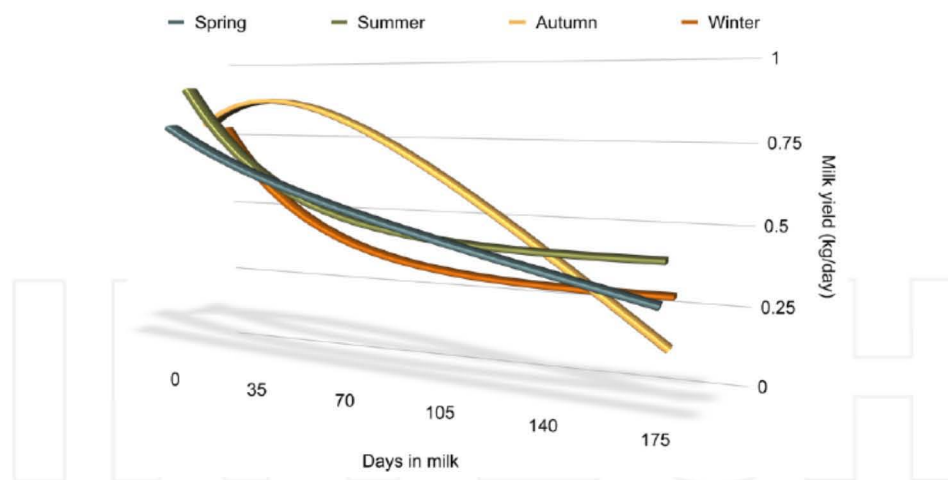
The standards that regulate feeding management in organic systems are one of the most critical factors that influence milk production performance and quality of milk (Table 2). Organic regulations limit the use of concentrate and reduce the range of ingredients that can be included in organic rations. This situation may cause deficiencies of energy, protein, and minerals (zinc, molybdenum, selenium, copper, and iodine), which increases the risk of nutrient imbalances [53, 54]; it has been reported that underfeeding ewes in early lactation, when nutritional requirements are highest, results in lower milk yields [55].

European organic standards require feed rations based on forage (minimum 60% of daily dry matter inclusion) and primarily homegrown ingredients [25]. One of the major challenges in organic management is to formulate high forage diets with an adequate energy concentration due to the low energy value of most forages (<11 MJ of ME per kg DM) when compared to concentrate feeds (>13 MJ of ME per kg DM) [56]. The stage of lactation determines the percentage of forage in the total ration, which can comprise up to 100% of the total ration. Organic dairy sheep can graze in natural or cultivated pastures, and different strategies of feeding can be used to follow organic standards.

The feed management on most organic dairy sheep farms is based on grazing. Grazing is the interaction between animals using the pasture and the pasture itself [57]. Systems based on natural pasture grazing utilize less fertilizer and are considered more ecological. However, the high level of pasture in diet, the availability and quality of forage, and the change from grazing fresh herbage to consuming conserved forage are associated with lower milk yields for sheep under organic management compared with milk yields on conventional farms [58, 59].

The availability and quality of pastures and conserved forage change significantly throughout the year, producing a seasonality effect on milk production. Angeles-Hernandez et al. [60] analyze the effect of lambing season on milk production in sheep under organic management; they conclude that sheep with autumn lambing showed significantly ($P = 0.002$) higher milk yields (Figure 3). This may be due to the sheep having been pregnant during the summer, when the availability of forage reaches its maximum, producing a positive effect on the differentiation of mammary secretory cells as well as on the buildup of the animal's physical condition.

Zervas et al. [58] analyze the milk production and live-weight changes in ewes in both conventional and organic systems. Ewes under organic management were fed with grass hay plus barley grain, and ewes under conventional management were fed with grass hay plus balanced concentrate feed. Milk yields of ewes fed organically were significantly lower ($P <$



Lactation curve adjusted using the Wilmink model [61] ($Y = a + be^{kt} + ct$).

Figure 3. Lactation curves per lambing season of dairy sheep under organic management (adapted from [60]).

0.001) when compared with conventional-fed ewes (134 vs. 180 kg/year, respectively). Also, ewes in conventional management showed higher values of live-weight gain ($P < 0.01$) in the period between lambing and weaning (organic 67 vs. conventional 79 g/day).

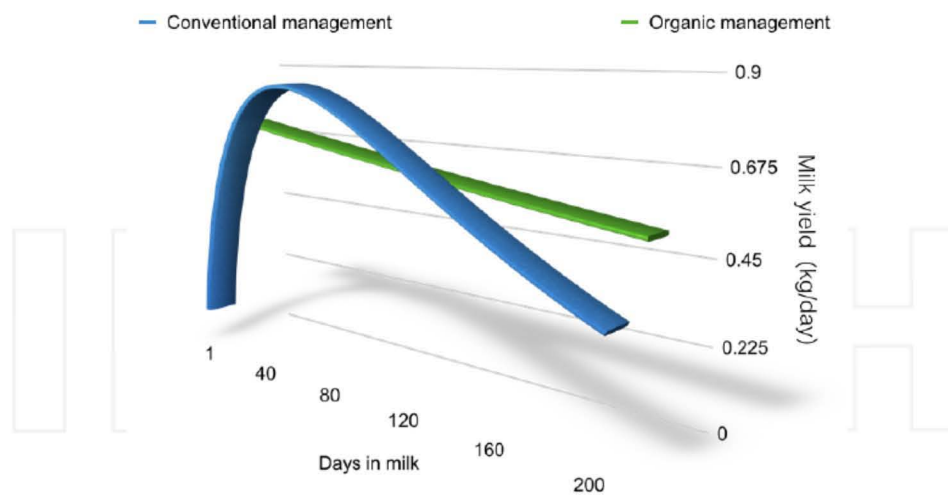


Figure 4. Lactation curves of conventional and organic dairy sheep farms (adapted from [62]).

Some studies note that milk yields of dairy sheep under organic management can be similar or higher than conventional dairy farms, which can be explained in part by lower stocking

rates and high availability of forage per animal [43, 63]. Angeles-Hernandez and Gonzalez-Ronquillo [62] compared the milk production and lactation curves of conventional and organic dairy sheep farms; these authors used the Wood model [64] to analyze a total of 7,501 weekly test-day milk yield records from crossbred dairy ewes. There were no differences in milk yields between organic and conventional dairy sheep farms (97 vs. 103 kg, respectively), but there were significant differences ($P < 0.05$) in the shape of the lactation curve (Figure 4), traits that defined the shape of lactation curve (peak yield and time of peak yield), and parameters of the Wood model (Table 3). Sheep in organic systems showed a higher percentage of lactation curves with atypical shape (without peak of lactation) (Table 3), which could be beneficial in this system, as the risk of negative energy balance and metabolic disturbances in early lactation is lower (Figure 4).

| Type of farming | Traits of lactation curve | | | Parameters of Wood model | | | Proportion of atypical shapes |
|-----------------|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| | TMY(kg) ¹ | PY(kg) | PT(kg) | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | (%) |
| Organic | 97.3 | 0.79 ^b | 20.9 ^b | 0.51 ^a | 0.43 ^b | 0.011 ^a | 52.6 |
| Conventional | 103.0 | 0.85 ^a | 86.9 ^a | 0.25 ^b | 1.89 ^a | 0.002 ^b | 10.5 |
| P-value | 0.06 | 0.05 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.001 | |

¹ TMY, total milk yield adjusted to 200 days in milk; PY, peak yield; PT, time to peak yield; *a* is the production of milk at beginning of the lactation (kg), *b* and *c* are parameters of inclining and declining slopes of lactation curve before and after the PY, respectively.

Table 3. Characteristics of lactation curve and parameters of Wood model from lactation of organic and conventional dairy sheep farming (Adapted from [62]).

Pasture farming systems result in milk characterized by a chemical composition that has beneficial properties for human health. Organic sheep milk has a high fat content (Table 2) due to rations rich in fiber [15]. Several studies report that milk and dairy products from certified organic production systems contain higher concentrations of protein, cis-9, trans-11 CLA, α -linolenic (α -LNA), transvaccenic acid, docosapentanoic acid, eicosapentanoic acid, total n-3 fatty acids, α -tocopherol, and β -carotene than those from conventional production systems [65–67]. Tsiplakou et al. [45] conclude that sheep milk produced under organic farming conditions has higher nutritive values, with elevated contents of MUFA, PUFA, α -LNA, cis-9, trans-11 CLA, and ω -3 FA compared with that from conventional systems.

2.2. Effect of genetic factors in organic dairy sheep farming

The breed or genotype of dairy sheep is one of the main factors that affects milk yields and chemical composition. The choice of breed in organic systems must be considered, with an emphasis on animal characteristics that ensure their welfare and health, such as adaptation to local environmental conditions, vitality and resistance to disease, and absence of specific health problems associated with certain breeds [23, 25].

According to Nauta et al. [2], the different production and marketing strategies of organic farmers demand different breeds. Current dairy breeds have been modified through selective breeding programs to produce high levels of milk, which may make them unsuitable for a traditional and more natural production system. However, the “non-chemical approach” organic farmers use specialized dairy sheep breeds to reach economically viable milk yields, and organic farmers with other production approaches use specialized dairy sheep breeds during the conversion process, usually with moderate milk production performance (Table 2).

The main strategies of animal breeding in organic dairy systems are selection (within and among breeds) and crossbreeding. Selection in organic farming should be used to reinforce, in a sustainable manner, the relationship between the animal and the environment in which it is produced [21]. There are differences in the characteristics and magnitude of genotype due to external factors (i.e., environmental interaction between conventional and organic systems) [68]; the specific approximation to environmental conditions of organic management determines different selection traits for both production systems (Table 4).

The program of selection on organic dairy sheep farms can be applied to specialized, local, or native breeds to improve dairy production traits, but it mainly promotes the selection of vital traits that improve animal well-being, sustainability, health, and flock efficiency [69] (Table 4). Nauta et al. [2] noted that 43% of organic farmers were seeking functional traits as a breeding goal, 32% productive traits, and 25% conformation traits.

| Trait | Heritability |
|--|--------------|
| General disease resistance | 0.05-0.80 |
| Resistance to parasite infection | 0.25-0.40 |
| Somatic cell count | 0.12-0.13 |
| Longevity | 0.05-0.13 |
| Female fertility | 0.07-0.20 |
| Mature size | 0.47 |
| Feeding characteristics | 0.10 |
| Udder shape | 0.20-0.24 |
| Teat size | 0.18-0.39 |
| Milking ease | 0.01 |
| Milk production and composition | |
| Milk production | 0.28-0.32 |
| Fat content | 0.41-0.62 |
| Protein content | 0.51-0.53 |
| Fat yield | 0.17-0.29 |
| Protein yield | 0.18-0.27 |

Data from: [21, 70-77].

Table 4. Important traits in organic dairy sheep breeding.

Organic dairy production can benefit from using native or local breeds genetically adapted to their environment; these breeds are more resilient to climatic stress and are resistant to local parasites and diseases, enabling them to utilize a lower quality of feed [78]. Organic farming may contribute to the maintenance and improvement of the variability of dairy sheep breeds. The use of native breeds can also help support food, agricultural, and cultural diversity, in that the milk and cheese produced from sheep are an expression of a regional cultural tradition. Native breeds also promote local food security and represent a valuable genetic source for improving health and performance traits in the future [12, 78]. However, under organic management, the use of local sheep breeds that are not specialized in milk production may hinder the achievement of sufficient milk yields to reach economic viability. In these situations, crossbreeding can be an option as an improved genetic strategy [79].

Crossbreeding of native breeds with specialized dairy breeds is a viable option to improve dairy production parameters and promote adaptation to feed sources, climate, and the management and market conditions of organic milk production systems, through heterosis and the combined attributes of different breeds [48]. When animals are genetically adapted to specific/extreme environmental conditions, they will be more productive and production costs will be lower. Furthermore, genetic groups adapted to organic dairy management help to safeguard animal health and welfare [78].

Angeles-Hernandez et al. [48] carried out an evaluation of the effect of genetic group on milk production and composition on an organic dairy sheep farm; they compared three genetic groups: East Friesian (EF), EFXPelibuey (local hair breed) (EFxPL), and EFXSuffolk (EFxSF). They found significant differences among genetic groups in milk yield and milk composition (Figure 5). EFXPL sheep showed a lower milk yield (59.8 kg), protein yield (20.8 g/day), and fat yield (31.3 g/day) compared to the other groups. EF and EFXSF showed similar values of milk yield ($76.1 \cong 75.8$ kg), protein yield ($28.8 \cong 29.1$ g/day), and fat yield ($37.2 \cong 38.4$ g/day, respectively).

The EFXSF group showed appropriate milk yield and chemical composition; these contribute not only to an increased cheese yield but also to a differentiation of cheese flavor. However, crossbreeding presents challenges in terms of maintaining a correct proportion of purebred–crossbred populations; furthermore, in systems with inadequate management, biodiversity may be jeopardized by the elimination of certain purebreds (specialized and native breeds) [21].

The goals of organic dairy production farms are more than maximum milk productivity; their objectives are directed to favoring animal health and welfare and to improving the quality of their products with minimum environmental impact. In this sense, genetic improvement strategies must be individually selected and designed for each farm according to resource availability, local market conditions, and management approach.

2.3. Economic implications of organic dairy sheep farming

Organic dairy sheep farming provides income to thousands of families and contributes to regional development, especially in isolated and less favored areas. It also generates employ-

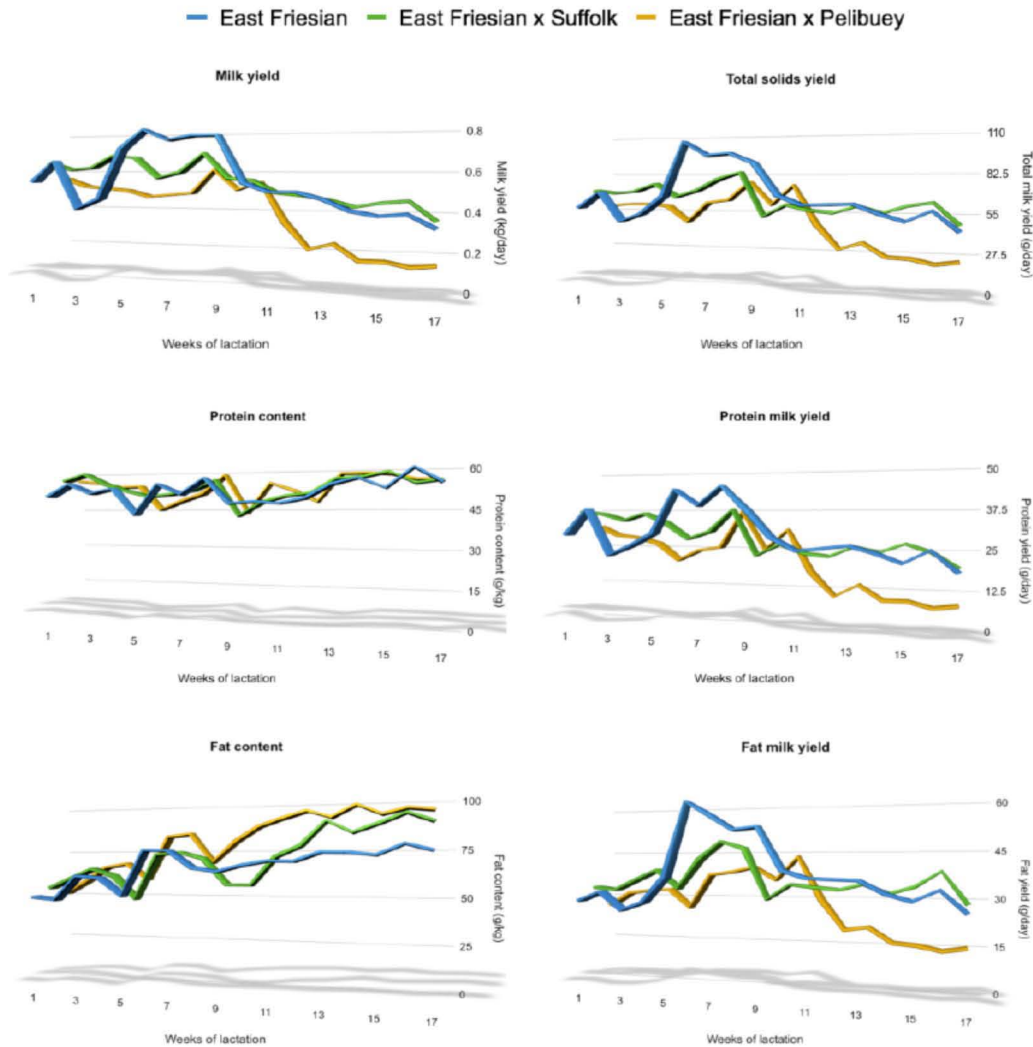


Figure 5. Effect of genetic group on milk production and composition in sheep under organic management (adapted from [48]).

ment, promotes closer links with local markets, restores connections between farmers and customers, and increases incomes in the local economy through exports [13].

The specific productive approach of organic dairy sheep farms determines its economic stability and profitability. The main factors that affect the expected returns of dairy sheep farming are milk yield and price of dairy products [80]. The competitive prices of organic products has played an important role in the expansion of interest in organic systems. Frequently, organic products obtain a premium price when compared to products from conventional farms. The magnitude of the premium depends on product availability and market demand.

The premium in price for organic sheep milk over conventional milk ranges from 8% to 36% within European market [81], 51% in New Zealand [82], from 47% to 79% in the USA [83], and a price difference of approximately 20% to 30% in Mexico [79]. In the case of the gross production value of meat and lambs, the variation arises mainly from fluctuations in price. Gross production value for ewe meat (non-productive ewes) contributes less to the total gross production value of the farm.

Gerrard et al. [84] have noted that organic dairy sheep farms show lower investments in items such as acquisition of animals, equipment depreciation, and agronomic management (less use of fertilizers and chemical compounds). However, it should be taken into account that in the case of organic farming, the value of animal capital is lower due to the fact that the flock consists mainly of crossbred dairy ewes [79]. It has also been reported that organic dairy sheep farms employ more people in comparison with conventional farms. Padel and Lampink [85] noted the higher number of working hours on organic farms (10–50% greater), and they considered salaries to be an expense with a higher impact on the total cost of organic milk sheep production.

The initial investment for establishing an organic farm, as for a conventional farm, includes investments in buildings (stables and barns), equipment (milking machine, feeders), animal capital, pasture area, and grain supplements for feeding throughout the year. An added investment that needs to be considered for organic farms is the certification process, as well as the fact that during the conversion process the commercialization of dairy products with a premium price is not yet possible.

The questions that we have to ask when comparing conventional systems vs. organic systems in general terms are as follow: How will sustainable intensification work in practice? How can farmers and other producers improve their production systems to produce food in more sustainable ways? Being less susceptible to volatile food prices, how can niche-level innovations and consumer interpretations and social practices be better integrated into the mainstream food security discourse? For example, organic systems offer the security of avoiding chemical fertilizers, antibiotics, hormones, and synthetic growth promoters, all of which involve human risk through the increase in allergies and antimicrobial resistance. How will the transformations of the food system play out in terms of geographical area, food security and animal welfare?

From the economic perspective, the dominant message is the importance of the profit motive, which drives the production system. However, the cost to the environment must also be taken into account. For this reason, we have to analyze the “economic sustainability” based not only on economic profitability but also on the relationship of farmers to their land environment and the sustainability of their activity [86]. There may also be hidden costs of production not only from agricultural intensification [87] but also from organic production [88].

3. Conclusion

Organic production is not a method of production that can solve all the problems of the dairy sheep industry; it is mainly an approach to production focused on satisfying the current

demand for dairy products, but without the adverse effects of intensified livestock production. Moreover, organic farming is a production method with a specific market focus on products of premium quality and high standards of production. Organic sheep milk production can provide a balance between society's demand for food and the ecological impact of the agro-alimentary industry, through the comprehensive implementation of conservation practices and the ecological utilization of natural resources.

The production of organic sheep's milk requires research along specific lines, aimed at developing better methods of production, distribution, and marketing of their products. These must be focused mainly on genetic improvement, preventive medicine, welfare, nutrition management, and promotion of nutritional characteristics, in accordance with defined production approaches and regulations.

Acknowledgements

Mr. Angeles Hernandez was granted with CONACyT, Mexico scholarship for their studies in the Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Dr. Gonzalez Ronquillo was granted with a CONACyT fellowship "Estancias Sabaticas en el Extranjero 2014." Also, we thank Ms. Penelope Krumm for the critical review of this paper.

Author details

Juan C. Angeles Hernandez^{1,4}, Octavio A. Castelan Ortega², Sergio Radic Schilling³, Sergio Angeles Campos⁴, A. Hilda Ramirez Perez⁴ and Manuel Gonzalez Ronquillo^{2*}

*Address all correspondence to: mrg@uaemex.mx

1 Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México

2 Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote, Toluca, Estado de México, México

3 Escuela de Ciencias y Tecnologías en Recursos Agrícolas y Acuícolas, Universidad de Magallanes, Región de Magallanes y la Antártica Chilena, Chile

4 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México

References

- [1] Terrence T, Cihat G. Organic agriculture, sustainability and consumer preferences. In: Vytautas P, editor. *Organic Agriculture Towards Sustainability*. InTech; 2014. p. 1–24. DOI: 10.5772/58428
- [2] Nauta WJ, Baars T, Bovenhuis H. Converting to organic dairy farming: consequences for production, somatic cell scores and calving interval of first parity Holstein cows. *Livestock Science*. 2006;90:185–195. DOI: 10.1016/j.livprodsci.2005.06.013
- [3] International Federation of Organic Agriculture Movements, IFOAM. The IFOAM standard for organic production and processing; 2012. Available from: <http://www.ifoam.bio/en/ifoam-standard> [Accessed: 2014-12-20]
- [4] FiBL-INFOAM. The World of Organic Agriculture 2015. Available from: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1663-organic-world-2015.pdf>. [Accessed: 2015-01-12]
- [5] INFOAM. Consolidated Annual Report of the IFOAM Action Group 2013. Available from: http://www.ifoam.bio/sites/default/files/annual_report_2013_web.pdf. [Accessed: 2015-02-21]
- [6] Ayuya OI, Gido EO, Bett HK, Lagat JK, Kahi AK, Bauer S. Effect of certified organic production systems on poverty among smallholder farmers: empirical evidence from Kenya. *World Development*. 2015;67:27–37. DOI: 10.1016/j.worlddev.2014.10.005
- [7] Global Organic Market Access GOMA. Conference to highlight 10 years of growing market access for organic agriculture. In: *Proceedings of the Global Organic Market Access Conference*. February 2012, Nuremberg, Germany; 2002. p. 39–40.
- [8] Alrøe HF, Kristensen ES, Halberg, N. A systems approach to research in sustainability and organic farming. In: *Research methodologies in organic farming. Workshop in Frink*. September–October 1998; 30-FAO REU Technical series 58.
- [9] Siardos GC. The impact of organic agriculture in socio-economic structures. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 73–86. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [10] Blair, R. Aims and principles of organic cattle production. In: Blair R, editor. *Nutrition and Feeding of Organic Cattle*. UK: CAB International; 2011. p. 5–27. DOI: 10.1079/9781845937584.0000
- [11] Verhoog H, Matze M, Lammerts Van Bueren E, Baars T. The role of the concept of the natural (naturalness) in organic farming. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. 2003;16:29–49. DOI: 10.1023/A:1021714632012
- [12] Ronchi B, Nardone A. Contribution of organic farming to increase sustainability of Mediterranean small ruminant livestock systems. *Livestock Production Science*. 2003;80:17–31. DOI: 10.1016/S0301-6226(02)00316-0

- [13] Lobley M, Butler A, Winter M. Local organic food for local people? Organic marketing strategies in England and Wales. *Regional Studies*. 2013;47(2): 216–228. DOI: 10.1080/00343404.2010.546780
- [14] Johnson J. Saving natural. *Nutrition Business Journal*. 2015: 3–11. Available from: http://newhope360.com/sitefiles/newhope360.com/files/uploads/2015/02/2015%20nbjSampleIssue_CZ.pdf [Accessed: 2015-01-25]
- [15] Morand-Fehr P, Fedele V, Decandia M, Le Frileux Y. Influence of farming and feeding systems on composition and quality of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*. 2007;68(1):20–34. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2006.09.019
- [16] Toro-Mujica PM. Análisis técnico, económico y social de los sistemas ovino lechero ecológicos de Castilla la Mancha: Eficiencia y sustentabilidad [thesis]. Spain: Córdoba University; 2011 (In Spanish).
- [17] Pérez BL, Esquivel CG, Molina OM, Hernández AH. Importancia económica y normatividad de la producción de leche orgánica. In: Hernandez LAG, Pérez LB, editors. *Producción sustentable calidad y leche orgánica*. México: Universidad Autónoma Metropolitana; 2009. p. 85–105 (In Spanish).
- [18] Wright IA, Zervas G, Louloudis L. The development of sustainable farming systems and the challenges that face producers in the EU. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 27–37.
- [19] Degen AA. Sheep and goat milk in pastoral societies. *Small Ruminant Research*. 2007;68:7–19. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2006.09.020
- [20] Shrestha JNB. Sheep. In: Fuquay JW, Fox PF, McSweeney PLH, editors. *Encyclopedia of Dairy Science*. Elsevier. UK: CABI Publishing; 2011. p. 67–76.
- [21] Nardone A, Zervas G, Rochi B. Sustainability of small ruminant organic systems of production. *Livestock Production Science*. 2004;90:27–39. DOI: 10.1016/j.livprodsci.2004.07.004
- [22] Paniagua A. The politics of place: official, intermediate and community discourses in depopulated rural areas of Central Spain. The case of the Riaza river valley (Segovia, Spain). *Journal of Rural Studies*. 2009;25(2):207–216. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2008.12.001
- [23] FAO/WHO Food Standards Programme-Codex Alimentarius Commission. Guidelines for the production, processing, labeling and marketing of organically produced foods. 1999. Available from: <http://www.fao.org/organicag/doc/glorganicfinal.pdf> [Accessed: 2015-02-19]
- [24] East African Community EAC. East African Organic Products standards EAS456:2007; 2007. Available from: <https://www.organic-standards.info/en/documents/East-African-Organic-Product-standard,25>. [Accessed: 2015-02-20]

- [25] European Union (EU). Council Regulation (EC) No. 834/2007 on organic production and labeling of organic products with regard to organic production, labeling and control. 2007. Official Journal of the European Union. Available from: <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?qid=1407328133792&uri=CELEX:32007R0834>. [Accessed: 2015-01-15]
- [26] Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina SENASA. Produccion Ecologica, Biologica y Organica, Ley 25.127. 1999. Available from: <http://www.senasa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=981&rio=4659>. [Accessed: 2015-01-22] (In Spanish).
- [27] Ministro de estado da agricultura, pecuária e abastecimento MAPA. lei 10.831. Diário Oficial da União. 2003. Available from: [http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Organicos/Produtos%20Fitossanitários/Home/Lei_10-831_de_2003_\(portuguese\).pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Organicos/Produtos%20Fitossanitários/Home/Lei_10-831_de_2003_(portuguese).pdf) [Accessed: 2015-01-19].
- [28] Servicio Agrícola y Ganadero SAG. Law No. 20.089. (2005). Available from http://www.sag.cl/sites/default/files/Ley_reglamento_version_dic2011.pdf [Accessed: 2015-01-27] (In Portuguese)
- [29] Ministerio de Agricultura y Ganaderia-Hacenda-Economia, Industria y Comercio, MAG-H-MEIC. Desarrollo, promoción y fomento de la actividad agropecuaria orgánica. No. 8591. 2007. Available from: <http://www.mag.go.cr/legislacion/2009/de-35242.pdf> [Accessed: 2015-01-19] (In Spanish).
- [30] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA. Law of Organic Products. 2006. Available from: <http://www.sagarpa.gob.mx/normateca/Normateca/2%20DECRETO%20por%20el%20que%20se%20expide%20la%20Ley%20de%20Productos%20Orgánicos%20070206.pdf>. [Accessed: 2015-01-25] (In Spanish).
- [31] USDA. National Organic Program. Part 205. 2000. Available from: <http://www.ecfr.gov/cgibin/textidx?SID=b7698166035019cd62a11e2d5be520ba&mc=true&node=pt7.3.205&rgn=div5> [Accessed: 2015-02-11].
- [32] Journal Officiel de la Republique Tunisienne JORT. Law on Organic Agriculture No. 99-30; 1999. p. 539–540. Available from: <http://faolex.fao.org/docs/pdf/tun16328.pdf> [Accessed: 2015-01-21].
- [33] National Organic Agricultural Movement of Uganda NOGAMU and Uganda National Bureau of Standards UNBS. Uganda organic standard (UOS) for organic production and processing. 2004. Available from: http://www.grolink.se/epopa/Publications/UOS_July-05.pdf [Accessed: 2015-02-19].
- [34] Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries MIFF. Japanese Agricultural Standard for Organic Livestock Products Established: Notification No.59. (2005). Available

- from: http://www.maff.go.jp/e/jas/specific/pdf/836_2012-2.pdf [Accessed: 2015-03-27].
- [35] Ministry of Commerce and Industry, Government of India MCI. National Programme for Organic Production (NPOP). 2001. Available from: http://apeda.gov.in/apedawebsite/organic/ORGANIC_CONTENTS/National_Programme_for_Organic_Production.htm [Accessed: 2015-02-17].
- [36] National Standard for Organic and Bio-Dynamic Produce. Organic Industry Export Consultative Committee-Australian Quarantine and Inspection Service (OIECC-AQIS). 2009. Available from: <http://www.tamburlaine.com.au/docs/national-standard.pdf> [Accessed: 2015-02-01].
- [37] Ministry of Agriculture and Forestry of New Zealand MAF. Technical Rules for Organic Production MAF Standard OP3. 2011. Available from: <http://www.foodsafety.govt.nz/elibrary/industry/nzfsa-standard-registration-documents/index.htm> [Accessed: 2015-12-15].
- [38] Tucker HA. Physiological Control of Mammary Growth, Lactogenesis, and Lactation. *Journal of Dairy Science*. 1981; 64(6):1403–1421.
- [39] Bencini R, Pulina G. The quality of sheep milk: a review. *Animal Production Science*. 1997; 37(4):485–504. DOI: 10.1071/EA96014
- [40] Gilbert G. Nutrition of dairy sheep. In: Dawe ST, Dignand M, editors. *Sheep Dairying: The Manual*. NSW Agriculture; 1992. p. 1–5.
- [41] Pulina G, Macciotta NPP, Nudda A. Milk composition and feeding in the Italian dairy sheep. *Italian Journal of Animal Science*. 2005;4(Suppl. 1):5–14. DOI: 10.4081/ijas.2005.631
- [42] Ronchi B, Bernabucci U, Amici A, Serrani F. Effects of different source of yeast on milk yield and composition in organic dairy sheep farming. In: Kyriazakis I, Zervas G editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 189–193. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [43] Pirisi A, Piredda G, Sitzia M, Fois N. Organic and conventional systems: composition and cheese-making aptitude of Sarda ewes' milk. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 143–146. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [44] Novotná L, Kuchník J, Ustova K, Zapletal D, Filip [cbreve] ík R. Effects of lactation stage and parity on milk yield, composition and properties of organic sheep milk. *Journal of Applied Animal Research*. 2009;36(1):71–76. DOI: 10.1080/09712119.2009.9707034
- [45] Tsiplakou E, Kotrotsios V, Hadjigeorgiou I, Zervas G. Differences in sheep and goats milk fatty acid profile between conventional and organic farming systems. *Journal of Dairy Research*. 2010; 77:343–349. DOI: 10.1017/S0022029910000270

- [46] King R. Managing dairy sheep nutrition on a organic farm. In: Proceeding of the 18th Annual Dairy Sheep Association of North America Symposium; 18–20 October 2012; Virginia, USA. p. 22–26.
- [47] Králíčková Š, Pokorná M, Kuchťík J, Filipčík R. Effect of parity and stage of lactation on milk yield, composition and quality of organic sheep milk. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013;60(1):71–78. DOI: 10.11118/actaun201260010071
- [48] Angeles-Hernandez JC, Castelan OOA, Ramirez-Perez AH, González-Ronquillo M. Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Animal Production Science*. 2014;54:1641–1645. DOI: 10.1071/AN14214
- [49] Fuertes JA, Gonzalo C, Carriedo JA, San Primitivo F. Parameters of Test Day Milk Yield and Milk Components for Dairy Ewes. *Journal of Dairy Science*. 1998;81(5):1300–1307. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(98)75692-9
- [50] Leitner G, Chaffer M, Caraso Y, Ezra E, Kababea D, Winkler M, Saran A. Udder infection and milk somatic cell count, NAGase activity and milk composition—fat, protein and lactose—in Israeli-Assaf and Awassi sheep. *Small Ruminant Research*. 2003;49(2):157–164. DOI: 10.1016/S0921-4488(03)00079-8
- [51] Kuchťík J, Sustova K, Urban T, Zapletal D. Effect of the stage of lactation on milk composition, its properties and the quality of rennet curdling in East Friesian ewes. *Czech Journal of Animal Science*. 2008;53(2):55.
- [52] Andrade BR, Salama AAK, Caja G, Castillo V, Albanell E, Such X. Response to lactation induction differs by season of year and breed of dairy ewes. *Journal of Dairy Science*. 2008;91(6):2299–2306. DOI: 10.3168/jds.2007-0687
- [53] Coonan C, Freestone-Smith C, Allen J, Wilde, D. Determination of the major mineral and trace element balance of dairy cows in organic production systems. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 181–183. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [54] Rosati A, Aumaitre A. Organic dairy farming in Europe. *Livestock Production Science*. 2004;90(1):41–51. DOI: 10.1016/j.livprodsci.2004.07.005
- [55] Byström S, Jonsson S, Martinsson K. Organic versus conventional dairy farming—studies from the Öjebyn Project. In: *Proceedings of the UK Organic Research 2002 Conference*. Aberystwyth: Organic Centre Wales, Institute of Rural Studies, University of Wales. p. 179–184
- [56] Weller, R. Improving organic milk. In: Griffiths MW, editor. *Improving the Safety and Quality of Milk. Volume 2: Improving Quality in Milk Products*. Wood Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition; 2010. p. 283–303.
- [57] Molle G, Decandia M, Ligios S, Fois N, Treacher TT, Sitzia M. Grazing Management and stocking rate with particular reference to the Mediterranean environment. In:

- Pulina G, Bencini R, editors. Dairy Sheep Nutrition. CABI Publishing; 2004. p. 191–211.
- [58] Zervas G, Koutsotolis K, Theodoropoulos G, Zabeli G, Gagnaux D, Poffet JR. Comparison of organic with conventional feeding systems of lactating dairy ewes in Greece. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Livestock Farming Systems; 19–20 August, 1999; Posieux, Fribourg, Switzerland: Wageningen Pers; 2000. p. 107–111.
- [59] Von Borell E, Sørensen JT. Organic livestock production in Europe: aims, rules and trends with special emphasis on animal health and welfare. *Livestock Production Science*. 2004;90(1):3–9.
- [60] Angeles-Hernandez JC, Albarran-Portillo B, Gonzalez AG, Salas NP, Gonzalez-Ronquillo M. Comparison of mathematical models applied to f1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation curve parameter. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2013;26(8):1119–1126. DOI: 10.5713/2Fajas.2013.13096
- [61] Wilmink JBM. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. *Livestock Production Science*. 1987;16:335–348. DOI: 10.1016/0301-6226(87)90003-0
- [62] Angeles-Hernandez JC, González-Ronquillo M. Comparing the milk production and characteristics of lactation curves in organic and conventional dairy sheep farms in Mexico. In: Proceeding of International Symposium on Food Safety and Quality: Applications of Nuclear and Related Techniques, 10–13 November 2014. Vienna. IAEA; 2006.
- [63] Padel S. Strategies of organic milk production. In: Proceedings of the 3th NAHWOA Workshop, Clermont-Ferrand, France; 2000. p. 121–135.
- [64] Wood PDP. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*. 1967;216:164–165. DOI: 10.1038/216164a0
- [65] Bisig W, Eberhard P, Collomb M, Rehberger B. Influence of processing on the fatty acid composition and the content of conjugated linoleic acid in organic and conventional dairy products—a review. *Le Lait*. 2007;87:1–19. DOI: 10.1051/lait:2007001
- [66] Palupi E, Jayanegara A, Ploeger AJ, Kahl J. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2012;92:2774–2781. DOI: 10.1002/jsfa.5639.
- [67] Heins BJ, Paulson JC, Endres MI, Moon RD. Effect of organic grain supplementation on pasture and total mixed ration dry matter intake and fatty acid profiles of organic dairy cows. In: Join Annual Meeting ADSA-ASAS. 8–14 July 2013. Indianapolis. p. 662.

- [68] Nauta WJ. Selective Breeding in Organic Dairy Production [thesis]. Wageningen, the Netherlands: Wageningen University; 2009.
- [69] Conington J, Lewis RM, Simm G. Breeding goals and strategies for organic sheep production. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 135–142. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [70] Mavrogenis AP, Papachristoforou C, Lysandrides P, Roushias A. Environmental and genetic factors affecting udder characters and milk production in Chios sheep. *Genetics Selection Evolution*. 1988;20:477–488. DOI: 10.1186/1297-9686-20-4-477
- [71] Fernández G, Baro JA, De la Fuente LF, San Primitivo F. Genetic parameters for linear udder traits of dairy ewes. *Journal of Dairy Science*. 1997;80:601–605. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(97)75976-9
- [72] Conington J, Bishop SC, Grundy B, Waterhouse A, Simm G. Multi-trait selection indexes for sustainable UK hill sheep production. *Animal Science*. 2001;73:413–424.
- [73] Rupp R, Lagriffoul G, Astruc JM, Barillet F. Genetic parameters for milk somatic cell scores and relationships with production traits in French Lacaune dairy sheep. *Journal of Dairy Science*. 2003;86(4):1476–1481. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(03)73732-1
- [74] Berger Y, Billon P, Bocquier F, Caja G, Cannas A, McKusick B, Marnet PG, Thomas D. Principles of sheep dairying in North America. 2004. Available from: http://www.drobnica.si/files/brosure/Berger_et_al_Principles_of_Sheep_Dairying_in_North_America_2004.pdf [Accessed: 2015-02-17]
- [75] Legarra A, Ugarte E. Genetic parameters of udder traits, somatic cell score, and milk yield in latxa sheep. *Journal of Dairy Science*. 2005;88:2238–2245. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72899-X
- [76] Legarra A, Ramón M, Ugarte E, Pérez-Guzmán MD. Economic weights of fertility, prolificacy, milk yield and longevity in dairy sheep. *Animal*. 2007;01:193–203. DOI: 10.1017/S1751731107657814
- [77] Ugarte E. The breeding program of Latxa breed. *Biotechnology in Animal Husbandry*. 2007;23:97–111.
- [78] Van Diepen P, McLean B, Frost D. *Livestock Breeds and Organic Farming Systems*. 2007. Available from: <http://orgprints.org/10822/> [Accessed: 2015-04-11]
- [79] Ángeles-Hernández JC, Perez-Hernandez AH, Pérez-Rocha MJ, González-Ronquillo M. Organic production of sheep milk. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2014;17(1):49–62.
- [80] Tzouramani I, Sintori A, Lontakis A, Alexopoulos G. Assessing economic incentives for dairy sheep farmers: a real options approach. In: *Proceeding of 12th Congress of*

the European Association of Agricultural Economists (EAAE 2008); August 26–29; Ghent, Belgium; 2008.

- [81] Kristensen ES, Thamsborg SM. Future European market for organic products from ruminants. In: Kyriazakis I, Zervas G, editors. *Organic Meat and Milk from Ruminants*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2002. p. 5–13. DOI: 10.3920/978-90-8686-506-2
- [82] Christensen V, Saunders C. Economic analysis of issues concerning organic dairy farming. AERU Research Report No. 257, Lincoln, New Zealand: AERU, Lincoln University; 2003. Available from: https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/746/aeru_rr_257.pdf?sequence=1. [Accessed: 2015-03-11]
- [83] Dimitri C, Greene C. Recent growth patterns in the US organic foods market. *Agriculture Information Bulletin*. 2000, 777. Available from: http://www.ers.usda.gov/media/255736/aib777c_1_.pdf. [Accessed: 2015-03-18]
- [84] Gerrard CL, Padel S, Moakes S. The use of farm business survey data to compare the environmental performance of organic and conventional farms. *International Journal of Agricultural Management*. 2012;2:5–16. DOI: 10.5836/ijam/2013-01-02
- [85] Padel S, Lampkin N. Farm-level performance of organic farming systems. An overview. In: Lampkin N, Padel S, editors. *The Economics of Organic Farming*. Wallingford: CAB International; 1994. p. 201–221.
- [86] Zahm F, Viaux P, Girardin P, Vilain L, Mouchet C. Farm sustainability assessment using the IDEA method: from the 77 concept of farm sustainability to case studies on French farms. In: *Proceedings and Outputs of the First Symposium of the International Forum on Assessing Sustainability in Agriculture (INFASA)*; 16 March; Bern, Switzerland; 2006.
- [87] Hodges J. Session IV: role of international organizations and funding agencies in promoting gene-based technologies in developing countries. In: Makkar HPS, Viljoen GJ, editors. *Applications of Gene-Based Technologies for Improving Animal Production and Health in Developing Countries*. New York: Springer Science and Business Media, Inc.; 2005. p. 18–21 2005.
- [88] Capper JL. The environmental sustainability of food production. In: Kebreab E, editor. *Sustainable animal Agriculture*. Wallingford, Oxfordshire: CABI International; 2014. p. 157–171. DOI: 10.1079/9781780640426.0000

CAPÍTULO IV

PRODUCCIÓN LÁCTEA Y MODELACIÓN DE LA CURVA DE LACTACIÓN

4. PRODUCCIÓN LÁCTEA Y MODELACIÓN DE LA CURVA DE LACTACIÓN

4.1. PRODUCCIÓN LÁCTEA

La producción láctea es un complejo proceso fisiológico de gran importancia en los mamíferos, representa la forma de proveer nutrientes a las crías en las primeras etapas de vida (McManaman y Neville, 2003). El desarrollo tecnológico de la industria lechera ha permitido la obtención de rendimientos superiores a los necesarios para el desarrollo de la cría, permitiendo el aprovechamiento del excedente o en algunos casos la totalidad de la producción láctea para la alimentación humana. Para los pequeños rumiantes, la importancia de la producción lechera se ha incrementado en años recientes, especialmente en países en desarrollo en donde existe un interés para la suplementación de derivados lácteos para el consumo humano (Lérias *et al.*, 2014a).

4.1.1. Desarrollo de la glándula mamaria

Las glándulas mamarias (GM) son glándulas sudoríparas modificadas (Ferreira *et al.*, 2013) que distinguen a los mamíferos del resto de los animales por su estructura anatómica única y su capacidad para secretar leche que es destinada a la alimentación de la cría o crías (Macias Hinck 2012). El desarrollo adecuado de la GM es un factor primario que afecta la producción láctea y comprende: a) el mayor número posible de células secretoras diferenciadas, b) el apropiado aporte sanguíneo y c) un fuerte tejido conectivo para una GM que será altamente productiva a lo largo del proceso de lactación (Strucken *et al.* 2015).

Histológicamente, la GM está compuesta por dos tipos de tejidos: el parénquima y el estroma. El tejido parenquimatoso comprende la parte secretora y es originada del ectodermo del embrión. El estroma tiene un origen mesodérmico y está constituido por vasos linfáticos y sanguíneos y tejidos adiposo, conectivo y nervioso (Lérias *et al.*, 2014b). La GM está localizada en la ubre, un órgano complejo integrado por un conjunto de sistemas: de soporte, y el de secreción (células epiteliales) y un sistema

ductal para el almacenamiento y transporte de leche. El tejido secretor contiene lóbulos y cada lóbulo consiste de numerosos lobulillos; cada lobulillo contiene racimos de alvéolos, los cuales son estructuras en forma de saco en donde se sintetiza la leche y se secreta hacia el sistema ductal (Ferreira *et al.*, 2013).

La GM es uno de los pocos órganos de los mamíferos que lleva a cabo ciclos repetidos de desarrollo estructural, diferenciación funcional y involución (Hurley y Loor, 2011; Rezaei *et al.*, 2016). El adecuado manejo de este ciclo es la base de una lactación exitosa en animales lecheros. El desarrollo de la GM es referido como mamogénesis, llevándose a cabo a través de una serie de fases íntimamente asociadas con la fisiología específica del crecimiento y reproducción de los animales (Figura 1). Dicho desarrollo comienza tempranamente durante la vida fetal y continúa, en algunas especies, ms allá del inicio de la lactación (Rezaei *et al.*, 2016). El desarrollo de la GM ocurre generalmente en cinco periodos: fetal, prepuberal, post-puberal, gestación y lactación (Ferreira *et al.*, 2013).

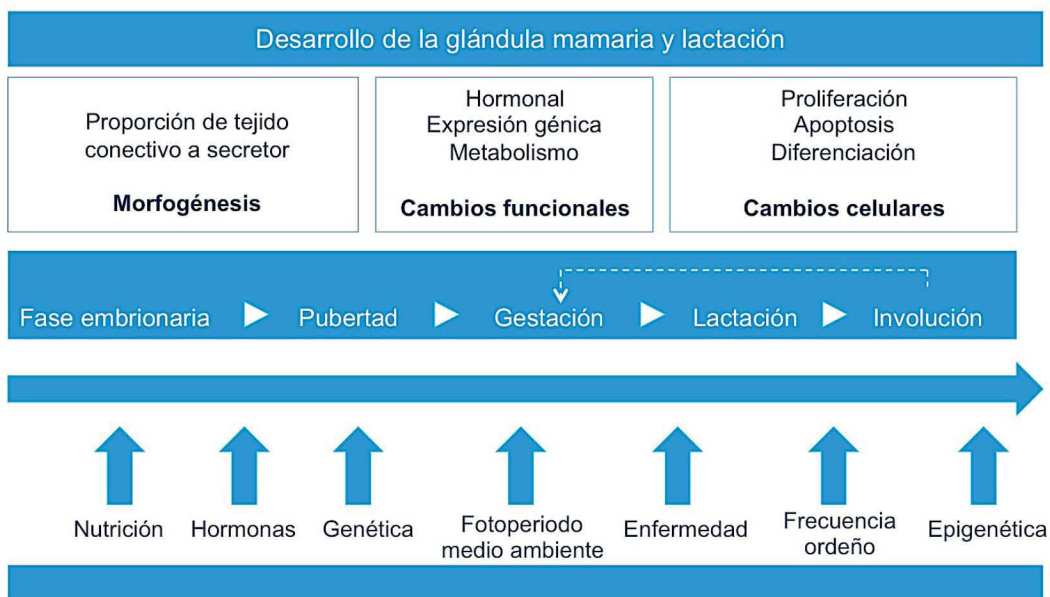


Figura 1. Representación esquemática del desarrollo mamario y lactación desde la etapa embrionaria hasta la involución (Adaptado de Ferreira *et al.*, 2013).

En todas las especies, la glándula mamaria comienza su desarrollo desde la etapa fetal en respuesta a las hormonas maternas (Strucken *et al.*, 2015). El primer conglomerado de células ectodérmicas embrionarias discernibles destinadas a formar la GM es llamado banda mamaria (Hurley y Loo 2011). El esquema básico del sistema de excreción de la GM en rumiantes es completado al final del segundo trimestre de la vida fetal (Svennersten-Sjaunja y Olsson, 2005). En la GM del feto ovino hembra, el tejido epitelial mamario (que origina el tejido mesenquimatoso) se incrementa aproximadamente 24 veces desde la iniciación de los ductos secundarios hasta el parto y más de 4 a 5 veces en las tres semanas posteriores al parto. Aunque en términos absolutos el crecimiento de la GM durante la etapa fetal es solo un pequeño porcentaje de la GM en estado maduro y productivo, es importante considerar que el crecimiento prenatal puede tener un efecto significativo en el potencial de producción láctea en la vida adulta (Jenkinson, 2003).

Al nacimiento, la GM ovina tiene claramente diferenciadas las cisternas, los pezones y un incipiente sistema ductal (Caja *et al.*, 2002). Después del nacimiento el desarrollo de la GM coincide con la transición del crecimiento isométrico a un estado de crecimiento alométrico que facilita el rápido desarrollo posnatal. En corderas se ha registrado un rápido crecimiento del parénquima entre las 4 y 20 semanas de edad (Rowson *et al.*, 2012); sin embargo, este crecimiento de la GM del nacimiento a la pubertad es debido principalmente a la formación del estroma mamario, más que al desarrollo de tejido secretor especializado (Strucken *et al.*, 2015).

En la pubertad el inicio del ciclo estral, a través de la estimulación de la hormona folículo estimulante y luteinizante, induce la síntesis y liberación de estrógenos y progesterona (Strucken *et al.*, 2015). En la mayoría de las especies la pubertad es el periodo de crecimiento más rápido para los ductos y el estroma de la GM (crecimiento alométrico positivo)(Caja *et al.* 2002); en esta etapa, el completo desarrollo del sistema lóbulo-alveolar en ovejas requiere de estrógenos, progesterona y la presencia de prolactina endógena (Rowson *et al.*, 2012; Lérias *et al.*, 2014b). Los estrógenos actúan a través de sus receptores en el estroma mamario para estimular la producción de

factores de crecimiento, los cuales promueven el desarrollo ductal de la GM principalmente. Por otro lado, la progesterona tiene un rol más importante en la morfogénesis alveolar mediante la estimulación de la síntesis de ADN en el epitelio ductal, probablemente mediado de manera indirecta por su efecto en células del estroma (Rezaei *et al.*, 2016).

La proliferación lóbulo-alveolar y diferenciación de la GM durante la gestación requiere de la acción coordinada de hormonas esteroideas y peptídicas. Estas hormonas mamogénicas relacionadas con la gestación son secretadas por el ovario y cuerpo lúteo durante el ciclo estral y la gestación inicial (principalmente estrógenos, progesterona y relaxina), por la placenta durante la fase de gestación media y tardía (estradiol, progesterona y lactógeno placentario) (Manalu *et al.*, 1998) y por la hipófisis (prolactina). Además, factores de crecimiento (IGF-I, factor de crecimiento epidermal, TGF- α , factor de crecimiento de los hepatocitos) y de transcripción (JAK2 y STAT5a) están implicados en la estimulación de la mamogénesis (Tucker, 2000).

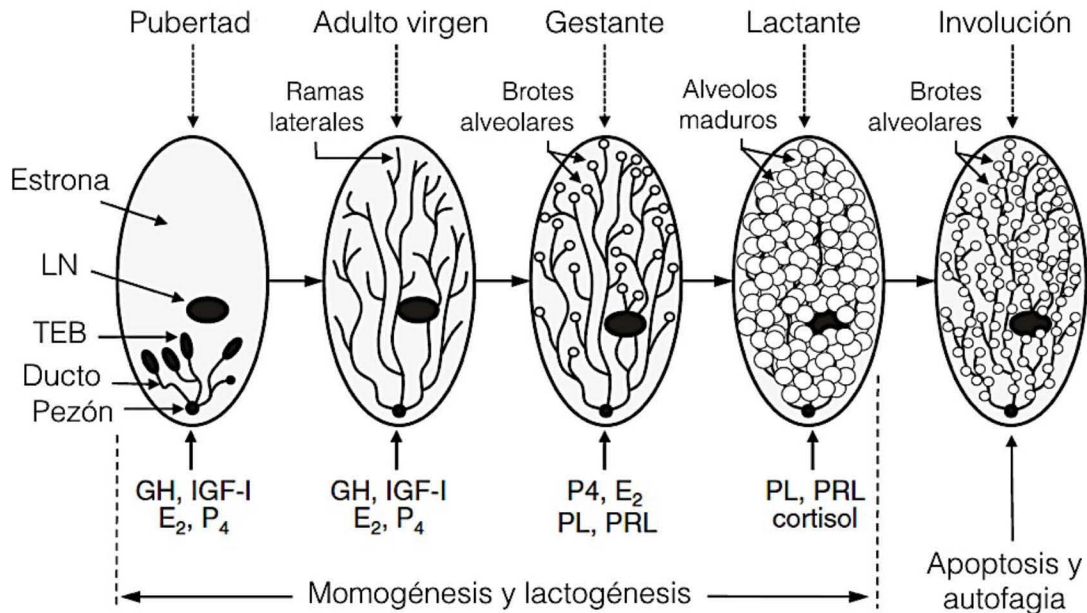


Figura 2. Desarrollo de la glándula mamaria en mamíferos (Adaptado de Rezaei *et al.* 2016). *E2* = estrógenos; *GH* = hormona del crecimiento; *IGF-1* = factor de crecimiento insulínico; *LN* = linfonodo; *P4* = progesterona; *PL* = lactógeno placentario; *PRL* = prolactina; *TEB* = brotes extremos terminales.

En ovejas, una porción mayoritaria de la GM completa su desarrollo durante la pubertad y la gestación y su capacidad de síntesis se logra días antes del parto (Manalu *et al.*, 1998), transformándose de un árbol ductal a un órgano exocrino altamente eficiente con extensas estructuras lóbulo-alveolares (McManaman y Neville, 2003). La diferenciación secretora de la GM, denominada lactogénesis, comienza a la mitad de la gestación y manifiesta un crecimiento exponencial conforme ésta avanza, con un mayor crecimiento de la GM durante la gestación tardía, coincidiendo con el periodo de ms rápido crecimiento fetal. Este periodo es importante ya que determina el número de células secretoras en la GM lactante y la subsecuente producción de leche (Hurley y Looor, 2011). El proceso de lactogénesis ha sido dividido en lactogénesis I (fase de inicio) y lactogénesis II (fase de activación).

La fase de lactogénesis I consiste de una limitada diferenciación estructural y funcional del epitelio secretor (Akers y Capuco, 2012), caracterizada por un incremento en la expresión de algunos genes que codifican para la síntesis de proteínas de la leche, enzimas biosintéticas y acumulación de glóbulos grasos alveolares; lo cual le confiere una limitada capacidad de secreción de algunos componentes lácteos (McManaman y Neville, 2003). En ovejas, al día 90 de gestación las células alveolares comienzan a sintetizar la grasa y proteína de la leche (Nørgaard *et al.*, 2008) y la lactosa ha sido detectada después del día 100 (Caja *et al.*, 2002).

En la fase de lactogénesis II se completa la diferenciación celular y estructural del sistema secretor de la GM, que ocurre durante el periodo inmediato al parto, coincidiendo con el inicio de la síntesis y secreción copiosa de leche (Akers y Capuco, 2012). Esta fase se caracteriza por una homogénea expresión genética de proteínas de la leche por las células epiteliales secretoras (CES), polarización de organelos, expansión mitocondrial y del retículo endoplásmico rugoso, maduración del aparato de Golgi y cierre de los complejos de uniones estrechas intercelulares. Estas modificaciones de las células alveolares son reflejadas en la dramática modificación de

la composición láctea y el incremento del volumen secretado e indica una maduración coordinada de los mecanismos secretores y una alteración en las vías de transporte de los componentes de la leche (McManaman y Neville, 2003).

El mantenimiento de la producción láctea copiosa alcanzada durante la fase de lactogénesis II requiere de la expulsión de la leche; el estasis de la secreción por un tiempo prolongado (40 – 60 horas) induce la involución de la GM (Rezaei *et al.*, 2016). El término galactopoyesis fue originalmente conceptualizado como el mejoramiento de la lactación (Collier *et al.*, 2011). Sin embargo, en un sentido más amplio, el término ha sido utilizado para describir el mantenimiento de la lactación ya establecida (Capuco y Akers, 2011), estrechamente ligado al concepto de persistencia; Paten (2014) señala que un incremento de la galactopoyesis significa un incremento en la persistencia de la lactación lo cual es beneficioso para los sistemas de producción animal.

El término persistencia implica la habilidad de un animal para mantener su producción después del pico de lactación (Wood, 1967, 1968; Dekkers *et al.*, 1998) o la tasa de disminución de los rendimientos lácteos después del pico de lactación (Togashi y Lin, 2003; Pulina, *et al.* 2007). Por ello, animales con lactaciones persistentes son altamente deseables, ya que tienen la habilidad de lograr una excepcional eficiencia en la producción láctea (Wall y Mcfadden, 2012), con menor estrés al pico de lactación, mayor resistencia a enfermedades, mejores parámetros reproductivos y reducción en los costos de alimentación (Togashi y Lin, 2006; Pulina *et al.*, 2007). La definición de estrategias para mejorar la persistencia requiere de conocer los diversos factores que la afectan, incluyendo: factores genéticos, estatus hormonal (factores de crecimiento locales y sistémicos), técnicas de manejo (i.e. frecuencia de ordeño), estado sanitario (i.e. mastitis), estrés (exposición a especies reactivas de oxígeno y antioxidantes), así como nutrición (partición de nutrimentos) (Wall y Mcfadden, 2012; Paten, 2014) (Figura 3).

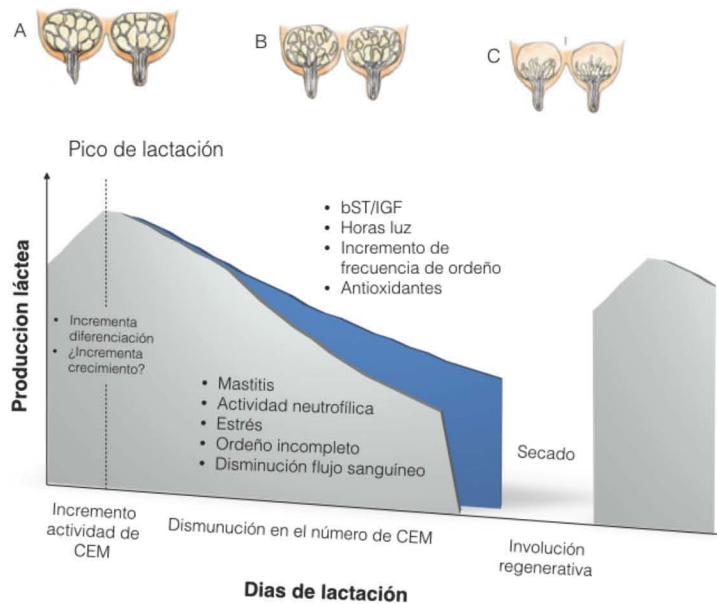


Figura 3. Factores que contribuyen a los cambios en la producción láctea y persistencia durante la lactación (Adaptado de Paten, 2014). Pevio al pico de lactación los rendimientos lácteos aumentan como consecuencia de un incremento de la actividad secretora de las células epiteliales mamarias (CEM) (A). Después del pico de lactación la producción láctea disminuye debido a un declive del número de CEM por la muerte celular por apoptosis (B). Los factores que reducen la pérdida de CEM por apoptosis disminuyen el declive de los rendimientos lácteos (incrementan la persistencia). Durante el secado continúa el proceso de involución y remodelación (C). Los factores que incrementan y reducen los rendimientos lácteos y la persistencia se muestran por encima y debajo de la curva de lactación, respectivamente.

Posterior al cese de la extracción de leche de la GM, continúa el proceso de involución en donde las unidades alveolares y el tejido secretor manifiestan una completa involución, y se desarrollan nuevamente en la siguiente lactación (Paten, 2014). Aunque el proceso de involución de la glándula mamaria manifiesta su mayor actividad al cese de la extracción de leche, este proceso inicia gradualmente desde la lactación temprana y resulta en la lenta disminución de la producción láctea observada durante el ciclo natural de la lactación (Zobel *et al.*, 2015). El momento en que ocurre la involución es dependiente del pico de lactación y éste es altamente específico entre especies y manifiesta variabilidad entre razas; en ovejas se reporta el pico de lactación entre los días 35 a 40 pos parto (Gootwine y Pollott, 2000; Ruiz *et al.*, 2000).

4.2. CURVA DE LACTACIÓN

La lactación es definida como el proceso combinado de síntesis, secreción y excreción de leche (Rezaei *et al.*, 2016), comienza al parto y continúa hasta el secado natural o inducido de la hembra lactante. La evolución de la producción láctea a través del tiempo es caracterizada por un patrón particular común en varias especies de mamíferos conocida usualmente como curva de lactación (Steri, 2010), la cual representa la relación entre la producción láctea y el tiempo después del parto (Figura 4) La producción láctea exhibe generalmente un patrón llamado “*curva típica de lactación*” definida por un incremento en los rendimientos lácteos a partir del parto a una tasa relativamente alta, hasta un punto máximo en donde se alcanza el pico de lactación; posteriormente, la producción de leche disminuye lentamente hasta el final del ciclo de producción (Capuco *et al.*, 2001; Lombaard, 2006).

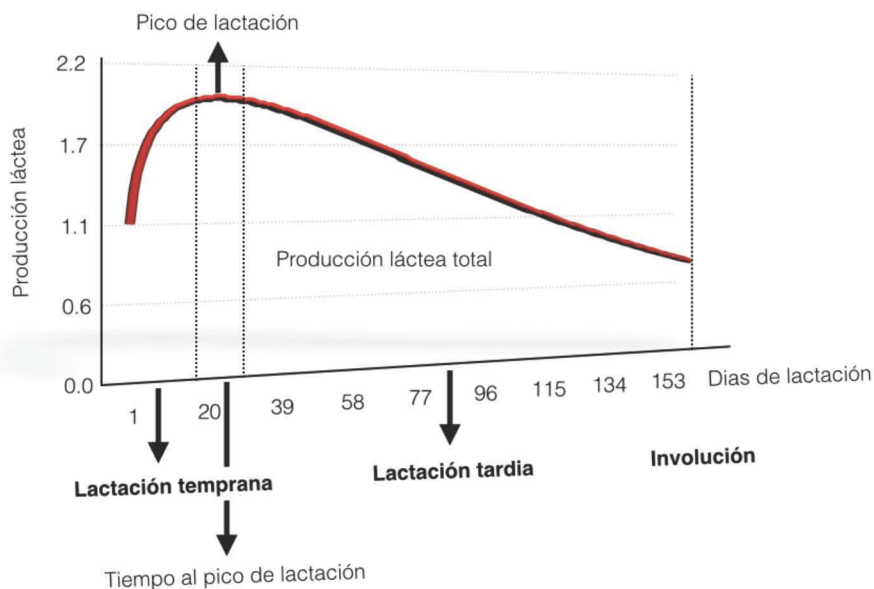


Figura 4. Características de la curva de lactación (Adaptado de Strucken *et al.*, 2015). La glándula mamaria y el sistema alveolar están altamente desarrollados desde días previos al parto hasta el pico de lactación. Este sistema alveolar involuciona continuamente en la lactación tardía hasta el secado.

La curva de lactación refleja el proceso fisiológico complejo de síntesis y captación de los componentes de la leche del torrente sanguíneo por las células especializadas de la GM (Macciotta *et al.*, 2011); el proceso de síntesis láctea es influenciada principalmente por el número y actividad secretora de las células epiteliales mamarias (CEM) durante la lactación (Capuco *et al.*, 2001). La variación en el número de CEM es el resultado de dos eventos: 1) la proliferación celular, que comienza al inicio de la gestación, alcanzando su máximo potencial inmediatamente después del parto; y 2) la remodelación y apoptosis que comienza en la lactación temprana y dura hasta el secado natural o inducido (Knight & Wilde 1993; Colitti *et al.* 2005).

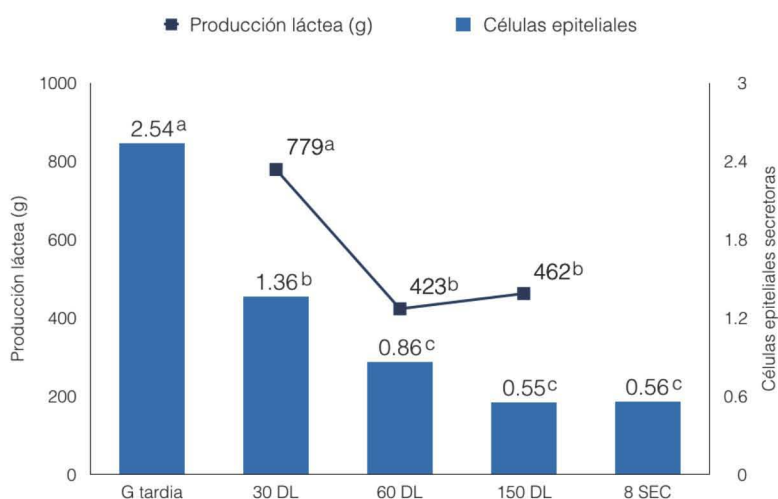


Figura 5. Producción láctea y número de células epiteliales secretoras mamarias de ovejas Sarda (Adaptado de Castañares *et al.*, 2013). El periodo de análisis comprendió 10 días previos al parto (G tardía); 30, 60 y 150 días de lactación (30, 60 y 150 DL) y 8 días después del secado (8 SEC). Las células epiteliales mamarias (CEM) fueron mediadas en CEM x 10⁶. Diferente literal indica diferencias entre periodos (P<0.01).

La dinámica celular y la producción láctea asociada a ésta han sido analizadas principalmente en ganado bovino especializado en producción de leche. En ovejas lecheras Castañares *et al.* (2013) señalan una disminución significativa (P<0.05) en el número de alvéoloalvéolos y en CEM conforme la lactación avanza, lo que coincide con la disminución progresiva de la producción láctea en el transcurso de la lactación (Figura 5). Por lo tanto, el incremento de la producción láctea hasta el pico de lactación podría estar asociado a la diferenciación continua de las CEM y al incremento de la

actividad secretora por célula; mientras que la disminución de la producción láctea después del pico de lactación se debe probablemente a la disminución del número de CEM, como resultado del proceso de involución natural de la glándula mamaria a través del proceso de apoptosis (Figura 3) (Svennersten-Sjaunja y Olsson, 2005; Paten, 2014).

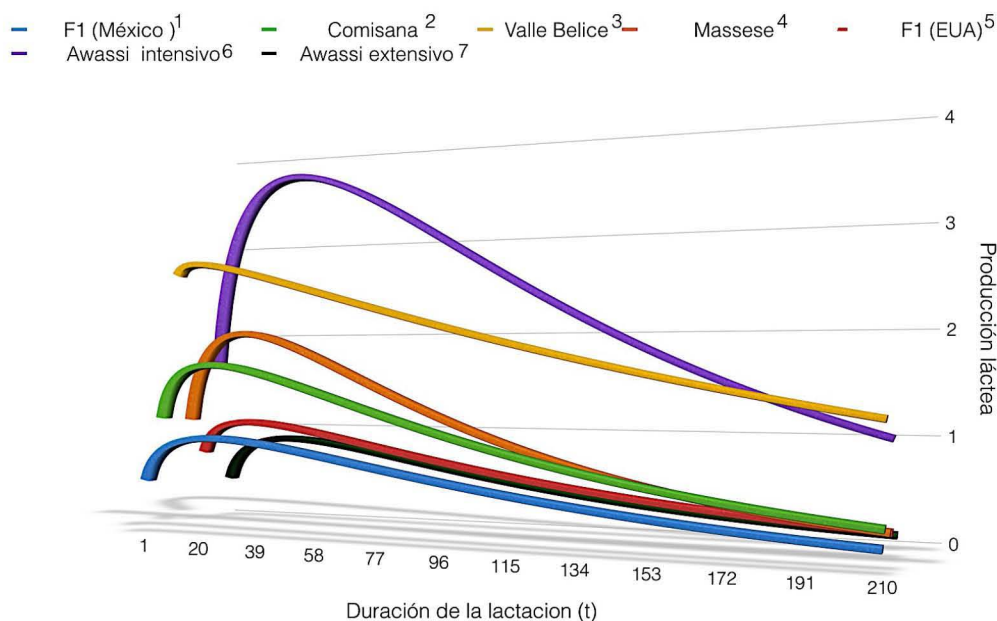


Figura 6. Producción láctea en ovejas de acuerdo con el grupo genético y sistema de producción. Curvas de lactación ajustadas utilizando el modelo de Wood (1967) empleando los parámetros reportados por: ³Portolano *et al.*, 1997; ⁴Franci *et al.*, 1999; ⁶Pollott, 2000; ⁵Chang *et al.*, 2001; ²Pulina y Nudda, 2004; ⁷Dag *et al.*, 2006; ¹Angeles-Hernandez *et al.*, 2013

Estos procesos fisiológicos y dinámica celular son expresados fenotípicamente a través de la curva de lactación. En ovejas, la lactación tiene una duración promedio de cinco meses, con un pico de lactación entre la tercera y cuarta semana pos parto (Lérias *et al.*, 2014a); sin embargo, estos valores dependen en gran magnitud del grupo genético, estado nutricional, manejo, entre otros factores. El patrón de la curva de lactación puede ser considerado como el resultado de dos componentes principales. El primer componente es regular y continuo, que surge como una consecuencia directa del proceso fisiológico de laGM durante la producción láctea. El segundo es un componente aleatorio e impredecible y se refiere a la variación individual con relación al

patrón general de producción láctea (Steri, 2009), y se asocia con los factores previamente mencionados, por ejemplo grupo genético y sistema de producción (Figura 6).

Un fenómeno interesante en el estudio de la curva de lactación es la existencia de dos patrones generales de producción láctea. El primero puede ser definido como un patrón regular y que sigue la forma *típica* de curva de lactación como se muestra en la Figura 4. La segunda forma se define como *atípica*, donde hay una ausencia de pico de lactación con rendimientos continuamente decrecientes desde el inicio de la producción láctea (Macciotta *et al.*, 2004). La presentación de curvas atípicas está relacionada con diversos factores como la especie (en ovejas 30 – 50 % de las lactaciones presenta forma atípica) (Cappio-Borlino *et al.*, 1997), raza, potencial genético, manejo nutricional, etc. (Macciotta *et al.*, 2011). Además, este patrón está asociado con la ausencia de registros productivos en la primera parte de la lactación, originando un efecto gráfico de ausencia de un punto de inflexión en la fase decreciente de la curva (Steri, 2009).

4.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA CURVA DE LACTACIÓN

4.3.1 Modelación matemática en producción animal

Los modelos matemáticos describen las creencias acerca del funcionamiento del mundo; lo cual se traduce en un modelo abstracto expresado en términos de un lenguaje matemático (Yang, 2013). Esto tiene múltiples ventajas debido a que las matemáticas manejan un lenguaje preciso, con reglas bien establecidas de manipulación y cuenta con resultados que han sido probados por cientos de años (Marion y Lawson, 2008); además, las herramientas computacionales disponibles en la actualidad nos permiten la realización de operaciones matemáticas complejas de manera rápida y eficiente. El entendimiento de una parte sustancial del universo a través de la modelación matemática requiere la utilización del proceso de *abstracción*, el cual consiste en remplazar una parte del universo bajo consideración por un modelo similar pero con una estructura más simple (France y Kebreab, 2008).

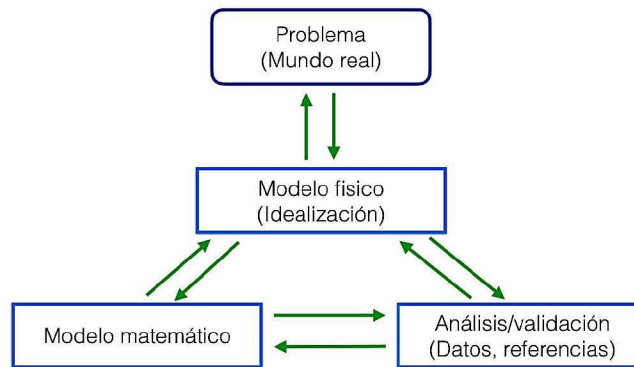


Figura 7. Modelación matemática (Adaptado de Yang, 2013).

Un modelo matemático es definido como un set de relaciones matemáticas que describen o simulan el comportamiento de un sistema (Dumas *et al.*, 2008). Ledger (2013) menciona que esta definición es útil en un sentido semántico, pero falla en distinguir entre modelos extremadamente útiles y aquellos totalmente inútiles; por ello, propone la siguiente definición:

“Un modelo matemático es un set de fórmulas y/o ecuaciones basadas en una descripción cuantitativa aproximada de un fenómeno real y creado con la intención de que el comportamiento predicho sea consistente con el comportamiento real sobre el cual se basó”.

La anterior definición enfatiza en la aplicación y utilidad de los modelos matemáticos, más allá de considerarlos únicamente como “construcciones matemáticas que describen un fenómeno real en el mundo físico” (McNamara, 2004). La aplicación y utilidad de los modelos matemáticos requiere enfocarse en la magnitud de su capacidad para replicar el fenómeno en el mundo real antes de aceptar las respuestas matemáticas como significativas (Ledder, 2013). Por lo tanto, el valor de un modelo matemático dependerá de las respuestas que otorga del sistema para el cual es aplicado (Figura 8); sin embargo, su utilidad también deriva de las preguntas que

pretende abordar, las cuales están directamente relacionadas con los objetivos para los cuales el modelo fue desarrollado. Algunos autores (McNamara 2004; Marion y Lawson 2008) señalan como objetivos para construir un modelo:

- I. La generación de conocimiento científico
 - A través de expresiones cuantitativas del conocimiento actual de un sistema.

- II. Probar el efecto de cambios en un sistema.
 - Responder preguntas como: ¿Qué pasaría si...?

- III. Auxiliar en la toma de decisiones.

- IV. Aplicaciones en la enseñanza y educación.
 - Demostrar a estudiantes como funcionan sistemas complejos.

El uso de técnicas de modelaje en ciencia y producción animal está basado en la premisa de que las complejas interacciones dentro y entre los elementos ambientales, digestivos y fisiológicos que influyen en desempeño productivo de los animales no pueden ser evaluados adecuadamente de forma cuantitativa y dinámica utilizando las aproximaciones tradicionales de investigación. La utilización de modelos matemáticos es compatible con el objetivo general de la investigación científica animal, el cual es: avanzar en la comprensión del metabolismo animal con el fin de explicar las variaciones cuantitativas en el desempeño productivo, y finalmente aplicar efectivamente este conocimiento en la solución de problemas de la producción animal.

De manera puntual, los modelos matemáticos han sido utilizados para mejorar el desempeño productivo de los animales (i.e. análisis de curvas de lactación, curvas de crecimiento, etc.), reducir los costos de producción (simulación de escenarios) y reducir la excreción de nutrimentos al disminuir la variación entre la estimación de los requerimientos nutricionales y la utilización real de nutrientes (Tedeschi *et al.*, 2005). McNamara (2004) señala que la utilización de modelos matemáticos a nivel de granja en bovinos lecheros en EUA ha permitido optimizar la formulación de raciones y

manejo nutricional, ahorrando cerca de 55 billones de dólares a lo largo de 30 años.

La representación matemática y la predicción de la función animal ha sido un trabajo en biología y una amplia gama de aproximaciones han sido propuestas. De manera puntual, los objetivos de la modelación animal pueden incluir: la descripción de observaciones pasadas, predicción de respuesta a diferentes estrategias de manejo y las explicaciones a mecanismos biológicos. Cada uno de estos objetivos requiere de una aproximación diferente (Tedeschi *et al.*, 2005). Modelos descriptivos y predictivos son usualmente estáticos y empíricos, teniendo generalmente utilidad a nivel práctico. Modelos explicativos o mecanísticos requieren una aproximación dinámica y son útiles a nivel de investigación y docencia.

Al utilizar modelos matemáticos es de utilidad identificar las categorías de clasificación de los mismos. La clasificación de modelos individuales dentro de las categorías permite conocer de manera inmediata algunos puntos esenciales de su estructura (Marion y Lawson, 2008). Una clasificación de los modelos matemáticos está basada en el tipo de respuesta que predice. Los modelos *determinísticos* ignoran la variación aleatoria, proporcionando siempre la misma solución a un serie dada de datos; por otro lado, los modelos pueden tener una naturaleza estadística, incorporar la aleatoriedad y predecir la distribución de los resultados, estos modelos son denominados *estocásticos* (Tedeschi *et al.*, 2005; Ugwa, 2012).

Los modelos también pueden ser clasificados en términos de su jerarquía organizacional como *empíricos* y *mecanísticos* (France y Kebreab, 2008). Los modelos empíricos están basados en la examinación de datos numéricos derivados de la observación o experimentación y no es indispensable una teoría biológica preconcebida (France y Kebreab, 2008; Ledder, 2013). La aproximación empírica consiste en examinar los datos y establecer la ecuación o sistema de ecuaciones que pueden ser usados como un modelo matemático (Nitu *et al.*, 2010).

Un modelo mecanístico está basado en supuestos acerca de los principios científicos

que determinan el fenómeno a ser modelado, ofreciendo una descripción acompañada de un entendimiento de su causalidad y estudiando los mecanismos subyacentes del sistema biológico dado (Tedeschi *et al.*, 2005). La aproximación de la modelación mecanística implica dividir el sistema en sus componentes clave, analizando el comportamiento del sistema en su totalidad en términos de sus componentes individuales y sus interacciones (France y Kebreab, 2008). Los dos métodos de clasificación mencionados anteriormente son complementarios (Figura 9).

Cuadro 8. Complementariedad de las clasificaciones de los modelos matemáticos (Adaptado de Marion y Lawson, 2008).

| | Empírico | Mecanístico |
|----------------|---|--|
| Determinístico | Predicción el crecimiento de corderos basados en la relación con el consumo de alimento | Movimiento planetario basado en mecánica newtoniana (ecuaciones diferenciales) |
| Estocástico | Análisis de varianza de los rendimientos lácteos con base a cierto manejo | Genética de poblaciones basado en herencia mendeliana (ecuaciones probabilísticas) |

4.3.2. Modelación de la curva de lactación

La modelación matemática y simulación han sido exitosamente utilizadas para establecer medidas en el mejoramiento productivo a nivel de granja. La descripción de la evolución temporal de la producción láctea en rumiantes domésticos es una de las aplicaciones más importantes de la modelación matemática en ciencia animal y representa un paso fundamental para alcanzar un conocimiento profundo de los procesos fisiológicos complejos que determinan la lactación. Además, estos modelos también son frecuentemente utilizados con propósitos técnicos, principalmente para

mejorar la toma de decisiones con relación a manejo y mejoramiento genético (Dimauro *et al.*, 2007).

Puntualmente, los modelos matemáticos que describen la curva de lactación han sido empleados como base para aplicar sistemas de análisis e interpretación de datos observacionales y experimentales (Choumei *et al.*, 2006), predicción y extrapolación de rendimientos en lactaciones futuras o incompletas (Tufarelli *et al.*, 2009), apoyo en el desarrollo de programas de mejoramiento genético (Olori *et al.*, 1999; Berry, Olori, *et al.*, 2007; Korkmaz *et al.*, 2011; León *et al.*, 2012), evaluación del efecto de modificaciones en el manejo nutricional (Tufarelli *et al.*, 2009; Nezamidoust *et al.*, 2013) y monitoreo sanitario (Cankaya *et al.*, 2011).

De manera general, el objetivo de la modelación de la curva de lactación es predecir los rendimientos para cada día con el mínimo error posible, con la finalidad de poder dilucidar el patrón de producción láctea subyacente en la presencia de variaciones locales asociadas al efecto del medio ambiente (Olori *et al.*, 1999). La utilidad de cualquier modelo de ajuste de la curva de lactación depende de su capacidad para mimetizar el proceso biológico de evolución de la producción láctea y de ajustar los factores que la afectan. Además, estos modelos pueden ser desarrollados para ajustar únicamente registros productivos de manera adecuada (modelos empíricos) o proveer un entendimiento biológico del proceso de lactación (modelos mecanísticos) (Dimauro *et al.*, 2007).

4.3.2.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos para el análisis del proceso de lactación son esencialmente diseñados para distinguir el componente determinístico del estocástico. El primer componente es caracterizado por un patrón continuo y regular, asociado con factores genéticos y ambientales del proceso de producción láctea; el segundo es peculiar para cada animal y por lo tanto impredecible (Dimauro *et al.*, 2007). Esta aproximación es la base para todos los modelos empíricos:

$$Y = f(t) + e \quad ()$$

En donde $f(t)$ es una función continua y diferenciable del tiempo (componente determinístico) y e es el error aleatorio (componente estocástico) (Steri, 2009). Diversos modelos empíricos han sido diseñados para el ajuste de la curva de lactación, los cuales pueden ser distinguidos por el tipo de análisis de regresión utilizado para la estimación de sus parámetros (lineal y no lineal), número de parámetros y su grado de relación con las principales características de la curva de lactación (pico de lactación, tiempo al pico de lactación y persistencia) (Dimauro *et al.*, 2007). En la presente revisión bibliográfica Y denota la producción láctea diaria, t representa el tiempo en días después del parto y a , b , c , d y w denotan los parámetros de cada modelo.

Modelos de Brody (1923)

El modelo desarrollado por Brody *et al.* (1923) es la primera aproximación para la modelación de la curva de lactación reportada en la literatura. Este modelo tiene la capacidad de generar únicamente curvas exponencialmente decrecientes, lo cual fue satisfactorio para estos autores ya que tenían como objetivo evaluar la fase de descenso de la producción láctea durante la lactación tardía. La estructura matemática de este modelo es la siguiente:

$$Y = a \exp(-ct) \quad (1)$$

En donde a representa un valor teórico de la producción láctea al momento del parto y c describe la fase de descenso de la producción láctea. Con la finalidad de incluir la fase inicial de la curva de lactación Brody, Turner y Raggsdale presentaron en 1924 una versión mejorada de su modelo. Este modelo incorporó una función de inclinación para contemplar la fase inicial de la curva de lactación en donde los rendimientos aumentan hasta el pico de producción:

$$Y = a \exp(-bt) - a \exp(-ct) \quad (2)$$

Este modelo expresa que el incremento de la producción láctea al pico de lactación toma lugar a una tasa de $\ln \frac{c}{b} / (c - b)$. Aunque esta modificación presentó una mejoría notable respecto al modelo inicial, posteriores investigadores señalan que el ajuste de este modelo en lactaciones de bovinos tiende a subestimar los rendimientos lácteos en la mitad de la lactación y sobrestimarlos al final de la misma.

Modelo de Sikka (1950)

Sikka propuso una función parabólica exponencial para el ajuste de la curva de lactación:

$$Y = ae^{(bt-ct^2)} \quad (3)$$

En donde el parámetro b representa la fase de ascenso hasta el pico de lactación y c indica la fase de descenso de la producción láctea (Steri, 2009). Este modelo provee de una curva en forma de campana incompleta, dando como resultado un patrón simétrico alrededor del pico de lactación, lo cual determina que ajuste de manera razonable rendimientos lácteos sólo durante la primera lactación (Lombaard, 2006).

Modelo de Wood (1967)

El modelo desarrollado por Wood es el más ampliamente conocido y aplicado para describir el proceso completo de lactación (Ruiz *et al.*, 2000; Vetharaniem *et al.*, 2003a; Macciotta *et al.*, 2011; Nezamidoust *et al.*, 2013) las razones pueden estar relacionadas con su sencilla estructura matemática, la interpretación biológica parcial de sus parámetros y su combinación para el cálculo de las características de la curva de lactación (pico de lactación, tiempo al pico de lactación y persistencia) (Dag *et al.*, 2006; Steri, 2009); además de la abundante información de sus estimaciones en

diversas especies, grupos genéticos y manejos facilita la comparación y discusión de las mismas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelo de Wood ajustando lactaciones en diversas especies, grupos genéticos y manejo.

| Especie/Raza | Manejo | Autor |
|---------------------|---------------|--------------------------------------|
| Ovinos | | |
| F1 | intensivo | Sakul and Boylan (1992) |
| Serdeña | extensivo | Cappio-Borlino <i>et al.</i> (1995) |
| Merino | intensivo | Groenewald <i>et al.</i> (1996) |
| Comisana | intensivo | Portolano <i>et al.</i> (1996) |
| Massese | extensivo | Franci <i>et al.</i> (1999) |
| Awassi | intensivo | Pollott y Gootwine (2000) |
| Varios ¹ | intensivo | Chang <i>et al.</i> (2001b) |
| Criolla | extensivo | Peralta-Lailson <i>et al.</i> (2005) |
| Awassi | extensivo | Dag <i>et al.</i> (2006) |
| Akkaraman | extensivo | Keskin y Dağ (2006) |
| Varios ² | extensivo | Bilgin <i>et al.</i> (2010) |
| F1 | orgánico | Angeles <i>et al.</i> (2013) |
| Makui | intensivo | Nezamidoust <i>et al.</i> (2013) |
| Caprinos | | |
| Verata | intensivo | Rota <i>et al.</i> (1993) |
| East African | extensivo | Wahome <i>et al.</i> (1994) |
| F1 | extensivo | Ruvuna <i>et al.</i> (1995) |
| Red Sokoto | extensivo | Akpa <i>et al.</i> (2001) |
| Murciano-Granadina | intensivo | Fernández <i>et al.</i> (2002) |
| Varios ³ | extensivo | Quinn <i>et al.</i> (2005) |
| Jonica | intensivo | Tufarelli <i>et al.</i> (2009) |
| Murciano-Granadina | intensivo | León <i>et al.</i> (2012) |
| Zaraibi | intensivo | Shaat (2014) |
| Bovinos | | |
| Holstein | intensivo | Wood (1967) |
| Angus | intensivo | Hohenboken <i>et al.</i> (1992) |
| Simmental | intensivo | Macciotta <i>et al.</i> (2005) |
| Frisona Navarra | intensivo | Varona <i>et al.</i> (1998) |
| Holstein-Friesian | intensivo | Olori <i>et al.</i> (1999) |
| Montbéliard | intensivo | Gołębiewski <i>et al.</i> (2011) |
| Holstein | intensivo | Choumei <i>et al.</i> (2006) |
| Holstein | intensivo | Grzesiak <i>et al.</i> (2006) |

| | | |
|----------------------------|-----------|----------------------------------|
| Varios ⁴ | intensivo | Quinn <i>et al.</i> (2005) |
| White Fulani | extensivo | Fadlemoula <i>et al.</i> (2007) |
| Jersey | extensivo | Cankaya <i>et al.</i> (2011) |
| Simmental | extensivo | Korkmaz <i>et al.</i> (2011) |
| Ciervo rojo | extensivo | Landete-Castillejos (2000) |
| Búfalo | | |
| Italiano | extensivo | Catillo <i>et al.</i> (2002) |
| Italiano | extensivo | Dimauro <i>et al.</i> (2005) |
| Egipcio | intensivo | Aziz <i>et al.</i> (2006) |
| Equino | | |
| Lusitano | extensivo | Santos y Silvestre (2008) |
| IHDH ⁵ | extensivo | Centoducati <i>et al.</i> (2012) |
| Conejo | | |
| Nueva Zelanda | intensivo | Casado <i>et al.</i> (2006) |
| Conejillo de indias | | |
| Inglés | intensivo | Anderson <i>et al.</i> (1984) |
| Cerdo | intensivo | Hansen <i>et al.</i> (2012) |

¹Dorset, Romanov, Targhee, Rideau Arcott, Polypay, Booroola Merino, Suffolk, Rambouillet, Finnsheep y East Friesian; ²Awassi, Morkaraman y Tushin; ³Holstein, Normande y Montebeliarde; ⁴Alpina, Damascus y Murciana; ⁵IHDH: Italian Heavy Draft horse

El modelo de Wood es una función multiplicativa constituida por dos principales componentes que regulan el aumento y descenso de la producción láctea:

$$Y = at^b e^{-ct} \quad (4)$$

La partición de la ecuación propuesta por Wood en sus componentes evidencia la relación directa de sus parámetros con las principales características de la curva de lactación (Figura 11). El parámetro a representa la producción láctea al $t = 0$; b controla la tasa de incremento de la producción láctea hasta el pico de lactación; finalmente c , expresa la tasa de descenso de la producción después del pico de lactación (Wood 1967; Macciotta *et al.* 2011).

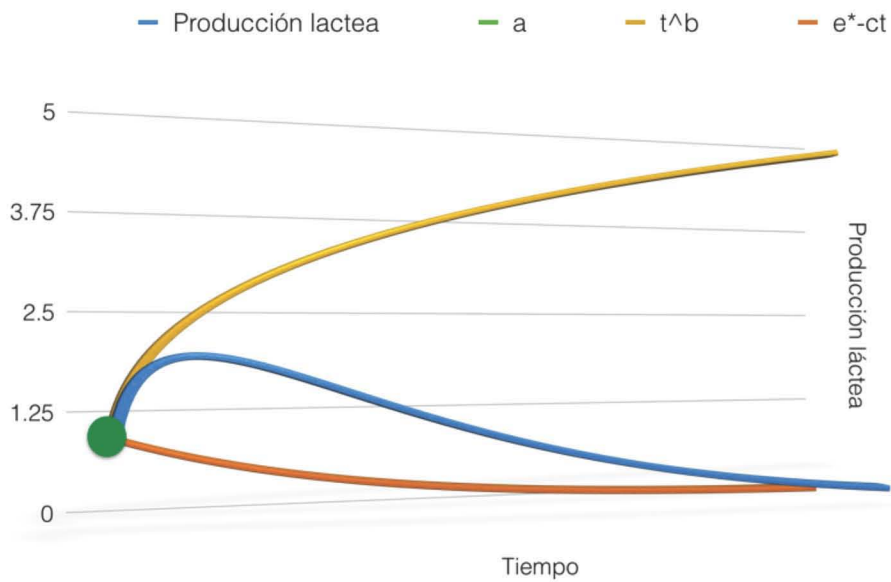


Figura 9. Descomposición del modelo de Wood (1967).

Los parámetros del modelo de Wood pueden ser relacionados matemáticamente para calcular algunas de las características de la lactación:

Tiempo al pico de lactación (TLP)

$$TLP = b/c \quad (5)$$

Pico de lactación (PL)

$$PL = a(b/c)^b e^{-b} \quad (6)$$

Persistencia (Per)

$$Per = -(b + 1) \ln(c) + \Gamma(b + 1) \quad (7)$$

Aunque se reconoce que el modelo de Wood provee un ajuste aceptable de la curva de lactación en diversas especies, algunos autores señalan diferencias en el grado de ajuste con relación a la forma de la curva de lactación. Shanks *et al.* (1981) refiere que el modelo de Wood tuvo un ajuste superior en curvas típicas en comparación con curvas atípicas (sin pico de lactación); de la misma forma los hallazgos de Silvestre *et al.* (2009) ilustran que el modelo de Wood no tiene la misma eficiencia en el ajuste de las diferentes formas de la curva de lactación. En ovejas el modelo de Wood ha sido

ampliamente utilizado en diversos grupos genéticos (Cuadro 2) con la presentación de un 30 a 50 % de curvas atípicas (Macciotta et al. 2004).

Cuadro 2. Parámetros del modelo de Wood estimados de lactaciones en distintos grupos genéticos ovinos.

| Grupo genético | a | b | c | Autor |
|-----------------------|----------|----------|----------|-------------------------------------|
| Serdeña | 1.05 | 0.19 | 0.041 | Cappio-Borlino <i>et al.</i> 1(989) |
| Comisana | | | | |
| <i>Parto simple</i> | 1.082 | 0.17 | 0.01 | Portolano <i>et al.</i> (1997) |
| <i>Parto doble</i> | 1.146 | 0.19 | 0.01 | |
| Awassi | 1.98 | 0.24 | 0.009 | Pollott y Gootwine (2000) |
| Awassi | 0.442 | 0.36 | 0.014 | Dag <i>et al.</i> (2006) |
| Akkaraman | 0.508 | 0.253 | 0.014 | Keskin y Dağ (2006) |
| Massese ¹ | | | | |
| <i>T1</i> | 0.34 | 0.31 | -0.01 | |
| <i>T2</i> | 0.48 | 0.24 | -0.01 | Steri (2009) |
| <i>T3</i> | 0.31 | 0.31 | -0.007 | |
| <i>T4</i> | 0.52 | 0.22 | -0.008 | |
| Awassi | 1.04 | 0.398 | 0.111 | |
| Morkaraman | 0.46 | 0.768 | 0.142 | Bilgin <i>et al.</i> 2010) |
| Tushin | 0.98 | 0.065 | 0.064 | |
| F1 | 0.979 | 0.071 | 0.009 | Angeles <i>et al.</i> (2013) |

¹Tipo de lactación: T1=lactación corta en otoño; T2= lactación corta en invierno-primavera; T3=lactación larga en otoño; T4: lactación larga en invierno-otoño.

Se reconoce que el modelo de Wood puede ajustar cuatro diferentes formas de la curva de lactación (Macciotta *et al.*, 2005; Silvestre *et al.*, 2009), dependiendo de los signos de los parámetros *b* y *c*; el parámetro *a* siempre es positivo. El tipo C1 ($b > 0$, $c < 0$) representa la forma estándar de la curva de lactación y la combinación de $b > 0$ y $c > 0$ representa una curva con un incremento continuo de la producción láctea (C2), mientras que la solución $b < 0$ y $c < 0$ describe con curva continuamente decreciente o también llamada *curva atípica* (C3) (Macciotta et al. 2011). Finalmente el tipo C4 corresponde a una forma reversa con una fase inicial de descenso de la producción láctea seguida de un incremento de la misma.

Aunque el modelo de Wood permite el ajuste de diversas formas de la curva de lactación mediante la combinación de los signos de sus parámetros (b y c), estos parámetros estimados a partir de curvas atípicas se sitúan fuera del rango de significancia biológica. Por ejemplo, el ajuste de una curva atípica utilizando el modelo de Wood resulta en un valor negativo del parámetro b , lo cual implica que el pico de lactación ocurrió antes del parto, además de representar dificultades para el cálculo del pico de lactación, tiempo al pico de lactación y persistencia (Cuadro 3) mediante las formulas propuestas por Wood (1967). Macciotta *et al.* (2004) sugieren imponer un valor mayor que cero para el parámetro b al momento de realizar el procedimiento iterativo de regresión lineal para la estimación del los parámetros del modelo de Wood.

Cuadro 3. Características de la curva de lactación en ovinos calculadas utilizando el modelo de Wood.

| Grupo genético | PL | TPL | Per | Autor |
|-----------------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------------------|
| Serdeña | 1.16 | 32.4 | 6.54 | Cappio-Borlino <i>et al.</i> (1989) |
| Comisana | | | | |
| <i>Parto simple</i> | 1.41 | 15.3 | 5.46 | Portolano <i>et al.</i> (1997) |
| <i>Parto doble</i> | 1.49 | 13.4 | 5.39 | |
| Awassi | 3.44 | 27 | 12.7 | Pollott y Gootwine (2000) |
| Awassi | 0.99 | 25.3 | 5.81 ^a | Dag <i>et al.</i> (2006) |
| Akkaraman | 0.78 | 35.3 | 5.34 | Keskin y Dağ (2006) |
| Massese ¹ | | | | |
| T1 | 0.72 | 31.1 | 6.04 ^a | |
| T2 | 0.82 | 25.5 | 5.78 ^a | Steri (2009) |
| T3 | 0.73 | 43.7 | 6.48 ^a | |
| T4 | 0.87 | 27.9 | 5.91 ^a | |
| Awassi | 1.16 | 34.5 | 3.07 | |
| Morkaraman | 0.77 | 39.9 | 3.45 | Bilgin <i>et al.</i> (2010) |
| Tushin | 0.82 | 36.6 | 0.47 | |
| F1 | 0.65 | 37 | 5.04 ^a | Angeles <i>et al.</i> (2013) |

¹Tipo de lactación: T1=lactación corta en otoño; T2= lactación corta en invierno-primavera; T3=lactación larga en otoño; T4: lactación larga en invierno-otoño; PL= pico de lactación; TPL= tiempo al pico de

lactación; Per= persistencia; ^aPersistencia calculada utilizando los parámetros reportados por los autores mediante la fórmula $Per = -(b + 1) \ln(c)$.

Otras limitaciones del modelo de Wood incluyen la subestimación de la producción láctea alrededor del pico de lactación, sobrestimación de los rendimientos en la primera parte de la curva de lactación y una elevada correlación entre sus parámetros (r^2 entre 0.70 -0.90)(Macciotta *et al.*, 2011). Además, otra de las mayores críticas al modelo de Wood es que al tiempo cero (momento del parto) la producción láctea es también cero, lo cual es biológicamente incorrecto. Sin embargo, Bebbington *et al.* (2009) aminora esta crítica al señalar que al inicio de la lactación la hembra produce calostro, el cual no tiene un valor económico, además el animal no entra inmediatamente a la línea de ordeño después del parto, por lo cual fijar la producción a cero al $t=0$ no es un problema significativo que determine la funcionalidad de modelo de Wood.

Modelo de Wilmink (1987)

El modelo de Wilmink consiste en tres términos que se combinan aditivamente con la finalidad de mejorar su flexibilidad, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$Y = a + be^{kt} + ct \quad (8)$$

En donde a se interpreta como el nivel de la producción inicial, b controla la tasa de variación de la producción en la primera fase de la lactación, c está relacionada con la tasa de descenso de la producción láctea en la segunda parte de la lactación (Lombaard, 2006). El parámetro k generalmente se establece como un valor fijo y está relacionado con el día al pico de lactación (León *et al.* 2012); este parámetro puede ser estimado para cada experimento a partir del modelo en su forma original utilizando regresión no lineal (Steri, 2009).

Cuadro 4. Formas teóricas de la curva de lactación que pueden ser ajustadas por el modelo de Wilmink (Macciotta *et al.* 2005).

| Parámetro | | Forma de la curva |
|-----------|----------|-------------------------------------|
| <i>b</i> | <i>c</i> | |
| - | - | Curva estándar |
| + | - | Continuamente decreciente (atípica) |
| + | + | Reversa estándar |
| - | + | Continuamente creciente |

El parámetro *a* siempre es mayor que 0.

Similar a lo que ocurre con el modelo de Wood (1967), el modelo desarrollado por Wilmink puede ajustar cuatro diferentes formas de la curva de lactación a través de la combinación de los signos de sus parámetros (*b* y *c*) (Cuadro 4). Este modelo ha demostrado un ajuste adecuado en lactaciones de bovinos (Olori *et al.*, 1999; Macciotta *et al.*, 2005; Steri, 2009; Cankaya *et al.*, 2011), ovinos (Steri, 2009; Bilgin *et al.*, 2010; Angeles-Hernandez *et al.*, 2013), caprinos (León *et al.*, 2012) y búfalos (Dimauro *et al.*, 2005). Olori *et al.* (1999) compararon esta función con otros modelos empíricos (ejem. Wood, 1967), señalando que es el mejor modelo con tres parámetros para predecir rendimientos lácteos, además esta función presentó los residuales de menor dimensión y menos correlacionados.

Modelo de Dhanoa (1981)

Este autor propone una modificación del modelo de Wood (1967) con el objetivo de reducir la correlación entre sus parámetros. Una elevada correlación entre los parámetros de un modelo puede determinar una lenta convergencia en los procesos iterativos de estimación. Dhanoa (1981) planteó la siguiente ecuación:

$$Y = at^{mc} \exp(-cm) \quad (9)$$

En donde el parámetro *m* representa el tiempo al que se alcanza el pico de lactación. El ajuste de este modelo en lactaciones de vacas Holstein resultó en un menor grado de correlación entre los parámetros *b* y *c* ($r^2 = 0.64$) en comparación con el valor

observado en el modelo de Wood ($r^2 = 0.91$) (Dhanao, 1981).

Modelo de Cappio-Borlino (1995)

Este modelo es una modificación del modelo de Wood (1967) desarrollado con la finalidad de mejorar su ajuste en la primera parte de la lactación, adecuación especialmente útil en lactaciones de ovejas, las cuales pueden presentar valores negativos del parámetro b , originando un patrón exponencial decreciente de la curva de lactación. Los valores negativos del parámetro b están asociados a una caída abrupta de los rendimientos lácteos después del pico de lactación o a la falta de registros de lactación durante las primeras 4 o 5 semanas post-parto (Cappio-Borlino *et al.*, 1995). Este modelo presenta la siguiente estructura matemática:

$$Y = at^{b \exp(-ct)} \quad (10)$$

Esta estructura matemática ha sido utilizada para ajustar lactaciones de ovejas de la raza Serdeña (Cappio-Borlino *et al.*, 1995) mostrando ser más flexible que el modelo de Wood (1967) y útil para resolver el problema de estimación durante la primera fase de la lactación debido al número reducido de registros productivos. Sin embargo, este modelo manifestó menor grado de ajuste en comparación con el modelo de Wood (1967) al analizar lactaciones de ovejas de la raza Massese (Franci *et al.*, 1999).

Modelo de Prasad (2003)

Este modelo cuenta con una estructura aditiva con cuatro parámetros a estimar, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$Y = a + bt + ct^2 + \frac{d}{t} \quad (11)$$

Este modelo fue utilizado para ajustar lactaciones en bovinos y búfalos. Su grado de ajuste fue comparado con otros cuatro modelos empíricos en donde el modelo mostró valores superiores de coeficientes de correlación e inferiores de cuadrado medio del

error de predicción (CMEP) y coeficiente de información Akaike (AIC) (Prasad, 2003).

Modelo de Grossman y Koops (2003)

Una limitación de algunos modelos empíricos estriba en su poca flexibilidad para ajustar curvas de lactación con diferentes patrones (ejem. curvas típicas y atípicas) o lactaciones extendidas (Ruiz *et al.*, 2000; Macciotta *et al.*, 2005). Grossman y Koops (2003) propusieron una aproximación en la cual dividieron la lactación en cuatro fases, representadas cada una por un componente independiente, otorgándole así mayor flexibilidad a su función matemática (Figura 10). El modelo describe un incremento logístico de la producción láctea en función del tiempo en una primera fase, asociado al aumento del número de CEM y su actividad secretora. Las fases de descenso se describen en tres funciones logísticas decrecientes en función del tiempo, asociadas con la disminución en el número de CEM debido a la apoptosis, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{a_1}{1 + e^{-(t-c_1)/b_1}} - \frac{p_2 a_1}{1 + (0.5e^{-(t-c_{max2})/b_2})^2} - \frac{p_3 a_1}{1 + e^{-(t-c_3)/b_3}} - \frac{p_4 a_1}{1 + (0.5e^{-(t-c_{max4})/b_4})^2} \quad (12)$$

En donde a_1 es el nivel mas alto para el incremento de la fase uno y p_2 , p_3 y p_4 son proporciones de a_1 para las fases de decremento dos, tres y cuatro, respectivamente; b_1 , b_2 , b_3 y b_4 representan la duración proporcional de cada una de las cuatro fases del modelo y c_1 , c_2 , c_3 y c_4 representan el tiempo en el cual se presenta el máximo incremento o decremento (Grossman y Koops, 2003).

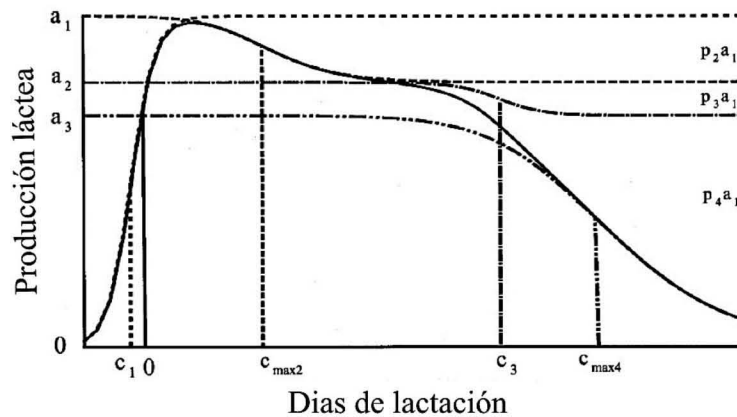


Figura 10. Representación de una curva típica de lactación a través del modelo desarrollado por Grossman y Koops (2003).

4.3.2.2. Modelos mecanísticos

Un modelo mecanístico se define como aquel que analiza el proceso biológico subyacente para la predicción de resultados (Vetharanim *et al.*, 2003); dichos modelos son desarrollados con la intención de traducir algunas hipótesis acerca de los procesos biológicos y bioquímicos que regulan la lactación en términos matemáticos (Dimauro *et al.*, 2007). Mientras que los modelos empíricos proveen un adecuado ajuste de los datos, los modelos mecanísticos estiman parámetros con una interpretación biológica; además, tienen la habilidad de analizar los factores que influyen en la producción láctea durante el curso de la lactación (Pollott, 2000b).

El detalle y nivel de representación de la lactación en los modelos mecanísticos varían ampliamente; sin embargo, todos representan los mecanismos de lactación a través de una serie de ecuaciones diferenciales que simulan los procesos biológicos fundamentales involucrados en la secreción y expulsión de leche (Dimauro *et al.*, 2007). Estos modelos pueden ser divididos en la siguientes categorías: modelos lineales, los cuales pueden ser resueltos analíticamente (ejem. Neal y Thornley, 1983), y modelos no lineales, que necesitan métodos de aproximación numérica para su resolución (ejem. Vetharanim *et al.*, 2003).

En la construcción de un modelo mecanístico para el ajuste de curvas de lactación hay un punto común inicial en el cual se asume que la leche producida (Y) por la glándula mamaria al tiempo t es directamente proporcional al número de células secretoras activas (nC) y la eficiencia de síntesis de cada célula (h):

$$Y = h nC \quad (13)$$

Una vez que la base del modelo es construida, el sistema puede ser ampliado para considerar otros procesos biológicos relacionados y factores externos. Por lo tanto, se inicia a partir de un sistema simplificado para progresivamente hacerlo más complicado añadiendo diversos sub-modelos que son conectados por mecanismos regulatorios (Steri, 2009).

Modelo de Neal y Thornley (1983)

Neal y Thornley (1983) desarrollaron la primera aproximación mecanística de ajuste de curva de lactación en bovinos lecheros, la cual está basada en la representación multi-compartamental de la glándula mamaria (Steri, 2009). En este modelo la glándula mamaria es representada por compartimentos de células no-diferenciadas (Cu), células diferenciadas (Cs) producidas por la división celular de Cu y el compartimiento C que representa los alvéoloalvéolos, ductos y cisterna glandular que contienen la leche producida (M).

El número de células secretoras Cs se incrementa por la diferenciación celular a una tasa V que depende del nivel de una hormona genérica H y disminuye debido a la muerte celular. En mamíferos el inicio de la lactación es causado por cambios en la concentración hormonal alrededor del parto. En bovinos diversas hormonas están involucradas y su concentración sanguínea disminuye conforme la lactación avanza. Por lo tanto, en este modelo se asume que el nivel de la hormona H presenta variaciones con respecto al tiempo con un comportamiento exponencial de acuerdo con

la siguiente relación:

$$H = H_0 e^{-k_H t} \quad (14)$$

En donde H_0 representa un pulso simple de la hormona H que es producido al tiempo $t = 0$; k es la tasa a la cual la concentración de la hormona H disminuye. Neal y Thornley (1983) asumen que la tasa de disminución de la concentración de la hormona H (k_H) es de 0.01 por día con una vida media promedio de 70 días. La muerte de células mamarias varia a una tasa L_s la cual depende de una tasa específica k_s y de la leche presente en el compartimiento C (Figura 11). Factores físicos (ejem. compresión alveolar) y bioquímicos (ejem. factor inhibidor de la lactación) determinan que la estasis de leche dentro de los compartimentos glandulares genere una disminución en la síntesis de leche e involución de la glándula mamaria (Rezaei *et al.*, 2016). Este modelo considera que es importante calcular la secreción láctea bajo condiciones en donde la retención de leche no sea un factor que deprima los rendimientos lácteos; por lo cual toma el valor más alto para la función de ordeño $r_c = 40$ kg/día.

Este modelo incorporó los conocimientos disponibles acerca de la fisiología de la producción láctea en la glándula mamaria dentro de un simple esquema cuantitativo, el cual es capaz de poder predecir adecuadamente la producción láctea a través del tiempo. Algunos de los parámetros de este modelo podrían tener una carácter genético (ejem. k_H) y podrían ser manipulados a través de programas de selección, mientras que otros parámetros son determinados por cuestiones de manejo (ejem. r_c). Sin embargo, este modelo presenta diversas deficiencias con relación a algunas aseveraciones planteadas; por ejemplo, asume una disminución a una tasa constante de la hormona H , lo cual contrasta con el elegante control hormonal que rige el proceso de lactación, el cual no solo está determinado por la concentración hormonal, sino además por el número y afinidad de sus receptores (Rezaei *et al.*, 2016).

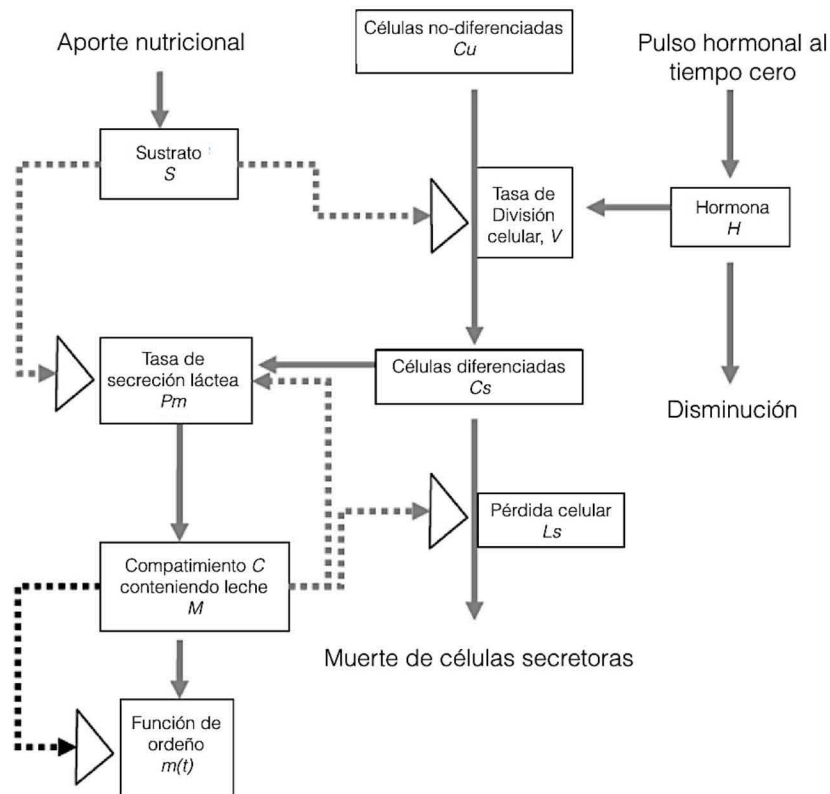


Figura 11. Representación gráfica de la aproximación compartamental de la glándula mamaria desarrollada por Neal y Thorney (1983).

Modelo de Dijkstra (1997)

Este modelo mecánico propone que los rendimientos lácteos pueden ser representados por una simple ecuación que describe los patrones de crecimiento y proliferación de las células epiteliales secretoras (CES) mamarias durante la gestación y lactación. Dijkstra *et al.* (1997) enuncian que los parámetros de este modelo poseen una interpretación biológica directa, otorgando mediciones simples de proliferación y muerte celular. La ecuación desarrollada por estos autores considera la relación entre el tamaño de la glándula mamaria o número de células secretoras y la producción láctea (Dijkstra *et al.*, 2010).

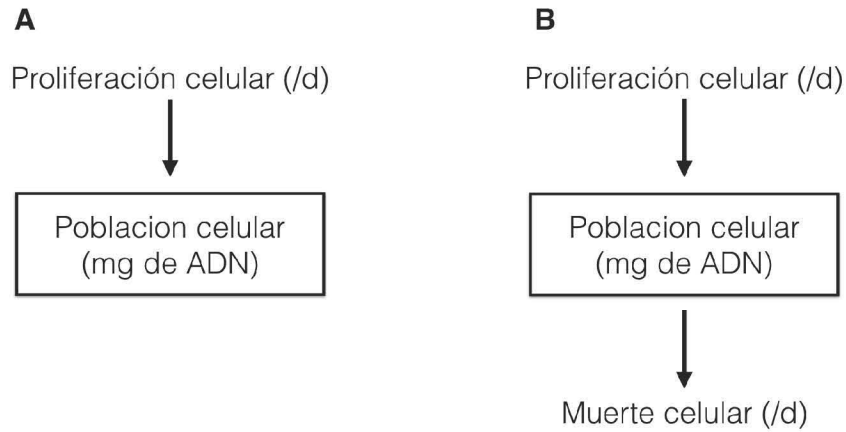


Figura 12. Representación esquemática de los patrones de crecimiento de la glándula mamaria durante la gestación (A) y la lactación (B)(Adaptado de Dijkstra *et al.*, 1997).

El modelo desarrollado por Dijkstra *et al.* (1997) comprende una población simple, un influjo y un eflujo (Figura 12). La población simple son las células secretoras del tejido mamario (N; miligramos), representado por la acumulación de ADN durante la gestación y subsecuente lactación; los flujos son la proliferación y muerte celular. La dinámica de proliferación celular que determina la producción láctea es definida mediante la siguiente ecuación:

$$Y = M_0 \exp \{ \mu [1 - \exp(-kt)] / k - \lambda t \} \quad (15)$$

En donde Y es la producción láctea al día t ; M_0 representa la producción láctea teórica inicial al momento del parto ($t = 0$); μ y λ son definidas como la tasa específica de proliferación de las células secretoras mamarias al parto y muerte celular, respectivamente. Finalmente, k es el parámetro asociado con la reducción en la capacidad de proliferación celular con respecto al tiempo. Mediante la utilización de este modelo pueden ser calculadas algunas de las principales características de la curva de lactación:

Pico de lactación (PL)

$$PL = M_0 (\lambda/\mu)^{\lambda/k} \exp [(\mu - \lambda)/k] \quad (16)$$

Tiempo al pico de lactación (TPL):

$$TPL = [\ln(\mu/\lambda)]/k \quad (17)$$

Producción láctea total (PLT):

$$PLT = M_0 \int_0^{t_f} \exp \{ \mu [1 - \exp(-kt)]/k - \lambda t \} dt \quad (18)$$

En donde t_f es la duración de la lactación en días. El modelo de Dijkstra *et al.* (1997) fue desarrollado originalmente para el ajuste de curvas de lactación en bovinos lecheros y ha sido utilizada para evaluar el efecto de factores como el número de parto y sistema de producción sobre la producción láctea (Val-Arreola *et al.*, 2006). Val Arreola y colaboradores evaluaron además la capacidad de ajuste de esta función con respecto a otros modelos empíricos (Wood, 1967) y mecanísticos (Pollott, 2000), concluyendo que la función desarrollada por Dijkstra es una opción viable para ser aplicada en diferentes sistemas de producción, además de permitir calcular fácilmente la producción láctea total al final de la lactación. En ovejas este modelo también fue comparado con el modelo de Wood (1967) observándose ajustes similares de la curva de lactación para ambos modelos matemáticos (Dijkstra *et al.*, 2010).

Modelo de Pollott (2000)

Discernir que la disminución gradual de la producción láctea después del pico de lactación está asociada con la reducción en el número de células secretoras debido al proceso de apoptosis fue un paso fundamental para comprender la dinámica celular de la glándula mamaria y los factores que la afectan. La involución gradual de la glándula mamaria se inicia en la lactación temprana, lo cual produce una lenta disminución de la producción láctea característica de la curva de lactación (Zobel *et al.* 2015). La dimensión de pérdida de células mamarias secretoras durante la involución es un factor importante para determinar la producción láctea en lactaciones en curso y subsecuentes (Wilde *et al.*, 1997).

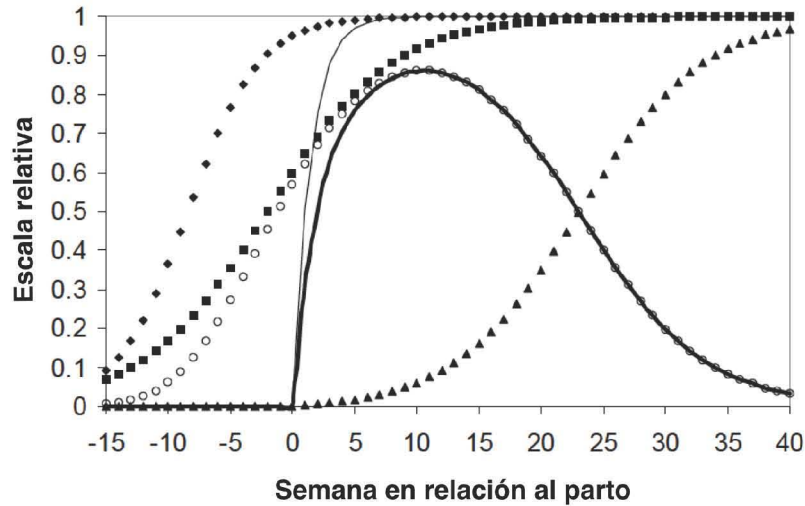


Figura 13. Representación esquemática de biología de la glándula mamaria durante la gestación y 40 semanas de lactación (Pollott, 2000b). ◆ producción de células parenquimatosas; ■ diferenciación de células secretoras; muerte celular debido a apoptosis; ○ células potencialmente activas; — tasa de secreción; — producción láctea.

El modelo de Pollott (2000) basa su aproximación mecanística de la curva de lactación en los hallazgos de Wilde *et al.* (1997) y Knight *et al.* (1998) en relación con los cambios en la dinámica celular de la glándula mamaria durante la gestación, lactación e involución y sus efectos sobre la producción láctea. El modelo de Pollott (2000) considera tres procesos principales en la dinámica de la glándula mamaria: i) proliferación celular del parénquima mamario; ii) diferenciación de células parenquimatosas a celular secretoras; y iii) reducción del número de células secretoras como resultado de la muerte celular programada (apoptosis)(Pollott 2000).

De acuerdo con Pollott (2000) la producción láctea (Y) a un tiempo determinado (t) se describe de la siguiente manera:

$$Y_t = (NDPC - NDCD) S_{Yt} \quad (19)$$

En donde $NDPC$ es el número de células parenquimatosas diferenciadas producidas al día t , $NDCD$ es el número de parenquimatosas secas debido a apoptosis al día t y S_{Yt} es la tasa de secreción láctea por célula al día t (kg/célula/día). $NCPC$ y $NDCD$ toman

la forma de curvas logísticas respecto al tiempo; por lo tanto es posible la descripción de la lactación en un animal a través de las dos curvas logísticas y una función para la tasa de secreción láctea (Figura 13). La curva logística de *NDCP* puede ser descrita a través de la siguiente función (Freund y Littell, 1991):

$$NDPC = N / (1 + \frac{1-P_0}{P_0} e^{-Gt}) \quad (20)$$

En donde *N* es el número total de células parenquimatosas las cuales se vuelven activas durante la lactación temprana; *P₀* es la proporción de *N* presentes al inicio de la lactación; *G* es la tasa de crecimiento relativo en el número de células activas ($0 < G < 1$); *t* día de lactación. En el mismo contexto de aproximación matemática el declive del número de células secretoras (*NDCD*) puede representarse de la siguiente manera:

$$NDCD = L / (1 + \frac{1-Q_0}{Q_0} e^{-Dt}) \quad (21)$$

El tercer componente que contempla el modelo es la tasa de secreción láctea (*S*). El modelo de Pollott (2000) asume, con base a la escasa información disponible, que la tasa de secreción es cero al momento del parto y que se incrementa rápidamente hasta alcanzar un plateau durante el transcurso de la lactación; este patrón puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$S = S_a [1 - \exp(-S_b t)] \quad (22)$$

En donde *S_a* es la máxima secreción por célula (kg/célula/día) y *S_b* es la tasa relativa de cambio de la tasa de secreción al tiempo *t*. Pollott (2000) señala que bajo condiciones de granjas comerciales es imposible separar los parámetros *S_a*, *N* y *L* usando los datos disponibles comúnmente. El modelo puede redefinirse combinando *S_a* con ambos *NDCD* (MPC, curva de producción láctea) y *NDCD* (PLC, curva de pérdida de producción) resultado en $Y_t = (MPL - PLC) S$:

$$Y_t = \left\{ \left[MS/1 + \frac{1-P_0}{P_0} e^{-Gt} \right] - \left[ML/1 + \frac{1-Q_0}{Q_0} e^{-Dt} \right] \right\} [1 - \exp(-S_b t)] \quad (23)$$

En donde Y_t es la producción láctea al tiempo t ; MS es el potencial máximo de secreción láctea; P_0 es la proporción del máximo número de células secretoras presentes al inicio de la lactación; G es la tasa relativa de incremento de la diferenciación celular; ML es la máxima pérdida de secreción; Q_0 es la proporción de células diferenciadas que han muerto al inicio de la lactación; D es la tasa relativa de disminución en el número de células secretoras; finalmente S_b representa la tasa de secreción. Este es el modelo original que comprende siete parámetros; sin embargo, versiones reducidas de este modelo han sido utilizadas en diversas especies (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros de distintas versiones simplificadas del modelo de Pollott (2000) ajustado a lactaciones de ovinos y bovinos.

| Especie | Num | MS | P₀ | G | ML | Q₀ | D | Autor |
|---------------------|------------|-------------------|----------------------|----------|-------------------|----------------------|----------|------------------------------------|
| Ovino | | | | | | | | |
| Awassi | 6 | 3.75 ^a | 0.0831 | 0.11 | 3.61 ^a | 0.083 | 0.017 | Pollott y Gootwine (2000) |
| Awassi | 3 | 3.9 ^a | | 0.067 | | | 0.02 | Pollott y Gootwine (2004) |
| Assaf | 3 | 2.9 ^a | | 0.027 | | | 0.015 | |
| | 2 | 2.76 ^a | | | | | 0.003 | |
| Lacaune | 3 | 2.76 ^a | | | | 0.95 | -0.02 | Elvira <i>et al.</i> (2013a) |
| | 6 | 3.8 ^a | 0.67 | 0.07 | 3.96 ^a | 0.16 | 0.014 | |
| Lacaune | 6 | 3.48 ^a | 0.53 | 0.28 | 3.15 ^a | 0.1 | 0.03 | Elvira <i>et al.</i> (2013b) |
| Bovino | | | | | | | | |
| Holstein | 2 | 30.1 ^b | | | | | 0.001 | Albarrán-Portillo y Pollott (2008) |
| Holstein | 2 | 35.6 ^b | | | | | 0.001 | Albarrán-Portillo y Pollott (2000) |
| NR | 2 | 36 ^b | | | | | 0.0014 | Albarrán-Portillo y Pollott (2011) |
| Varios ¹ | 5 | 30.74 | 0.44 | 1.05 | | 0.36 | 0.004 | Noronha <i>et al.</i> (2010) |

| | | | | | | | |
|-----------------|---|------|------|-------|------|-------|-------------------------------------|
| NR ² | 5 | 30.7 | 0.77 | 0.02 | 0.34 | 0.005 | Val-Arreola <i>et al.</i> (2004) |
| NR ³ | 5 | 31.9 | 0.74 | 0.004 | 0.23 | 0.004 | |

Num, número de parámetros; ^aparámetro expresado en litros; ^bparámetro expresado en kilogramos; ¹cruza de Holstein x Zebu y Holstein puras; ²hatos lecheros a pequeña escala; ³ hatos lecheros intensivos; NR, no reportado.

La ecuación 23 representa la versión aditiva del modelo de Pollott (2000); una versión multiplicativa también fue desarrollada mostrando el mejor grado de ajuste (ecuación 24), al compararse con otras nueve funciones matemáticas, cuando se analizaron registros semanales de producción láctea en ovejas (Pollott y Gootwine 2000).

$$Y_t = \left\{ \left[\frac{MS}{1 + \frac{1-P_0}{P_0} e^{-Gt}} \right] \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1-Q_0}{Q_0} e^{-Dt}} \right] \right\} [1 - \exp(-S_b t)] \quad (24)$$

Adecuaciones a este modelo podrían realizarse en relación al número de células secretoras en cada etapa de la curva de lactación. El modelo desarrollado por Pollott (2000) se basa en la dinámica celular propuesta por Knight y Wilde (1993) y Knight *et al.* (1998) en donde el número de células secretoras y su eficiencia secretora son estimados a través de la cantidad total de ADN y de la relación ARN/ADN, respectivamente. Una desventaja de la utilización de ADN como un índice de las células secretoras es que proporciona la medición de todas las células de la glándula mamaria, incluyendo estroma y células epiteliales. Nuevas aproximaciones como las desarrolladas por Castañares *et al.* (2013), basadas en la morfometría de las células mamarias, podrían ser útiles para mejorar la habilidad de los modelos mecanísticos de predecir la relación entre el número de células epiteliales en cada etapa de la curva de lactación y la producción láctea.

Modelo de Vetharanim (2003)

El modelo de Vetharanim *et al.* (2003) surge con el objetivo de desarrollar una ecuación mecanística que contemple factores biológicos adicionales que afectan la

producción láctea, además de la dinámica celular. Vetheraniam y colaboradores señalan que los modelos propuestos por Neal y Thornley (1983) y Dijkstra *et al.* (1997) pueden ser mejorados en distintos aspectos; primeramente, estos últimos dos modelos consideran que existe una sola población de células secretoras, lo cual contrasta con los hallazgos de Molenaar *et al.* (1992) señalando que, con base al análisis de la expresión genética de α -lactoalbúmina, α -S1-caseína y lactoferrina en bovinos y ovinos, existen importantes variaciones en el nivel de actividad de las células secretoras en la glándula mamaria, definiendo dos estados principales de la población secretora: activa (secretora) y quiescente (distendida).

Mientras que el número de alvéoloalvéolos activos (y por consiguiente el número de células secretoras activas) tienen un impacto preponderante en la producción láctea, la nutrición asume también una fuerte influencia mediadora, por lo cual señalan la necesidad de contemplarla en el desarrollo del modelo mecanístico de ajuste de lactación. Vetharanim *et al.* (2003) expresaron la producción láctea en términos de energía contenida en la leche (i.e. MJ/día). El número de alvéolos activos es denotado por A , el número de alvéolos quiescentes por Q , y S representa la tasa máxima de secreción láctea-energía de los alvéolos activos. Por lo tanto, la tasa máxima de secreción láctea (P) de la glándula mamaria es:

$$P = SA \quad (25)$$

La dinámica alveolar se expresa gráficamente en la figura 11; los alvéolos pueden pasar de una población a otra (progenitora, activa, quiescente y senescente) dependiendo de los factores que el modelo contempla (expulsión de leche, energía/nutrición y hormonas) a una tasa específica (r_{pa} , r_{qa} , r_{aq} y r_{qs}). Aunque los alvéolos quiescentes no son secretores, ellos tienen el potencial de volverse activos y por lo tanto almacenan una capacidad secretora latente. La senescencia de las células quiescentes reduce la capacidad secretora de la glándula mamaria; lo cual determina que a una mayor tasa de senescencia existe menor persistencia de la lactación (Vetharanim *et al.*, 2003a).

El cambio con respecto al tiempo de A a Q se representan en términos de las siguientes tasas de cambio:

$$\frac{dA}{dt} = r_{pa} - r_{aq} + r_{qa} \quad (26)$$

$$\frac{dQ}{dt} = r_{aq} - r_{qa} + r_{qs} \quad (27)$$

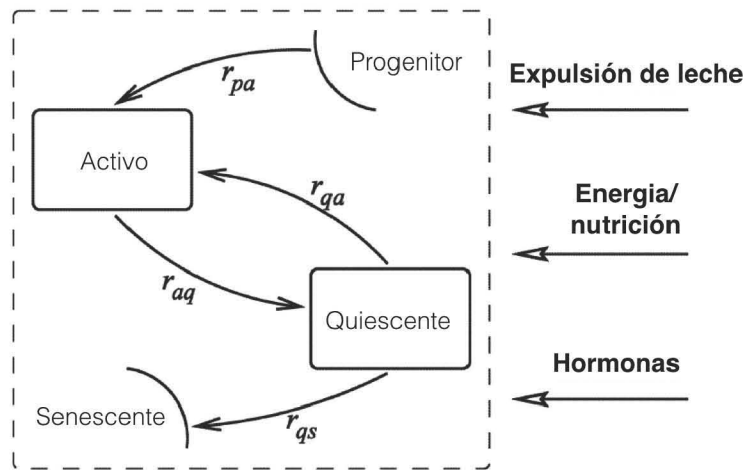


Figura 14. Partición de las células secretoras mamarias y la dinámica de interacción de sus componentes (Adaptado de Vetharanim *et al.*, 2003). Las células activas (A) tienen dos influjos: r_{pa} , que es la tasa de división de células progenitoras y r_{qa} , que se refiere a la tasa de reactivación de alvéolos quiescentes; la tasa de quiescencia de los alvéolos, r_{aq} es el único eflujo de los alvéolos activos. Los alvéolos quiescentes (Q) tienen dos eflujos: la reactivación de alvéolos quiescentes y la senescencia de alvéolos quiescentes a una tasa r_{qs} .

El modelo indica que el mayor efecto del manejo nutricional sobre la dinámica alveolar de la glándula mamaria es sobre la tasa de quiescencia a senescencia; así, las vacas alimentadas con base en forraje presentaron mayor tasa de senescencia en comparación con los animales alimentados con una ración totalmente mezclada (Vetharanim *et al.*, 2003a). Este modelo ilustra el potencial de un modelo mecanístico no lineal para incorporar conocimiento acerca de las relaciones entre los componentes

fisiológicos que gobiernan la producción de leche.

Modelo de Dimauro (2007)

Dimauro *et al.* (2007) construyeron un modelo mecanístico utilizando simulación computarizada mediante modelación orientada a objetos. Este modelo tiene la capacidad de simular el proceso de producción láctea en ovejas tomando en cuenta la dinámica alveolar y la energía disponible para la lactación. Basados en el modelo de la glándula mamaria bovina desarrollado por Vetharaniam (2003), el modelo de Dimauro establece que la dinámica de la población alveolar es la siguiente: alvéolos progenitores se vuelve activos, alvéolos activos se vuelven quiescentes, y alvéolos quiescentes que se reactivan o se vuelven senescentes.

Además, este modelo afirma que la producción láctea al tiempo t depende del número de alvéolos activos, la capacidad secretora de cada alvéolo y de la energía disponible para la lactación (originada del proceso de digestión o movilización de reservas corporales). El modelo de Dimauro *et al.* (2007) está estructurado en tres sub-modelos: alveolar, energía y leche. En el sub-modelo alveolar, los alvéolos secretores de la GM están divididos en tres compartimentos que representan el estado de las variables: A alvéolos activos, P alvéolos progenitores y Q alvéolos quiescentes.

En la primera etapa de la lactación existe un rápido incremento de nuevos alvéolos los cuales pasan del compartimento P al A a una tasa específica k . Por lo tanto, el número de alvéolos r_{pa} que pasan del compartimento P al A puede ser expresado de la siguiente manera:

$$r_{pa} = Pk_1 \quad (28)$$

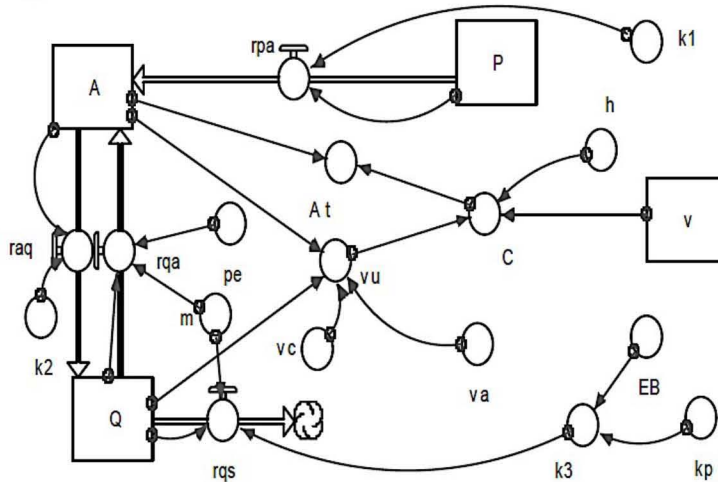


Figura 15. Partición de las células secretorias mamarias y la dinámica de interacción de sus componentes. En donde: A son alvéolos activos, P alvéolos progenitores, Q alvéolos quiescentes y V capacidad de la glándula mamaria.

Durante el periodo entre ordeños el número de alvéolos activos que pasan del compartimento A al compartimento de alvéolos quiescentes (Q) se calcula de la siguiente manera:

$$r_{aq} = Ak_2 \quad (29)$$

En donde A es el número de alvéolos presentes en el compartimento A y k_2 es la tasa específica de quiescencia. Además, este modelo señala que el número efectivo de alvéolos activos al tiempo t de lactación (A_t) no depende solamente de la combinación de la cinética de activación, quiescencia y reactivación, también es dependiente del estado actual de llenado de la glándula mamaria. Dimauro *et al.* (2007) proponen un parámetro v_u el cual representa la capacidad total de la glándula mamaria, especificando que en ovejas el 65% de la leche secretada se acumula en la cisterna y ductos mayores (v_c), mientras que el remanente se almacena en los alvéolos y ductos menores (v_a).

El sub-modelo energía establece que la energía neta total destinada para la producción

láctea (E_t), es la sumatoria de la energía obtenida de los alimentos consumidos (E_I), mas la energía movilizada de sus reservas corporales (E_R). Finalmente, el sub-modelo leche define que la cantidad de leche secretada por la glándula mamaria por unidad de tiempo depende de la disponibilidad de energía. La aproximación mecanística del modelo de Dimauro *et al.* (2007) provee una adecuada descripción de la evolución de la producción láctea en ovejas Sarda como una función de la frecuencia ordeño, estrés asociado al ordeño y al manejo nutricional.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DEL MODELO DE WOOD PARA EL ANÁLISIS DE CURVAS DE LACTACIÓN DE OVEJAS BAJO UN SISTEMA ORGÁNICO

Artículo publicado: **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelán, O.A.O., Benito Albarran-Portillo, B., Montaldo, H., Ronquillo. M.G. 2014. Application of the Wood model to analyze lactation curves of organic dairy sheep farming. *Animal Production Science*. 54, 1609–1614.

Application of the Wood model to analyse lactation curves of organic dairy sheep farming

Juan Carlos Ángeles Hernández^{A,F}, Octavio Castelán Ortega^B, Benito Albarrán Portillo^C, Hugo H. Montaldo^D and Manuel González Ronquillo^{B,E}

^APrograma de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

^BDepartamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.

^CCentro Universitario UAEM Temascaltepec, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.

^DDepartamento de Genética y Bioestadística, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

^EFacultad de Ciencias, Escuela de Ciencias y Tecnología en Recursos Agrícolas y Acuícolas, Universidad de Magallanes, Chile.

^FCorresponding author. Email: mvzjuancarlos@comunidad.unam.mx

Abstract. The aim of the present study was to evaluate the performance of the Wood model to describe the characteristics of lactation curves of dairy ewes under organic management in Mexico. In total, 4861 weekly test-day milk yield records from 194 lactations of crossbred dairy ewes were analysed to assess the performance of an empirical model to fit their lactation curve. We used the mathematical model proposed by Wood. The evaluation criteria were the correlation coefficient (r) between the values of total milk yield observed and estimated, the coefficient of determination (R^2), and the mean square prediction error (MSPE). In addition, the peak yield (PY_{est}) and time at peak yield (PT_{est}) were calculated. The Wood model showed adequate goodness of fit ($r = 0.95$, $R^2 = 0.92$ and $MSPE = 0.024$). The Wood model detected that 52.06% of lactation curves had a continuously decreasing shape (atypical curve), probably as a consequence of the characteristic management of the organic system, mainly due to the genotype used and the nutritional management. Residuals were greater for atypical curves than for typical ones, indicating differences in the ability of the Wood model to fit the two types of shapes. In typical curves, the Wood model showed adequate estimates of total milk yield and time at peak yield. The peak yield was underestimated both in typical and atypical curves. The Wood model in atypical curves underestimated the time at peak yield and milk yields in late lactation. The Wood model showed a reasonable fit of lactation curve in dairy sheep in organic systems but presented deficiencies of fit in atypical curves; therefore, estimates should be interpreted carefully.

Additional keywords: goodness of fit, mathematical modelling, milk production, organic management.

Received 13 March 2014, accepted 13 June 2014, published online 19 August 2014

Introduction

Mathematical modelling of lactation curves is one of the tools available for analysing the performance of dairy sheep, mainly because milk production is the most important factor affecting the nutritional requirements of dairy ewes. Mathematical models of lactation curves provide summarised information about dairy sheep production that is useful in research and farm management (Pulina *et al.* 2005).

The Wood (1967) mathematical function has been widely used in descriptions of the lactation curves of different livestock species; modifications of this model have been made, and parameters have been added to improve its predictive capacity and fit (Cappio-Borlino *et al.* 1995). The goodness of fit of this

model has been evaluated in cattle (Silvestre *et al.* 2006), sheep (Portolano *et al.* 1997), goats (León *et al.* 2012) and deer (Landete-Castillejos and Gallego 2000), as well as in different production systems and genotypes (Wasike *et al.* 2011) and under different environmental conditions (León *et al.* 2012).

Organic sheep farming involves a radical change in thinking about the traditional production processes and conditions of animal husbandry, paying special attention to health and welfare, environmental impacts and food quality and safety (Ronchi and Nardone 2003). These production systems use environmentally friendly methods of crop and livestock production and do not use synthetic fertilisers, growth hormones or gene manipulation and limit the use of concentrates and antibiotics.

Flock feeding in organic dairy sheep is largely based on grazing in natural pastures of rangelands or cultivated forages. Feed availability has been identified as one of the main constraints for milk production in organic dairy sheep systems, due to seasonal and irregular pasture growth and quality. Low genetic potential, health deficiencies and variability of climatic, soil and topographic conditions have also been associated with lower milk yields in organic dairy sheep systems (Ronchi and Nardone 2003).

There is no evidence of the ability of the Wood model to describe lactation curves of dairy ewes reared in organic production systems, where specific management conditions could determine particular characteristics of milk production patterns. The aim of the present study was to evaluate the performance of the Wood model for modelling and describing complete lactation curves in dairy ewes under organic management.

Materials and methods

Animals and management conditions

The research was performed in an organic dairy herd located in the municipality of Marques, Querétaro, Mexico. We analysed lactation curves of dairy crossbred ewes of the following breeds: East Friesian, Pelibuey, Suffolk and Black Belly.

The lactation data were from multiparous ewes with lambing in winter (January to March 2005). Ewes were milked mechanically once daily from the day of weaning until their milk yield declined to ~0.2 kg/day. After weaning (average 2 weeks post-lambing) the lambs were fed ewes' milk under conventional management as well as milk replacer.

The farm was focussed on the production of semi-mature and mature cheese from ewes' milk produced under an organic system. Ewes were reared in a grazing system based on alfalfa (*Medicago sativa*) and ryegrass (*Lolium multiflorum*), supplemented with alfalfa hay and corn grain (500 g/ewe.day), which were provided at milking time. The availability and quality of forage in grasslands showed variation throughout the year, with average yields of 2260 kg DM/ha in winter (dry season) and 3500 kg DM/ha in summer (wet season).

Data basis

The analysis included 4861 weekly test-day milk yield (TD) records from 194 whole lactations from the same number of crossbred ewes. The original database included 225 lactations. Only lactations where the ewe's identity, lambing date and number of the lambing (second and third) were known, and with the first TD record within the 30 days post-lambing, were considered for the analysis. The average lactation period was 200 days, with 26.8 weekly TD records of milk yield per lactation, and the first TD was recorded on average at 11.1 days of lambing.

Mathematical model

To analyse the lactation curves and their parameters, we used the mathematical model proposed by Wood (1967):

$$Y_t = at^b e^{-ct}, \quad (1)$$

where Y is the milk production (kg) at time t , and a , b and c are the parameters describing the curve shape: a is the production of milk at the beginning of the lactation (kg), and b and c are the

parameters of inclining and declining slopes of the lactation curve before and after the peak of production, respectively.

The parameters of the Wood model (a , b and c) were estimated individually for each lactation curve through an iterative procedure of nonlinear regression analysis (PROC NLIN, SAS Institute 2002) using the Marquardt computational strategy. The best-fit solution was assumed when the difference between the error sums of squares for two successive iterations was less than 10^{-6} .

Several authors have mentioned that in some cases, fitting lactation curves with the Wood model can result in parameter estimates being outside their expected range (negative values of Parameter b), which prevents the calculation of peak yield (PY_{est}) and time at peak yield (PT_{est}) (Pollott and Gootwine 2000). In this sense computing PT_{est} required special attention because negative values of the Parameter b generate estimates of PT_{est} outside of the lactation period (i.e. before lambing).

In the present study, restriction rules were used in the procedure to estimate the parameters of the Wood model, imposing a value greater than zero on the Parameter b (BOUNDS statement $b > 0$, NLINE SAS). For each lactation, a graphical analysis was generated by the Wood model to detect typical and atypical shapes of lactation curves. In addition, all predicted lactation curves that showed a continuously decreasing (atypical) form had values of $PT_{est} > 0$ and < 1 .

The traits related to the lactation curve were computed for each individual ewe using the formulae proposed by Wood (1967): peak yield [$a(b/c \exp^{-b})$], time at peak yield (b/c) and total milk yield per lactation (TMY), which was obtained by additive sums. PY_{obs} and PT_{obs} were obtained by visual observation of each individual curve and TMY_{obs} was calculated using the Fleischmann method (Ruiz *et al.* 2000). The general expression of the Fleischmann method is:

$$TMY = (y_1 t_1) + \sum((y_i + y_{i+1})/2) \times t_i + (y_{k+1} \times 7), \quad (2)$$

where TMY is the total milk yield, y_1 is the yield at first milk record, t_1 is the interval between lambing and first recording, y_i is the yield of record i ($i = 1, \dots, k$), t_i is the interval between record i and record $(i + 1)$ and 7 is the assumed number of days between the last recording and the dry-off.

Fitting analysis

The goodness of fit of the Wood model was evaluated using the mean square of prediction error (MSPE), calculated as:

$$MSPE = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n - p}, \quad (3)$$

where e_t is the residual for the milk yield at day t of the TD record, n is the number of TD records in the lactation and p is the number of parameters of the Wood model.

The coefficient of determination adjusted by the number of parameters in the model (adjusted R^2) was also estimated as a criterion of the goodness of fit, according to following formula:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}, \quad (4)$$

where R^2 is the coefficient of determination ($1 - (RSS/TSS)$), RSS is the residual sum of squares, TSS is the total sum of squares, n is

the number of observations and p is the number of parameters in the model.

The correlation coefficient (r) between TMY_{obs} and TMY_{est} was run to quantify the degree of association between the observed and estimated values. The comparison between estimated and observed values of traits of the lactation curve (TMY, PY and PT) was carried out using Student's t -test (PROC TTEST, SAS Institute 2002). The correlation coefficient between the parameters of the Wood model (a , b and c) was calculated.

Results

Shapes of lactation curves

The Wood model was used to fit the complete lactation curves of dairy ewes under organic management. Using this model, two shapes were detected for the lactation curves: typical or standard curves (47.94%) and atypical or continuously decreasing curves (52.06; Fig. 1).

The average TMY_{obs} , PY_{obs} and PT_{obs} in typical curves were significantly ($P < 0.001$) higher than in the atypical curves (102.29 vs 91.95 kg, 0.97 vs 0.87 kg and 42.58 vs 10.56 days, respectively). Atypical curves showed the highest milk yield (PY = 0.87 kg) in the first TD record, then presented a continuous decrease in milk yield (Fig. 1*b*). The first TD was recorded on average at 14.51 days (s.d. 10.43 days) in typical curves and 10.56 days (s.d. 8.55 days) in atypical curves.

Atypical curves had high values of the parameter a , which represents the milk production at the beginning of lactation, compared with typical curves, contrary to what occurred with Parameters b and c , where the higher values of these parameters in

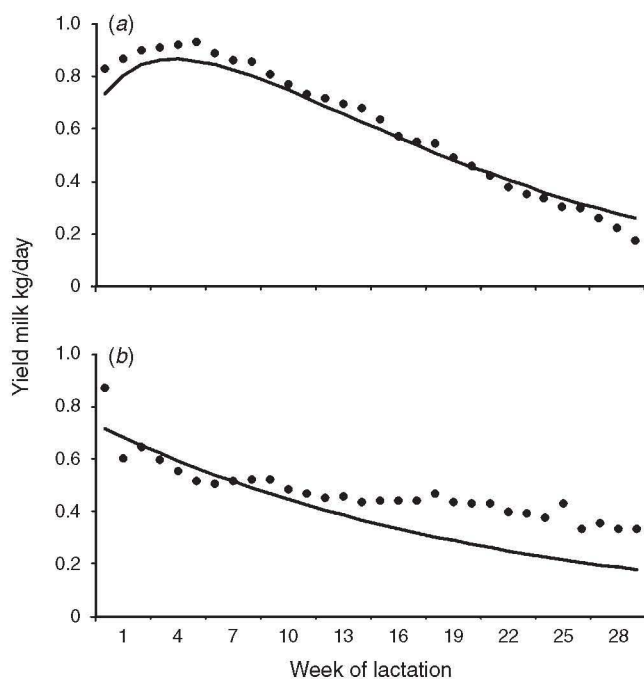


Fig. 1. (a) Typical and (b) atypical lactation curves fitted using the Wood model to mean lactation data of dairy ewes reared in organic livestock system. Observed data (dotted line); the Wood model (solid line). Typical lactation curves $n = 93$; atypical lactation curves $n = 101$.

the typical curves generated regular or standard lactation curves (Fig. 1*a*).

Fitting of the model

Statistics of the goodness of fit revealed a good performance of the Wood model ($r = 0.95$, adjusted $R^2 = 0.92$ and $MSPE = 0.024$). The observed and estimated values of TMY, PL and PT for typical and atypical lactation curves are shown in Table 1. The Wood model showed better estimation of TMY_{est} and PT_{est} in typical curves compared with the values of atypical curves.

TMY_{est} estimated by the Wood model and calculated by the Fleishmann method (observed values) were not different ($P = 0.193$) in typical curves; however, TMY_{est} was overestimated by 4.4% in atypical curves. Overestimation mainly concerned the second phase of lactation (Fig. 1*b*). The fit of the Wood model in typical curves tended to underestimate the milk yields in early lactation and overestimate then in late lactation (Fig. 1*a*).

Values of PY_{obs} and PY_{est} were significantly different in typical and atypical curves ($P = 0.001$ and $P = 0.05$, respectively). For both lactation curve shapes, PY_{est} were underestimated (Fig. 1). The Wood model estimated PT_{est} earlier in atypical curves and provided appropriate values in typical curves.

An example of the residuals observed for the two lactation curve shapes is shown in Fig. 2, indicating a better fit by the Wood model in typical curves than in atypical curves, with smaller and randomly distributed residuals.

Model parameters and their correlation

All Wood model parameters had high standard deviations (Table 2) in typical and atypical curves, being higher for the Parameters b and c in atypical curves. These results indicate high variability in the milk yields and length of the lactations used, also a marked dimorphism of the lactation curves.

The Parameter a , which represents the estimated production at the moment of lambing, was lower for ewes with typical curves in comparison with atypical curves (0.30 vs 0.75 kg). The average increasing rate of milk yield in the ascending stage (Parameter b)

Table 1. Comparison between total milk yield (TMY), peak yield (PY) and time at peak yield (PT) observed and estimated using the Wood model in typical and atypical lactation curves of dairy ewes reared in an organic livestock system

Values within a column followed by different letters are significantly different in each shape of lactation curve

| Parameter | TMY (kg) | PY (kg) | PT (days) |
|----------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| <i>Typical curves (n = 93)</i> | | | |
| Observed | 102.29 ± 6.40 | 0.97 ± 0.30a | 42.58 ± 2.69 |
| Wood model | 99.65 ± 6.20 | 0.79 ± 0.40b | 37.93 ± 1.47 |
| s.e. | 2.01 | 0.025 | 2.35 |
| P-value | 0.193 | 0.001 | 0.06 |
| <i>Atypical curves (n = 101)</i> | | | |
| Observed | 91.95 ± 5.08b | 0.87 ± 0.03a | 10.56 ± 0.81a |
| Wood model | 96.00 ± 5.45a | 0.82 ± 0.04b | 0.14 ± 0.03b |
| s.e. | 1.35 | 0.03 | 0.81 |
| P-value | 0.003 | 0.05 | 0.001 |

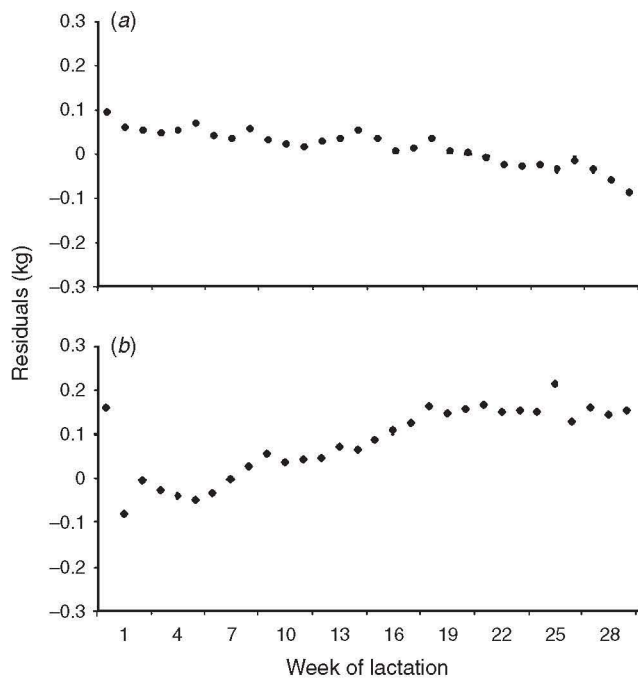


Fig. 2. Residual derivatives of fitting the Wood model to mean lactation data of (a) typical and (b) atypical lactation curves of dairy ewes reared in an organic livestock system. Typical lactation curves $n = 93$; atypical lactation curves $n = 101$.

Table 2. Mean and s.d. of the Wood model parameters (a – c) for typical and atypical lactation curves of dairy ewes reared in an organic livestock system

Correlations between these parameters are reported and their significance is indicated within parentheses

| Shape of the lactation curve | Frequency | a | | b | | c | |
|------------------------------|-----------|--------------------|------|---------------|-------|-------|-------|
| | | Mean | s.d. | Mean | s.d. | Mean | s.d. |
| Typical | 93 | 0.30 | 0.28 | 0.542 | 0.471 | 0.015 | 0.016 |
| Atypical | 101 | 0.75 | 0.32 | 0.011 | 0.061 | 0.007 | 0.009 |
| | | <i>Correlation</i> | | | | | |
| Typical | b | –0.649 (0.001) | | — | | – | |
| | c | –0.409 (0.001) | | 0.766 (0.001) | | – | |
| Atypical | b | –0.416 (0.001) | | – | | – | |
| | c | –0.248 (0.021) | | 0.879 (0.001) | | – | |

was 0.542 in typical curves; in atypical curves this value was lower ($b = 0.011$) and did not describe an ascending phase of milk production (Fig. 1b). The mean declining rate after PY (Parameter c) was 0.015 in typical curves and 0.007 in atypical curves.

The correlation showed the same sign in the three parameters of the Wood model in both lactation curve shapes. The Parameter a was correlated negatively with b and c in typical and atypical curves, and the absolute values of correlation between these parameters were higher in typical curves.

The parameters associated with inclining and declining slopes of lactation curves (Parameters b and c) were more correlated in atypical curves. The significant correlation observed between the three parameters both in typical and atypical curves indicated a high association between the different stages of the lactation curve.

Discussion

Shapes of lactation curves

The characteristic pattern of the lactation curve is defined by a first phase, where milk yield increases the peak production, followed by a decreasing phase, but there are variations of this pattern of production. Landete-Castillejos and Gallego (2000) and Macciotta *et al.* (2005) have defined ‘atypical curve’ as a form of continuously decreasing milk production, a curve without a lactation peak.

In the present study, 52.06% of ewes showed atypical lactation curves, which was higher than the figure reported by Pollott and Gootwine (2000) in improved Awassi dairy ewes under intensive management (20% of atypical curves). Cappio-Borlino *et al.* (1997) observed similar percentages of atypical curves (56%) of Sarda ewes under extensive systems.

The presence of atypical curves could be the result of the absence of a lactation peak (Shanks *et al.* 1981), or a lactation peak that is too small to be detected by the Wood model (Pulina *et al.* 2005). Silvestre *et al.* (2006) reported that the lack of TD records in the first stage of lactation is another cause of atypical curves; however, this situation does not coincide with the structure of the data in the present study because milk yields were recorded close to the first week after lambing.

The factors associated with the presence of atypical curves in the present study highlight the importance of nutritional management, mainly associated with the availability and quality of forage, which is determined by agroclimatic conditions. Likewise, environmental factors play a dominant role in shaping the lactation curves, especially high temperatures and arid conditions (Shanks *et al.* 1981).

It is generally recognised that climatic conditions influence sheep milk yields, with changes in metabolism as a result of high temperatures and low rainfall (Gradiz *et al.* 2009). The onset of lactation in ewes analysed began in the dry season (winter), which could have caused the high proportion of atypical curves and the tendency to flatten out before the PY in typical curves.

Similar proportions of atypical curves to those described in this study have been reported in dairy sheep with lambings in winter and animals outdoors on pasture (Cappio-Borlino *et al.* 1997). When lactation began in the dry season (November–April), Gradiz *et al.* (2009) observed a significant effect ($P < 0.05$) on Parameter c , and low values of PY_{est} and TM_{est} in crossbred cows.

León *et al.* (2012) mentioned the impact of environmental conditions in the shape of lactation curves in extensive and semi-extensive systems, because the ewes’ diet is based mainly on grazing, and environmental conditions have a strong influence on the development of sources of feed, basically pasture.

In the present study, grassland yields varied throughout the year, with the highest forage yields in summer; also, the impact of feeding is higher in this organic system due to the

limiting feeding of concentrate and because supplementation with organic forage is expensive.

Cannas (2004) reported that restricting the supply of energy and protein in the diets of dairy ewes during early lactation delays or avoids the show of PY. In this work the availability of forage was lower in grassland areas during early lactation (winter season), which limited the supply of energy and protein for ewes in this phase of lactation, which could have influenced changes in the inclining and declining phases of the lactation curves.

The European Union indicates that animals used in organic production systems must be able to adapt to certain environmental conditions of the site and should preferably be local breeds (EU 1999). In the organic dairy sheep farm in the present study, crossbred ewes (local breeds \times specialised milk production breeds) were analysed in order to promote the process of adaptation.

The utilisation of crossbred ewes in the present study and the low level of selection of sheep breeds under organic management may explain in part the high percentage of atypical curves detected. This agrees with Cappio-Borlino *et al.* (1997) who reported a genetic effect in the high frequency of atypical curves in dairy sheep.

Fitting of model

According to the evaluation criteria, the Wood model showed an adequate performance, with r and adjusted- R^2 values higher than those reported by Cappio-Borlino *et al.* (1995) and Dag *et al.* (2005). Similar MSPE values have been reported by Dag *et al.* (2005) who reported an appropriate fit by the Wood model. Silvestre *et al.* (2006) reported adequate performance of the Wood model when data were available on the initial stage of lactation and when the interval between TD was reduced. In the present study the first TD was recorded within 11 days of lambing and records were carried out weekly.

TMY_{obs} was low when it was compared with conventional production systems using specialised dairy sheep breeds (Awassi, 553 L/lactation) (Pollott and Gootwine 2000), but coincided with the milk yields in organic systems (84 kg/lactation) (Tzouramani *et al.* 2011). Pollott and Gootwine (2000) indicated an adequate performance of the Wood model to fit lactations of ewes with low yields (<300 L), which could explain partially the appropriate values of r , adjusted R^2 and MSPE in the present study.

The TMY_{est} was predicted with a high degree of accuracy by the Wood model for typical curves. Similar results were reported in previous studies of dairy sheep in conventional systems (Portolano *et al.* 1997; Pollott and Gootwine 2000) and cows in organic dairy herds (Hovi *et al.* 2001).

The TMY_{obs} and TMY_{est} showed significant differences ($P = 0.003$) in atypical curves, which agree with Ruiz *et al.* (2000) who reported that the Wood model is not suitable in lactation curves of ewes under grazing conditions. Wolfová *et al.* (2009) found deficiencies in milk production estimates using the Wood model, especially when feed resources were limited.

The Wood model underestimated PY_{est} in both shapes of lactation curve and agrees with Portolano *et al.* (1997). Macciotta *et al.* (2011) found a limitation of the Wood model: an underestimation of milk yields before and after the PY. This

situation is related to the constancy of the curvature of this function (Cappio-Borlino *et al.* 1995) and that the Wood model assumes a production level of zero at time $t = 0$ (Wood 1967).

The PT_{est} calculated by the Wood model was underestimated significantly in atypical curves; this is contrary to the results reported by Pollott and Gootwine (2000) with values of PT_{est} close to the observed values. However, they analysed the lactation curves of a specialised dairy sheep breed (Awassi) under intensive management, whereas in the present study organic management could favour the presentation of atypical curves.

Pollott and Gootwine (2000) reported a limitation of the Wood model. In some cases the estimates of their parameters were outside of the expected range ($b > 0$). This generated estimates outside the range of biological of PY_{est} and PT_{est}; for example, PT_{est} estimated before lambing (Congleton and Everett 1980).

In the present study, we avoided using negative values for Parameter b through the use of restrictions, which allowed the calculation of PY_{est} and PT_{est}. In atypical curves the PY_{est} was estimated closest to the beginning of lactation (0.14 days), this is explained in part because the first TD milk record (average 10.56 days after lambing) was highest in the lactation.

Differences in the magnitude of the residuals in typical and atypical curves indicated variation in the level of accuracy. The residuals of typical curves were smaller and more randomly distributed, apart from lower underestimation of yields in late lactation. Shanks *et al.* (1981) found a lower adjustment to the Wood model in atypical lactation curves compared with standard lactation curves.

Large estimates of residuals at the extreme ends of the lactation curves could be a result of the inability of the Wood model to fit the extremely high and low yields recorded in this stage of lactation.

Model parameters and their correlations

According to the second derivate of the Wood model, the absolute value of parameter b controls the magnitude of curvature of the lactation pattern. This agrees with the present study, where typical curves showed higher values than did atypical curves for this parameter.

The effect of Parameter b on estimates of the lactation curve varied for typical and atypical curves. In typical curves the larger values of b generated a rapid rate of increase of estimated yields in the first stage of lactation, whereas in atypical curves the increasing values of Parameter b resulted in a low rate of decline of the curve (Macciotta *et al.* 2005). For this reason, comparisons across different groups and interpretation of Parameter b values of lactation curves in organic dairy sheep systems should be done carefully.

The lower absolute values of correlation coefficients between parameters of the Wood model in atypical curves were similar to those reported by Macciotta *et al.* (2005) and González-Peña *et al.* (2012). In both shapes of lactation curve the positive correlation between Parameters b and c indicated that ewes who reached the PY faster also showed a high rate of decline in milk production after the PY. The negative correlations between Parameters a and b implies that high milk yields at the beginning of lactation are associated with a lower rate of increase to PY (Gradiz *et al.* 2009).

The correlation between the parameters of the Wood model in typical and atypical lactation curves can be explained by the multiplicative form of this function, resulting in a marked rigidity of the Wood model (Macciotta *et al.* 2011) and high sensitivity to the distribution of the data (Silvestre *et al.* 2006).

The high variability observed in the Wood model parameter values can be attributed to the strong influence of environmental effects (mainly the effect of the availability and quality of forage through the year) and genetic factors (diversity of analysed genetic groups) in dairy sheep organic systems. This agrees with Olori *et al.* (1999), who also reported that high variation can be due to the biological nature of the lactation itself, which varies randomly between animals.

Conclusions

The Wood model applied in lactation curves of dairy sheep in an organic system showed a reasonable fit to milk production data. This model detected a high proportion of atypical curves, probably as a consequence of the management characteristics of the organic farm, the genotypes used and the nutritional conditions. The Wood model has deficiencies in fitting atypical curves; therefore, careful interpretation of their estimates should be done when carrying out analysis of lactation curves of ewes in organic production systems.

Acknowledgements

This project was supported by Foundation PRODUCE, State of México, and the University Autonomous State of México, UAEM 3643/2013 E. The authors would like to thank Miss Liz Hopper from the University of North Texas Department of Linguistics and Technical Communication for the critical review of this manuscript. We also thank Ing. Javier Perez Rocha M. for the facilities during the realization of the present study. Mr Angeles Hernandez was granted by a CONACyT fellowship. Dr. Gonzalez Ronquillo received a grant from Beca Alianza del Pacifico Chile.

References

- Cannas A (2004) Feeding of lactation ewes. In 'Handbook of milk of non-bovine mammals'. (Eds WY Park, GFW Haenlein) pp. 79–108. (Blackwell Publishing: Ames, IA)
- Cappio-Borlino A, Pulina G, Rossi G (1995) A non-linear modification of Wood's equation fitted to lactation curves of Sardinian dairy ewes. *Small Ruminant Research* **18**, 75–79. doi:10.1016/0921-4488(95)00713-U
- Cappio-Borlino A, Macciotta NPP, Pulina G (1997) The shape of Sarda ewe lactation curve analyzed by a compartmental model. *Livestock Production Science* **51**, 89–96. doi:10.1016/S0301-6226(97)00102-4
- Congleton WR, Everett RW (1980) Error and bias in using the incomplete gamma function to describe lactation curves. *Journal of Dairy Science* **63**, 101–108. doi:10.3168/jds.S0022-0302(80)82894-3
- Dag B, Keskin I, Mikailsoy F (2005) Application of different models to the lactation curves on unimproved Awassi ewes in Turkey. *South African Journal of Animal Science* **35**, 238–243.
- EU (1999) Council Regulation No. 1804/1999 of July 1999, Supplementing Regulation (EEC) No. 2092/91. CELEX-EUR Official Journal L 222, pp. 1–28. Available at europa.eu.eu18524.doc.
- González-Peña D, Acosta J, Guerra D, González N, Acosta M, Sosa D, Torres-Hernández G (2012) Modelling of individual lactation curves for milk production in a population of Alpine goats in Cuba. *Livestock Science* **150**, 42–50. doi:10.1016/j.livsci.2012.07.026
- Gradiz L, Alvarado L, Kahi AK, Hirooka H (2009) Fit of Wood's function to daily milk records and estimation of environmental and additive and non-additive genetic effects on lactation curve and lactation parameters of crossbred dual purpose cattle. *Livestock Science* **124**, 321–329. doi:10.1016/j.livsci.2009.02.016
- Hovi M, Roderick S, Taylor N, Hanks J (2001) The production characteristics of organic dairy herds in the UK. In 'Organic meat and milk from ruminants'. (Eds I Kyriazakis, G Zervas) pp. 127–133. (Wageningen Academic Publishers: Wageningen, The Netherlands)
- Landete-Castillejos T, Gallego L (2000) Technical note: the ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. *Journal of Animal Science* **78**, 3010–3013.
- León JM, Macciotta NPP, Gama LT, Barba C, Delgado JV (2012) Characterization of the curve in Murciano–Granadina dairy goats. *Small Ruminant Research* **107**, 76–84. doi:10.1016/j.smallrumres.2012.05.012
- Macciotta NPP, Vicario D, Cappio-Borlino A (2005) Detection of different shapes of lactation curves for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models. *Journal of Dairy Science* **88**, 1178–1191. doi:10.3168/jds.S0022-0302(05)72784-3
- Macciotta NPP, Dimauro C, Rassa SPG, Steri R, Pulina G (2011) The mathematical description of lactation curves in dairy cattle. *Italian Journal of Animal Science* **10**, 213–223. doi:10.4081/ijas.2011.e51
- Olori VE, Brotherstone S, Hill WG, McGuirk BJ (1999) Fit of standard models of lactation curves to weekly records of milk production of cows in a single herd. *Livestock Production Science* **58**, 55–63. doi:10.1016/S0301-6226(98)00194-8
- Pollott GE, Gootwine E (2000) Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *Animal Science* **71**, 197–207.
- Portolano B, Spatafora F, Bono G, Margiotta S, Todaro M, Ortoleva V, Leto G (1997) Application of the Wood model to lactation curves of Comisana sheep. *Small Ruminant Research* **24**, 7–13. doi:10.1016/0921-4488(95)00842-X
- Pulina G, Macciotta N, Nudda A (2005) Milk composition and feeding in the Italian dairy sheep. *Italian Journal of Animal Science* **4**, 5–14.
- Ronchi B, Nardone A (2003) Contribution of organic farming to increase sustainability of Mediterranean small ruminants livestock systems. *Livestock Production Science* **80**, 17–31. doi:10.1016/S0301-6226(02)00316-0
- Ruiz R, Oregui LM, Herrero M (2000) Comparison of models for describing the lactation curve of Latxa sheep and an analysis of factors affecting milk yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2709–2719. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75165-4
- SAS Institute (2002) 'Statistical analysis systems user's guide.' (SAS: Cary, NC)
- Shanks RD, Berger PJ, Freeman AE, Dickinson FN (1981) Genetic aspects of lactation curves. *Journal of Dairy Science* **64**, 1852–1860. doi:10.3168/jds.S0022-0302(81)82775-0
- Silvestre AM, Petim-Batista F, Colaco J (2006) The accuracy of seven mathematical functions in modeling dairy cattle lactation curves based on test-day records from varying sample schemes. *Journal of Dairy Science* **89**, 1813–1821. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72250-0
- Tzouramani I, Sintori A, Liontakis A, Karanikolas P, Alexopoulos G (2011) An assessment of the economic performance of organic dairy sheep farming in Greece. *Livestock Science* **141**, 136–142. doi:10.1016/j.livsci.2011.05.010
- Wasike CB, Kahi AK, Peters KJ (2011) Modeling of lactation curves of dairy cows based on monthly test day milk yield records under inconsistent milk recording scenarios. *Animal* **5**, 1780–1790. doi:10.1017/S1751731111000954
- Wolfová M, Wolf J, Krupová Z, Kica J (2009) Estimation of economic values for traits of dairy sheep: I. Model development. *Journal of Dairy Science* **92**, 2183–2194. doi:10.3168/jds.2008-1411
- Wood PDP (1967) Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* **216**, 164–165. doi:10.1038/216164a0

CAPITULO VI

**APLICACIÓN DE UN MODELO MECANÍSTICO PARA ANALIZAR LOS FACTORES
QUE AFECTAN LOS PARAMETROS DE LA CURVA DE LACTACIÓN EN OVEJAS
LECHERAS EN MÉXICO**

The application of a mechanistic model to analyze the factors that affect the lactation curve parameters of dairy sheep in Mexico

Juan C. Ángeles Hernández^{a,d}, Octavio Castelán Ortega^b, Benito Albarran Portillo^c,
Aurora H. Ramírez Pérez^d, Manuel González Ronquillo^b, Augusto Lizarazo C.^d,
Geoffrey Ernest Pollott^e

^aPrograma de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Salud y la Producción Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad nº 3000, C.U., Ciudad de México, 04510.

^bFacultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario nº 100, Col. Centro, Toluca, México, 50000.

^cCentro Universitario UAEM Temascaltepec, Universidad Autónoma del Estado de México.

^dFacultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad nº 3000, C.U., Ciudad de México, 04510.

^eRoyal Veterinary College, Royal College Street, London, NW1 0TU, UK

Corresponding Author: email: mrg@uaemex.mx

Abstract

Pollott's mechanistic model has been designed to describe lactation curve parameters based on the known biology of milk production and can be useful for analysing the factors that affect this process. A total of 556 lactations (10,008 weekly test-day records) of crossbred dairy sheep from four commercial farms located in Mexico, were analysed to investigate environmental factors that influenced lactation curve parameters, using Pollott's 5-parameter additive model. This model was fitted to each lactation using an iterative nonlinear procedure. The estimate parameters were maximum milk secretion potential (MS), relative rate of increase in cell differentiation (GR), maximum secretion loss (MSL), relative rate of decline in cell numbers (DR) and the proportion of parenchyma cells dead at parturition. A general linear model procedure was used to determine the effect of type of lambing, lambing number, flock and lambing season on total lactation milk yield (TMY) and calculated total milk yield (CTMY). Ewes had an average milk yield of 72 kg with an average lactation length of 140 days. The TMY and CTMY were significantly ($P = 0.04$) higher for twin lambing than single lambing lactations. Sheep in their first lambing had lower TMY and CTMY than those in their fourth lambing, possibly explained by the lower values of MS (2.85 vs, 5.3 kg). The relative GR was greatest ($P = 0.04$) during first lambing (0.059) and then decreased as the number of lambings increased. The DR however, was low at first lambing (0.201) and increased throughout life ($P = 0.03$). Both lambing number and type of lambing also affected milk yield. The parameters of Pollott model can be useful to explain, with a biologically approximation, the dynamic of differentiation, secretion and death of mammary cells in dairy sheep farms in Mexico.

Keywords: dairy sheep, lactation curve, biological factors.

Introduction

Dairy sheep production is an important livestock and economic activity in Mediterranean countries. Recently Latin American countries have developed a dairy sheep industry

with the aim of improving farm incomes and providing consumers with high quality dairy sheep products. In order to achieve adequate milk yields that provide financial support to dairy sheep producers, several improvements have been carried out by both genetic and non-genetic means.

The lactation curve is a graphic representation of milk production over time and provides useful information for breeding programs and management practices (Dag *et al.* 2006). Lactation curves can be analysed using mathematical models. There are several classifications of mathematical models applied to animal science according to a) their randomness approximation (deterministic and stochastic), b) a temporal approach (dynamic and static) and 3) the depth understanding of biological process (empirical and mechanistic). Mechanistic models of lactation curves have deeper theoretical assumptions about the complex physiological mechanisms that underlie the milk secretion process (Steri 2009).

Milk production and the shape of the lactation curve are determined by the number of active epithelial cells, their secretory activity and the gradual reduction of number of secretory cell as results of apoptosis (Svennersten-Sjaunja and Olsson 2005). Several mechanistic models have been developed based on a biological approach to the lactation curve (Neal *et al.* 1983; Dijkstra *et al.* 1997b; Pollott 2000b; Vetharaniam *et al.* 2003b). In the majority of these models the number and efficiency of mammary cells are the basis of the mechanistic approach to modelling the mammary gland (Castañares *et al.* 2013b).

The Pollott models have been specifically design to describe milk production patterns based on studies (Knight and Wilde 1993; Wilde *et al.* 1997; Knight *et al.* 1998) which focused on the dynamics of the mammary cell population (Albarrán-Portillo and Pollott 2008). This model has been compared to empirical and mechanistic models of lactation curve fitting (Pollott and Gootwine 2000; Elvira *et al.* 2013a; Angeles-Hernandez *et al.* 2013) and Pollott's models have been found to be the best-fit method using sheep's

milk yield records. Also, this model has the advantage that it provides parameters which can have biological interpretation.

Milk production is a complex biological process and the definition of strategies to improve milk yield requires an understanding of several factors that affect it, including genetics, animal health, seasonal effects, management techniques, udder morphology and nutrition (Pulina *et al.* 2007). Hence, the use of an appropriate mathematical model to fit lactation curves is needed in order to study the biological factors that affect milk production (Pollott and Gootwine 2000). The aim of this study was to analyse the known factors that affect the milk production of dairy sheep in Mexico through the application of a mechanistic model fitted to lactation curve data.

Material and methods

A total of 556 lactations comprising 10,008 weekly test-day records (TDR) of crossbred sheep from 4 commercial dairy farms located in the central region of Mexico, were analysed to investigate the factors that influenced the lactation curve parameters of dairy sheep using a 5-parameter Pollott mechanistic model (Pollott, 2000). The crossbred ewes were progeny of East Friesian x Suffolk, Pelibuey, Black Belly and Hampshire sheep. Ewes were milked mechanically once daily and milk yields were recorded weekly. Only lactations with the following information: ewe identity, lambing date, lambing number, type of lambing and with the first TD record within 30 days post lambing, were considered for the analysis. Lactations averaged 18.3 weekly TDR with a lactation length averaging 140 days.

The 5-parameter reduced additive model described by Pollott (2000) was fitted to each lactation using an iterative non-linear procedure (NLIN, SAS Institute, 2002):

$$MY = ((MS/(1 + (Z*\exp(-GR (n-150)))) - (ML/(1 + ((1 - NOD)/NOD)*\exp(-DR n))) \quad (1)$$

Where: M = milk yield (kg/day) on day n of lactation, MS = maximum milk secretion potential of the lactation, $Z = ((1-0.999999)/0.999999)$, GR = relative proliferation rate of

secretory cell number during early lactation, ML= maximum secretion loss, DR = relative decline rate in cell number, NOD = proportion of parenchyma cells dead at parturition.

TMY was computed using the so-called Fleischmann method after (Sargent *et al.* 1968):

$$TMY = y_1 t_1 + \sum_{i=2}^k ((y_i + y_{i+1})/2) * D_i + y_{k+1} * 7 \quad (2)$$

where TMY is total milk yield; y_1 is yield at first milk recording; t_1 is the interval, in days, between lambing and first milk recording; y_i is the yield at recording i and D_i is the interval between the record i and record $(i + 1)$ ($i = 1, \dots, k$), and 7 is the interval, in days, between the last recording and the dry-off (Ruiz *et al.*, 2000).

The biological parameters of Pollott model was used to calculate total milk yield (CTMY). The general linear model procedure GLM (SAS Institute, 2002) was used to determine the effect of lambing type (single or twin), lambing number (1st, 2nd, 3rd and 4th), farm (1, 2, 3 and 4) and season of lambing (spring, summer, autumn and winter), on curve traits (TMY and CTMY) and biological parameters of the Pollott model (MS, ML, DR, GR and NOD). The goodness of fit of the Pollott model was evaluated using the mean square of prediction error (MSPE) and correlation coefficient (r) between TMY and CTMY. The correlations between the lactation traits and parameters of the Pollott model were performed using the *corrplot* routine from the *corrplot v. 0.77* package (Wei and Viliam 2016) of R software v. 3.2.2. (R project).

Results

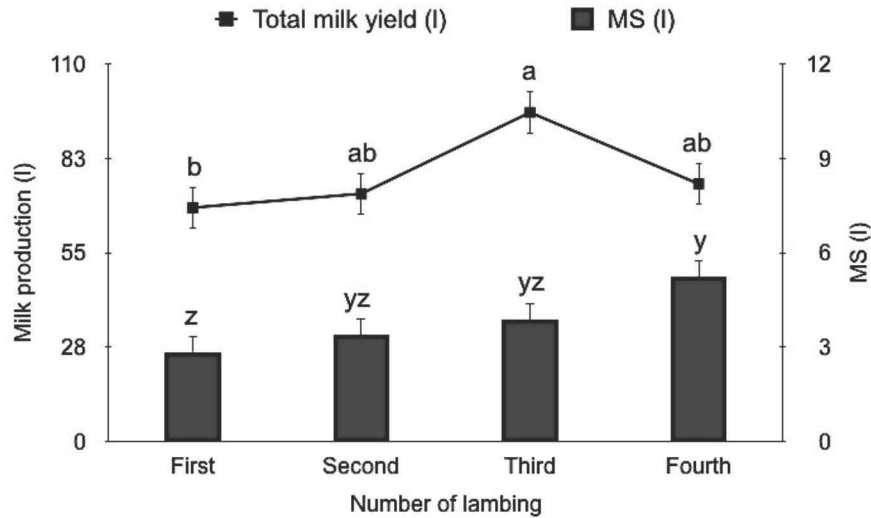
The Pollott model showed an adequate mean goodness of fit ($MSPE = 0.013 \text{ l}^2$, and $r = 0.86$). Lactations had an average milk yield of 74.4 l during a mean lactation length of 140 days. The mean parameter values from fitting the Pollott model and tests of significance of the analysed effects are shown in the Table 1. Flock had a significant ($P < 0.05$) effect on most of analysed traits; only MS, ML and NOD were found to be non-significant ($P > 0.05$).

Table 1. The influence of the analysed effects on lactation curve traits and parameters of the Pollott model.

| Traits | Mean | SD | Effect probability | | | |
|---------------------------------|-------|------|--------------------|----------------|----------------|-------------|
| | | | Flock | Lambing season | Lambing number | Litter size |
| Total milk yield (l) | 74.4 | 53.9 | 0.001 | 0.9 | 0.1 | 0.005 |
| Calculated total milk yield (l) | 71.3 | 50.1 | 0.001 | 0.9 | 0.04 | 0.006 |
| Lactation length (days) | 140 | 65.5 | 0.002 | 0.33 | 0.3 | 0.16 |
| Maximum secretion potential (l) | 3.12 | 2.6 | 0.08 | 0.6 | 0.04 | 0.09 |
| Relative growth rate | 0.049 | 0.06 | 0.004 | 0.54 | 0.04 | 0.83 |
| Relative rate of decline | 0.164 | 0.32 | 0.03 | 0.47 | 0.03 | 0.24 |
| Maximum secretion loss (l) | 2.98 | 2.8 | 0.1 | 0.52 | 0.28 | 0.34 |
| Proportion of cells dead | 0.21 | 0.16 | 0.69 | 0.26 | 0.78 | 0.22 |

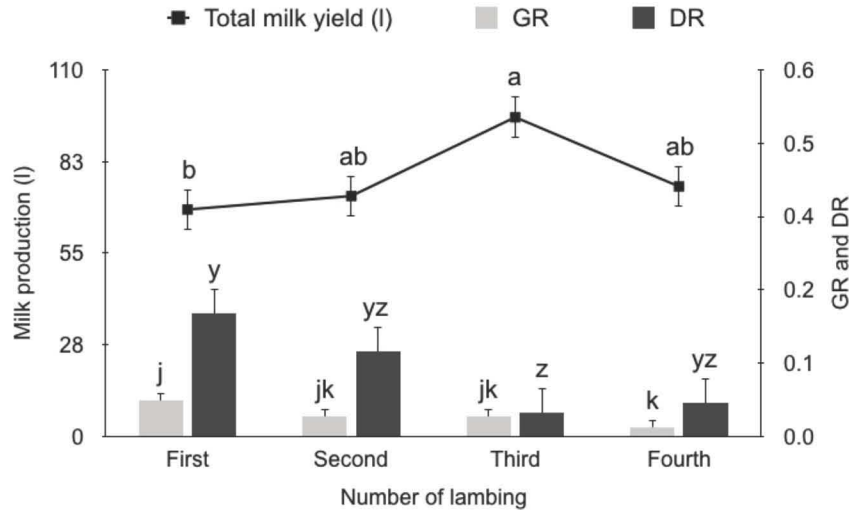
Lambing number significantly affected ($P < 0.05$) CTMY, MS, GR and DR (Table 1). Ewes at first lambing showed the lowest TMY (68.1 l), this increased in the second (72.2 l) lambing and reached the peak in the third lambing (95.9 l), and then declined at fourth lambing (75.0 l) (Fig. 1). The MS was lowest in the first lactation (2.8 l) and, increased with lambing number until the fourth lambing, which showed the highest value (5.3 l). The GR and DR were greatest ($P < 0.05$) during the first lambing and then decreased as the number of lambings increased, except for DR at the fourth lambing (Fig. 2).

Figure 1. The effect of lambing number on total milk yield and maximum secretion potential (MS) of dairy sheep.



Values with different superscripts (*a, b* and *y, z*) indicate significant differences ($P < 0.05$)

Figure 2. The effect of lambing number on total milk yield, relative growth rate (GR) and death rate in cell differentiation (DR) of dairy sheep.



Values with different superscripts (*a, b; j, k* and *y, z*) indicate significant differences ($P < 0.05$)

Lambing season did not affect milk yield or the biological parameters of the Pollott model ($P > 0.05$). Litter size significantly influenced ($P < 0.01$) TMY and CTMY, in both

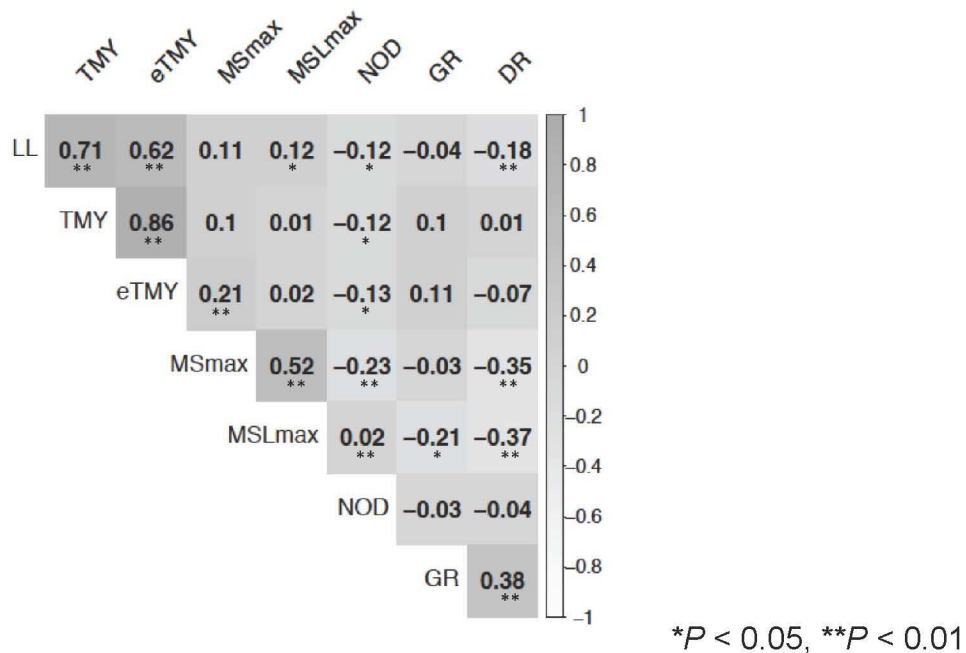
traits; twin-lambing ewes producing more milk than single-lambing ewes. There was a trend in MS ($P < 0.1$) in relation to litter size, showing the same pattern as found for TMY and CTMY, higher values in ewes carrying multiple foetuses (Table 2).

Table 2. The effect of litter size on milk production and parameters of the Pollott model.

| Traits | Single | Twin | S.E. |
|--|-------------------|--------------------|-------|
| Total milk yield (l) | 75.3 ^b | 107.5 ^a | 3.28 |
| Calculated total milk yield | 72.1 ^b | 100.6 ^a | 3.06 |
| Lactation length (d) | 153 | 147 | 4.06 |
| Maximum secretion potential (l) | 2.98 | 3.54 | 0.16 |
| Relative growth rate in cell differentiation | 0.05 | 0.048 | 0.005 |
| Relative rate of decline in cell differentiation | 0.17 | 0.12 | 0.019 |
| Maximum secretion loss (l) | 2.82 | 3.49 | 2.92 |
| Proportion of cells death at parturition | 0.22 | 0.22 | 0.16 |

^{a, b} within a row, means followed by a common superscript do not differ significantly ($P < 0.05$)

Figure 3. Pearson correlation coefficients between lactation curve traits and parameters of Pollott model.



Discussion

The milk yields found in the current work are lower than those reported in specialized dairy breeds (Gootwine and Goot 1994; Pollott and Gootwine 2004; Elvira *et al.* 2013b). However, they are similar to previous literature reports of TMY in meat breeds (Sakul and Boylan 1992; Ochoa-Cordero *et al.* 2002) and crossbred ewes (Mioč *et al.* 2009; Kremer *et al.* 2010). The significant effect of flock on milk production and parameters of the Pollott model can be explained by the different farms' management practices, mainly the nutrition management (Meraï *et al.* 2014). The flocks analysed had differences in feed management but they all used a moderate to high level of feed supplementation. This was likely to reduce the effect of agro-climatic conditions and variation due to the seasons and could explain the lack of difference in milk production, and lactation curve parameters, in relation to lambing season.

Previous studies have reported higher milk yields of sheep carrying twins in comparison to singles (Gootwine and Pollott 2000; Afolayan *et al.* 2002). Higher MS values of ewes bearing twins could explain, in part, the observed differences in milk production between single and twin-bearing ewes. This is in agreement with the findings of Gootwine and Pollott (2000) who analysed the effect of type of lambing on Awassi sheep. They mentioned that higher values of milk production and MS of twin-bearing ewes was due to a greater number of secretory cells, a higher secretion rate or a combination of both. In this model MS ($N \times S_a$) is defined as the product of total of mammary epithelial secretory cells (N) produced and, differentiated through lactation by maximum secretion rate (S_a , kg/cell/d). *In vivo* experiments support our findings of Pollott parameters, where ewes giving birth to multiple lambs had greater mammary growth and development, with higher total mammary DNA and RNA contents as indicators of epithelial cell and synthetic activities respectively (Ratray *et al.* 1974; Manalu and Sumaryadi 1998; Manalu *et al.* 2000)

This parameter represents the upper limit of milk production that an animal can produce per day if there was no cell death during the lactation (Pollott 2000b). Previous research has shown that differences in the dynamics of mammary cell renewal have a strong influence on the shape of the lactation curve and productivity. The findings in the current work suggests that differences in secretory cell dynamics can be due to a different litter size, which is orchestrated by elegant and specific hormonal control. Ewes bearing multiple foetuses have more corpora lutea and heavier placental mass (Pulina *et al.* 2007); therefore, higher MS values in twin lambings can be due to an increase in progesterone and placental lactogen (PL), secreted by the corpus luteum and placenta, respectively. These determine the greater ductal growth of mammary glands during early pregnancy, and mammary cell growth and synthetic activity during late pregnancy, with a better development mammary glands at lambing and an increase in milk production during lactation (Manalu *et al.* 2000). The effect of higher levels of progesterone is not only at the onset of lactation, but has been reported that ewes with higher progesterone concentrations maintain more cells and higher synthetic activity at the end of lactation (Manalu and Sumaryadi, 1998).

Elvira *et al.*, (2013b) applied the Pollott model in dairy sheep lactations and reported that ewes with reduced milk yield showed lower MS and higher NOD, which is in agreement with our results from single-bearing ewes. Beside the effect of progesterone, discussed above, the mammogenic and lactogenic effect of PL play an important role in sheep mammary development; ewes carrying multiple lambs show higher plasma levels of PL in comparison with single lambing ewes (Gootwine 2004). A positive relationship between litter size and PL levels with milk yield has been reported previously (Lérias *et al.*, 2014) and is confirmed in our results. The MS of twin-bearing ewes is in part, explained by the prolactin-like and growth hormone biological effects of PL, that enhances the preparation of the mammary gland for lactation, stimulation of steroidogenesis, foetal growth and alteration of the maternal metabolism (Akers and Akers, 2016).

Milk production depends on both the ewes' milk production potential and the net energy available for lactation (Dimauro *et al.* 2011). There is evidence that high-yielding ewes do not reach the potential milk production due to their inability to satisfy their nutritional requirements during early lactation, even under *ad libitum* feeding. For this reason the use of body reserves is a key practice in order to achieve adequate milk yields, mainly in the first phase of lactation. The lower TMY of primiparous in comparison to multiparous ewes has been previously reported (Ruiz *et al.* 2000; Pulina *et al.* 2007) and it could be in part associated with the lower provision of nutrients to the mammary gland to synthesise milk components, as primiparous animals have to use their nutrients not only for lactation, but also for their own growth (Lérias *et al.*, 2014). Additionally, younger ewes have lower body weight, body condition score and body reserves (González-García *et al.* 2015) than older ewes.

As the lambing number rises with the age there is an improvement in efficiency of homeorhetic dynamics involved in the partition of nutrients to the developing mammary gland and milk synthesis (González-García *et al.* 2015). Our results show an increase of TMY with lambing number, as previously (Angeles-Hernandez *et al.* 2013; González-García *et al.* 2015). The slightly different patterns of both the lactation curve and milk yield between lactation numbers are probably related to the biology of mammary gland. By interpreting the biological parameters from Pollott's model, it can be established that the maximum milk yield reached in third lambing is associate with the higher milk secretion potential (MS) and a lower decline in the udder cells (DR). This disagrees with the results from the Awassi (Pollott and Gootwine 2004) and Lacuane sheep (Elvira *et al.* 2013a): both studies showed that milk yield declined as the ewes aged. Also DR increased and MS declined as lambing number increased. However, our results and both studies are in agreement about the positive correlation between CTMY with MS and lactation length (LL) ($r = 0.21$ and $r = 0.62$, respectively) and the negative relationship of LL with DR ($r = -0.18$) (Fig. 3).

According to Pollott (2000) the GR describes the speed at which active cell numbers increase during pregnancy and early lactation. In the current work, the GR decreased

with lactation number in contrast to milk production that increased with age. There is evidence that in small ruminants alveoli developed and secretory structures from the previous lactation do not regress entirely during involution, but are added to those which grow in the following lactation, increasing the udder volume, especially the secretory parenchyma tissue (Lérias et al., 2014). This possibly explains the higher TMY and MS in multiparous ewes despite of their lower GR values.

Biological parameters of Pollott model help us to explain the characteristics of lactation, predict appropriate milk yields and detect the systematic changes in yield caused by biological factors; this is in line with previous works in crossbred sheep (Angeles-Hernandez *et al.* 2013) and pure breeds like Awasssi (Pollott and Gootwine, 2000, 2004) and Lacuane (Elvira *et al.* 2013a; b).

Conclusion

The effects lambing number and lambing type were the main factors that affected milk production in crossbred sheep. Also, the parameters of the Pollott model can help to explain, with a biological approximation, the dynamic of differentiation, secretion and death of mammary cells in dairy ewes of farms in Mexico.

References

- Abdelsayed M, Thomson PC, Raadsma HW (2015) A review of the genetic and non-genetic factors affecting extended lactation in pasture-based dairy systems. *Animal Production Science* **55**, 949–966. doi:10.1071/AN13300.
- Afolayan RA, Abubakar BY, Osinowo OA, Dim NI (2002) Lactation and Function of Curve Parameters in Yankasa Sheep. *Asian Journal of Plant Sciences* **15**, 890–894.
- Agenas S, Burstedt E, Holtenius K (2003) Effect of feeding intensity during the dry period. 1. Feed intake, body weight and milk production. *Journal of Dairy Science* **86**, 870–882.

- Akers RM, Capuco A V. (2012) Lactation. 'Encycl. Dairy Sci.' pp. 1442–1446. (Elsevier Ltd)
- Akpa GN, Asiribo EO, Oni OO, Alawa JP (2001) The influence of non-genetic factors on the shape of lactation curves in Red Sokoto goats. *Animal Science* **72**, 233–239.
- Albarran-Portillo B, Pollott GE (2000) The Relationship Between Parameters of Biological Models of Lactation and Milk Production. 215–217.
- Albarrán-Portillo B, Pollott GE (2008) Genetic Parameters Derived From Using a Biological Model of Lactation on Records of Commercial Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **91**, 3639–3648. doi:10.3168/jds.2007-0929.
- Albarrán-Portillo B, Pollott GE (2011) Environmental factors affecting lactation curve parameters in the United Kingdom ' s commercial dairy herds. *Archivos de Medicina Veterinaria* **43**, 145–153.
- Alqaisi O (2007) Reproductive performance and lactation yield of local Awassi, Improved Awassi and Afec-Awassi ewes under contemporary comparison on Al-Khanasry station in Jordan. MSc thesis, University of Hohenheim.
- Anderson RR, Salah MS, Sheffield LG, McKenzie WN (1984) Milk Production and Lactation Curve of Guinea Pigs. *Journal of Dairy Science* **67**, 185–193. doi:10.3168/jds.S0022-0302(84)81283-7.
- Angeles-Hernandez JC, Albarran-Portillo B, Gomez Gonzalez A V, Pescador Salas N, Gonzalez-Ronquillo M (2013) Comparison of mathematical models applied to f1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation curve parameter. *Asian-Australasian journal of animal sciences* **26**, 1119–26. doi:10.5713/ajas.2013.13096.
- Angeles-Hernandez JC, Ortega OAC, Perez AHR, Ronquillo MG (2014) Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Animal Production Science* **54**, 1641–1645. doi:10.1071/AN14214.
- Aziz MA, Shalaby NA, El-Shafie OM, Mahdy AT, Nishida A (2006) Comparison between the shapes of lactation curve of Egyptian buffalo milk yield estimated by the incomplete gamma function and a new model. *Livestock Research for Rural Development* **18**,.
- Barillet F, Marie C, Jacquin M, Lagriffoul G, Astruc JM (2001) The French Lacaune dairy

- sheep breed : Use in France and abroad in the last 40 years. *Livestock Production Science* **71**, 17–29. doi:10.1016/S0301-6226(01)00237-8.
- Bauman DE, Currie WB (1980) Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *Journal of Dairy Science* **63**, 1514–1529. doi:10.3168/jds.S0022-0302(80)83111-0.
- Bebbington M, Lai CD, Zitakis R (2009) Modeling lactation curves: classical parametric models re-examined and modified. *Journal of Applied Statistics* **36**, 121–133. doi:10.1080/02664760802443897.
- Berry DP, Buckley F, Dillon P (2007) Body condition score and live-weight effects on milk production in Irish Holstein-Friesian dairy cows. *Animal: an international journal of animal bioscience* **1**, 1351–1359. doi:10.1017/S1751731107000419.
- Berry DP, Olori VE, Cromie a. R, Veerkamp RF, Rath M, Dillon P (2007) Accuracy of predicting milk yield from alternative milk recording schemes. *Animal Science* **80**, 53–60. doi:10.1079/ASC34880053.
- Bilgin OC, Esenbuga N, Davis ME (2010) Comparison of models for describing the lactation curve of Awassi, Morkaraman and Tushin sheep. *Archiv Tierzucht* **53**, 447–456.
- Brody S, Ragsdale AC, Turner CW (1923) the Rate of Decline of Milk Secretion With the Advance of the Period of Lactation. *The Journal of general physiology* **5**, 441–4. doi:10.1085/jgp.5.4.441.
- Butorovic N (2015) Meteorological summary year 2014 ‘Jorge C. Schythe’ Station. *Anales del Instituto de la Patagonia* **43**,.
- Caja G, Such ;, Rovai ;, Molina ;, Fernández N, Torres A, Gallego Y (2002) Aptitud al ordeño mecánico y morfología mamaria en ovino lechero. In ‘XXVII Jornadas Científicas y VI Jornadas Int. la Soc. Española Ovinotecnia’, 1–30
- Cankaya S, Unalan A, Soydan E (2011) Selection of a mathematical model to describe the lactation curves of Jersey cattle. *Archiv Tierzucht* **54**, 27–35.
- Cannas A (2004a) Feeding of lactating ewes. ‘Dairy Sheep Nutr.’ (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 79–108. (CABI Publishing: Oxfordshire)
- Cannas A (2004b) Energy and protein requeriments. ‘Dairy Sheep Nutr.’ (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 31–49. (CABI Publishing)

- Cappio-Borlino A, Portolano B, Todaro M, Macciotta NPP, Giaccone P, Pulina G (1997) Lactation Curves of Valle del Belice Dairy Ewes for Yields of Milk, Fat, and Protein Estimated with Test Day Models. *Journal of Dairy Science* **80**, 3023–3029. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76269-6.
- Cappio-Borlino A, Pulina G, Cannas A, Rossi G (1989) The theoretical lactation curve of Sardinian ewes estimated by a gamma-type function. *Zoot Nutr Anim* **15**, 59–63.
- Cappio-Borlino A, Pulina G, Rossi G (1995) A non-linear modification of Wood's equation fitted to lactation curves of Sardinian dairy ewes. *Small Ruminant Research* **18**, 75–79. doi:10.1016/0921-4488(95)00713-U.
- Capuco A, Akers RM (2011) Galactopoiesis, effects of hormones and growth factors. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds JW Fuquay, PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 26–31. (Elsevier Ltd: Oxford)
- Capuco A V, Wood DL, Baldwin R, Mcleod K, Paape MJ (2001) Mammary Cell Number, Proliferation, and Apoptosis During a Bovine Lactation: Relation to Milk Production and Effect of bST 1. *J Dairy Sci* **84**, 2177–2187.
- Carta A, Macciotta N, Cappio-Borlino A, Sanna SR (2001) Modelling phenotypic (co)variances of test day records in dairy ewe. *Livestock Production Science* **69**, 9–16.
- Casado C, Piquer O, Cervera C, Pascual JJ (2006) Modelling the lactation curve of rabbit does : Towards a model including fit suitability and biological interpretation. *Livestock Science* **99**, 39–49. doi:10.1016/j.livprodsci.2005.05.019.
- Castañares N, Colitti M, Nudda A, Stefanon B, Pulina G (2013a) Dynamics of mammary secretory cells in lactating dairy ewes. *Small Ruminant Research* **113**, 251–253. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.003.
- Castañares N, Colitti M, Nudda A, Stefanon B, Pulina G (2013b) Dynamics of mammary secretory cells in lactating dairy ewes. *Small Ruminant Research* **113**, 251–253. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.003.
- Catillo G, Macciotta NPP, Carretta a, Cappio-Borlino a (2002) Effects of age and calving season on lactation curves of milk production traits in Italian water buffaloes. *Journal of dairy science* **85**, 1298–1306. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74194-5.

- Centoducati P, Maggiolino A, Palo P De, Tateo A (2012) Application of Wood's model to lactation curve of Italian Heavy Draft horse mares. *Journal of Dairy Science* **95**, 5770–5775. doi:10.3168/jds.2012-5513.
- Chang Y-M, Rekaya R, Gianola D, Thomas DL (2001a) Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livestock Production Science* **71**, 241–251.
- Chang Y-M, Rekaya R, Gianola D, Thomas DL (2001b) Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livestock Production Science* **71**, 241–251. doi:10.1016/S0301-6226(01)00185-3.
- Charismiadou MA, Bizelis JA, Rogdakis E (2000) Metabolic changes during the perinatal period in dairy sheep in relation to level of nutrition and breed . I . Late pregnancy. *Journal of Animal Physiology and ANimal Nutrition* **84**, 61–72.
- Choumei Y, Kahi AK, Hirooka H (2006) Fit of Wood's function to weekly records of milk yield, total digestible nutrient intake and body weight changes in early lactation of multiparous Holstein cows in Japan. *Livestock Science* **104**, 156–164. doi:10.1016/j.livsci.2006.04.015.
- Colitti M[, Stefanon B[, Wilde J[Apoptotic Cell Death\ bax and bcl1 Expression During Sheep Mammary Gland Involution.
- Collier RJ, Romagnolo D, Baumgard LH (2011) Galactopoiesis, Seasonal effects. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds F J.W., PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 1465–1470. (Elsevier Ltd: Oxford)
- Dag B, Keskin I, Mikailsoy F (2006) Application of different models to the lactation curves of unimproved Awassi ewes in Turkey. *South African Journal of Animal Science* **35**, 238–243. doi:10.4314/sajas.v35i4.3965.
- Dekkers JCM, Hag JH Ten, Weersink A (1998) Economic aspects of persistency of lactation in dairy cattle. *Livestock Production Science* **53**, 237–252.
- Dhanao m s (1981) A note on an alternative form of the lactaion model of Wood. *Animal Production* **32**, 349–351.
- Dickerson G (1970) Efficiency of animal production-molding the biological components. *Journal of Animal Science* **30**, 848–859.
- Dijkstra J, France J, Dhanoa MS, Maas J a, Hanigan MD, Rook a J, Beever DE

- (1997a) A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of dairy science* **80**, 2340–2354. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X.
- Dijkstra J, France J, Dhanoa MS, Maas JA, Hanigan MD, Rook AJ, Beever DE (1997b) A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of dairy science* **80**, 2340–54. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X.
- Dijkstra J, Lopez S, Bannink a., Dhanoa MS, Kebreab E, Odongo NE, Fathi Nasri MH, Behera UK, Hernandez-Ferrer D, France J (2010) Evaluation of a mechanistic lactation model using cow, goat and sheep data. *The Journal of Agricultural Science* **148**, 249. doi:10.1017/S0021859609990578.
- Dimauro C, Atzori AS, Pulina G (2011) Assessing and optimizing the performance of a mechanistic mathematical model of the sheep mammary gland. 'Model. Nutr. Dig. Util. farm Anim.' (Eds D Sauvant, J Van Milgen, P Faverdin, N Friggens) pp. 72–82. (Wageningen Academic Publishers: Wageningen) doi:10.3920/978-90-8686-712-7.
- Dimauro C, Cappio-Borlino A, Macciotta NPP, Pulina G (2007) Use of a computer-aided design to develop a stress simulation model for lactating dairy sheep. *Livestock Science* **106**, 200–209. doi:10.1016/j.livsci.2006.08.005.
- Dimauro C, Catillo G, Bacciu N, Macciotta NPP (2005) Fit of different linear models to the lactation curve of Italian water buffalo. *Italian Journal of Animal Science* **4**, 22–24.
- Dumas A, Dijkstra J, France J (2008) Mathematical modelling in animal nutrition : a centenary review. *Journal of Agricultural Science* **146**, 123–142. doi:10.1017/S0021859608007703.
- Elvira L, Hernandez F, Cuesta P, Cano S, Gonzalez-Martin J-V, Astiz S (2013a) Accurate mathematical models to describe the lactation curve of Lacaune dairy sheep under intensive management. *Animal : an international journal of animal bioscience* **7**, 1044–52. doi:10.1017/S175173111200239X.
- Elvira L, Hernandez F, Cuesta P, Cano S, Gonzalez-Martin JV, Astiz S (2013b) Factors affecting the lactation curves of intensively managed sheep based on a clustering approach. *Journal of Dairy Research* **80**, 439–447.

doi:10.1017/S0022029913000381.

- Fadlelmoula AA, Nikhaila A, 11 AM (2007) Lactation Curve and Persistency of Crossbred Dairy Cows in the Sudan. *Journal of Applied Sciences Research* **3**, 1127–1133.
- Fahmy MH, Shrestha JNB (2011) Sheep breeds. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds JW Fuquay, PF Fox, PLH McSweeney) pp. 325–339. (Elsevier: London) doi:10.1016/B978-0-12-374407-4.00290-9.
- Fernández C, Sánchez A, Garcés C (2002) Modeling the lactation curve for test-day milk yield in Murciano-Granadina goats. *Small Ruminant Research* **46**, 29–41. doi:10.1016/S0921-4488(02)00179-7.
- Ferreira AM, Bislev SL, Bendixen E, Almeida AM (2013) The mammary gland in domestic ruminants: A systems biology perspective. *Journal of Proteomics* **94**, 110–123. doi:10.1016/j.jprot.2013.09.012.
- France J, Kebreab E (2008) Introduction. 'Math. Model Anim. Nutr.' (Eds J France, E Kebreab) pp. 1–11. (CAB International: Oxfordshire)
- Franci O, Pugliese C, Acciaioli A, Parisi G, Lucifero M (1999) Application of two models to the lactation curve of Massese ewes. *Small Ruminant Research* **31**, 91–96. doi:10.1016/S0921-4488(98)00130-8.
- Freund RJ, Littell RC (1991) 'SAS system for regression.' (SAS Institute Inc.: Cary, NC)
- Godfrey RW, Gray ML, Collins JR (1997) Lamb growth and milk production of hair and wool sheep in a semi-arid tropical environment. *Small Ruminant Research* **24**, 77–83.
- Gołębiewski M, Brzozowski P, Gołębiewski Ł (2011) Analysis of lactation curves, milk constituents, somatic cell count and urea in milk of cows by the mathematical model of Wood. *Acta Veterinaria Brno* **80**, 73–80. doi:10.2754/avb201180010073.
- González-García E, Tesniere A, Camous S, Bocquier F, Barillet F, Hassoun P (2015) The effects of parity, litter size, physiological state, and milking frequency on the metabolic profile of Lacaune dairy ewes. *Domestic Animal Endocrinology* **50**, 32–44. doi:10.1016/j.domaniend.2014.07.001.
- Gootwine E (2004) Placental hormones and fetal – placental development. *Animal Reproduction Science* **82**, 551–566. doi:10.1016/j.anireprosci.2004.04.008.

- Gootwine E (2011) Mini review : breeding Awassi and Assaf sheep for diverse management conditions. *Tropical Animal Health Production* **43**, 1289–1296. doi:10.1007/s11250-011-9852-y.
- Gootwine E, Goot H (1994) Lamb and milk production of Awassi and East-Friesian sheep and their crosses under Mediterranean environment. *Small Ruminant Research* **20**, 255–260.
- Gootwine E, Goot H (1996) Lamb and milk production of Awassi and East Friesian sheep and their crosses under a mediterranean environment. *Small Ruminant Research* **20**, 255–260.
- Gootwine E, Pollott GE (2000) Factors affecting milk production in improved Awassi dairy ewes. *Animal Science* **71**, 807–815. <http://www.cabdirect.org/abstracts/20003013245.html;jsessionid=B09F1EBA77AAA79D0A51860E332C96BC>.
- Groenewald PCN, Ferreira A V., van der Merwe HJ, Slippers SC (1996) Application of Bayesian inference in the comparison of lactation curves of Merino ewes. *Animal Science* **62**, 63–69. doi:10.1017/S1357729800014326.
- Grossman M, Koops WJ (2003) Modeling extended lactation curves of dairy cattle: a biological basis for the multiphasic approach. *Journal of dairy science* **86**, 988–98. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73682-0.
- Grzesiak W, B??aszczyk P, Lacroix R (2006) Methods of predicting milk yield in dairy cows-Predictive capabilities of Wood's lactation curve and artificial neural networks (ANNs). *Computers and Electronics in Agriculture* **54**, 69–83. doi:10.1016/j.compag.2006.08.004.
- Haenlein GFW, Wendorff WL (2006) Sheep milk. 'Handb. Milk Non-Bovine Mamm.' (Eds YW Park, GFW Haenlein) pp. 137–194. (Blackwell Publishing: Victoria)
- Hansen LB, Cole JB, Marx GD, Seykora AJ (1999) Productive life and reasons for disposal of Holstein cows selected for large versus small body size. *Journal of dairy science* **82**, 795–801. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75298-7.
- Hansen A V, Strathe AB, Kebreab E, France J, Theil PK (2012) Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach 1. doi:10.2527/jas.2011-4788.

- Harville DA, Henderson CR (1966) Interrelationships Among Age, Body Weight, and Production Traits During First Lactations of Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* **49**, 1254–1261. doi:10.3168/jds.S0022-0302(66)88065-7.
- Hohenboken WD, Dudley A, Moody DE (1992) A comparison among equations to characterize lactation curves in beef cows. *Animal Production* **55**, 23–28. doi:10.1017/S0003356100037223.
- Hunter TE, Suster D, DiGiacomo K, Cummins LJ, Dunshea FR, Egan AR, Leury BJ (2015) Milk production and body composition of single-bearing East Friesian×Romney and Border Leicester×Merino ewes. *Small Ruminant Research* **131**, 123–129. doi:10.1016/j.smallrumres.2015.08.006.
- Hurley WL, Looor JJ (2011) Growth, development and involution. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds W Fuquay J, PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 1689–1697. (Elsevier: London)
- ICAR (2016) Recording Guidelines. *International committee for animal Recording* 59–75.
- Ingvartsen KL, Friggens NC, Faverdin P (1999) Food intake regulation in late pregnancy and early lactation. *Metabolic stress in dairy cows, occasional publication* **24**, 37–54.
- Jenkinson CMC (2003) The pattern and regulation of mammary gland development during fetal life in sheep. Massey University.
- Keskin I, Dağ B (2006) Comparison of different mathematical models for describing the complete lactation of Akkaraman ewes in Turkey. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **19**, 1551–1555.
- Knight CH, Peaker M, Wilde CJ (1998) Local control of mamary development and function. *Reviews of Reproduction* **3**, 104–112.
- Knight CH, Wilde CJ (1993) Mammary cell changes during pregnancy and lactation. *Livestock Production Science* **35**, 3–19. doi:10.1016/0301-6226(93)90178-K.
- Korkmaz M, Üçkardeş F, Kaygisiz A (2011) Comparison of Wood, Gaines, parabolic, Hayashi, Dhanno and polynomial models for lactation season curve of Simmental cows. *J Anim Plant Sci* **21**, 448–458.
- Kremer R, Barbato G, Rista L, Rosés L, Perdigón F (2010) Reproduction rate, milk and wool production of Corriedale and East Friesian×Corriedale F1 ewes grazing on

- natural pastures. *Small Ruminant Research* **90**, 27–33.
doi:10.1016/j.smallrumres.2009.12.009.
- Landete-Castillejos T, Gallego L (2000) Technical note: The ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. *Journal of Animal Science* **78**, 3010–3013.
- Laporte-Broux B, Duvaux-Ponter C, Roussel S, Promp J, Chavatte-Palmer P, Ponter AA (2011) Restricted feeding of goats during the last third of gestation modifies both metabolic parameters and behaviour. *Livestock Science* **138**, 74–88.
doi:10.1016/j.livsci.2010.12.008.
- Ledder G (2013) Mathematical Modeling. 'Math. Life Sci. Calc. Model. Probab. Dyn. Syst.' (Ed G Ledder) pp. 83–143. (Springer) doi:10.1007/978-1-4614-7276-6.
- León JM, Macciotta NPP, Gama LT, Barba C, Delgado J V (2012) Characterization of the lactation curve in Murciano-Granadina dairy goats. *Small Ruminant Research* **107**, 76–84. doi:10.1016/j.smallrumres.2012.05.012.
- Lérias JR, Hernández-Castellano LE, Suárez-Trujillo A, Castro N, Poulis A, Almeida AM (2014a) The mammary gland in small ruminants: major morphological and functional events underlying milk production – a review. *Journal of Dairy Research* **81**, 304–318. doi:10.1017/S0022029914000235.
- Lérias JR, Hernández-Castellano LE, Suárez-Trujillo A, Castro N, Poulis A, Almeida AM (2014b) The mammary gland in small ruminants: major morphological and functional events underlying milk production--a review. *The Journal of dairy research* **81**, 304–18. doi:10.1017/S0022029914000235.
- van der Linden DS, Kenyon PR, Blair HT, Lopez-Villalobos N, Jenkinson CMC, Peterson SW, Mackenzie DDS (2009a) Effects of ewe size and nutrition on fetal mammary gland development and lactational performance of offspring at their first lactation. *Journal of animal science* **87**, 3944–54. doi:10.2527/jas.2009-2125.
- van der Linden DS, Kenyon PR, Blair HT, Lopez-Villalobos N, Jenkinson CMC, Peterson SW, Mackenzie DDS (2009b) Effects of ewe size and nutrition on fetal mammary gland development and lactational performance of offspring at their first lactation. *Journal of animal science* **87**, 3944–54. doi:10.2527/jas.2009-2125.
- Lombaard C (2006) Hierarchical Bayesian modelling for the analysis of the lactation of

- dairy animals. *Thesis*. <http://etd.uovs.ac.za/ETD-db/theses/available/etd-11032006-105824/unrestricted/LombaardCS.pdf>.
- Louca A, Mavrogenis A, Lawlor MJ (1974) Effects of plane of nutrition in late pregnancy on lamb birth weight and milk yield in early lactation of Chios and Awassi sheep. *Animal Production* **19**, 341–349. doi:10.1017/S0003356100022911.
- Macciotta NPP, Cappio-Borlino A, Pulina G (2004) Growth and lactation curves. 'Genet. Anal. Complex Trait. Using SAS'. (Ed AM Saxton) pp. 97–146. (SAS Publishing: North Carolina)
- Macciotta NPP, Dimauro C, Rassa SPG, Steri R, Pulina G (2011) The mathematical description of lactation curves in dairy cattle. *Ital J Anim Sci* **10**, 51–213. doi:10.4081/ijas.2011.e51.
- Macciotta NPP, Vicario D, Cappio-Borlino a (2005) Detection of different shapes of lactation curve for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models. *Journal of dairy science* **88**, 1178–91. doi:10.3168/jds.S0022-0302(05)72784-3.
- Macias H, Hinck L (2012) Mammary gland development. *Wiley interdisciplinary reviews Developmental biology* **1**, 533–57. doi:10.1002/wdev.35.
- Manalu W, Sumaryadi MY (1998) Mammary gland indices at the end of lactation in Javanese ewes with different litter sizes. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **11**, 648–654.
- Manalu W, Sumaryadi M., Sudjatmogo , Satyaningtjas A. (1998) Effect of superovulation on maternal serum progesterone concentration, uterine and fetal weights at weeks 7 and 15 of pregnancy in Javanese Thin-Tail ewes. *Small Ruminant Research* **30**, 171–176. doi:10.1016/S0921-4488(98)00121-7.
- Manalu W, Sumaryadi MY, Sudjatmogo, Satyaningtjas AS (2000) Effect of Superovulation Prior to Mating on Milk Production Performance During Lactation in Ewes. *Journal of Dairy Science* **83**, 477–483. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)74906-X.
- Marion G, Lawson D (2008) An Introduction to Mathematical Modelling List of Figures. https://people.maths.bris.ac.uk/~madjl/course_text.pdf.
- Mavrogenis AP, Hancock J, Louca A (1980) The effect of body-weight changes during pregnancy and lactation on the performance of three breeds of sheep. *The Journal*

- of Agricultural Science* **95**, 357–363. doi:10.1017/S0021859600039381.
- Mavrogenis AP, Papachristoforou C (2000) Genetic and phenotypic relationships between milk production and body weight in Chios sheep and Damascus goats. *Livestock Production Science* **67**, 81–87. doi:10.1016/S0301-6226(00)00187-1.
- Mayer E, Liebich HG, Arbitman R, Hagemeister H, Dirksen G (1986) Nutritionally-induced changes in the rumenal papillae and in their capacity to absorb short chain fatty acids in high producing dairy cows. In '14th World Congr. Dis. Cattle', 806–817
- Mckusick BC, Thomas DL, Berger YM (2001) Effect of Weaning System on Commercial Milk Production and Lamb Growth of East Friesian Dairy Sheep. *Journal of dairy Science* **84**, 1660–1668.
- McManaman JL, Neville MC (2003) Mammary physiology and milk secretion. *Advanced Drug Delivery Reviews* **55**, 629–641. doi:10.1016/S0169-409X(03)00033-4.
- McNamara JP (2004) Research, improvement and application of mechanistic, biochemical, dynamic models of metabolism in lactating dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology* **112**, 155–176. doi:10.1016/j.anifeedsci.2003.10.010.
- Mellor DJ, Murray L (1985) Effects of maternal nutrition on udder development during late pregnancy and on colostrum production in Scottish Blackface ewes with twin lambs. *Research in veterinary science* **39**, 230–4.
<http://europepmc.org/abstract/med/4070789>.
- Meraï A, Gengler N, Hammami H, Rekik M, Bastin C (2014) Non-genetic sources of variation of milk production and reproduction and interactions between both classes of traits in Sicilo-Sarde dairy sheep. *Animal* **8**, 1534–1539.
doi:10.1017/S1751731114001347.
- Mioč B, Prpić Z, Antunac N, Antunović Z, Samaržija D, Vnučec I, Pavić V (2009) Milk yield and quality of Cres sheep and their crosses with Awassi and East Friesian sheep. *Mljekarstvo* **59**, 217–224.
- Molenaar AJ, Davis SR, Wilkins RJ (1992) Expression of a -Lactalbumin , a- S 1- Casein , and Lact oferrin Genes Is Heterogeneous in Sheep and Cattle Mammary Tissue. *Comparative and General Pharmacology*.
- Neal HDSC, Thornley JHM (1983) The lactation curve in cattle: a mathematical model of the mammary gland. *Journal of Agricultural Science* **101**, 389–400.

- Neal HDSC, Thornley JHM, Nelder JA, WOOD PDP (1983) The lactation curve in cattle: a mathematical model of the mammary gland. *The Journal of Agricultural Science* **101**, 389. doi:10.1017/S0021859600037710.
- Neville TL, Meyer AM, Reyaz A, Borowicz PB, Redmer DA, Reynolds LP, Caton JS, Vonnahme KA (2013) Mammary gland growth and vascularity at parturition and during lactation in primiparous ewes fed differing levels of selenium and nutritional plane during gestation. *Journal of animal science and biotechnology* **4**, 1–6. doi:10.1186/2049-1891-4-6.
- Nezamidoust M, Kominakis A, Safari A (2013) Use of Wood's model to analyze the effects of milking methods on lactation curve in sheep. *Small Ruminant Research* **113**, 195–204. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.019.
- Nitu C, Burlacu R, David L (2010) Principles of Mathematical Modeling Applied to Animal Science. *Animal Science and Biotechnologies* **43**, 362–367.
- Nørgaard JV, Nielsen MO, Theil PK, Sørensen MT, Safayi S, Sejrsen K (2008) Development of mammary glands of fat sheep submitted to restricted feeding during late pregnancy. *Small Ruminant Research* **76**, 155–165. doi:10.1016/j.smallrumres.2007.11.001.
- Noronha D De, Vieira F, Pereira JC, Fonseca F, Campos OF De, Braga JL, Martuscello JA (2010) Revista Brasileira de Zootecnia Selection of models of lactation curves to use in milk production simulation Seleção de funções de curvas de lactação para uso em modelos de simulação de sistemas de produção de leite. *Revista Brasileira de Zootecnia* **39**, 891–902.
- Ochoa-Cordero MA, Torres-Hernández G, Ochoa-Alfaro AE, Vega-Roque L, Mandeville PB (2002) Milk yield and composition of Rambouillet ewes under intensive management. *Small Ruminant Research* **43**, 269–274. doi:10.1016/S0921-4488(02)00019-6.
- Olori VE, Brotherstone S, Hill WG, McGuirk BJ (1999) Fit of standard models of the lactation curve to weekly records of milk production of cows in a single herd. *Livestock Production Science* **58**, 55–63. doi:10.1016/S0301-6226(98)00194-8.
- Paten A (2014) Maternal nutritional programming in the sheep : Effects on post - - - natal growth , mammogenesis and lactation in adult - - - ewe offspring. Massey

University.

- Paten AM, Duncan EJ, Pain SJ, Peterson SW, Kenyon PR, Blair HT, Dearden PK (2015) Functional development of the adult ovine mammary gland--insights from gene expression profiling. *BMC genomics* **16**, 748. doi:10.1186/s12864-015-1947-9.
- Paten AM, Pain SJ, Peterson SW, Blair HT, Kenyon PR, Dearden PK, Duncan EJ (2014) Identification of reference genes for RT-qPCR in ovine mammary tissue during late pregnancy and lactation and in response to maternal nutritional programming. *Physiological genomics* **46**, 560–70. doi:10.1152/physiolgenomics.00030.2014.
- Peralta-Lailson M, Trejo-González AÁ, Pedraza-Villagómez P, Berruecos-Villalobos JM, Vasquez CG (2005) Factors affecting milk yield and lactation curve fitting in the creole sheep of Chiapas-Mexico. *Small Ruminant Research* **58**, 265–273. doi:10.1016/j.smallrumres.2004.11.005.
- Pollott G. (2000b) A Biological Approach to Lactation Curve Analysis for Milk Yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2448–2458. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8.
- Pollott GE (2000a) A Biological Approach to Lactation Curve Analysis for Milk Yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2448–2458. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8.
- Pollott GE, Gootwine E (2000) Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *Animal Science* **7100**, 197–207.
- Pollott GE, Gootwine E (2004) Reproductive performance and milk production of Assaf sheep in an intensive management system. *Journal of dairy science* **87**, 3690–703. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73508-0.
- Portolano B, Spatafora F, Bono G, Margiotta S, Todaro M, Ortoleva V, Leto G (1996) Application of the Wood model to lactation curves of Comisana sheep. *Small Ruminant Research* **24**, 7–13. doi:10.1016/0921-4488(95)00842-X.
- Prasad S (2003) Modeling of lactation curves of dairy animals. *Journal of Applied Animal Research* **24**, 79–84.
- Pulina G, Nudda A (2004) Mathematical modelling of milk production patterns in dairy sheep. 'Dairy Sheep Nutr.' (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 13–30. (CABI Publishing: Oxfordshire)

- Pulina G, Nudda A, Pietro N, Macciotta P, Battacone G, Pier S, Rassu G, Cannas A (2007) Non-nutritional factors affecting lactation persistency in dairy ewes: a review. *ITALJANIMSCI* **6**, 115–141.
- Quinn N, Killen L, Buckley F (2005) Empirical algebraic modelling of lactation curves using Irish data Introduction Empirical algebraic modelling of lactation curves offers a summary of longitudinal milk. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* **44**, 0–0.
- Ratray P V., Garrett WN, East NE, Hinman N (1974) Growth, Development and Composition of the Ovine Conceptus and Mammary Gland During Pregnancy. *Journal of Animal Science* **38**, 613. doi:10.2527/jas1974.383613x.
- Rezaei R, Wu Z, Hou Y, Bazer FW, Wu G (2016) Amino acids and mammary gland development: nutritional implications for milk production and neonatal growth. *Journal of Animal Science & Biotechnology* **7**, 1–22. <http://10.0.4.162/s40104-016-0078-8>.
- Rota AM, Gonzalo C, Rodriguez PL, Rojas AI, Martín L, Tovar JJ (1993) Effects of stage of lactation and parity on somatic cell counts in milk of Verata goats and algebraic models of their lactation curves. *Small Ruminant Research* **12**, 211–219. doi:10.1016/0921-4488(93)90085-V.
- Rowson AR, Daniels KM, Ellis SE, Hovey RC (2012) Growth and development of the mammary glands of livestock: A veritable barnyard of opportunities. *Seminars in Cell and Developmental Biology* **23**, 557–566. doi:10.1016/j.semcdb.2012.03.018.
- Ruiz R, Oregui LM, Herrero M (2000) Comparison of models for describing the lactation curve of latxa sheep and an analysis of factors affecting milk yield. *Journal of dairy science* **83**, 2709–19. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75165-4.
- Ruvuna F, Kogi JK, Taylor JF, Mkuu SM (1995) Lactation curves among crosses of Galla and East African with Toggenburg and Anglo Nubian goats. *Small Ruminant Research* **16**, 1–6. doi:10.1016/0921-4488(94)00043-7.
- Sahlu T, Hart SP, Le-Trong T, Jia Z, Dawson L, Gipson T, Teh TH (1995) Influence of prepartum protein and energy concentrations for dairy goats during pregnancy and early lactation. *Journal of Dairy Science* **78**, 378–387.
- Sakul H, Boylan WJ (1992) Evaluation of U.S. sheep breeds for milk production and

- milk composition. *Small Ruminant Research* **7**, 195–201. doi:10.1016/0921-4488(92)90224-R.
- Santos AS, Silvestre AM (2008) A Study of Lusitano Mare Lactation Curve with Wood's Model. *Journal of Dairy Science* **91**, 760–766. doi:10.3168/jds.2007-0057.
- Sargent FD, Lytton VH, Wall OG (1968) Test Interval Method of Calculating Dairy Herd Improvement Association Records. *Journal of Dairy Science*, **51**, 170–179.
- SAS Institute (2002) 'Statistical analysis systems user's guide.'. (SAS: Cary, NC).
- Shaat I (2014) Application of the Wood lactation curve in analysing the variation of daily milk yield in the Zaraibi goats in Egypt. *Small Ruminant Research* **117**, 25–33.
- Shanks R, PJ B, AE F, FN D (1981) Genetic aspects of lactation curves. *Journal of Dairy Science* **64**, 1852–1860.
- Sieber M, Freeman AE, Kelley DH (1988) Relationships between Body Measurements, Body Weight, and Productivity in Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **71**, 3437–3445. doi:10.3168/jds.S0022-0302(88)79949-X.
- Sikka LC (1950) A study of lactation as affected by heredity and environment. *Journal of Dairy Research* **17**, 231.
- Silvestre AM, Martins AM, Santos VA, Ginja MM, Colaço JA (2009) Lactation curves for milk , fat and protein in dairy cows : A full approach. *Livestock Science* **122**, 308–313. doi:10.1016/j.livsci.2008.09.017.
- Steri R (2009) The mathematical description of the lactation curve of Ruminants: issues and perspectives. University of Sassari.
- Strucken EM, Laurenson YCSM, Brockmann GA (2015) Go with the flow-biology and genetics of the lactation cycle. *Frontiers in Genetics* **6**,. doi:10.3389/fgene.2015.00118.
- Svennersten-Sjaunja K, Olsson K (2005) Endocrinology of milk production. *Domestic Animal Endocrinology* **29**, 241–258. doi:10.1016/j.domaniend.2005.03.006.
- Swanson TJ, Hammer CJ, Luther JS, Carlson DB, Taylor JB, Redmer DA, Neville TL, Reed JJ, Reynolds LP, Caton JS, Vonnahme KA (2008) Effects of gestational plane of nutrition and selenium supplementation on mammary development and colostrum quality in pregnant ewe lambs. *Journal of animal science* **86**, 2415–23. doi:10.2527/jas.2008-0996.

- Tedeschi LO, Fox DG, Sainz RD, Barioni LG, Madeiros SR, Celso B (2005) Mathematical models in ruminant nutrition. *Science Agricola* **62**, 76–91.
- Togashi K, Lin CY (2003) Modifying the lactation curve to improve lactation milk and persistency. *Journal of Dairy Science* **86**, 1487–1493. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73734-5.
- Togashi K, Lin CY (2006) Selection for milk production and persistency using eigenvectors of the random regression coefficient matrix. *Journal of dairy science* **89**, 4866–4873. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72535-8.
- Tucker HA (2000) Hormones, Mammary Growth, and Lactation: a 41-Year Perspective. *Journal of Dairy Science* **83**, 874–884.
http://works.bepress.com/carolyn_ellis/49/%5Cnpapers2://publication/uuid/79EFC178-B759-44AE-B36E-3D2A6FA1ED65.
- Tufarelli V, Dario M, Laudadio V (2009) Forage to concentrate ratio in Jonica breed goats : influence on lactation curve and milk composition. *Journal of Applied Animal Research* **76**, 124–128. doi:10.1017/S0022029908003841.
- Ugwa KA (2012) Mathematical Modeling As A Tool For Sustainable Development In Nigeria. *Internatinal Journal of Academic Research in Progressive Education and Development* **1**, 251–258.
- Val-Arreola D, Kebreab E, Dijkstra J, France J (2004) Study of the lactation curve in dairy cattle on farms in central Mexico. *Journal of dairy science* **87**, 3789–3799. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73518-3.
- Val-Arreola D, Kebreab E, France J (2006) Modeling small-scale dairy farms in central Mexico using multi-criteria programming. *Journal of dairy science* **89**, 1662–72. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72233-0.
- Varona L, Moreno C, Cortes LAG, Altarriba J (1998) Bayesian Analysis of Wood ' s Lactation Curve for Spanish Dairy Cows. *J Dairy Sci* **81**, 1469–1478. doi:10.3168/jds.S0022-0302(98)75711-X.
- Veerkamp RF (1998) Selection for economic efficiency of dairy cattle using information on live weight and feed intake: a review. *Journal of dairy science* **81**, 1109–1119. doi:10.3168/jds.S0022-0302(98)75673-5.
- Veerkamp RF, Koenen EPC (1999) Genetics of food intake, live weight, condition score

- and energy balance. *Metabolic stress in dairy cows, occasional publication* **24**, 63–73.
- Veerkamp RF, Thompson R (1999) A covariance function for feed intake, live weight, and milk yield estimated using a random regression model. *Journal of dairy science* **82**, 1565–73. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75384-1.
- Vetharanim I, Davis SR, Upsdell M, Kolver ES, Pleasants AB (2003a) Modeling the effect of energy status on mammary gland growth and lactation. *Journal of dairy science* **86**, 3148–56. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73916-2.
- Vetharanim I, Davis SR, Upsdell M, Kolver ES, Pleasants AB (2003b) Modeling the Effect of Energy Status on Mammary Gland Growth and Lactation. *J Dairy Sci* **86**, 3148–3156.
- Wahome RG, Carles AB, Schwartz HJ (1994) An analysis of the variation of the lactation curve of Small East African goats. *Small Ruminant Research* **15**, 1–7.
- Wall E, Mcfadden T (2012) Regulation of mammary development as it relates to changes in milk production efficiency. 'Milk Prod. up-to-date Overv. Anim. Nutr. Manag. Heal.' (Ed Narongsak Chaiyabutr) pp. 257–288. (Croatia)
- Wei T, Viliam S (2016) corrplot: Visualization of a Correlation Matrix. <http://cran.r-project.org/package=corrplot>.
- Wilde CJ, Quarrie LH, Tonner E, Flint DJ, Peaker M (1997) Mammary apoptosis. *Livestock Production Science* **50**, 29–37. doi:10.1016/S0301-6226(97)00070-5.
- Wilmink JBM (1987) Adjustment of test day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. *Livestock Production Science* **16**, 335–348.
- Wood PDP (1967) Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* **216**, 164–165.
- Wood PDP (1968) Factors affecting persistency of lactation in cattle. *Nature* **218**, 894.
- Yang X-S (2013) 'Mathematical modeling with multidisciplinary applications.' (Wiley: New Jersey)
- Zobel G, Weary DM, Leslie KE, Von Keyserlingk MAG (2015) Invited review: Cessation of lactation: Effects on animal welfare. *Journal of dairy science* **98**, 8263–8277.

EFEECTO DEL CRUZAMIENTO SOBRE LA PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LECHE DE OVEJA BAJO UN MANEJO ORGÁNICO

Artículo publicado: **Ángeles-Hernández, J.C.**, Castelan O.A.O., Ramirez-Perez A.H., Ronquillo, M.G. 2014. Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Animal Production Science*. 54, 1641–1645.

Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management

Juan C. Angeles Hernandez^A, Octavio A. Castelan Ortega^B, Aurora H. Ramirez Perez^A and Manuel González Ronquillo^{B,C,D}

^APrograma de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510. México, D.F.

^BDepartamento de Nutrición Animal. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100, 50000, Toluca, México.

^CFacultad de Ciencias, Escuela de Ciencias y Tecnología en Recursos Agrícolas y Acuícolas, Universidad de Magallanes, Manuel Bulnes 01855, Punta Arenas 6210427, Décima Segunda Región de Magallanes y La Antártica Chilena, Chile.

^DCorresponding author. Email: mrg@uaemex.mx

Abstract. The crossbreeding of local sheep breeds with dairy breeds is an option to improve dairy production parameters in organic sheep dairy systems. Weekly milk yield (WMY) was recorded and individual samples of milk for chemical analysis were taken during 17 weeks from 45 dairy ewes of the following three genotypes: 15 East Friesian (EF), 15 EF × Suffolk (EF × SF) and 15 EF × Pelibuey (EF × PL) under organic management. For analysis of the lactation curve the Wood gamma model was used. The effect of genotype on the WMY was analysed using repeated-measures. The comparison of the least square means among genotypes for total milk yield (TMY), daily milk yield, protein content, protein yield, fat content, fat yield, non-fat solids concentration, non-fat solids yield, total solids yield and acidity was analysed using a general linear model. The genetic group influenced only in the ascent phase of the lactation curve, with values of the Parameter *b* of model Wood higher in EF ($P = 0.01$). There were no differences ($P > 0.05$) between genotypes in relation to the WMY, TMY, protein content and acidity; however, the effects of week of lactation trial and the interaction of genotype and week of lactation trial on WMY were significant ($P < 0.05$). The values of daily milk yield, fat yield, protein yield and total solids yield were higher ($P < 0.005$) in EF and EF × SF than EF × PL. Fat content was higher in EF × PL. EF × SF had similar values of TMY than EF and better chemical composition, which places this genotype as an option of crossbreeding in dairy sheep systems under organic management with similar agro climatic characteristics to the present study.

Additional keywords: ewe milk production, milk yields, organic farming.

Received 12 March 2014, accepted 17 June 2014, published online 19 August 2014

Introduction

The milk production performance of dairy sheep varies according to several factors, such as animal, genetics, feed, age of sheep, stage of lactation and environment. The breed or genotype of sheep is one of the main factors that affects milk yields and chemical composition and this is important because the quality of sheep milk is related to its capability to be transformed into dairy products (Bencini and Pulina 1997).

The improvement in milk production and their physicochemical characteristics can be carried out using tools such as crossbreeding and selection programs of purebreds. Crossbreeding of local or native breeds with specialised dairy breeds is a viable option to improve dairy production parameters and promoting adaptation to feed sources, climate, management and market conditions of organic milk production systems,

through heterosis and combined attributes of different breeds (Boyazoglu *et al.* 1979).

Organic farms are integrated systems designed to generate ecological and social stability and economic sustainability. To achieve these goals, it is essential there is the correct selection of sheep genotypes to ensure their welfare and animal health, the selection of suitable genotypes and promotion of human health (Stolze and Lampkin 2009). There is no specific legislation in relation to the genotypes to be used in organic and conventional systems, but it is recommended animals used are able to adapt to local environmental conditions; thus the use of native and local breeds is preferred. The aim of this study was to evaluate the effect of crossing local sheep breeds (Suffolk and Pelibuey) with a specialised dairy sheep breed (East Friesian) on milk production, characteristics of the

lactation curve and chemical composition of milk in an organic dairy sheep system.

Materials and methods

Animals and site of the study

The Institutional Committee for Care and Use of Experimental Animals (CICUA), approved all procedures of the National Autonomous University of Mexico. During 17 weeks (mean 135 days) weekly milk yields (WMY) were recorded and individual samples were collected for analysis of chemical composition of milk from 15 East Friesian (EF), 15 EF × Suffolk (EF × SF) and 15 EF × Pelibuey (EF × PL) ewes of an organic flock dedicated to milk production raised in Queretaro, Mexico (20°31'N, 100°24'W) with mean annual temperature of 17.3°C and average annual rainfall of 485 mm (SMN 2010). Oestrus was synchronised and lambing occurred between 5 and 15 January 2012. The weaning of lambs and first WMY was performed at 13 ± 2 days postpartum.

Ewes were managed under a strip grazing system on mixed swards of rye grass (*Lolium multiflorum*), rhodes grass (*Chloris gayana*) and alfalfa (*Medicago sativa*), supplemented at milking with sorghum hay and corn grain. The totality of feeds provided to dairy ewes was organically produced. Ewes were milked mechanically once daily (1200 hours).

Chemical composition of milk and feeds offered to animals

Individual weekly milk samples were collected in 20-mL plastic tubes of and analysed immediately using an Ekomilk-Standard Milk Analyzer (BULTECH 2000 Ltd, Stara Zagora, Bulgaria) with which the following were determined: protein content, fat content and non-fat solids content. The acidity was measure by direct titration technique with 0.1 N NaOH (AOAC 1997). Forage samples and supplement was analysed monthly for dry matter (DM), ash and N according to AOAC (1997). Neutral detergent fibre (NDF) (Van Soest *et al.* 1991) and acid detergent fibre (ADF) (AOAC 1997) analyses were performed using an ANKOM200 Fibre Analyzer Unit (ANKOM Technology Corporation, Macedon, NY, USA). NDF was assayed with use of α amylase. Both NDF and ADF are expressed without residual ash.

Calculations and statistical analyses

The observed total milk yield (TMY) per lactation was calculated using Fleischmann's method (Ruiz *et al.* 2000). The incomplete gamma function developed by Wood (WD) (Wood 1967) was used to estimate lactation curve parameters from weekly milk records of EF, EF × SF and EF × PL. The WD model is expressed as:

$$Y = at^b e^{-ct},$$

where a , b and c are the parameters that describe the shape of the curve. The Parameter a is the production of milk at the beginning of lactation; b and c are the parameters of inclining and declining slopes of lactation curve before and after the lactation peak, which were estimated individually for each lactation through the iterative non-linear curve fitting procedure of regression analysis (NLINE, SAS Institute 2002)

by Marquardt computational strategy. These parameters were used to estimate the total milk yield (TMYe), peak yield (PY) and time at peak yield (PT).

The effect of genotype on the WMY production was analysed using repeated-measures analysis (PROC MIXED, SAS Institute 2002) using the following model:

$$WMY_{ijt} = \mu + Ge_i + D_{j(i)} + WL_t + (GeWL)_{it} + e_{ijt},$$

where WMY_{ijt} is milk production measured at time t , μ is the overall mean effect, Ge_i is the fixed effect of genotype, $D_{j(i)}$ is the random effect of the j th sheep within the i th genotype, WL_t is the fixed t th time effect when the measurement was taken (week of lactation trial), $(GeWL)_{it}$ is the fixed effect of the interaction between genotype and time and e_{ijt} is the random error.

Comparison of least square means between genetic groups of the TMY, fat-corrected TMY (cTMY, kg), daily milk yield (DMY, kg/day), protein concentration (PC, g/kg) and fat concentration (FC, g/Kg), protein yield (PY, g/day), fat yield (FY, g/day), non-fat solids concentration (g/kg), non-fat solids yield (g/day), total solids yield (TSY, g/day) and acidity was analysed using the linear model (PROC GLM, SAS Institute 2002).

Results

Chemical composition of milk and feeds offered to animals

The general means of the chemical composition (g/kg DM) of the ingredients were as follows: pasture: 849 organic matter (OM), 191 crude protein (CP), 440 NDF, 203 ADF; sorghum hay, 872 OM, 53 CP, 540 NDF, 350 ADF; and corn grain: 905 OM, 103 CP, 248 NDF and 47 ADF.

Nutritional management in organic systems are based mainly on grazing forage intake; however, this management makes it susceptible to the availability of forage through the year. In the present study, there was a decrease in DM forage availability in the period between two to five lactation weeks, without affecting the nutritional value, which is reflected in the milk yield and chemical composition in this period (Fig. 1).

The interaction between WL and Ge was significant for the WMY ($P = 0.0046$); also there were differences ($P = 0.001$) in relation to the lactation period for the WMY (Fig. 1). Milk production was similar in the three genetic groups at early lactation, but in the fourth week of lactation the EF ewes decreased milk yields, which coincided with the lower availability of DM of the grassland.

The EF ewes showed higher milk yields than did the other genetic groups. In the second half of lactation between Weeks 10 and 17, the EF and EF × SF ewes showed similar milk yields. The lower yield production throughout the lactation was observed in EF × PL; however, this was significantly ($P = 0.0046$) lower than for the other genetic groups from Week 10 until the end of the lactation.

The average of DMY and cDMY (Table 1) showed differences ($P = 0.001$ and $P = 0.04$, respectively) in relation to the genetic group, being higher in EF and EF × SF than EF × PL. The least square means and significance tests in relation to the effect of genetic group on milk composition is shown in Table 1. FC in EF × PL was higher ($P < 0.01$) than EF and EF × SF;

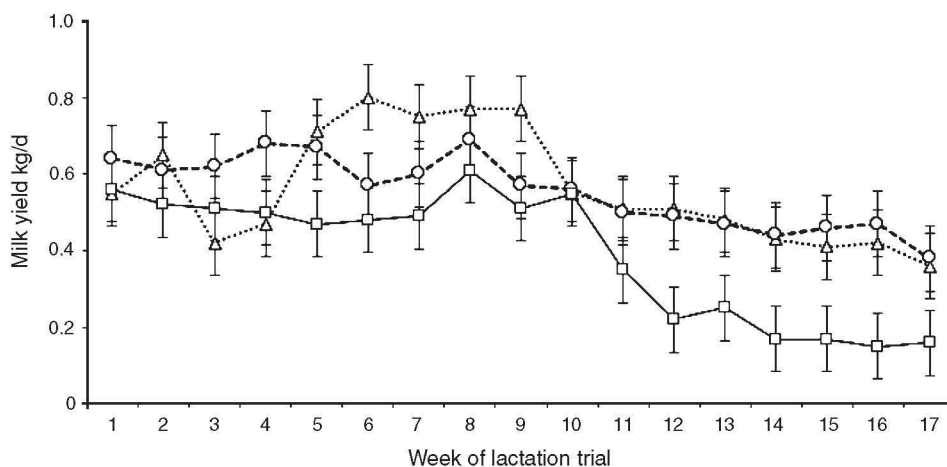


Fig. 1. Effect of East Friesian (EF, △), EF x Suffolk (○), and EF x Pelibuey (□) on weekly milk yields of sheep under organic management. Weekly milk yields were affected by week of lactation ($P = 0.001$) and interaction genotype x week of lactation ($P = 0.0046$).

Table 1. Milk yield and milk composition of East Friesian (EF), EF x Suffolk (EF x SF), EF x Pelibuey (EF x PL) sheep under organic management

cDMY, 6.5% fat-corrected daily milk yield. Values within rows followed by different letters are significantly different ($P = 0.05$)

| Item | EF | EF x SF | EF x PL | P-value | s.e. |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|------|
| Milk yield (kg/lactation) | 76.12 | 75.83 | 59.81 | 0.290 | 7.14 |
| Daily milk yield (DMY, kg/day) | 0.56a | 0.55a | 0.39b | 0.001 | 0.03 |
| Fat content (g/kg) | 66.38b | 69.84b | 80.30a | 0.001 | 1.83 |
| Fat yield (g/day) | 37.17a | 38.41a | 31.31b | 0.001 | 1.82 |
| Protein content (g/kg) | 51.42 | 52.91 | 53.38 | 0.26 | 0.87 |
| Protein yield (g/day) | 28.79a | 29.10a | 20.81b | 0.001 | 1.74 |
| Non-fat solids content (g/kg) | 102.18b | 104.41a | 106.91a | 0.05 | 1.28 |
| Non-fat solids yield (g/day) | 57.22a | 57.42a | 41.69b | 0.001 | 3.46 |
| Total solids yield (g/day) | 94.39a | 95.83a | 73.0b | 0.001 | 5.26 |
| cDMY (kg/day) | 0.56a | 0.54a | 0.40b | 0.005 | 0.04 |
| Acidity (°D) | 20.84 | 21.51 | 20.30 | 0.21 | 0.49 |

however, both genetic groups had higher FY (18.7% and 22.7% respectively), compared with EF x PL.

There were no differences ($P = 0.257$) in PC among the genetic groups, while EF x PL showed lower PY ($P = 0.001$) than did EF (38%) and EF x SF (39%); EF x SF ewes showed the highest TSY, similarly to EF ewes. Moreover, although FC and PC were higher in EF x PL, their lower milk yields determined that TSY in this group was the lowest ($P = 0.001$).

Lactation curves

The differences among genetic groups in relation to their lactation curves occurred in the Parameter *b* of the WD gamma model, showing the highest values in EF (Table 2). The EF x PL had the lowest values of the WD gamma model parameters and TMYe, PT and PY; also their milk yields decreased significantly after

Table 2. Mean parameter estimates of Wood gamma model and characteristics of lactation curves, according of the genetic group, East Friesian (EF), EF x Suffolk (EF x SF), EF x Pelibuey (EF x PL) TMYe, total milk yield estimated at 130 days of milk lactation. PY, peak yield. PT, peak time. Values within columns followed by different letters are significantly different (at $P = 0.01$)

| Item | Parameter | | | TMYe (kg) | PY (kg) | PT (days) |
|---------|-----------|-------|-------|-----------|---------|-----------|
| | a | b | c | | | |
| EF | 0.40 | 2.40b | 0.049 | 71.0 | 0.81 | 56 |
| EF x SF | 0.39 | 1.07a | 0.026 | 70.5 | 0.77 | 44 |
| EF x PL | 0.13 | 0.65a | 0.012 | 51.8 | 0.64 | 30 |
| P-value | 0.36 | 0.01 | 0.20 | 0.29 | 0.45 | 0.54 |
| s.e. | 0.14 | 0.56 | 0.01 | 7.14 | 0.125 | 13.66 |

Week 10 of lactation (Fig. 1). EF and EF x SF had similar values for Parameter *a*, TMYe and PY.

Discussion

Milk yield production

The appropriate analysis of the effect of genetic group on milk production and chemical composition of milk carried out in organic systems, allows defining characteristic patterns of dairy sheep production of each genotype studied at the farm level.

EF ewes showed increased susceptibility to the decrease in the availability of DM, which was reflected in lower yields between the second and fifth weeks of lactation, in agreement with Boyazoglu *et al.* (1979) who indicated that EF ewes have high nutritional requirements; these are not always satisfied in grazing systems, which affects milk production. Furthermore, specialised genotypes with high milk yields are more affected by the conditions of management mainly related to nutritional management (Padel 2000) in organic systems.

Studies in conventional systems indicate an improvement in milk yield when using EF crosses with local native sheep breeds (Boyazoglu *et al.* 1979); in the present study it was not possible

to compare the F1 animals with animals of pure local breeds because these animals are not typically subjected to milking management, due to their low yields and difficulties in management (Castellanos and Valencia 1982).

The EF ewes showed lower values of milk production than those reported by several authors in their region of origin. This situation is likely related to the specific management characteristics of organic systems and agro-climatic conditions, mainly related to the temperatures of the study region. Boyazoglu *et al.* (1979) and Gootwine and Goot (1996) indicated that EF ewes manifest deficiencies in adaptation due to the stress of more arid and dry land environments and high temperature conditions.

Lower yields in dairy ewes under organic management have been reported when compared with animals in conventional systems (Wright *et al.* 2001). However, organic farms aim for an ecological approximation of livestock production with minimal environmental impact, rather than the maximisation of production yields of animals. Several studies have indicated that management on organic farms favours high levels of biodiversity and have been associated with increased species richness and abundance of plants, predatory invertebrates and birds (Fuller *et al.* 2005).

Boyazoglu *et al.* (1979) and Chang *et al.* (2001) reported higher milk yield as the percentage of genes of EF increase; this coincides with the present study. DMY and cDMY in EF×PL ewes were similar to EF, which may present some advantages of SF crossbred sheep in organic systems because they have acceptable milk yields and could show better characteristics in adapting to environmental conditions, nutritional management and maintaining health.

Milk composition

EF × PL showed the higher FC in milk, being higher than those reported in PL (80 vs 70 g/kg) in conventional systems (Castellanos and Valencia 1982). In the three genetic groups the FC and TSY increased as lactation progressed; this has been reported in previous studies in sheep (Novotná *et al.* 2009) and cows (Bystrom *et al.* 2002) under organic management, which is attributed to the gradual decrease in milk production, confirming the negative correlation between the concentration of fat in milk and milk yield throughout lactation (Bencini and Pulina 1997).

FC was higher in crossbred genotypes compared with EF, which is consistent with Boyazoglu *et al.* (1979) and Morgan *et al.* (2006) under conventional grazing systems. This situation is advantageous because sheep which produced milk with high fat and protein content are greatly appreciated by the cheese manufacturing industry and are associated with high yields in resulting dairy products. In the case of EF × PL, the higher concentration could be associated with low milk yields. Bencini and Pulina (1997) indicated a negative correlation between milk yields and milk composition and concluded that generally breeds with higher milk yields show lower concentrations of milk fat and protein, such as EF in the present study.

Regarding the effect of genetic group on milk composition in organic systems, Rozzi *et al.* (2007) reported higher values of FC in milk in crossbred cows compared with Holstein cows with

higher milk yields. This is in agreement with the present study, where EF showed lower FC and PC. Bencini and Pulina (1997) suggested that highly selected sheep for milk production usually show low FC and PC in milk.

There were no differences ($P = 0.87$) for PC between genetic groups, which is in agreement with Boyazoglu *et al.* (1979) in Sarda × EF ewes, and Morgan *et al.* (2006) in crossbred ewes in grazing. PC during lactation was relatively more stable compared with FC, and agrees with Signorelli *et al.* (2008), who showed that increased lactation of FC was higher than PC, because the increased with time.

FY, PY and TSY were higher ($P < 0.001$) in genetic groups with higher milk yields (EF and EF×SF). Similar trends have been reported by Peeters *et al.* (1992) who evaluated milk yield and milk composition in Flemish milksheep, Suffolk and Texel ewes and their crossbreds. Pulina *et al.* (2005) indicate that probably as milk production increases, the synthesis of fat and protein show a slower rate of increase, according to an allometric process.

EF × SF showed appropriate milk yields, also adequate milk composition, which contributes not only to increase cheese yield, but also to differentiating cheese flavor (Signorelli *et al.* 2008). The acidity values of the milk of the three genetic groups coincide with those reported by Simos *et al.* (1996) and provide adequate characteristics of renneting time, rates of firming and curd consistency in the manufacture of cheese.

Lactation curves

The difference in Parameter *b* of the lactation curve reveals the genetic potential of EF for milk production, because Parameter *b* is the main shape parameter of the lactation curve. There also exists a positive correlation between TMY and Parameter *b* of the WD gamma model (Ruiz *et al.* 2000). However, EF × SF also showed adequate milk yields (TMY, WMY and DMY), without a peak of lactation, which may be useful in organic systems where the supply of energy and protein is limited by restrictions on the use of concentrates and chemical fertilisation on grassland, with a probable reduction of metabolic problems in the initial stage of lactation.

EF were the only ewes that expressed a peak lactation more defined between Weeks 6 and 8, when compared with F1 ewes; this result is in agreement with Angeles-Hernandez *et al.* (2013) who reported that in organic dairy sheep systems the animals resulting from crossbreeding between dairy breeds and meat breeds have a low genetic potential for milk production, which favours the manifestation of atypical curves (without peak lactation).

Conclusion

Crossbred EF × SF ewes had values of TMY similar to those of EF ewes but better milk composition, which places this genotype as an option for crossbreeding in dairy sheep systems under organic management with similar agro-climatic characteristics of the present study.

Acknowledgements

This project was supported by Foundation PRODUCE, State of México Project 197/2013, and the University Autonomous State of México, UAEM

3643/2013 E. We also thank Ing. Javier Perez Rocha M. for the facilities during the realisation of the present study. MSc Angeles Hernandez has been supported by CONACyT fellowship. Dr Gonzalez Ronquillo received a grant from Beca Alianza del Pacifico Chile.

References

- Angeles-Hernandez JC, Albarran-Portillo B, Gonzalez AG, Salas NP, Gonzalez-Ronquillo M (2013) Comparison of mathematical models applied to F1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation curve parameter. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **26**, 1119–1126. doi:10.5713/ajas.2013.13096
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists) (1997) 'Official methods of analysis.' 16th edn. (AOAC: Arlington, VA)
- Bencini R, Pulina G (1997) The quality of sheep milk: a review. *Animal Production Science* **37**, 485–504. doi:10.1071/EA96014
- Boyazoglu JG, Casu S, Flamant JC, Ruda G, Picinelli G, Carta R (1979) Crossbreeding the Sardinian and East Friesian breeds in Sardinia. *Annales de Genetique et de Selection Animale* **11**, 23–51. doi:10.1186/1297-9686-11-1-23
- Bystrom S, Jonsson S, Martinsson K (2002) Organic versus conventional dairy farming – studies from the Öjebyn Project. In 'Proceedings of the UK organic research 2002 conference'. (Ed. J Powell) pp. 179–184. (Organic Centre Wales, Institute of Rural Studies, University of Wales: Aberystwyth, UK)
- Castellanos RA, Valencia ZM (1982) Quantitative and qualitative study of milk production of the Pelibuey sheep. *Tropical Animal Production* **7**, 232–240.
- Chang YM, Rekaya R, Gianola D, Thomas DL (2001) Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livestock Production Science* **71**, 241–251. doi:10.1016/S0301-6226(01)00185-3
- Fuller RJ, Norton LR, Feber RE, Johnson PJ, Chamberlain DE, Joys AC, Firbank LG (2005) Benefits of organic farming to biodiversity vary among taxa. *Biology Letters* **1**, 431–434. doi:10.1098/rsbl.2005.0357
- Gootwine E, Goot H (1996) Lamb and milk production of Awassi and East-Friesian sheep and their crosses under Mediterranean environment. *Small Ruminant Research* **20**, 255–260. doi:10.1016/0921-4488(95)00807-1
- Morgan JE, Fogarty NM, Nielsen S, Gilmour AR (2006) Milk yield and milk composition from grazing primiparous non-dairy crossbred ewes. *Crop and Pasture Science* **57**, 377–387. doi:10.1071/AR05180
- Novotná L, Kuchtík J, Sustová K, Zapletal D, Filipčík R (2009) Effects of lactation stage and parity on milk yield, composition and properties of organic sheep milk. *Journal of Applied Animal Research* **36**, 71–76. doi:10.1080/09712119.2009.9707034
- Padel S (2000) Strategies of organic milk production. In 'Human-animal relationships: stockman ship and housing in organic livestock systems. Proceedings of the 3th NAHWOA workshop'. (Eds M Hovi, M Bouilhol) pp. 121–135. ((Network for Animal Health and Welfare in Organic Agriculture, University of Reading: Reading, UK)
- Peeters R, Buys N, Robijns L, Vanmontfort D, Van Isterdael J (1992) Milk yield and milk composition of Flemish Milkshew, Suffolk and Texel ewes and their crossbreds. *Small Ruminant Research* **7**, 279–288. doi:10.1016/0921-4488(92)90162-W
- Pulina G, Macciotta NPP, Nudda A (2005) Milk composition and feeding in the Italian dairy sheep. *Italian Journal of Animal Science* **4**, 5–14.
- Rozzi P, Miglior F, Hand KJ (2007) A total merit selection index for Ontario organic dairy farmers. *Journal of Dairy Science* **90**, 1584–1593. doi:10.3168/jds.S0022-0302(07)71644-2
- Ruiz R, Oregui LM, Herrero M (2000) Comparison of models for describing the lactation curve of Latxa sheep and an analysis of factors affecting milk yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2709–2719. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75165-4
- SAS Institute (2002) 'Statistical analysis systems user's guide.' (SAS: Cary, NC)
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2010) 'Normales climatológicas por estación. querétaro.' Available at http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177&tmpl=component [Verified 10 December 2013]
- Signorelli F, Contarini G, Annicchiarico G, Napolitano F, Orrù L, Catillo G, Moioli B (2008) Breed differences in sheep milk fatty acid profiles: Opportunities for sustainable use of animal genetic resources. *Small Ruminant Research* **78**, 24–31. doi:10.1016/j.smallrumres.2008.04.003
- Simos EN, Nikolaou EM, Zoiopoulos PE (1996) Yield, composition and certain physicochemical characteristics of milk of the Epirus mountain sheep breed. *Small Ruminant Research* **20**, 67–74. doi:10.1016/0921-4488(95)00780-6
- Stolze M, Lampkin N (2009) Policy for organic farming: rationale and concepts. *Food Policy* **34**, 237–244. doi:10.1016/j.foodpol.2009.03.005
- Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA (1991) Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* **74**, 3583–3597. doi:10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2
- Wood PDP (1967) Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* **216**, 164–165. doi:10.1038/216164a0
- Wright IA, Zervas G, Louloudis L (2001) The development of sustainable farming systems and the challenges that face producers in the UE. In 'Organic meat and milk from ruminants'. (Eds I Kyriazakis, G Zervas) pp. 27–37. (Athens, Greece)

EFFECTO DEL PESO VIVO PRE Y POSTPARTO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE LECHE DE OVEJAS EAST FRIESIAN

Artículo publicado: **Ángeles Hernández, J.C.**, Radic, S., Vera-Arias, M.A., Echeverría-Pérez, R., Castelán-Ortega, O.A., Ramírez-Pérez, A.H., Ronquillo, M.G. (2017): Effect of live weight pre- and post-lambing on milk production of East Friesian sheep. *Italian Journal of Animal Science*.

Effect of live weight pre- and post-lambing on milk production of East Friesian sheep

Juan C. Ángeles Hernández^{a,b} , Sergio Radic Schilling^c, Marcela A. Vera Arias^c, Ricardo A. Echeverría Pérez^c, Octavio Alonso Castelán-Ortega^d, Aurora H. Ramírez Pérez^b  and Manuel González Ronquillo^d 

^aPrograma de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México; ^bDepartamento de Bioquímica y Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México; ^cDepartment of Agriculture and Aquaculture Sciences, University of Magallanes, Punta Arenas, Chile; ^dFacultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México

ABSTRACT

The study was conducted to analyse the effect of sheep body weight (BW) at mating, mid-pregnancy, lambing, early lactation, mid-lactation and late lactation on milk yield and patterns of milk production. Also, the effects of environmental factors such as number of lambing (NL) and type of lambing (TL) on BW and milk production were analysed. A total of 52 multiparous East Friesian ewes from an experimental flock were used. Ewes were assigned to three different groups according to their BW at each productive stage: low (LBW), moderate (MBW) and high BW (HBW). Lactations were fitted using the mechanistic model described by Pollott. Total milk yield (TMY), peak yield (PY) and time at peak yield (TPY) were also calculated. HBW ewes had consistently higher TMY ($p < .001$) and PY ($p < .05$) values, than LBW and MBW in most of productive stage measured. There was a positive linear relationship ($p < .05$) between TMY and BW in all-productive stage, except at mid-gestation where the relationship was quadratic. HBW ewes weighted at mid-pregnancy showed the highest values of maximum secretion parameter ($p = .04$) of Pollott model, which could partially explain the better milk yield of HBW ewes. A significant effect of NL on BW ($p = .007$) and TMY ($p = .007$) was observed. The BW ewe's in pregnancy and early lactation is a useful indicator at farm level to improve the milk yield performance in dairy sheep.

ARTICLE HISTORY

Received 16 March 2017
Revised 20 June 2017
Accepted 22 June 2017

KEYWORDS


Milk yield; dairy ewe; pregnancy; live body weight

Introduction

The East Friesian (EF) is the most popular dairy sheep at worldwide; it has been introduced to many countries to promote the development of the local dairy sheep or the industry using pure breed flocks and to improve milk production of native sheep breeds through crossbreeding (Haenlein and Wendorff 2006). The introduction of EF has showed variable and inconsistent results. Several authors have referred to the fact that EF sheep not shown good milk yields under dry and hot conditions (Fahmy and Shrestha 2011) even without nutritional deficiencies; for instance, Gootwine and Goot (1996) referred that EF sheep have low milk production under Mediterranean conditions (161 L/lactation) compared with the productions in their natural environment (550 L/lactation). Similar results have been referred by Angeles-Hernandez et al.

(2014) with 76 kg per lactation of EF under semi-arid conditions.

In specialised dairy sheep animals, like EF sheep, high priority is given to functions of pregnancy and milk production (Bauman and Currie 1980). Adequate nutrient availability during pregnancy and lactation is key point in the development of the mammary gland and milk synthesis. Neville et al. (2013) reported that ewes showed a decrease of mammary growth during pregnancy when they were fed below of their requirements, this finding is in line with various early reports (Dimauro et al. 2011; Paten et al. 2014) which point out that cell differentiation, cell turnover and epithelial cell activity are affected by nutrition during pregnancy in adult sheep. Also, the availability of nutrients during lactation determines an adequate milk yield with a better persistence of lactation curve.

CONTACT Dr. Manuel González Ronquillo  mrg@uaemex.mx  Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México; Dr. Sergio Radic Schilling  sergio.radic@umag.cl  Departamento de Ciencias Agropecuarias y Acuícolas, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

© 2017 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

During the late pregnancy, the utilisation of nutrients is less efficient and the feed intake is limited by the compression of the rumen by the growing foetus, passage rate of the feed through the digestive tract (Haenlein and Wendorff 2006), the underdevelopment of the rumen papillae (Mayer et al. 1986) and physiological factors associated mainly with the presence and mobilisation of body reserves (Ingvarsen et al. 1999); furthermore, the metabolic reserves are very important to successful lactation.

Although all nutrients are mostly derived from feed intake, the nutrients stored in body tissues are fundamental in specific production stages such as late gestation and early lactation, mainly supporting adequate development and performance of mammary gland. Throughout the year, sheep often show large variation of body reserves, with higher weight at the end of pregnancy, the last part of lactation and the dry period, and with lower weight in the first part of lactation (Cannas 2004a).

The measuring and recording the body weight (BW) in each stage of the productive cycle of dairy sheep is very important to evaluate the body condition and corporal reserves in preparation to high demand nutrient stages like final gestation and early lactation. The body condition score (BCS) technique has been recognised as an available option to estimate body fat variations. However, these estimations are some subjective and the values of this scale can be different among breeds and stages of the productive cycle (Cannas 2004b), hence the measurement of BW in animals of the same breed and living on a group under the same management is a useful tool to estimate the mobilisation of reserves during productive stages. Previous research has also shown a relationship between live BW and milk yield within or between breeds (Hansen et al. 1999; van der Linden et al. 2009), and BW has been used in selection programmes in cows (Hansen et al. 1999) and sheep (Mavrogenis and Papachristoforou 2000).

The aim of the present study was to analyse the effect of sheep BW at mating, mid-pregnancy, lambing, early, mid- and late lactation on milk yield and patterns of milk production in a dairy sheep farm of Chilean Patagonia. Also, the effects of environmental factors such as number of lambing (NL) and type of lambing (TL) on live weights and milk production were analysed.

Materials and methods

Study area and animal management

The study sample consisted of 52 multiparous EF sheep from an experimental flock of the University of

Magallanes, Puerto Natales, Chile. The farm is located in the Magallanes region with a mean annual temperature of 6.5 °C (min: -2.1 °C and max: 15.6 °C); the average monthly maximum temperatures occur in January and February (11 °C and 10.6 °C, respectively) and average monthly minimum temperatures in June and July (2.2 °C and 1.8 °C, respectively). Annual average rainfall is 512.4 mm, with the rainy season lasting from March to July, although there low rainfall occurs throughout the year (Butorovic 2015).

The nutritional flushing began 2 weeks prior to breeding and continued during the breeding period; the sheep were supplemented with 200 g/d of commercial concentrate (15% CP; 2.6 Mcal EM/kg DM). During the first 100 days of pregnancy, the sheep were fed under a grazing system on mixed swards of mainly rye grass, cocksfoot and white clover. During the last 50 days of pregnancy, the ewes were supplemented with 400 g/d as DM of alfalfa hay. The feed management of milked ewes was strip grazing plus alfalfa hay (400 g DM/d) and commercial concentrate (400 g DM/d).

The ewes' oestrus was synchronised using intravaginal sponges (medroxyprogesterone acetate) at the second week of May; after 48 hours, the sponges were removed and teaser rams were introduced to the flock to detect oestrus. Ewes in oestrus were hand-mated; PM-AM method of breeding was used, ewes detected in oestrus in the afternoon were mated early the next morning and those detected in oestrus in the morning were mated in the afternoon of the same day. Fifteen days after teaser rams were placed with the ewes again to detect oestrus activity and ewes were hand-mated again. The lambing occurred between the 9th and 26th of October.

Measures of milk yield and live BW

Sheep were milked mechanically once daily. Lambs suckled their dams freely during the first month of age. Although in Chile there is not an official milk recording regulation of sheep milk production, the milk yield was recorded every four weeks (B4) according to ICAR rules (ICAR 2016) with the first milk recording in the day 34 ± 5.6 post-lambing, approximately; the average of the lactation length was around 148.9 ± 8.6 days. The total milk yield (TMY) was calculated using the Fleischmann's method (Ruiz et al. 2000). Sheep were weighed using a digital scale in the morning prior to feeding; the weighing were carried out at mating (WM), mid-pregnancy (WS), 48 h after lambing (WL), early lactation (WEL), mid-lactation (WML) and late lactation (WLL). According with their

BW in each productive stage, sheep were assigned to one of three groups: low (LBW, $n=16$), moderate (MBW, $n=18$) and high body weight (HBW, $n=18$).

Statistical analysis

Data were analysed using the mixed model analysis (PROC MIXED, SAS Institute 2002) to repeated measures data structure. The mathematical model for the analysis of milk production and live BW, included fixed effects for month of lactation, TL (single, $n=16$; twins, $n=31$; and triplets, $n=5$) and NL (1st, $n=5$; 2nd, $n=17$; 3rd, $n=15$; 4th, $n=10$ and 5th, $n=5$); the ewe was included as a random factor. Post hoc pairwise comparison was carried out using the Tukey's HSD test.

Akaike information criteria and Bayesian information criteria were used as indicators to select the most appropriate variance-covariance matrix, which was first-order autoregressive AR (1); the other covariance structures tested were Toeplitz, unstructured, compound symmetry and first-order ante-dependence ANTE (1). Significance was declared with $p < .05$, and trends were declared at $p < .10$.

Milk production and live BW of sheep in different stages of the productive cycle were taken as continuous variables. Higher-order polynomials were used to analyse their relationship (PROC REG, SAS Institute 2002). To analyse the effect of studied factors (NL, TL, WM, WS, WL, WEL and WLL) in lactation curves, we used the mechanistic model described by Pollott (2000).

$$M_t = (MS / (1 / (1 + (1 - 0.99999999) / 0.99999999) \times \exp(-GR * t - 150))) * (1 + NOD - (1 / (1 / ((1 + ((1 - NOD) / NOD) * \exp(-DR * t)))))) \quad (1)$$

Where: M_t =milk production; MS=maximum potential of secretion; GR=relative proliferation rate of

secretory cells during early lactation; NOD=proportion of secretory cell at start of lactation; DR=relative decline in cell numbers as lactation progressed. The parameters of the Pollott model were estimated individually for each lactation curve using a nonlinear regression analysis (PROC NLIN, SAS 2002).

Results

Environmental factors that affect milk production

The effect of month of lactation, NL, TL on milk production and BW was analysed in the current work; the results are shown in Table 1. The milk production was affected significantly ($p = .001$) by the month of lactation with the highest yields in the first month. It had a gradual decrease until the fifth month of lactation. In contrast, the BW was significantly lower ($p < .0001$) in the first and second months and rose gradually with the higher values in the last month of lactation; BW decreases from mating to lambing (Figure 1).

The NL significantly affected the TMY ($p = .007$); first and second lambing ewes had lower milk yields than ewes of other lambing. There was an effect of the NL on milk production patterns; all parities show an atypical shape of the lactation curve (continuously decreasing), with the fifth lambing ewes showing the highest milk yields on the 1st day (Figure 2(a)). Ewes of first and second lambing showed significant ($p = .001$) lower BW (55.62 and 56.48 kg, respectively); the higher BW was reported for ewes of third, fourth and fifth lambing (63.15, 62.36 and 65.22 kg, respectively) (Table 1).

Litter size does not have an effect ($p > .05$) on milk production and BW of the studied sheep. A high number of animals might be needed to find significant effects of this factor. However, a trend is shown in TMY in analysed data ($p = .09$); ewes bearing twins and triplets had greater milk yields, by 6.9% and 32.7%, respectively, in comparison with single bearing

Table 1. Least square means of milk yield (MY) and live body weight (BW) in relation with month of lactation, number of lambing and type of lambing of East Friesian sheep.

| Item | Month of lactation | | | | | S.E. | p-value |
|-------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|---------|
| | First | Second | Third | Fourth | Fifth | | |
| Daily MY, L | 1.04 ^a | 0.81 ^b | 0.56 ^c | 0.47 ^d | 0.36 ^e | 0.026 | .001 |
| BW, kg | 57.6 ^d | 57.8 ^d | 59.23 ^c | 63.12 ^b | 65.17 ^a | 0.41 | .001 |
| Item | Number of lambing | | | | | S.E. | p-value |
| | First | Second | Third | Fourth | Fifth | | |
| Total MY, L | 86.88 ^b | 97.87 ^b | 123.77 ^a | 123.91 ^a | 127.02 ^a | 9.67 | .007 |
| BW, kg | 55.62 ^b | 56.48 ^b | 63.15 ^a | 62.36 ^a | 65.22 ^a | 2.23 | .001 |
| Item | Litter size | | | S.E. | p-value | | |
| | Single | Twins | Triple | | | | |
| Total MY, L | 103.59 | 110.74 | 137.23 | 0.08 | .09 | | |
| BW, kg | 64.35 | 62.43 | 61.58 | 3.73 | .15 | | |

^{a,b,c,d,e}Literals different showed significant differences ($p < .05$).

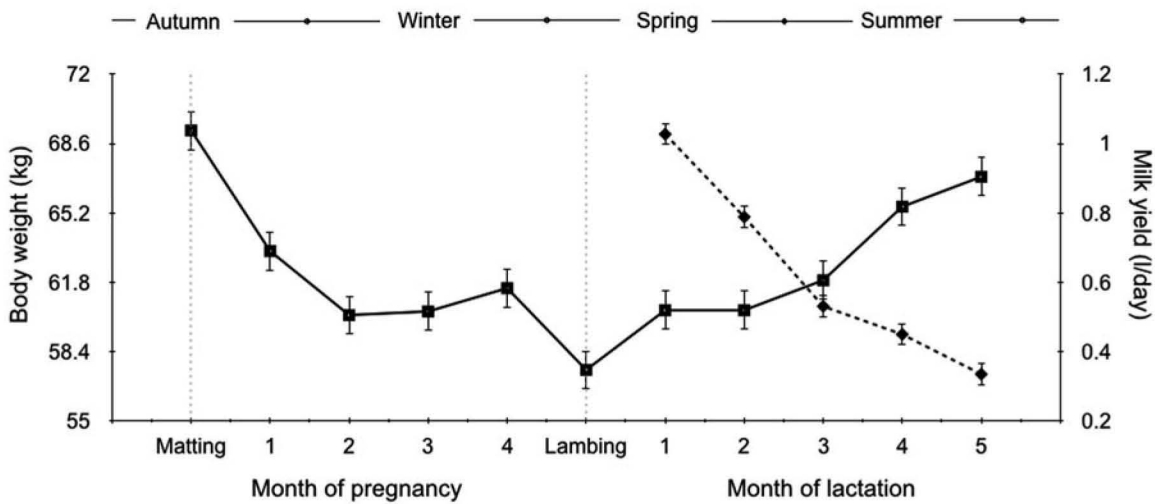


Figure 1. Milk yield (dotted line) and body live weight (solid line) in pregnancy and lactation period of East Friesian sheep. The lactation month in both milk yield and live body weight had significant effect ($p < .001$).

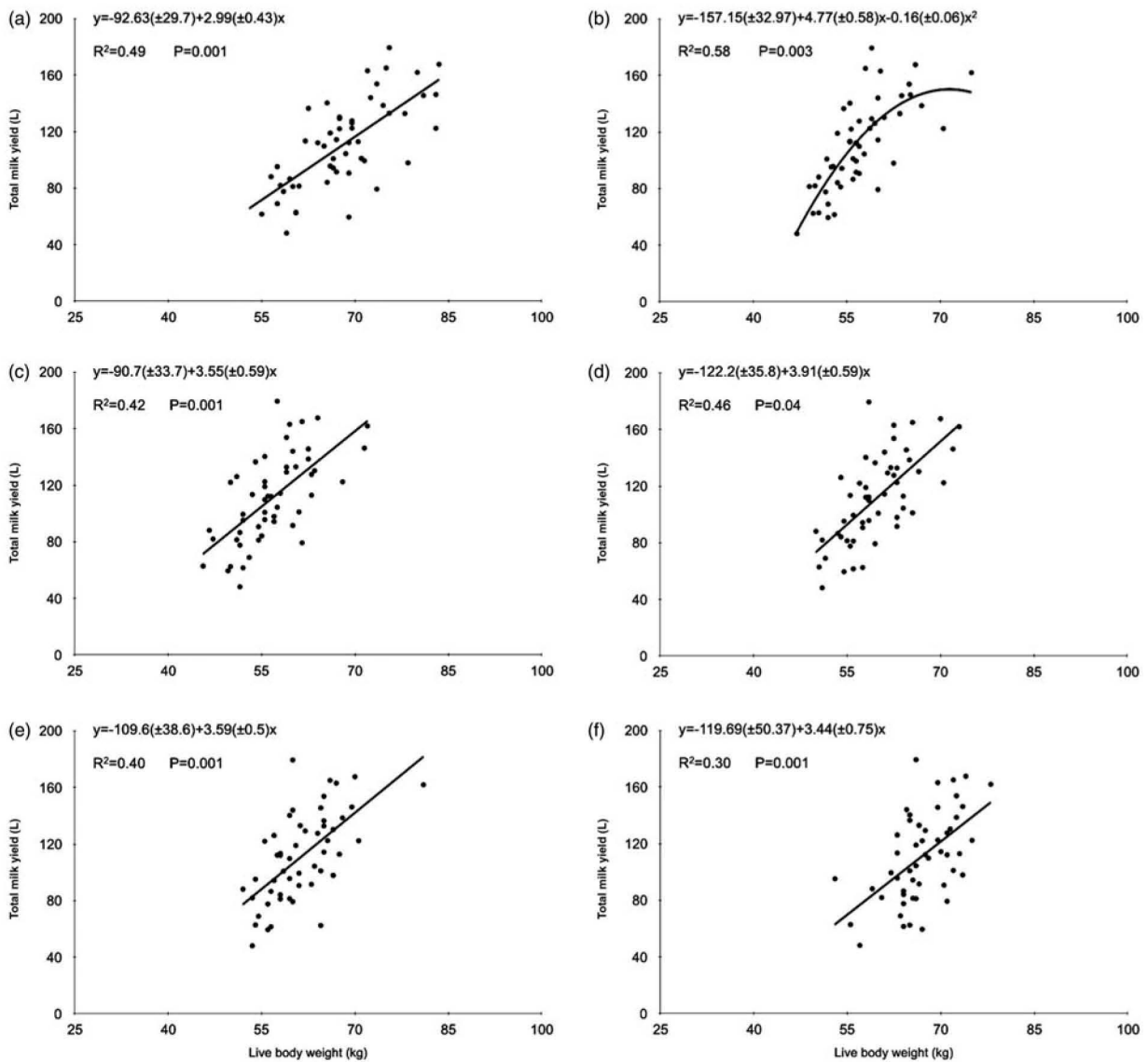


Figure 2. Relationships between total milk yield (TMY) and body live weight (BW) at mating (a), mid-pregnancy (b), lambing (c), early lactation (d), mid-lactation (e) and ending lactation (f) of East Friesian sheep, $n = 52$.

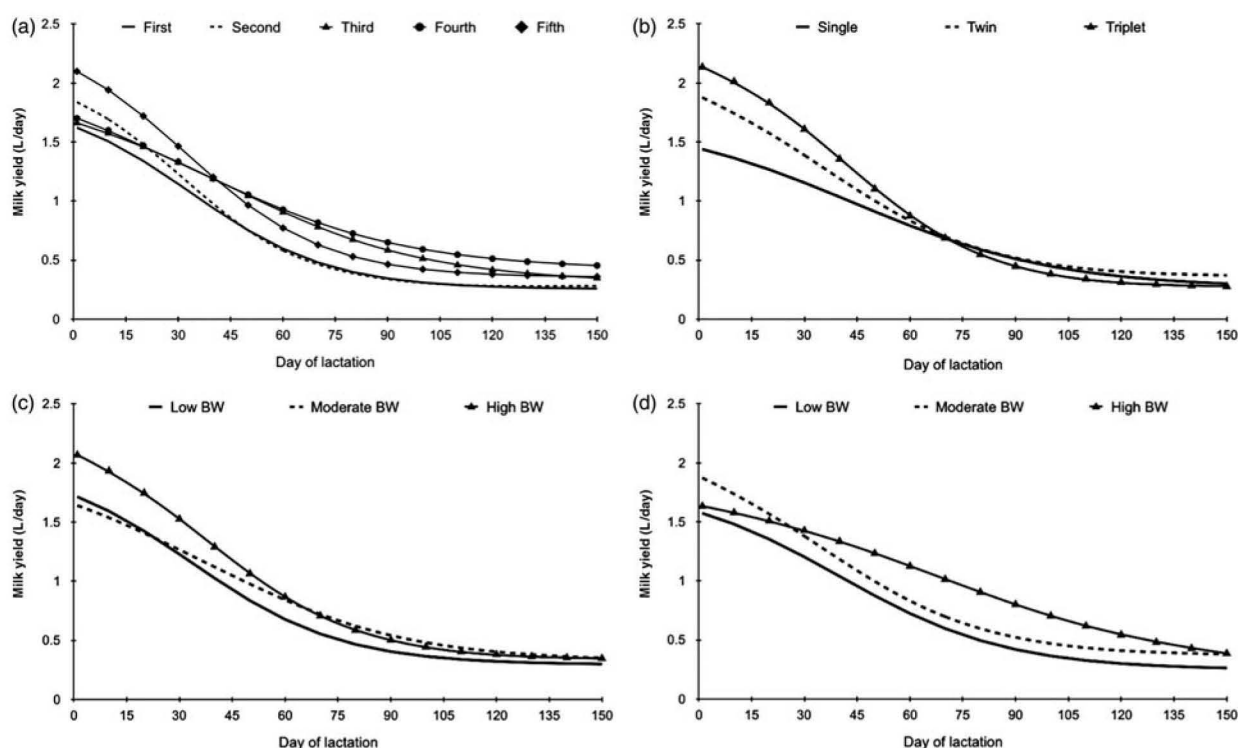


Figure 3. Lactation curves (L/d) according with the number of lambing (a), type of lambing (b) and live body weight (BW) at mating (c) and lambing (d) of East Friesian sheep. Lactation curves fitted using the Pollott (2000) model; a, number of lambing; b, litter size; c, BW at mating; d, BW at lambing.

ewes (Table 1). Also, lactation curves show differences in the first weeks of lactation in relation with the ewe's litter size (Figure 3(b)).

Effect of live body weight on milk production

Mean squares and test of significance of milk production and parameters of the Pollott (2000) model in relation with the BW are presented in Table 2. The mean of TMY was 111.08 L with an average lactation length of 149 days. The BW in all analysed productive stages affected the TMY ($p < .01$). HBW ewes weighed at mating and mid-pregnancy showed the highest values ($p < .001$) of TMY followed by MLW and LBW ewes. MLW and HBW ewes had higher values ($p < .01$) of TMY than LBW when was weighed at lambing, early and mid-lactation. There was an effect of BW ($p < .05$) on the lactation length when the ewes were weighted at mating, mid-pregnancy, early and mid-lactation.

Maximum secretion was higher in HBW ewes in comparison with LBW and MBW ewes at mid-pregnancy. HBW ewes tended to have higher maximum secretion values at early lactation compared with LBW and MBW ewes (1.92 vs. 1.66 and 1.73 L; $p = .09$; for HBW vs. LBW and MBW-ewes, respectively). No dam-

weight effect ($p > .05$) was found on GR and DR parameters; however, LBW ewes showed numerically higher rates of growth and death in most of measured stages. Ewes with LBW and MBW in most of productive stages had smaller peak yield ($p < .05$) than those with HBW; also, HBW ewes reached peak time before at mid-pregnancy (33.44 and 37.97 vs. 29.62 d; $p = .04$) and mid-lactation (36.89 and 37.66 vs. 29 d; $p = .05$; for LBW and MBW vs. HBW, respectively).

There was a positive linear relationship between TMY and BW at the most productive stages measured (Figure 2). The TMY increased at a rate between 2.99 and 3.91 L of TMY per kilogram of increase in BW in all productive stages, except at mid-gestation. There was a quadratic relationship between TMY and BW at mid-gestation. The strength of the relationship between TMY and BW was least to BW at mating and lambing ($R^2 = 0.49$ and 0.42 , respectively) and highest to BW at mid-gestation ($R^2 = 0.58$) in measures of BW before lactation.

Discussion

The EF sheep is recognised for its superior dairy performance; however, the ewes of current study had

Table 2. Effect of live body weight of dairy sheep on milk production characteristics and parameters of Pollott model.

| Item | Total milk yield (L) | Length lactation (days) | ¹ Maxima secretion (L) | ¹ Growth rate | ¹ Dead rate | ¹ Peak yield (L) | ¹ Time peak (days) | |
|--------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------|
| Mean(S.D.) | 111.08 (31.47) | 148.9 (8.6) | 1.77 (0.90) | 0.059 (0.065) | 0.041 (0.023) | 1.17 (0.39) | 35.9 (9.31) | |
| BW mating | Low | 77.65 ^c | 151.07 ^a | 1.72 | 0.06 | 0.97 ^b | 35.61 | |
| | Moderate | 113.21 ^b | 149.76 ^a | 1.65 | 0.06 | 1.17 ^{ab} | 36.92 | |
| | High | 140.2 ^a | 145.0 ^b | 2.08 | 0.04 | 1.39 ^a | 34.15 | |
| | s.e. | 7.6 | 1.28 | 0.21 | 0.018 | 0.005 | 0.09 | |
| | p-value. | .001 | .008 | .36 | .71 | .33 | .01 | .68 |
| BW mid-pregnancy | Low | 78.64 ^c | 150.7 ^a | 1.57 ^b | 0.061 | 0.96 ^b | 33.44 ^a | |
| | Moderate | 111.80 ^b | 149.8 ^a | 1.69 ^b | 0.059 | 1.15 ^b | 37.97 ^{ab} | |
| | High | 144.45 ^a | 142.6 ^b | 2.37 ^a | 0.060 | 1.52 ^a | 29.62 ^b | |
| | s.e. | 7.5 | 1.36 | 0.24 | 0.018 | 0.006 | 0.11 | 2.5 |
| | p-value | .001 | .001 | .04 | .9 | .46 | .008 | .04 |
| BW lambing | Low | 81.4 ^b | 150.8 | 1.58 | 0.071 | 0.95 ^b | 37.93 | |
| | Moderate | 121.2 ^a | 148.5 | 1.88 | 0.056 | 1.26 ^a | 35.0 | |
| | High | 143.5 ^a | 143.3 | 1.53 | 0.037 | 1.35 ^a | 30.33 | |
| | s.e. | 8.3 | 1.73 | 0.3 | 0.019 | 0.007 | 0.12 | 3.1 |
| | p-value | .001 | .07 | .51 | .6 | .5 | .02 | .40 |
| BW early lactation | Low | 82.2 ^b | 150.7 ^a | 1.66 | 0.074 | 0.98 ^b | 37.5 | |
| | Moderate | 115.3 ^a | 149.8 ^{ab} | 1.73 | 0.058 | 1.23 ^{ab} | 35.9 | |
| | High | 132.5 ^a | 146.3 ^b | 1.92 | 0.047 | 1.29 ^a | 34.4 | |
| | s.e. | 5.8 | 1.25 | 0.21 | 0.01 | 0.005 | 0.08 | 2.22 |
| | p-value | .001 | .04 | .09 | .5 | .4 | .04 | .64 |
| BW mid-lactation | Low | 97.52 ^b | 150.5 ^a | 1.77 | 0.073 | 1.13 ^b | 36.89 ^a | |
| | Moderate | 123.26 ^a | 148.8 ^a | 1.73 | 0.034 | 1.08 ^b | 37.66 ^a | |
| | High | 137.44 ^a | 143.0 ^b | 1.87 | 0.058 | 1.50 ^a | 29.00 ^b | |
| | s.e. | 7.32 | 1.32 | 0.24 | 0.016 | 0.014 | 0.09 | 3.45 |
| | p-value | .006 | .001 | .94 | .1 | .6 | .02 | .05 |

^{a,b,c}Literals different showed significant differences ($p < .05$).

¹Values obtained using the Pollott (2000) function.

lower milk yields than reported by Fahmy and Shrestha (2011) in their native environment (540–650 kg per lactation). Several reports indicate that the EF breed has a low ability to adapt to exotic climatic conditions, resulting in lower milk yields mainly under dry or hot conditions (Gootwine and Goot 1996; Angeles-Hernandez et al. 2014). Hunter et al. (2015) report that the variability of response of the East Frisian breed and its crosses is maybe due to insufficient nutrition to maximise milk yield under grazing condition, as in the current study, or inadequate milking pressure; although the heat, humidity and health problems are environmental factors that have been strongly associated with the low and moderate milk performance of the EF genotype outside the native conditions (Gootwine and Goot 1996).

The analysed sheep showed an atypical shape of lactation curve (continuously decreasing) with the peak of milk production in the first milk yield record and gradually declining until the end of the trial. Similar patterns of lactation curve have been reported in the EF (Mckusick et al. 2001; Angeles-Hernandez et al. 2014) and other breeds (Carta et al. 2001). The atypical shape of lactation curves has been associated with meat and wool breeds (Godfrey et al. 1997) or low genetic merit of animals; however, dairy sheep breeds, like the EF, can also show atypical curves due to environmental factors and nutritional management that play a dominant role in the shape of the lactation curves. Also, the lack of milk yield records in the first stage of lactation is another likely cause of atypical curves in the current work, since the first milk yield was recorded ~35 days post-lambing.

Environmental factors that affect milk production

Several previous studies (Gootwine and Pollott 2000; Angeles-Hernandez et al. 2013) reported a quadratic effect of the NL on milk production, point out that the lowest milk yields and more persistent lactation curves occur in the first lactation due to the mammary gland not being fully developed at the beginning of the first lactation (Abdelsayed et al. 2015); afterwards, milk yields increase with the NL, showing the highest milk yields in the third and fourth lactation and a consequent decline until culling; this is in agreement with the results of the current study. An early study analysed the effect of the NL in milk production and BW of Chios sheep, stating higher milk yields in third lambing and maximum BWs in the fifth parity (Mavrogenis and Papachristoforou 2000); again, that coincides with our results.

The BW decreased from mating to lambing in average by 11.75 kg. Similar findings have been reported by Louca et al. (1974) in Chios sheep under a low plane of feeding (barley straw *ad libitum*). They showed a considerable weight loss and also lower milk yields ($p < .05$) than sheep under medium (0.5 kg/day of concentrate) and high plane (1 kg/day of concentrate) of feeding. Mavrogenis et al. (1980), who expected similar BW changes to the present study during the pregnancy in sheep fed on stubble grazing and/or cereal straw during early and late pregnancy.

In the current study, the pregnancy period coincides with the coldest season and lowest availability and quality of pastures; hence, sheep did not cover their feed requirements and were forced to mobilise body reserves. The results were consistent with (Laporte-Broux et al. 2011) who had analysed the effect of restricted feeding at late pregnancy on dairy goats. They suggest that the metabolic status at the lactation can result in the redirection of nutrients toward the foetus and therefore dam BW gain at the end of the pregnancy may be physiologically difficult to obtain.

The sheep's BW decreased by 4.01 kg from fourth month of pregnancy to lambing; the sheep was weighed one day after lambing; hence, the loss of BW can be due to the expulsion of lamb or lambs, amniotic fluid and placental mass (Sahlu et al. 1995) and the decline of feed intake during the days previous to lambing (Charismiadou et al. 2000). The increase of the ewes' BW during lactation was similar to the weight gain observed by Godfrey et al. (1997) and Hunter et al. (2015). After the ewes lost weight in early lactation, they began to gain weight again during the first month of lactation approximately; in contrast, milk production declined over time.

Effect of live body weight on milk production

Pregnancy, mainly foetal and mammary gland development, induces adaptive responses in energetic metabolism and peripheral tissue mobilisation of glucose, which can be more pronounced under a regime of moderate-under nutrition. Dramatic metabolism changes also happened during the transition from late pregnancy to establishing lactation with the goal to meet the highest nutritional requirements of adult sheep without any increase of voluntary feed intake, this is a major motivation to analyse the effect of BW during the pregnancy and lactation on milk production in dairy animals.

The effect of BW measured in pregnancy and lactation on milk yields has been demonstrated in some

previous studies (Berry et al. 2007). In the present experiment there was a positive relationship between TMY and BW in the all-productive stage; the finding of a greater milk yield in heavier ewes is in general agreement with previous studies (Berry et al. 2007; van der Linden et al. 2009). Ewes weighed at mid-lactation showed a quadratic relationship between TMY and BW which has been reported previously by Berry et al. (2007) in dairy cows weighed pre-calving (8 weeks), at calving and during early lactation; the study mentions that heavier cows produce more milk, although the effect per kg of BW tended to diminish with an increase of BW.

In previous studies, the relationship between BW and milk yield showed inconsistent results. Several authors report an increase of milk yields as the BW increases (Sieber et al. 1988); they associated this with a greater energy intake and high levels of body reserves, that determine greater availability of precursors of milk synthesis reaching the mammary gland and higher udder volume in heavy ewes (Godfrey et al. 1997). Also, a positive genetic and phenotypic correlation between milk yields and BW have been reported (Veerkamp 1998; Veerkamp and Thompson 1999).

Hence, the breeding selection based on milk production can mean the selection of larger and heavier animals (Harville and Henderson 1966). Nevertheless, this situation apparently occurs only in the initial stages of selection programmes, since in efficiently selected genetic programmes no differences in BW between animals with different milk yields have been shown. This was observed in Lacaune sheep from a selection programme with duration of 50 years, in which the low production line versus the high productive line did not show differences in BW; however, the latter produced 22% more milk (Barillet et al. 2001).

Another successful genetic selection programme of dairy sheep has been carried out for the Awassi breed. Unimproved Awassi sheep under extensive conditions produce between 70 L and 107 L of milk per lactation (Dag et al. 2005). In contrast, improved Awassi sheep reach milk yields of up to 506 l/lactation as an average; with better milk yield of improved Awassi inclusive in comparative studies under the same conditions (Alqaisi 2007). Gootwine (2011) carried out an intensive genetic improvement management programme; this researcher reported that high milk production of improved Awassi lines is associated with an increase of the ewe's BW. The improved Awassi line sheep showed a higher BW (22 kg) in comparison with unimproved Awassi (Gootwine 2011).

In contrast, Mavrogenis and Papachristoforou (2000) suggest that BW is not a determinative and is independent of the volume of milk yield; they found very low genetic ($r=0.08$) and phenotypic ($r=0.08$) correlation between milk production and BW. Also, Sieber et al. (1988) reported that lighter cows tended to show larger milk yields than heavier cows. Berry et al. (2007) suggest that contrasting results of the BW's effect on milk yield could be associated with the characteristics of feeding management. Berry et al. (2007) did not identify a significant association between BW and milk production when the sheep were fed with total mixed rations; in contrast to studies with grazing system as the main energy source. As the BW in pregnancy and lactation is significantly important, cows with better body conditions produce more milk; this finding is in agreement with the present study.

It has been suggested that the variability in the magnitude of relationships between milk yields and BW is in relation to the stage of pregnancy or lactation in which the BW measures were made, with higher genetic correlations between milk yields and BW at early lactation ($r=0.37$) in comparison to the BW at ending lactation ($r=0.04$) (Veerkamp and Thompson 1999). The different values of R^2 in the present study confirm the above findings, as BW at mid-pregnancy explained the change of TMY better in comparison with BW at mid- and ending lactation. This finding could be explained by the fact that stored body fat is an important contributor to live BW during some parts of lactation, and body tissue mobilisation is closely related to milk yield (Veerkamp 1998). Also, Mavrogenis et al. (1980) reported in three dairy sheep breeds that the correlation between TMY and BW changed from 0.28 at lambing to -0.23 in the week 18 of lactation. They conclude that adequate BW at lambing predisposes sheep to higher milk production.

Between and within breeds, sheep with higher BW in pregnancy showed better milk yields, maybe due to the high feed intake capacity and better body store reserves (Mavrogenis et al. 1980). The milk production depends on the potential milk production (number of active alveoli and milk secretion of each alveolus) and of the net energy available for lactation (Dimauro et al. 2011). In this context, adequate development of the mammary gland during pregnancy is a key factor to reach good milk production in the subsequent lactation. Adequate nutrient intake during late pregnancy is very important as the sheep's mammary gland grows by 70% during the last 4 weeks of gestation (Swanson et al. 2008). Furthermore, the sheep's mammary development is essentially complete by parturition, in contrast to the mammary gland development

in rodents, pigs, some dairy cows and goats which continues during early lactation (Paten et al. 2015).

In the current study, there was a significant decrease of BW from mating to lambing, which can be associated with a maternal under nutrition during pregnancy. This low BW at lambing can be associated with the low quantity and quality of forage in the grassland during the pregnancy. During autumn and winter, temperatures are lowest and dry matter forage is least available in the region in which the study was conducted. Mellor and Murray (1985) refer a significant reduction of udder measurements and milk yields in ewes with low nutrient intake during late pregnancy.

Also, a biological interpretation of the parameters as given in the Pollott model (Pollott 2000) can help to explain in part the positive effect of BW in milk production, as HBW ewes showed highest values of MS potential. These results concur with the findings in Gootwine and Pollott (2000) for Awassi sheep. They stated that higher values of MS were associated with a greater number of secretory cells, a higher secretory rate per cell or both; Gootwine and Pollott (2000) reported a significant positive correlation between MS and TMY ($p < .001$; $r = 0.69$) and PY ($p < .001$; $r = 0.99$). Swanson et al. (2008) analysed the effect of nutrition level (restricted, control and high) on mammary development. Ewes with high nutrition level had the highest BW and showed high values of proliferation of mammary alveolar cells and weight of mammary gland.

In specialised dairy sheep breeds, the most common health problems (metabolic and infectious) occur close to lambing and in early lactation. This as consequence of that their elevated genetic potential of milk production determines high levels of energy requirements at ending of pregnancy, unfortunately also in this stage the sheep have the lowest flexibility and capacity to accommodate the food constrain; this situation is more important when the nutrition environment is limited, where the mobilisation of body reserves is a key factor (Ingvarsen et al. 1999). For this reason, although some early studies suggest that BW is not a determinant of milk production with a null relationship (Mavrogenis and Papachristoforou 2000), the importance of BW during pregnancy and lactation is in relation at the energy partition towards milk yield with a drastic body tissue mobilisation and less energy focussed to growth, fertility and immunity (Veerkamp and Koenen 1999) with consequences in animal health, well-being and welfare.

In the present study, the ewes with moderate BW at lambing and early lactation showed milk yields

similar to high BW ewes can be associated with the potential of dairy animals to compensate for the low nutrient intake during the pre-parity period by a high intake in early lactation (Agenas et al. 2003) if they are fed with adequate energy-dense feed like it occurred in the current study. The ewes were supplemented at lambing and lactation with a good quality forage and concentrate. The ability to compensate is not enough for low BW ewes to reach milk yields of moderate and high BW, which is likely due to the low level of body reserves available that must be mobilised at early lactation. Dickerson (1970) points out that the selection within a breed should not be focussed on higher weight *per se*, but rather aimed at higher yield relative to body size.

Conclusions

The availability of nutrients at the end of pregnancy and during lactation that are provided by the feed ration and body reserve mobilisation are a key point to reach adequate milk yields in dairy sheep. The BW showed an important relationship with the milk production, but the strength of association is according to the productive stage in which the BW was measured. The BW at pregnancy, lambing and lactation must be considered as indicators of animal nutritional status and level body reserves, mainly in systems that base their nutritional management on grazing.

Acknowledgements

Mr. Angeles Hernandez thank the National Council for Science and Technology (CONACyT, Mexico) for the scholarship for their studies in the Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Dr. Gonzalez Ronquillo was granted with a Beca Alianza del Pacifico 2014 fellowship.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

Mr. Angeles Hernandez thank the National Council for Science and Technology (CONACyT, Mexico) for the scholarship for their studies in the Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Dr. Gonzalez Ronquillo was granted with a Beca Alianza del Pacifico 2014 fellowship.

ORCID

Juan C. Ángeles Hernández  <http://orcid.org/0000-0001-5303-1685>

Aurora H. Ramírez Pérez  <http://orcid.org/0000-0001-9001-1528>

Manuel González Ronquillo  <http://orcid.org/0000-0003-3616-4157>

References

- Abdelsayed M, Thomson PC, Raadsma HW. 2015. A review of the genetic and non-genetic factors affecting extended lactation in pasture-based dairy systems. *Anim Prod Sci.* 55:949–966.
- Agenas S, Burstedt E, Holtenius K. 2003. Effect of feeding intensity during the dry period. 1. Feed intake, body weight and milk production. *J Dairy Sci.* 86:870–882.
- Alqaisi O. 2007. Reproductive performance and lactation yield of local Awassi, Improved Awassi and Afec-Awassi ewes under contemporary comparison on Al-Khanasry station in Jordan [Thesis]. University of Hohenheim.
- Angeles-Hernandez JC, Albarran-Portillo B, Gomez-Gonzalez AV, Pescador-Salas N, Gonzalez-Ronquillo M. 2013. Comparison of mathematical models applied to f1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation curve parameter. *Asian-Australasian J Anim Sci.* 26:1119–1126.
- Angeles-Hernandez JC, Ortega OAC, Perez AHR, Gonzalez-Ronquillo M. 2014. Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Anim Prod Sci.* 54:1641–1645.
- Barillet F, Marie C, Jacquin M, Lagriffoul G, Astruc JM. 2001. The French Lacaune dairy sheep breed: use in France and abroad in the last 40 years. *Livest Prod Sci.* 71:17–29.
- Bauman DE, Currie WB. 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *J Dairy Sci.* 63:1514–1529.
- Berry DP, Buckley F, Dillon P. 2007. Body condition score and live-weight effects on milk production in Irish Holstein-Friesian dairy cows. *Animal.* 1:1351–1359.
- Butorovic N. 2015. Meteorological summary year 2014 “Jorge C. Schythe” Station. *An del Inst la Patagon;* p. 43.
- Cannas A. 2004a. Feeding of lactating ewes. In: Pulina G, Bencini R, editors. *Dairy sheep nutrition.* Oxford (UK): CABI Publishing; p. 79–108.
- Cannas A, 2004b. Energy and protein requirements. In: P, G, B. R editors. *Dairy sheep nutrition.* Oxford (UK): CABI Publishing; p. 31–49.
- Carta A, Macciotta N, Cappio-Borlino A, Sanna SR. 2001. Modelling phenotypic (co)variances of test day records in dairy ewe. *Livest Prod Sci.* 69:9–16.
- Charismiadou MA, Bizelis JA, Rogdakis E. 2000. Metabolic changes during the perinatal period in dairy sheep in relation to level of nutrition and breed. I. Late pregnancy. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 84:61–72.
- Dag B, Keskin I, Mikailsoy F. 2005. Application of different models to the lactation curves of unimproved Awassi ewes in Turkey. *S Afr J Anim Sci.* 35:238–243.
- Dickerson G. 1970. Efficiency of animal production-molding the biological components. *J Anim Sci.* 30:848–859.
- Dimairo C, Atzori AS, Pulina G. 2011. Assessing and optimizing the performance of a mechanistic mathematical model of the sheep mammary gland. In: Sauvant D, M, JV, F, P, F. N, editors. *Modelling nutrient digestion and utilisation in farm animals.* Wageningen (The Netherlands): Wageningen Academic Publishers; p. 72–82.
- Fahmy MH, Shrestha JNB. 2011. Sheep breeds. In: Fuquay JW, Fox PF, McSweeney PLH, editors. *Encyclopedia of dairy sciences.* London (UK): Elsevier; p. 325–339.
- Godfrey RW, Gray ML, Collins JR. 1997. Lamb growth and milk production of hair and wool sheep in a semi-arid tropical environment. *Small Rumin Res.* 24:77–83.
- Gootwine E. 2011. Mini review: breeding Awassi and Assaf sheep for diverse management conditions. *Trop Anim Health Prod.* 43:1289–1296.
- Gootwine E, Goot H. 1996. Lamb and milk production of Awassi and East Friesian sheep and their crosses under a mediterranean environment. *Small Rumin Res.* 20: 255–260.
- Gootwine E, Pollott GE. 2000. Factors affecting milk production in improved Awassi dairy ewes. *Anim Sci.* 71:807–815.
- Haenlein GFW, Wendorff WL. 2006. Sheep milk. In: Park YW, Haenlein GFW, editors. *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals.* Victoria: Blackwell Publishing; p. 137–194.
- Hansen LB, Cole JB, Marx GD, Seykora AJ. 1999. Productive life and reasons for disposal of Holstein cows selected for large versus small body size. *J Dairy Sci.* 82:795–801.
- Harville DA, Henderson CR. 1966. Interrelationships among age, body weight, and production traits during first lactations of dairy cattle. *J Dairy Sci.* 49:1254–1261.
- Hunter TE, Suster D, DiGiacomo K, Cummins LJ, Dunshea FR, Egan AR, Leury BJ. 2015. Milk production and body composition of single-bearing East Friesian × Romney and Border Leicester × Merino ewes. *Small Rumin Res.* 131:123–129.
- ICAR. 2016. Recording guidelines. *Int Comm Anim Rec.* 59–75.
- Ingvartsen KL, Friggens NC, Faverdin P. 1999. Food intake regulation in late pregnancy and early lactation. *Metab Stress Dairy Cows.* 24:37–54.
- Laporte-Broux B, Duvaux-Ponter C, Roussel S, Promp J, Chavatte-Palmer P, Ponter AA. 2011. Restricted feeding of goats during the last third of gestation modifies both metabolic parameters and behaviour. *Livest Sci.* 138:74–88.
- Louca A, Mavrogenis A, Lawlor MJ. 1974. Effects of plane of nutrition in late pregnancy on lamb birth weight and milk yield in early lactation of Chios and Awassi sheep. *Anim Prod.* 19:341–349.
- Mavrogenis AP, Hancock J, Louca A. 1980. The effect of body-weight changes during pregnancy and lactation on the performance of three breeds of sheep. *J Agric Sci.* 95:357–363.
- Mavrogenis AP, Papachristoforou C. 2000. Genetic and phenotypic relationships between milk production and body weight in Chios sheep and Damascus goats. *Livest Prod Sci.* 67:81–87.
- Mayer E, Liebich HG, Arbitman R, Hagemeister H, Dirksen G. 1986. Nutritionally-induced changes in the rumenal papillae and in their capacity to absorb short chain fatty acids in high producing dairy cows. Paper presented at Proceedings of the 14th World Congress on Diseases of Cattle; p. 806–817.

- Mckusick BC, Thomas DL, Berger YM. 2001. Effect of weaning system on commercial milk production and lamb growth of East Friesian dairy sheep. *J Dairy Sci.* 84:1660–1668.
- Mellor DJ, Murray L. 1985. Effects of maternal nutrition on udder development during late pregnancy and on colostrum production in Scottish Blackface ewes with twin lambs. *Res Vet Sci.* 39:230–234.
- Neville TL, Meyer AM, Reyaz A, Borowicz PB, Redmer DA, Reynolds LP, Caton JS, Vonnahme KA. 2013. Mammary gland growth and vascularity at parturition and during lactation in primiparous ewes fed differing levels of selenium and nutritional plane during gestation. *J Anim Sci Biotechnol.* 4:6.
- Paten AM, Duncan EJ, Pain SJ, Peterson SW, Kenyon PR, Blair HT, Dearden PK. 2015. Functional development of the adult ovine mammary gland—insights from gene expression profiling. *BMC Genomics.* 16:748.
- Paten AM, Pain SJ, Peterson SW, Blair HT, Kenyon PR, Dearden PK, Duncan EJ. 2014. Identification of reference genes for RT-qPCR in ovine mammary tissue during late pregnancy and lactation and in response to maternal nutritional programming. *Physiol. Genomics.* 46:560–570.
- Pollott GE. 2000. A biological approach to lactation curve analysis for milk yield. *J Dairy Sci.* 83:2448–2458.
- Ruiz R, Oregui LM, Herrero M. 2000. Comparison of models for describing the lactation curve of latxa sheep and an analysis of factors affecting milk yield. *J Dairy Sci.* 83:2709–2719.
- Sahlu T, Hart SP, Le-Trong T, Jia Z, Dawson L, Gipson T, Teh TH. 1995. Influence of prepartum protein and energy concentrations for dairy goats during pregnancy and early lactation. *J Dairy Sci.* 78:378–387.
- SAS Institute. 2002. *Statistical analysis systems user's guide.* SAS Cary, NC.
- Sieber M, Freeman AE, Kelley DH. 1988. Relationships between body measurements, body weight, and productivity in Holstein dairy cows. *J Dairy Sci.* 71:3437–3445.
- Swanson TJ, Hammer CJ, Luther JS, Carlson DB, Taylor JB, Redmer DA, Neville TL, Reed JJ, Reynolds LP, Caton JS, et al. 2008. Effects of gestational plane of nutrition and selenium supplementation on mammary development and colostrum quality in pregnant ewe lambs. *J Anim Sci.* 86:2415–2423.
- van der Linden DS, Kenyon PR, Blair HT, Lopez-Villalobos N, Jenkinson CMC, Peterson SW, Mackenzie DDS. 2009. Effects of ewe size and nutrition on fetal mammary gland development and lactational performance of offspring at their first lactation. *J Anim Sci.* 87:3944–3954.
- Veerkamp RF. 1998. Selection for economic efficiency of dairy cattle using information on live weight and feed intake: a review. *J Dairy Sci.* 81:1109–1119.
- Veerkamp RF, Koenen EPC. 1999. Genetics of food intake, live weight, condition score and energy balance. *Metab Stress Dairy Cows.* 24:63–73.
- Veerkamp RF, Thompson R. 1999. A covariance function for feed intake, live weight, and milk yield estimated using a random regression model. *J Dairy Sci.* 82:1565–1573.

CAPÍTULO IX

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

La representación matemática del complejo proceso biológico de producción láctea es un área importante de la investigación en ciencia animal desde principios del siglo XX y una de las herramientas metodológicas más utilizadas en la modelación matemática en los procesos biológicos. La representación de la lactación en términos matemáticos han contado con diversas aproximaciones, las cuales dependen substancialmente de factores como: a) los objetivos iniciales de investigación, b) hipótesis a soportar o rechazar, c) características de la base de datos analizada, d) herramientas computacionales disponibles, y e) profundidad de comprensión del proceso biológico en estudio. Las primeras aproximaciones contaron con una naturaleza empírica, en las cuales el objetivo principal fue obtener estimaciones precisas de los rendimientos lácteos con base a los datos disponibles.

Los modelos empíricos de ajuste de curva de lactación continúan siendo utilizados ampliamente en diversas especies dedicadas a la producción lechera. Limitaciones en relación a la flexibilidad de los patrones de curva a analizar se han discutido ampliamente, relacionadas esencialmente con la estructura matemática que condiciona la forma de las curvaturas; además de la restringida interpretación biológica de sus parámetros. La mayoría de los modelos matemáticos de curva de lactación, empíricos y mecanísticos, han sido desarrollados para ajustar lactaciones de bovinos lecheros. Sin embargo, los sistemas ovinos presentan características particulares de manejo nutricional, reproductivo y mejoramiento genético en comparación con los sistemas lecheros bovinos, lo cual determinan una elevada variabilidad en las formas de la curva de lactación.

El modelo de Wood es la función matemática de ajuste de curva de lactación más ampliamente utilizada en la modelación en ciencia animal; desarrollada en 1967, esta función continúa vigente en la investigación animal, debido principalmente a su sencilla estructura matemática, el reducido número de observaciones necesarias para su ajuste

y por la interpretación biológica parcial de sus parámetros; que difiere con la conceptualización general de los modelos empíricos, la cual señala que su utilidad estriba únicamente en el ajuste de datos, sin una descripción biológica del proceso analizado. Además, este modelo tiene la capacidad de detectar diferentes formas de curva de lactación a través de la combinación de los signos de los parámetros b y c .

En el capítulo V un modelo empírico (Wood, 1967) fue aplicado para el análisis de curva de lactación de ovejas lecheras bajo un sistema orgánico. El modelo desarrollado por Wood (1967) detectó que el 52.06 % de las curvas analizadas presentaban una forma atípica (continuamente decreciente) lo cual es notablemente superior a lo observado en bovinos lecheros por Macciotta *et al.* (2005), quienes reportaron que solo el 20.5 % de curvas presentaban este patrón. Sin embargo, no solo la especie analizada determina la forma de curva de lactación, también el tipo de manejo influye en el patrón de producción; en el sistema orgánico analizado el porcentaje de curvas atípicas es superior al 20 % observado en sistemas intensivos-convencionales en ovejas Awassi (Pollott y Gootwine 2000).

La naturaleza aditiva del modelo de Wood determina que exista una correlación considerable entre sus parámetros; un hallazgo importante del estudio presentado en el capítulo V, es la asociación entre la forma de la curva de lactación y el grado de correlación entre los parámetros b y c . Las curvas de lactación atípicas muestran un mayor grado de correlación entre los parámetros b y c , lo cual aunado a la mayor magnitud de los residuales observados en el análisis gráfico, soportan los hallazgos de estudios previos que señalan deficiencias del modelo de Wood en el ajuste de curvas atípicas de lactación.

En el mismo estudio, la función de Wood sobreestimó rendimiento lácteos en curvas atípicas, principalmente en la segunda parte de la lactación; además de acuerdo a los residuales muestra una tendencia a la sobreestimación en el análisis gráfico. Los patrones múltiples y particulares de producción láctea ovina bajo un sistema orgánico determinan el establecimiento de un proceso de selección de modelos de ajuste de

lactación que comprenda funciones con estructura empírica y mecanística, con la finalidad de obtener estimaciones adecuadas de los rendimientos lácteos, pero además permita evaluar la relación entre factores ambientales y el proceso de producción láctea a través de la interpretación de sus parámetros.

Asimismo, la función desarrollada por Wood, además de tener la capacidad de ajustar de los rendimientos lácteos a través de la lactación, permite la estimación de algunas características importantes de la curva de lactación, como son: el pico de lactación, el tiempo al pico de lactación y la persistencia. Sin embargo, las ecuaciones utilizadas para el cálculo de estas características requieren que los valores de los parámetros b y c se encuentre en el rango de los números reales positivos. El ajuste de curvas atípicas utilizando el modelo de Wood, genera valores negativos de los parámetros b y c cuando procesos comunes son utilizados para el cálculo de estos parámetros. En el estudio del capítulo V, fueron establecidos límites (valores > 0) para el cálculo de los parámetros del modelo de Wood, lo cual permite la adecuada utilización de los mismos para estimar las características de la curva de lactación.

En el capítulo VII la ecuación desarrollada por Wood permitió identificar las diferencias en forma de la curva de lactación relacionadas con el grupo genético ovino; diferencias significativas en la producción láctea y composición química fueron observadas entre grupos genéticos, con mejores rendimientos en ovejas East Friesian y East Friesian X Suffolk. La interpretación de los parámetros del modelo de Wood detectaron diferencias en la fase de ascenso de la curva de lactación, representada por el parámetro b ; sin embargo, son necesarios estudios mas profundos con la finalidad de identificar los factores asociados a estas diferencias productivas; una herramienta metodológica útil podría ser la modelación mecanística de la curva de lactación, aprovechando su fundamentación teórica de este proceso biológico.

La modelación mecanística es una opción mas compleja para trasladar en términos matemáticos hipótesis acerca de los procesos fisiológicos y bioquímicos que regulan la

lactación. El modelo de Pollott (2000) ha sido específicamente diseñado para describir los patrones de producción láctea basado en el número y eficiencia de las células secretoras mamarias, además de integrar el concepto de apoptosis como el mecanismo que determina la disminución gradual de los rendimientos lácteos después del pico de lactación. Los parámetros del modelo de Pollott permiten la adecuada estimación de los rendimientos lácteos y el análisis de factores ambientales que afectan la curva de lactación en ovejas lecheras.

En el capítulo VI el parámetro *máxima secreción (MS)*, que describe el máximo potencial de secreción a un tiempo t de la lactación, permitió explicar parcialmente las diferencias en los rendimientos productivos en relación al número de parto; la producción láctea total y la MS se incrementaron conforme al aumento en el número de parto. Además, el aumento en la producción láctea conforme se incrementó la edad de las ovejas se asocia con una maduración anatómica y funcional de la glándula mamaria, lo cual determina una menor tasa de apoptosis, descrito en el modelo de Pollott por el parámetro *tasa de muerte celular (DR)*.

Sin embargo, el modelo de Pollott no permitió dilucidar el efecto sobre la dinámica celular de la glándula mamaria y producción láctea del tipo y época de parto. Probablemente es necesario el análisis de un mayor número de lactación para poder identificar el efecto de estos factores sobre los parámetros que describen la dinámica celular mamaria. Asimismo, la elevada complejidad teórica y el gran número de variables involucradas en el proceso de lactación determinan que la utilización de modelos mecanísticos de ajuste de curva de lactación en diversos estudios no sea tan exitoso.

La disponibilidad de nutrientes durante el último tercio de gestación y lactación provistos por la ración ofrecida y la movilización de reservas corporales son un punto clave para alcanzar adecuados rendimientos lácteos en ovejas lecheras. En el capítulo VIII la interpretación biológica de los parámetros del modelo de Pollott ayudó a explicar el efecto positivo del peso vivo (PV) sobre la producción láctea, ya que ovejas con

valores superiores de PV a la mitad de la gestación y durante el inicio y lactación media mostraron valores también superiores de MS y producción láctea, coincidiendo con hallazgos de estudios previos que señalan que ovejas mas pesadas muestran mayor proliferación de células alveolares mamarias y peso de la glándula mamaria.

La utilización de modelos matemáticos para el ajuste de lactaciones ovinas en sistemas orgánicos y convencionales permiten visualizar de manera gráfica y a través de la interpretación de sus parámetros los patrones de producción láctea y dilucidar los factores genéticos y ambientales que los afectan. La elección del modelo matemático a utilizar y su tipología debe estar basada principalmente en el establecimiento puntual de los objetivos de investigación o aplicación práctica del mismo, robustez de la base de datos y herramientas de análisis disponibles. Sin embargo, debido a los avances en la automatización en el registro de la producción láctea y la disponibilidad de poderosas herramientas de análisis de datos, permiten mayor factibilidad en la aplicación de modelos mecanísticos complejos de ajuste de curvas de lactación.

CAPÍTULO X

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelsayed M, Thomson PC, Raadsma HW (2015) A review of the genetic and non-genetic factors affecting extended lactation in pasture-based dairy systems. *Animal Production Science* **55**, 949–966. doi:10.1071/AN13300.

Afolayan RA, Abubakar BY, Osinowo OA, Dim NI (2002) Lactation and Function of Curve Parameters in Yankasa Sheep. *Asian Journal of Plant Sciences* **15**, 890–894.

Agenas S, Burstedt E, Holtenius K (2003) Effect of feeding intensity during the dry period. 1. Feed intake, body weight and milk production. *Journal of Dairy Science* **86**, 870–882.

Akers RM, Capuco A V. (2012) Lactation. 'Encycl. Dairy Sci.' pp. 1442–1446. (Elsevier Ltd)

Akpa GN, Asiribo EO, Oni OO, Alawa JP (2001) The influence of non-genetic factors on the shape of lactation curves in Red Sokoto goats. *Animal Science* **72**, 233–239.

Albarran-Portillo B, Pollott GE (2000) The Relationship Between Parameters of Biological Models of Lactation and Milk Production. 215–217.

Albarrán-Portillo B, Pollott GE (2008) Genetic Parameters Derived From Using a Biological Model of Lactation on Records of Commercial Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **91**, 3639–3648. doi:10.3168/jds.2007-0929.

Albarrán-Portillo B, Pollott GE (2011) Environmental factors affecting lactation curve parameters in the United Kingdom ' s commercial dairy herds. *Archivos de Medicina Veterinaria* **43**, 145–153.

Alqaisi O (2007) Reproductive performance and lactation yield of local Awassi, Improved Awassi and Afec-Awassi ewes under contemporary comparison on Al-Khanasry station in Jordan. MSc thesis, University of Hohenheim.

Anderson RR, Salah MS, Sheffield LG, McKenzie WN (1984) Milk Production and Lactation Curve of Guinea Pigs. *Journal of Dairy Science* **67**, 185–193. doi:10.3168/jds.S0022-0302(84)81283-7.

Angeles-Hernandez JC, Albarran-Portillo B, Gomez Gonzalez A V, Pescador Salas N, Gonzalez-Ronquillo M (2013) Comparison of mathematical models applied to f1 dairy sheep lactations in organic farm and environmental factors affecting lactation curve

parameter. *Asian-Australasian journal of animal sciences* **26**, 1119–26. doi:10.5713/ajas.2013.13096.

Angeles-Hernandez JC, Ortega OAC, Perez AHR, Ronquillo MG (2014) Effects of crossbreeding on milk production and composition in dairy sheep under organic management. *Animal Production Science* **54**, 1641–1645. doi:10.1071/AN14214.

Aziz MA, Shalaby NA, El-Shafie OM, Mahdy AT, Nishida A (2006) Comparison between the shapes of lactation curve of Egyptian buffalo milk yield estimated by the incomplete gamma function and a new model. *Livestock Research for Rural Development* **18**,.

Barillet F, Marie C, Jacquin M, Lagriffoul G, Astruc JM (2001) The French Lacaune dairy sheep breed: Use in France and abroad in the last 40 years. *Livestock Production Science* **71**, 17–29. doi:10.1016/S0301-6226(01)00237-8.

Bauman DE, Currie WB (1980) Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *Journal of Dairy Science* **63**, 1514–1529. doi:10.3168/jds.S0022-0302(80)83111-0.

Bebbington M, Lai CD, Zitikis R (2009) Modeling lactation curves: classical parametric models re-examined and modified. *Journal of Applied Statistics* **36**, 121–133. doi:10.1080/02664760802443897.

Berry DP, Buckley F, Dillon P (2007) Body condition score and live-weight effects on milk production in Irish Holstein-Friesian dairy cows. *Animal: an international journal of animal bioscience* **1**, 1351–1359. doi:10.1017/S1751731107000419.

Berry DP, Olori VE, Cromie a. R, Veerkamp RF, Rath M, Dillon P (2007) Accuracy of predicting milk yield from alternative milk recording schemes. *Animal Science* **80**, 53–60. doi:10.1079/ASC34880053.

Bilgin OC, Esenbuga N, Davis ME (2010) Comparison of models for describing the lactation curve of Awassi, Morkaraman and Tushin sheep. *Archiv Tierzucht* **53**, 447–456.

Brody S, Ragsdale AC, Turner CW (1923) the Rate of Decline of Milk Secretion With the Advance of the Period of Lactation. *The Journal of general physiology* **5**, 441–4. doi:10.1085/jgp.5.4.441.

Butorovic N (2015) Meteorological summary year 2014 'Jorge C. Schythe' Station. *Anales del Instituto de la Patagonia* **43**,.

- Caja G, Such ;, Rovai ;, Molina ;, Fernández N, Torres A, Gallego Y (2002) Aptitud al ordeño mecánico y morfología mamaria en ovino lechero. In 'XXVII Jornadas Científicas y VI Jornadas Int. la Soc. Española Ovinotecnia', 1–30
- Cankaya S, Unalan A, Soydan E (2011) Selection of a mathematical model to describe the lactation curves of Jersey cattle. *Archiv Tierzucht* **54**, 27–35.
- Cannas A (2004a) Feeding of lactating ewes. 'Dairy Sheep Nutr.' (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 79–108. (CABI Publishing: Oxfordshire)
- Cannas A (2004b) Energy and protein requirements. 'Dairy Sheep Nutr.' (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 31–49. (CABI Publishing)
- Cappio-Borlino A, Portolano B, Todaro M, Macciotta NPP, Giaccone P, Pulina G (1997) Lactation Curves of Valle del Belice Dairy Ewes for Yields of Milk, Fat, and Protein Estimated with Test Day Models. *Journal of Dairy Science* **80**, 3023–3029. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76269-6.
- Cappio-Borlino A, Pulina G, Cannas A, Rossi G (1989) The theoretical lactation curve of Sardinian ewes estimated by a gamma-type function. *Zoot Nutr Anim* **15**, 59–63.
- Cappio-Borlino A, Pulina G, Rossi G (1995) A non-linear modification of Wood's equation fitted to lactation curves of Sardinian dairy ewes. *Small Ruminant Research* **18**, 75–79. doi:10.1016/0921-4488(95)00713-U.
- Capuco A, Akers RM (2011) Galactopoiesis, effects of hormones and growth factors. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds JW Fuquay, PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 26–31. (Elsevier Ltd: Oxford)
- Capuco A V, Wood DL, Baldwin R, Mcleod K, Paape MJ (2001) Mammary Cell Number, Proliferation, and Apoptosis During a Bovine Lactation: Relation to Milk Production and Effect of bST 1. *J Dairy Sci* **84**, 2177–2187.
- Carta A, Macciotta N, Cappio-Borlino A, Sanna SR (2001) Modelling phenotypic (co)variances of test day records in dairy ewe. *Livestock Production Science* **69**, 9–16.
- Casado C, Piquer O, Cervera C, Pascual JJ (2006) Modelling the lactation curve of rabbit does: Towards a model including fit suitability and biological interpretation. *Livestock Science* **99**, 39–49. doi:10.1016/j.livprodsci.2005.05.019.
- Castañares N, Colitti M, Nudda A, Stefanon B, Pulina G (2013a) Dynamics of mammary secretory cells in lactating dairy ewes. *Small Ruminant Research* **113**, 251–253.

doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.003.

Castañares N, Colitti M, Nudda A, Stefanon B, Pulina G (2013b) Dynamics of mammary secretory cells in lactating dairy ewes. *Small Ruminant Research* **113**, 251–253. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.003.

Catillo G, Macciotta NPP, Carretta a, Cappio-Borlino a (2002) Effects of age and calving season on lactation curves of milk production traits in Italian water buffaloes. *Journal of dairy science* **85**, 1298–1306. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74194-5.

Centoducati P, Maggiolino A, Palo P De, Tateo A (2012) Application of Wood's model to lactation curve of Italian Heavy Draft horse mares. *Journal of Dairy Science* **95**, 5770–5775. doi:10.3168/jds.2012-5513.

Chang Y-M, Rekaya R, Gianola D, Thomas DL (2001a) Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livestock Production Science* **71**, 241–251.

Chang Y-M, Rekaya R, Gianola D, Thomas DL (2001b) Genetic variation of lactation curves in dairy sheep: a Bayesian analysis of Wood's function. *Livestock Production Science* **71**, 241–251. doi:10.1016/S0301-6226(01)00185-3.

Charismiadou MA, Bizelis JA, Rogdakis E (2000) Metabolic changes during the perinatal period in dairy sheep in relation to level of nutrition and breed . I . Late pregnancy. *Journal of Animal Physiology and ANimal Nutrition* **84**, 61–72.

Choumei Y, Kahi AK, Hirooka H (2006) Fit of Wood's function to weekly records of milk yield, total digestible nutrient intake and body weight changes in early lactation of multiparous Holstein cows in Japan. *Livestock Science* **104**, 156–164. doi:10.1016/j.livsci.2006.04.015.

Colitti M[, Stefanon B[, Wilde J[Apoptotic Cell Death\ bax and bcl!1 Expression During Sheep Mammary Gland Involution.

Collier RJ, Romagnolo D, Baumgard LH (2011) Galactopoiesis, Seasonal effects. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds F J.W., PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 1465–1470. (Elsevier Ltd: Oxford)

Dag B, Keskin I, Mikailsoy F (2006) Application of different models to the lactation curves of unimproved Awassi ewes in Turkey. *South African Journal of Animal Science* **35**, 238–243. doi:10.4314/sajas.v35i4.3965.

- Dekkers JCM, Hag JH Ten, Weersink A (1998) Economic aspects of persistency of lactation in dairy cattle. *Livestock Production Science* **53**, 237–252.
- Dhanao m s (1981) A note on an alternative form of the lactaion model of Wood. *Animal Production* **32**, 349–351.
- Dickerson G (1970) Efficiency of animal production-molding the biological components. *Journal of Animal Science* **30**, 848–859.
- Dijkstra J, France J, Dhanoa MS, Maas J a, Hanigan MD, Rook a J, Beever DE (1997a) A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of dairy science* **80**, 2340–2354. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X.
- Dijkstra J, France J, Dhanoa MS, Maas JA, Hanigan MD, Rook AJ, Beever DE (1997b) A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of dairy science* **80**, 2340–54. doi:10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X.
- Dijkstra J, Lopez S, Bannink a., Dhanoa MS, Kebreab E, Odongo NE, Fathi Nasri MH, Behera UK, Hernandez-Ferrer D, France J (2010) Evaluation of a mechanistic lactation model using cow, goat and sheep data. *The Journal of Agricultural Science* **148**, 249. doi:10.1017/S0021859609990578.
- Dimauro C, Atzori AS, Pulina G (2011) Assessing and optimazing the performance of a mechanistic mathematical model of the sheep mammary gland. 'Model. Nutr. Dig. Util. farm Anim.' (Eds D Sauvant, J Van Milgen, P Faverdin, N Friggens) pp. 72–82. (Wageningen Acedemic Publishers: Wageningen) doi:10.3920/978-90-8686-712-7.
- Dimauro C, Cappio-Borlino A, Macciotta NPP, Pulina G (2007) Use of a computer-aided design to develop a stress simulation model for lactating dairy sheep. *Livestock Science* **106**, 200–209. doi:10.1016/j.livsci.2006.08.005.
- Dimauro C, Catillo G, Bacciu N, Macciotta NPP (2005) Fit of different linear models to the lactation curve of Italian water buffalo. *Italian Journal of Animal Science* **4**, 22–24.
- Dumas A, Dijkstra J, France J (2008) Mathematical modelling in animal nutrition: a centenary review. *Journal of Agricultural Science* **146**, 123–142. doi:10.1017/S0021859608007703.
- Elvira L, Hernandez F, Cuesta P, Cano S, Gonzalez-Martin J-V, Astiz S (2013a)

Accurate mathematical models to describe the lactation curve of Lacaune dairy sheep under intensive management. *Animal: an international journal of animal bioscience* **7**, 1044–52. doi:10.1017/S175173111200239X.

Elvira L, Hernandez F, Cuesta P, Cano S, Gonzalez-Martin JV, Astiz S (2013b) Factors affecting the lactation curves of intensively managed sheep based on a clustering approach. *Journal of Dairy Research* **80**, 439–447. doi:10.1017/S0022029913000381.

Fadlelmoula AA, Nikhaila A, 11 AM (2007) Lactation Curve and Persistency of Crossbred Dairy Cows in the Sudan. *Journal of Applied Sciences Research* **3**, 1127–1133.

Fahmy MH, Shrestha JNB (2011) Sheep breeds. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds JW Fuquay, PF Fox, PLH McSweeney) pp. 325–339. (Elsevier: London) doi:10.1016/B978-0-12-374407-4.00290-9.

Fernández C, Sánchez A, Garcés C (2002) Modeling the lactation curve for test-day milk yield in Murciano-Granadina goats. *Small Ruminant Research* **46**, 29–41. doi:10.1016/S0921-4488(02)00179-7.

Ferreira AM, Bislev SL, Bendixen E, Almeida AM (2013) The mammary gland in domestic ruminants: A systems biology perspective. *Journal of Proteomics* **94**, 110–123. doi:10.1016/j.jprot.2013.09.012.

France J, Kebreab E (2008) Introduction. 'Math. Model Anim. Nutr.' (Eds J France, E Kebreab) pp. 1–11. (CAB International: Oxfordshire)

Franci O, Pugliese C, Acciaioli A, Parisi G, Lucifero M (1999) Application of two models to the lactation curve of Massese ewes. *Small Ruminant Research* **31**, 91–96. doi:10.1016/S0921-4488(98)00130-8.

Freund RJ, Littell RC (1991) 'SAS system for regression.' (SAS Institute Inc.: Cary, NC)

Godfrey RW, Gray ML, Collins JR (1997) Lamb growth and milk production of hair and wool sheep in a semi-arid tropical environment. *Small Ruminant Research* **24**, 77–83.

Gołębiewski M, Brzozowski P, Gołębiewski Ł (2011) Analysis of lactation curves, milk constituents, somatic cell count and urea in milk of cows by the mathematical model of Wood. *Acta Veterinaria Brno* **80**, 73–80. doi:10.2754/avb201180010073.

González-García E, Tesniere A, Camous S, Bocquier F, Barillet F, Hassoun P (2015) The effects of parity, litter size, physiological state, and milking frequency on the

metabolic profile of Lacaune dairy ewes. *Domestic Animal Endocrinology* **50**, 32–44. doi:10.1016/j.domaniend.2014.07.001.

Gootwine E (2004) Placental hormones and fetal – placental development. *Animal Reproduction Science* **82**, 551–566. doi:10.1016/j.anireprosci.2004.04.008.

Gootwine E (2011) Mini review: breeding Awassi and Assaf sheep for diverse management conditions. *Tropical Animal Health Production* **43**, 1289–1296. doi:10.1007/s11250-011-9852-y.

Gootwine E, Goot H (1994) Lamb and milk production of Awassi and East-Friesian sheep and their crosses under Mediterranean environment. *Small Ruminant Research* **20**, 255–260.

Gootwine E, Goot H (1996) Lamb and milk production of Awassi and East Friesian sheep and their crosses under a mediterranean environment. *Small Ruminant Research* **20**, 255–260.

Gootwine E, Pollott GE (2000) Factors affecting milk production in improved Awassi dairy ewes. *Animal Science* **71**, 807–815. <http://www.cabdirect.org/abstracts/20003013245.html;jsessionid=B09F1EBA77AAA79D0A51860E332C96BC>.

Groenewald PCN, Ferreira A V., van der Merwe HJ, Slippers SC (1996) Application of Bayesian inference in the comparison of lactation curves of Merino ewes. *Animal Science* **62**, 63–69. doi:10.1017/S1357729800014326.

Grossman M, Koops WJ (2003) Modeling extended lactation curves of dairy cattle: a biological basis for the multiphasic approach. *Journal of dairy science* **86**, 988–98. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73682-0.

Grzesiak W, B??aszczyk P, Lacroix R (2006) Methods of predicting milk yield in dairy cows-Predictive capabilities of Wood's lactation curve and artificial neural networks (ANNs). *Computers and Electronics in Agriculture* **54**, 69–83. doi:10.1016/j.compag.2006.08.004.

Haenlein GFW, Wendorff WL (2006) Sheep milk. 'Handb. Milk Non-Bovine Mamm.' (Eds YW Park, GFW Haenlein) pp. 137–194. (Blackwell Publishing: Victoria)

Hansen LB, Cole JB, Marx GD, Seykora AJ (1999) Productive life and reasons for disposal of Holstein cows selected for large versus small body size. *Journal of dairy*

science **82**, 795–801. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75298-7.

Hansen A V, Strathe AB, Kebreab E, France J, Theil PK (2012) Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach 1. doi:10.2527/jas.2011-4788.

Harville DA, Henderson CR (1966) Interrelationships Among Age, Body Weight, and Production Traits During First Lactations of Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* **49**, 1254–1261. doi:10.3168/jds.S0022-0302(66)88065-7.

Hohenboken WD, Dudley A, Moody DE (1992) A comparison among equations to characterize lactation curves in beef cows. *Animal Production* **55**, 23–28. doi:10.1017/S0003356100037223.

Hunter TE, Suster D, DiGiacomo K, Cummins LJ, Dunshea FR, Egan AR, Leury BJ (2015) Milk production and body composition of single-bearing East Friesian×Romney and Border Leicester×Merino ewes. *Small Ruminant Research* **131**, 123–129. doi:10.1016/j.smallrumres.2015.08.006.

Hurley WL, Loor JJ (2011) Growth, development and involution. 'Encycl. Dairy Sci.' (Eds W Fuquay J, PF Fox, PLH Mcsweeney) pp. 1689–1697. (Elsevier: London)

ICAR (2016) Recording Guidelines. *International committee for animal Recording* 59–75.

Ingvartsen KL, Friggens NC, Faverdin P (1999) Food intake regulation in late pregnancy and early lactation. *Metabolic stress in dairy cows, occasional publication* **24**, 37–54.

Jenkinson CMC (2003) The pattern and regulation of mammary gland development during fetal life in sheep. Massey University.

Keskin I, Dağ B (2006) Comparison of different mathematical models for describing the complete lactation of Akkaraman ewes in Turkey. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **19**, 1551–1555.

Knight CH, Peaker M, Wilde CJ (1998) Local control of mamary development and function. *Reviews of Reproduction* **3**, 104–112.

Knight CH, Wilde CJ (1993) Mammary cell changes during pregnancy and lactation. *Livestock Production Science* **35**, 3–19. doi:10.1016/0301-6226(93)90178-K.

Korkmaz M, Üçkardeş F, Kaygisiz A (2011) Comparison of Wood, Gaines, parabolic, Hayashi, Dhanno and polynomial models for lactation season curve of Simmental cows.

J Anim Plant Sci **21**, 448–458.

Kremer R, Barbato G, Rista L, Rosés L, Perdigón F (2010) Reproduction rate, milk and wool production of Corriedale and East Friesian×Corriedale F1 ewes grazing on natural pastures. *Small Ruminant Research* **90**, 27–33. doi:10.1016/j.smallrumres.2009.12.009.

Landete-Castillejos T, Gallego L (2000) Technical note: The ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. *Journal of Animal Science* **78**, 3010–3013.

Laporte-Broux B, Duvaux-Ponter C, Roussel S, Promp J, Chavatte-Palmer P, Ponter AA (2011) Restricted feeding of goats during the last third of gestation modifies both metabolic parameters and behaviour. *Livestock Science* **138**, 74–88. doi:10.1016/j.livsci.2010.12.008.

Ledder G (2013) Mathematical Modeling. 'Math. Life Sci. Calc. Model. Probab. Dyn. Syst.' (Ed G Ledder) pp. 83–143. (Springer) doi:10.1007/978-1-4614-7276-6.

León JM, Macciotta NPP, Gama LT, Barba C, Delgado J V (2012) Characterization of the lactation curve in Murciano-Granadina dairy goats. *Small Ruminant Research* **107**, 76–84. doi:10.1016/j.smallrumres.2012.05.012.

Lérias JR, Hernández-Castellano LE, Suárez-Trujillo A, Castro N, Pourlis A, Almeida AM (2014a) The mammary gland in small ruminants: major morphological and functional events underlying milk production – a review. *Journal of Dairy Research* **81**, 304–318. doi:10.1017/S0022029914000235.

Lérias JR, Hernández-Castellano LE, Suárez-Trujillo A, Castro N, Pourlis A, Almeida AM (2014b) The mammary gland in small ruminants: major morphological and functional events underlying milk production—a review. *The Journal of dairy research* **81**, 304–18. doi:10.1017/S0022029914000235.

van der Linden DS, Kenyon PR, Blair HT, Lopez-Villalobos N, Jenkinson CMC, Peterson SW, Mackenzie DDS (2009a) Effects of ewe size and nutrition on fetal mammary gland development and lactational performance of offspring at their first lactation. *Journal of animal science* **87**, 3944–54. doi:10.2527/jas.2009-2125.

van der Linden DS, Kenyon PR, Blair HT, Lopez-Villalobos N, Jenkinson CMC, Peterson SW, Mackenzie DDS (2009b) Effects of ewe size and nutrition on fetal mammary gland development and lactational performance of offspring at their first

lactation. *Journal of animal science* **87**, 3944–54. doi:10.2527/jas.2009-2125.

Lombaard C (2006) Hierarchical Bayesian modelling for the analysis of the lactation of dairy animals. *Thesis*. <http://etd.uovs.ac.za/ETD-db/theses/available/etd-11032006-105824/unrestricted/LombaardCS.pdf>.

Louca A, Mavrogenis A, Lawlor MJ (1974) Effects of plane of nutrition in late pregnancy on lamb birth weight and milk yield in early lactation of Chios and Awassi sheep. *Animal Production* **19**, 341–349. doi:10.1017/S0003356100022911.

Macciotta NPP, Capplo-Borlino A, Pulina G (2004) Growth and lactation curves. ‘Genet. Anal. Complex Trait. Using SAS’. (Ed AM Saxton) pp. 97–146. (SAS Publishing: North Carolina)

Macciotta NPP, Dimauro C, Rassa SPG, Steri R, Pulina G (2011) The mathematical description of lactation curves in dairy cattle. *Ital J Anim Sci* **10**, 51–213. doi:10.4081/ijas.2011.e51.

Macciotta NPP, Vicario D, Cappio-Borlino a (2005) Detection of different shapes of lactation curve for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models. *Journal of dairy science* **88**, 1178–91. doi:10.3168/jds.S0022-0302(05)72784-3.

Macias H, Hinck L (2012) Mammary gland development. *Wiley interdisciplinary reviews Developmental biology* **1**, 533–57. doi:10.1002/wdev.35.

Manalu W, Sumaryadi MY (1998) Mammary gland indices at the end of lactation in Javanese ewes with different litter sizes. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **11**, 648–654.

Manalu W, Sumaryadi M., Sudjatmogo , Satyaningtijas A. (1998) Effect of superovulation on maternal serum progesterone concentration, uterine and fetal weights at weeks 7 and 15 of pregnancy in Javanese Thin-Tail ewes. *Small Ruminant Research* **30**, 171–176. doi:10.1016/S0921-4488(98)00121-7.

Manalu W, Sumaryadi MY, Sudjatmogo, Satyaningtijas AS (2000) Effect of Superovulation Prior to Mating on Milk Production Performance During Lactation in Ewes. *Journal of Dairy Science* **83**, 477–483. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)74906-X.

Marion G, Lawson D (2008) An Introduction to Mathematical Modelling List of Figures. https://people.maths.bris.ac.uk/~madjl/course_text.pdf.

Mavrogenis AP, Hancock J, Louca A (1980) The effect of body-weight changes during

pregnancy and lactation on the performance of three breeds of sheep. *The Journal of Agricultural Science* **95**, 357–363. doi:10.1017/S0021859600039381.

Mavrogenis AP, Papachristoforou C (2000) Genetic and phenotypic relationships between milk production and body weight in Chios sheep and Damascus goats. *Livestock Production Science* **67**, 81–87. doi:10.1016/S0301-6226(00)00187-1.

Mayer E, Liebich HG, Arbitman R, Hagemeister H, Dirksen G (1986) Nutritionally-induced changes in the rumenal papillae and in their capacity to absorb short chain fatty acids in high producing dairy cows. In '14th World Congr. Dis. Cattle', 806–817

Mckusick BC, Thomas DL, Berger YM (2001) Effect of Weaning System on Commercial Milk Production and Lamb Growth of East Friesian Dairy Sheep. *Journal of dairy Science* **84**, 1660–1668.

McManaman JL, Neville MC (2003) Mammary physiology and milk secretion. *Advanced Drug Delivery Reviews* **55**, 629–641. doi:10.1016/S0169-409X(03)00033-4.

McNamara JP (2004) Research, improvement and application of mechanistic, biochemical, dynamic models of metabolism in lactating dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology* **112**, 155–176. doi:10.1016/j.anifeedsci.2003.10.010.

Mellor DJ, Murray L (1985) Effects of maternal nutrition on udder development during late pregnancy and on colostrum production in Scottish Blackface ewes with twin lambs. *Research in veterinary science* **39**, 230–4. <http://europepmc.org/abstract/med/4070789>.

Meraï A, Gengler N, Hammami H, Rekik M, Bastin C (2014) Non-genetic sources of variation of milk production and reproduction and interactions between both classes of traits in Sicilo-Sarde dairy sheep. *Animal* **8**, 1534–1539. doi:10.1017/S1751731114001347.

Mioč B, Prpić Z, Antunac N, Antunović Z, Samaržija D, Vnučec I, Pavić V (2009) Milk yield and quality of Cres sheep and their crosses with Awassi and East Friesian sheep. *Mljekarstvo* **59**, 217–224.

Molenaar AJ, Davis SR, Wilkins RJ (1992) Expression of a -Lactalbumin , a- S 1- Casein , and Lact oferrin Genes Is Heterogeneous in Sheep and Cattle Mammary Tissue. *Comparative and General Pharmacology*.

Neal HDSC, Thornley JHM (1983) The lactation curve in cattle: a mathematical model of the mammary gland. *Journal of Agricultural Science* **101**, 389–400.

Neal HDSC, Thornley JHM, Nelder JA, WOOD PDP (1983) The lactation curve in cattle: a mathematical model of the mammary gland. *The Journal of Agricultural Science* **101**, 389. doi:10.1017/S0021859600037710.

Neville TL, Meyer AM, Reyaz A, Borowicz PB, Redmer DA, Reynolds LP, Caton JS, Vonnahme KA (2013) Mammary gland growth and vascularity at parturition and during lactation in primiparous ewes fed differing levels of selenium and nutritional plane during gestation. *Journal of animal science and biotechnology* **4**, 1–6. doi:10.1186/2049-1891-4-6.

Nezamidoust M, Kominakis A, Safari A (2013) Use of Wood's model to analyze the effects of milking methods on lactation curve in sheep. *Small Ruminant Research* **113**, 195–204. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.01.019.

Nitu C, Burlacu R, David L (2010) Principles of Mathematical Modeling Applied to Animal Science. *Animal Science and Biotechnologies* **43**, 362–367.

Nørgaard JV, Nielsen MO, Theil PK, Sørensen MT, Safayi S, Sejrsen K (2008) Development of mammary glands of fat sheep submitted to restricted feeding during late pregnancy. *Small Ruminant Research* **76**, 155–165. doi:10.1016/j.smallrumres.2007.11.001.

Noronha D De, Vieira F, Pereira JC, Fonseca F, Campos OF De, Braga JL, Martuscello JA (2010) Revista Brasileira de Zootecnia Selection of models of lactation curves to use in milk production simulation Seleção de funções de curvas de lactação para uso em modelos de simulação de sistemas de produção de leite. *Revista Brasileira de Zootecnia* **39**, 891–902.

Ochoa-Cordero MA, Torres-Hernández G, Ochoa-Alfaro AE, Vega-Roque L, Mandeville PB (2002) Milk yield and composition of Rambouillet ewes under intensive management. *Small Ruminant Research* **43**, 269–274. doi:10.1016/S0921-4488(02)00019-6.

Olori VE, Brotherstone S, Hill WG, McGuirk BJ (1999) Fit of standard models of the lactation curve to weekly records of milk production of cows in a single herd. *Livestock Production Science* **58**, 55–63. doi:10.1016/S0301-6226(98)00194-8.

Paten A (2014) Maternal nutritional programming in the sheep: Effects on post - - - natal growth , mammogenesis and lactation in adult - - - ewe offspring. Massey

University.

Paten AM, Duncan EJ, Pain SJ, Peterson SW, Kenyon PR, Blair HT, Dearden PK (2015) Functional development of the adult ovine mammary gland--insights from gene expression profiling. *BMC genomics* **16**, 748. doi:10.1186/s12864-015-1947-9.

Paten AM, Pain SJ, Peterson SW, Blair HT, Kenyon PR, Dearden PK, Duncan EJ (2014) Identification of reference genes for RT-qPCR in ovine mammary tissue during late pregnancy and lactation and in response to maternal nutritional programming. *Physiological genomics* **46**, 560–70. doi:10.1152/physiolgenomics.00030.2014.

Peralta-Lailson M, Trejo-González AA, Pedraza-Villagómez P, Berruecos-Villalobos JM, Vasquez CG (2005) Factors affecting milk yield and lactation curve fitting in the creole sheep of Chiapas-Mexico. *Small Ruminant Research* **58**, 265–273. doi:10.1016/j.smallrumres.2004.11.005.

Pollott G. (2000b) A Biological Approach to Lactation Curve Analysis for Milk Yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2448–2458. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8.

Pollott GE (2000a) A Biological Approach to Lactation Curve Analysis for Milk Yield. *Journal of Dairy Science* **83**, 2448–2458. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8.

Pollott GE, Gootwine E (2000) Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *Animal Science* **7100**, 197–207.

Pollott GE, Gootwine E (2004) Reproductive performance and milk production of Assaf sheep in an intensive management system. *Journal of dairy science* **87**, 3690–703. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73508-0.

Portolano B, Spatafora F, Bono G, Margiotta S, Todaro M, Ortoleva V, Leto G (1996) Application of the Wood model to lactation curves of Comisana sheep. *Small Ruminant Research* **24**, 7–13. doi:10.1016/0921-4488(95)00842-X.

Prasad S (2003) Modeling of lactation curves of dairy animals. *Journal of Applied Animal Research* **24**, 79–84.

Pulina G, Nudda A (2004) Mathematical modelling of milk production patterns in dairy sheep. 'Dairy Sheep Nutr.' (Eds G Pulina, R Bencini) pp. 13–30. (CABI Publishing: Oxfordshire)

Pulina G, Nudda A, Pietro N, Macciotta P, Battacone G, Pier S, Rassu G, Cannas A (2007) Non-nutritional factors affecting lactation persistency in dairy ewes: a review.

ITALJANIMSCI **6**, 115–141.

Quinn N, Killen L, Buckley F (2005) Empirical algebraic modelling of lactation curves using Irish data Introduction Empirical algebraic modelling of lactation curves offers a summary of longitudinal milk. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* **44**, 0–0.

Rattray P V., Garrett WN, East NE, Hinman N (1974) Growth, Development and Composition of the Ovine Conceptus and Mammary Gland During Pregnancy. *Journal of Animal Science* **38**, 613. doi:10.2527/jas1974.383613x.

Rezaei R, Wu Z, Hou Y, Bazer FW, Wu G (2016) Amino acids and mammary gland development: nutritional implications for milk production and neonatal growth. *Journal of Animal Science & Biotechnology* **7**, 1–22. <http://10.0.4.162/s40104-016-0078-8>.

Rota AM, Gonzalo C, Rodriguez PL, Rojas AI, Martín L, Tovar JJ (1993) Effects of stage of lactation and parity on somatic cell counts in milk of Verata goats and algebraic models of their lactation curves. *Small Ruminant Research* **12**, 211–219. doi:10.1016/0921-4488(93)90085-V.

Rowson AR, Daniels KM, Ellis SE, Hovey RC (2012) Growth and development of the mammary glands of livestock: A veritable barnyard of opportunities. *Seminars in Cell and Developmental Biology* **23**, 557–566. doi:10.1016/j.semcd.2012.03.018.

Ruiz R, Oregui LM, Herrero M (2000) Comparison of models for describing the lactation curve of latxa sheep and an analysis of factors affecting milk yield. *Journal of dairy science* **83**, 2709–19. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75165-4.

Ruvuna F, Kogi JK, Taylor JF, Mkuu SM (1995) Lactation curves among crosses of Galla and East African with Toggenburg and Anglo Nubian goats. *Small Ruminant Research* **16**, 1–6. doi:10.1016/0921-4488(94)00043-7.

Sahlu T, Hart SP, Le-Trong T, Jia Z, Dawson L, Gipson T, Teh TH (1995) Influence of prepartum protein and energy concentrations for dairy goats during pregnancy and early lactation. *Journal of Dairy Science* **78**, 378–387.

Sakul H, Boylan WJ (1992) Evaluation of U.S. sheep breeds for milk production and milk composition. *Small Ruminant Research* **7**, 195–201. doi:10.1016/0921-4488(92)90224-R.

Santos AS, Silvestre AM (2008) A Study of Lusitano Mare Lactation Curve with Wood's Model. *Journal of Dairy Science* **91**, 760–766. doi:10.3168/jds.2007-0057.

Sargent FD, Lytton VH, Wall OG (1968) Test Interval Method of Calculating Dairy Herd Improvement Association Records. *Journal of Dairy Science*, **51**, 170–179.

SAS Institute (2002) ‘Statistical analysis systems user’s guide.’. (SAS: Cary, NC).

Shaat I (2014) Application of the Wood lactation curve in analysing the variation of daily milk yield in the Zaraibi goats in Egypt. *Small Ruminant Research* **117**, 25–33.

Shanks R, PJ B, AE F, FN D (1981) Genetic aspects of lactation curves. *Journal of Dairy Science* **64**, 1852–1860.

Sieber M, Freeman AE, Kelley DH (1988) Relationships between Body Measurements, Body Weight, and Productivity in Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **71**, 3437–3445. doi:10.3168/jds.S0022-0302(88)79949-X.

Sikka LC (1950) A study of lactation as affected by heredity and environment. *Journal of Dairy Research* **17**, 231.

Silvestre AM, Martins AM, Santos VA, Ginja MM, Colaço JA (2009) Lactation curves for milk , fat and protein in dairy cows : A full approach. *Livestock Science* **122**, 308–313. doi:10.1016/j.livsci.2008.09.017.

Steri R (2009) The mathematical description of the lactation curve of Ruminants: issues and perspectives. University of Sassari.

Strucken EM, Laurenson YCSM, Brockmann GA (2015) Go with the flow-biology and genetics of the lactation cycle. *Frontiers in Genetics* **6**,. doi:10.3389/fgene.2015.00118.

Svennersten-Sjaunja K, Olsson K (2005) Endocrinology of milk production. *Domestic Animal Endocrinology* **29**, 241–258. doi:10.1016/j.domaniend.2005.03.006.

Swanson TJ, Hammer CJ, Luther JS, Carlson DB, Taylor JB, Redmer DA, Neville TL, Reed JJ, Reynolds LP, Caton JS, Vonnahme KA (2008) Effects of gestational plane of nutrition and selenium supplementation on mammary development and colostrum quality in pregnant ewe lambs. *Journal of animal science* **86**, 2415–23. doi:10.2527/jas.2008-0996.

Tedeschi LO, Fox DG, Sainz RD, Barioni LG, Madeiros SR, Celso B (2005) Mathematical models in ruminant nutrition. *Science Agricola* **62**, 76–91.

Togashi K, Lin CY (2003) Modifying the lactation curve to improve lactation milk and persistency. *Journal of Dairy Science* **86**, 1487–1493. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73734-5.

- Togashi K, Lin CY (2006) Selection for milk production and persistency using eigenvectors of the random regression coefficient matrix. *Journal of dairy science* **89**, 4866–4873. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72535-8.
- Tucker HA (2000) Hormones, Mammary Growth, and Lactation: a 41-Year Perspective. *Journal of Dairy Science* **83**, 874–884. http://works.bepress.com/carolyn_ellis/49/%5Cnpapers2://publication/uuid/79EFC178-B759-44AE-B36E-3D2A6FA1ED65.
- Tufarelli V, Dario M, Laudadio V (2009) Forage to concentrate ratio in Jonica breed goats: influence on lactation curve and milk composition. *Journal of Applied Animal Research* **76**, 124–128. doi:10.1017/S0022029908003841.
- Ugwa KA (2012) Mathematical Modeling As A Tool For Sustainable Development In Nigeria. *Internatinal Journal of Academic Research in Progressive Education and Development* **1**, 251–258.
- Val-Arreola D, Kebreab E, Dijkstra J, France J (2004) Study of the lactation curve in dairy cattle on farms in central Mexico. *Journal of dairy science* **87**, 3789–3799. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73518-3.
- Val-Arreola D, Kebreab E, France J (2006) Modeling small-scale dairy farms in central Mexico using multi-criteria programming. *Journal of dairy science* **89**, 1662–72. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72233-0.
- Varona L, Moreno C, Cortes LAG, Altarriba J (1998) Bayesian Analysis of Wood ' s Lactation Curve for Spanish Dairy Cows. *J Dairy Sci* **81**, 1469–1478. doi:10.3168/jds.S0022-0302(98)75711-X.
- Veerkamp RF (1998) Selection for economic efficiency of dairy cattle using information on live weight and feed intake: a review. *Journal of dairy science* **81**, 1109–1119. doi:10.3168/jds.S0022-0302(98)75673-5.
- Veerkamp RF, Koenen EPC (1999) Genetics of food intake, live weight, condition score and energy balance. *Metabolic stress in dairy cows, occassional publication* **24**, 63–73.
- Veerkamp RF, Thompson R (1999) A covariance function for feed intake, live weight, and milk yield estimated using a random regression model. *Journal of dairy science* **82**, 1565–73. doi:10.3168/jds.S0022-0302(99)75384-1.
- Vetharanim I, Davis SR, Upsdell M, Kolver ES, Pleasants AB (2003a) Modeling the

effect of energy status on mammary gland growth and lactation. *Journal of dairy science* **86**, 3148–56. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73916-2.

Vetharaniam I, Davis SR, Upsdell M, Kolver ES, Pleasants AB (2003b) Modeling the Effect of Energy Status on Mammary Gland Growth and Lactation. *J Dairy Sci* **86**, 3148–3156.

Wahome RG, Carles AB, Schwartz HJ (1994) An analysis of the variation of the lactation curve of Small East African goats. *Small Ruminant Research* **15**, 1–7.

Wall E, Mcfadden T (2012) Regulation of mammary development as it relates to changes in milk production efficiency. 'Milk Prod. up-to-date Overv. Anim. Nutr. Manag. Heal.' (Ed Narongsak Chaiyabutr) pp. 257–288. (Croatia)

Wei T, Viliam S (2016) corrplot: Visualization of a Correlation Matrix. <http://cran.r-project.org/package=corrplot>.

Wilde CJ, Quarrie LH, Tonner E, Flint DJ, Peaker M (1997) Mammary apoptosis. *Livestock Production Science* **50**, 29–37. doi:10.1016/S0301-6226(97)00070-5.

Wilmink JBM (1987) Adjustment of test day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. *Livestock Production Science* **16**, 335–348.

Wood PDP (1967) Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* **216**, 164–165.

Wood PDP (1968) Factors affecting persistency of lactation in cattle. *Nature* **218**, 894.

Yang X-S (2013) 'Mathematical modeling with multidisciplinary applications.' (Wiley: Nw Jersey)

Zobel G, Weary DM, Leslie KE, Von Keyserlingk MAG (2015) Invited review: Cessation of lactation: Effects on animal welfare. *Journal of dairy science* **98**, 8263–8277.

CAPÍTULO XI

APÉNDICES

Apéndice I. Base de datos utilizada para llevar a cabo el meta-análisis y meta-regresión del capítulo 1.

Cuadro S1. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la producción láctea (L) en respuesta a la relación forraje:concentrado.

| Autor | año | media F | DE F | n F | media C | DE C | n C | TE | VAR |
|-----------------------------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Cannas <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 1.42 | 0.06 | 8 | 1.26 | 0.06 | 8 | 0.1600 | 0.0009 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 0.63 | 0.04 | 30 | 0.66 | 0.04 | 30 | -0.0370 | 0.0001 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 0.64 | 0.04 | 30 | 0.70 | 0.04 | 30 | -0.0660 | 0.0001 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 0.98 | 0.02 | 8 | 1.02 | 0.02 | 8 | -0.0340 | 0.0001 |
| Mikolayunas <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 1.36 | 0.14 | 23 | 1.59 | 0.14 | 23 | -0.2300 | 0.0016 |
| Hervás <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 2.30 | 0.85 | 30 | 2.83 | 0.85 | 30 | -0.5300 | 0.0484 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 2.30 | 0.36 | 30 | 2.85 | 0.36 | 30 | -0.5500 | 0.0085 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.59 | 0.44 | 12 | 0.63 | 0.44 | 12 | -0.0430 | 0.0324 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.67 | 0.44 | 12 | 0.64 | 0.44 | 12 | 0.0280 | 0.0324 |
| Martini <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 1.01 | 0.45 | 20 | 1.10 | 0.45 | 20 | -0.0900 | 0.0204 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 2.58 | 0.16 | 10 | 2.63 | 0.16 | 10 | -0.0430 | 0.0050 |
| Joy <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 1.01 | 0.28 | 20 | 1.28 | 0.28 | 20 | -0.2660 | 0.0070 |

F, ración basada en forraje; C, ración basada en concentrado.

Cuadro S2. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la concentración de lactosa (g/100 g) en respuesta a la relación forraje:concentrado.

| Autor | año | media F | DE F | n F | media C | DE C | n C | TE | VAR |
|-----------------------------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Cannas <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 4.63 | 0.07 | 10.00 | 4.55 | 0.07 | 10.00 | 0.0800 | 0.0009 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 4.60 | 0.04 | 10.00 | 4.74 | 0.04 | 10.00 | -0.1400 | 0.0003 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 4.64 | 0.06 | 30.00 | 4.70 | 0.06 | 30.00 | -0.0600 | 0.0003 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 4.81 | 0.06 | 16.00 | 4.80 | 0.06 | 16.00 | 0.0100 | 0.0004 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 4.74 | 0.10 | 11.00 | 4.88 | 0.10 | 11.00 | -0.1400 | 0.0019 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 4.68 | 0.17 | 30.00 | 4.83 | 0.17 | 30.00 | -0.1500 | 0.0019 |
| Martini <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 4.70 | 0.31 | 16.00 | 4.73 | 0.31 | 16.00 | -0.0300 | 0.0121 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 4.98 | 0.10 | 48.00 | 5.05 | 0.10 | 48.00 | -0.0700 | 0.0004 |

F, ración basada en forraje; C, ración basada en concentrado.

Cuadro S3. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de proteína (g/100 g) en respuesta a la relación forraje: concentrado.

| Autor | año | media F | DE F | n F | media C | DE C | n C | TE | VAR |
|-----------------------------------|------|---------|------|-----|---------|------|-----|-------|--------|
| Cannas <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 5.36 | 0.16 | 10 | 5.45 | 0.16 | 10 | -0.09 | 0.0049 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 6.81 | 0.11 | 10 | 6.91 | 0.11 | 10 | -0.1 | 0.0025 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 6.85 | 0.19 | 30 | 7.04 | 0.19 | 30 | -0.19 | 0.0025 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 5.09 | 0.11 | 16 | 5.25 | 0.11 | 16 | -0.16 | 0.0016 |
| Mikolayunas <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 5.04 | 0.08 | 9 | 4.84 | 0.08 | 9 | 0.2 | 0.0016 |
| Hervás <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 4.96 | 0.31 | 30 | 4.84 | 0.31 | 30 | 0.12 | 0.0064 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 4.9 | 0.19 | 47 | 4.8 | 0.19 | 47 | 0.1 | 0.0016 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 5.34 | 0.10 | 11 | 5.84 | 0.10 | 11 | -0.5 | 0.0017 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 5.46 | 0.16 | 30 | 5.76 | 0.16 | 30 | -0.3 | 0.0017 |
| Martini <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 5.56 | 0.62 | 16 | 5.56 | 0.62 | 16 | 0 | 0.0484 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 4.95 | 0.20 | 48 | 4.91 | 0.20 | 48 | 0.04 | 0.0016 |

F, ración basada en forraje; C, ración basada en concentrado.

Cuadro S4. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de grasa (g/100 g) en respuesta a la relación forraje: concentrado.

| Autor | año | media F | DE F | n F | media C | DE C | n C | TE | VAR |
|-----------------------------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Cannas <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 5.82 | 0.12 | 8 | 5.58 | 0.12 | 8 | 0.240 | 0.004 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 7.31 | 0.25 | 30 | 6.88 | 0.25 | 30 | 0.430 | 0.004 |
| Zervas <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 7.29 | 0.25 | 30 | 6.54 | 0.25 | 30 | 0.750 | 0.004 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 5.90 | 0.34 | 16 | 5.94 | 0.34 | 16 | -0.040 | 0.014 |
| Mikolayunas <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 6.00 | 0.31 | 23 | 5.75 | 0.31 | 23 | 0.250 | 0.008 |
| Hervás <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 5.34 | 0.70 | 30 | 4.64 | 0.70 | 30 | 0.700 | 0.032 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 5.10 | 0.46 | 30 | 4.50 | 0.46 | 30 | 0.600 | 0.014 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 6.67 | 0.20 | 12 | 6.47 | 0.20 | 12 | 0.200 | 0.007 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 6.65 | 0.20 | 12 | 6.63 | 0.20 | 12 | 0.020 | 0.007 |
| Martini <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 6.77 | 0.67 | 20 | 6.23 | 0.67 | 20 | 0.540 | 0.045 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2009) | 2011 | 5.34 | 0.27 | 10 | 5.25 | 0.27 | 10 | 0.090 | 0.014 |
| Joy <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 5.90 | 1.26 | 20 | 6.00 | 1.26 | 20 | -0.100 | 0.160 |

F, ración basada en forraje; C, ración basada en concentrado.

Cuadro S5. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos forraje protegida (FP) y concentrado (C), tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de CLA (mg/g AGM) en respuesta a la relación forraje: concentrado.

| Autor | año | media F | DE F | n F | media C | DE C | n C | TE | VAR |
|------------------------------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|-----------|------------|
| Antongiovanni <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 3.86 | 4.19 | 4 | 5.820 | 4.186 | 4 | -1.960 | 8.762 |
| Valvo <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 2.53 | 0.34 | 10 | 1.330 | 0.338 | 10 | 1.200 | 0.023 |
| Atti <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 7.30 | 2.93 | 25 | 2.400 | 2.934 | 25 | 4.900 | 0.689 |
| Atti <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 10.30 | 2.93 | 25 | 2.400 | 2.934 | 25 | 7.900 | 0.689 |
| Tsiplakou <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 9.60 | 1.26 | 20 | 7.200 | 1.265 | 20 | 2.400 | 0.160 |
| Tsiplakou <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 8.80 | 1.20 | 20 | 6.400 | 1.202 | 20 | 2.400 | 0.144 |
| Tsiplakou <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 10.00 | 1.17 | 20 | 6.400 | 1.170 | 20 | 3.600 | 0.137 |
| Tsiplakou <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 9.00 | 1.01 | 20 | 6.400 | 1.012 | 20 | 2.600 | 0.102 |
| Hervás <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 13.70 | 2.52 | 30 | 8.100 | 2.517 | 30 | 5.600 | 0.423 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 12.08 | 0.82 | 30 | 7.200 | 0.821 | 30 | 4.880 | 0.045 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.79 | 0.76 | 12 | 2.340 | 0.762 | 12 | -1.550 | 0.097 |
| Mierlita <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 1.22 | 0.76 | 12 | 2.770 | 0.762 | 12 | -1.550 | 0.097 |
| Martini <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 10.00 | 3.48 | 20 | 8.200 | 3.479 | 20 | 1.800 | 1.210 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 6.70 | 1.36 | 10 | 5.500 | 1.364 | 10 | 1.200 | 0.372 |
| Joy <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 7.60 | 1.26 | 20 | 8.600 | 1.265 | 20 | -1.000 | 0.160 |

Cuadro S6. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para la producción láctea (L) en respuesta a la adición de grasa protegida.

| Autor | año | media GP | DE GP | n GP | media control | DE control | n control | Dosis | Raza | TE | VAR |
|------------------------------------|------|----------|-------|------|---------------|------------|-----------|-------|----------|--------|-------|
| Sklan (1992) | 1992 | 1.59 | 0.39 | 48 | 1.36 | 0.39 | 48 | 159.6 | Assaf | 0.230 | 0.006 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 1.94 | 0.44 | 8 | 1.98 | 0.44 | 8 | 75.0 | Dorset | -0.043 | 0.048 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 1.83 | 0.44 | 8 | 1.98 | 0.44 | 8 | 150.0 | Dorset | -0.153 | 0.048 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 1.44 | 0.44 | 8 | 1.98 | 0.44 | 8 | 300.0 | Dorset | -0.538 | 0.048 |
| Perez Alba <i>et al.</i> (1997) | 1997 | 1.56 | 0.19 | 20 | 1.40 | 0.19 | 20 | 199.2 | Manchega | 0.160 | 0.004 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 0.78 | 0.15 | 12 | 0.75 | 0.15 | 12 | 160.0 | Manchega | 0.030 | 0.004 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 0.67 | 0.15 | 12 | 0.73 | 0.15 | 12 | 160.0 | Manchega | -0.060 | 0.004 |
| Antongiovanni <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 0.91 | 0.05 | 8 | 0.92 | 0.05 | 8 | 50.0 | Massese | -0.006 | 0.001 |
| Kitessa <i>et al.</i> (2003) | 2003 | 0.72 | 0.06 | 8 | 0.72 | 0.16 | 8 | 150.0 | Awassi | -0.006 | 0.004 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 2.33 | 0.35 | 4 | 2.23 | 0.35 | 4 | 96.2 | Polipay | 0.100 | 0.061 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 2.39 | 0.26 | 5 | 2.48 | 0.26 | 6 | 81.0 | Polipay | -0.090 | 0.025 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 0.77 | 0.07 | 9 | 0.73 | 0.07 | 9 | 45.0 | Manchega | 0.039 | 0.001 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 0.74 | 0.07 | 9 | 0.73 | 0.07 | 9 | 45.0 | Manchega | 0.009 | 0.001 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.04 | 0.03 | 16 | 1.02 | 0.03 | 16 | 83.2 | Sarda | 0.018 | 0.000 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.01 | 0.03 | 16 | 0.98 | 0.03 | 16 | 77.2 | Sarda | 0.023 | 0.000 |
| Casals <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.01 | 0.58 | 47 | 1.04 | 0.58 | 47 | 77.7 | Manchega | -0.030 | 0.014 |
| Lock <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.61 | 0.07 | 10 | 1.47 | 0.07 | 10 | 25.0 | Several | 0.140 | 0.001 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 1.10 | 2.40 | 30 | 0.90 | 2.40 | 30 | 45.0 | Awassi | 0.200 | 0.384 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 1.40 | 2.40 | 30 | 0.90 | 2.40 | 30 | 75.0 | Awassi | 0.500 | 0.384 |
| Hervás <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 1.77 | 0.20 | 12 | 1.69 | 0.20 | 12 | 147.6 | Assaf | 0.086 | 0.007 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 1.95 | 0.05 | 12 | 1.71 | 0.05 | 12 | 147.6 | Assaf | 0.233 | 0.000 |
| Luna <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 0.68 | 0.25 | 240 | 0.62 | 0.25 | 240 | 19.4 | Manchega | 0.067 | 0.001 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.87 | 0.16 | 20 | 0.76 | 0.16 | 20 | 28.8 | Lacuane | 0.108 | 0.003 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.93 | 0.16 | 20 | 0.76 | 0.16 | 20 | 28.8 | Lacuane | 0.172 | 0.003 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-----|------|------|-----|-------|------------|--------|-------|
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 2.63 | 0.44 | 16 | 2.66 | 0.18 | 16 | 57.0 | Assaf | -0.028 | 0.014 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 2.63 | 0.44 | 16 | 2.66 | 0.18 | 16 | 27.5 | Assaf | -0.035 | 0.014 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 2.30 | 0.44 | 16 | 2.66 | 0.18 | 16 | 75.6 | Assaf | -0.362 | 0.014 |
| Toral <i>et al.</i> (2012) | 2010 | 2.15 | 0.47 | 10 | 2.06 | 0.47 | 10 | 89.6 | Assaf | 0.094 | 0.045 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 3.17 | 2.45 | 20 | 3.06 | 2.45 | 20 | 53.9 | Assaf | 0.111 | 0.601 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 2.98 | 2.45 | 20 | 3.06 | 2.45 | 20 | 101.4 | Assaf | -0.075 | 0.601 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 2.83 | 2.45 | 20 | 3.06 | 2.45 | 20 | 144.4 | Assaf | -0.226 | 0.601 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 1.40 | 0.15 | 110 | 1.36 | 0.15 | 110 | 80.0 | Sarda | 0.041 | 0.000 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 1.22 | 0.15 | 110 | 1.36 | 0.15 | 110 | 160.0 | Sarda | -0.145 | 0.000 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 2.11 | 0.40 | 10 | 1.96 | 0.41 | 10 | 70.0 | Lacaune | 0.150 | 0.033 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 2.14 | 0.52 | 10 | 1.96 | 0.41 | 10 | 105.0 | Lacaune | 0.180 | 0.044 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 1.75 | 0.49 | 12 | 1.79 | 0.49 | 12 | 63.0 | Churra | -0.045 | 0.040 |
| Bittante <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 0.18 | 0.01 | 10 | 0.20 | 0.01 | 10 | 84.8 | Santa Ines | -0.017 | 0.000 |

Cuadro S7. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de proteína (g/100g) en respuesta a la adición de grasa protegida.

| Autor | año | media FP | DE FP | n FP | media control | DE control | n control | Dosis | Raza | TE | VAR |
|------------------------------------|------|----------|-------|------|---------------|------------|-----------|-------|----------|-------|-------|
| Sklan (1992) | 1992 | 5.25 | 0.637 | 48 | 5.39 | 0.64 | 48 | 159.6 | Assaf | -0.14 | 0.017 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 5.21 | 0.540 | 8 | 5.47 | 0.54 | 8 | 75.0 | Dorset | -0.26 | 0.073 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 5.28 | 0.540 | 8 | 5.47 | 0.54 | 8 | 150.0 | Dorset | -0.19 | 0.073 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 4.5 | 0.540 | 8 | 5.47 | 0.54 | 8 | 300.0 | Dorset | -0.97 | 0.073 |
| Perez Alba <i>et al.</i> (1997) | 1997 | 4.36 | 0.288 | 20 | 4.4 | 0.29 | 20 | 199.2 | Manchega | -0.04 | 0.008 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 5.92 | 0.021 | 9 | 6.39 | 0.02 | 9 | 104.0 | Comisana | -0.47 | 0.000 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 5.92 | 0.021 | 9 | 6.39 | 0.02 | 9 | 208.0 | Comisana | -0.47 | 0.000 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 5.41 | 0.318 | 12 | 6.01 | 0.32 | 12 | 160.0 | Manchega | -0.60 | 0.017 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 5.62 | 0.318 | 12 | 6.09 | 0.32 | 12 | 160.0 | Manchega | -0.47 | 0.017 |
| Antongiovanni <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 6.65 | 0.180 | 8 | 6.99 | 0.18 | 8 | 50.0 | Massese | -0.34 | 0.008 |
| Kitessa <i>et al.</i> (2003) | 2003 | 5.6 | 0.160 | 8 | 5.4 | 0.16 | 8 | 150.0 | Awassi | 0.20 | 0.006 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 4.6 | 0.180 | 4 | 4.7 | 0.18 | 4 | 96.2 | Polipay | -0.10 | 0.016 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 4.6 | 0.400 | 5 | 4.7 | 0.40 | 6 | 81.0 | Polipay | -0.10 | 0.059 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 6.32 | 0.202 | 9 | 6.55 | 0.20 | 9 | 45.0 | Manchega | -0.23 | 0.009 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 6.61 | 0.202 | 9 | 6.55 | 0.20 | 9 | 45.0 | Manchega | 0.06 | 0.009 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 4.96 | 0.113 | 16 | 5.25 | 0.11 | 16 | 83.2 | Sarda | -0.29 | 0.002 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 4.93 | 0.113 | 16 | 5.09 | 0.11 | 16 | 77.2 | Sarda | -0.16 | 0.002 |
| Casals <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 6.38 | 0.630 | 47 | 6.38 | 0.63 | 47 | 77.7 | Manchega | 0.00 | 0.017 |
| Lock <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.05 | 0.067 | 10 | 0.82 | 0.07 | 10 | 25.0 | Several | 0.23 | 0.001 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 3.96 | 1.782 | 30 | 4.44 | 1.78 | 30 | 45.0 | Awassi | -0.48 | 0.212 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 3.74 | 1.782 | 30 | 4.44 | 1.78 | 30 | 75.0 | Awassi | -0.70 | 0.212 |
| Hervás <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 4.83 | 0.066 | 12 | 5.13 | 0.07 | 12 | 147.6 | Assaf | -0.30 | 0.001 |
| Luna <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 6.18 | 0.679 | 240 | 6.38 | 0.68 | 240 | 19.4 | Manchega | -0.20 | 0.004 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|-------|-----|------|------|-----|-------|------------|-------|-------|
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 7.17 | 0.648 | 20 | 7.52 | 0.65 | 20 | 28.8 | Lacuane | -0.35 | 0.042 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 7.49 | 0.648 | 20 | 7.52 | 0.65 | 20 | 28.8 | Lacuane | -0.03 | 0.042 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 4.89 | 0.181 | 16 | 5.17 | 0.18 | 16 | 57.0 | Assaf | -0.28 | 0.004 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 4.88 | 0.181 | 16 | 5.17 | 0.18 | 16 | 27.5 | Assaf | -0.29 | 0.004 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 4.73 | 0.181 | 16 | 5.17 | 0.18 | 16 | 75.6 | Assaf | -0.44 | 0.004 |
| Toral <i>et al.</i> (2012) | 2010 | 5.16 | 0.181 | 10 | 5.22 | 0.18 | 10 | 89.6 | Assaf | -0.06 | 0.007 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 4.96 | 0.332 | 20 | 4.96 | 0.33 | 20 | 53.9 | Assaf | 0.00 | 0.011 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 4.85 | 0.332 | 20 | 4.96 | 0.33 | 20 | 101.4 | Assaf | -0.11 | 0.011 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 4.76 | 0.332 | 20 | 4.96 | 0.33 | 20 | 144.4 | Assaf | -0.20 | 0.011 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 4.8 | 0.089 | 110 | 4.8 | 0.09 | 110 | 80.0 | Sarda | 0.00 | 0.000 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 4.89 | 0.089 | 110 | 4.8 | 0.09 | 110 | 160.0 | Sarda | 0.09 | 0.000 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 4.11 | 0.270 | 10 | 4.38 | 0.19 | 10 | 70.0 | Lacaune | -0.27 | 0.011 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 4.08 | 0.400 | 10 | 4.38 | 0.19 | 10 | 105.0 | Lacaune | -0.30 | 0.020 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 4.47 | 0.299 | 12 | 4.38 | 0.30 | 12 | 63.0 | Churra | 0.09 | 0.015 |
| Bittante <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 5.48 | 0.122 | 12 | 5.82 | 0.12 | 12 | 12.0 | Several | -0.34 | 0.003 |
| Ferreira <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 4.8 | 0.112 | 10 | 5.2 | 0.11 | 10 | 84.8 | Santa Ines | -0.40 | 0.003 |

Cuadro S8. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de grasa (g/100g) en respuesta a la adición de grasa protegida.

| Autor | año | media FP | DE FP | n FP | media control | DE control | n control | Dosis | Raza | TE | VAR |
|------------------------------------|------|----------|-------|------|---------------|------------|-----------|--------|----------|-------|------|
| Sklan (1992) | 1992 | 11.46 | 1.71 | 48 | 9.46 | 1.71 | 48 | 159.60 | Assaf | 2.00 | 0.12 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 5.66 | 1.18 | 8 | 4.98 | 1.18 | 8 | 75.00 | Dorset | 0.68 | 0.35 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 5.58 | 1.18 | 8 | 4.98 | 1.18 | 8 | 150.00 | Dorset | 0.60 | 0.35 |
| Horton <i>et al.</i> (1992) | 1992 | 5.72 | 1.18 | 8 | 4.98 | 1.18 | 8 | 300.00 | Dorset | 0.74 | 0.35 |
| Perez Alba <i>et al.</i> (1997) | 1997 | 8.2 | 1.17 | 20 | 7.30 | 0.92 | 20 | 199.20 | Manchega | 0.90 | 0.11 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 8.8 | 0.02 | 9 | 8.98 | 0.02 | 9 | 104.00 | Comisana | -0.18 | 0.00 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 9.21 | 0.02 | 9 | 8.98 | 0.02 | 9 | 208.00 | Comisana | 0.23 | 0.00 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 9.67 | 0.59 | 12 | 7.78 | 0.59 | 12 | 160.00 | Manchega | 1.89 | 0.06 |
| Casals <i>et al.</i> (1999) | 1999 | 10.06 | 0.59 | 12 | 8.28 | 0.59 | 12 | 160.00 | Manchega | 1.78 | 0.06 |
| Antongiovanni <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 8.06 | 1.08 | 8 | 7.43 | 1.08 | 8 | 50.00 | Massese | 0.63 | 0.29 |
| Kitessa <i>et al.</i> (2003) | 2003 | 7.7 | 0.20 | 8 | 7.40 | 0.20 | 8 | 150.00 | Awassi | 0.30 | 0.01 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 11.4 | 1.70 | 4 | 8.30 | 1.70 | 4 | 96.20 | Polipay | 3.10 | 1.45 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 12.1 | 1.88 | 5 | 9.90 | 1.88 | 6 | 81.03 | Polipay | 2.20 | 1.30 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 9.35 | 0.38 | 9 | 8.68 | 0.38 | 9 | 45.00 | Manchega | 0.67 | 0.03 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 9.86 | 0.38 | 9 | 8.68 | 0.38 | 9 | 45.00 | Manchega | 1.18 | 0.03 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 5.96 | 0.11 | 16 | 5.90 | 0.11 | 16 | 83.20 | Sarda | 0.06 | 0.00 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 5.99 | 0.11 | 16 | 5.94 | 0.11 | 16 | 77.20 | Sarda | 0.05 | 0.00 |
| Casals <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 10.24 | 1.84 | 47 | 7.85 | 1.84 | 47 | 77.70 | Manchega | 2.39 | 0.14 |
| Lock <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 4.9 | 0.40 | 10 | 6.40 | 0.40 | 10 | 25.00 | Several | -1.50 | 0.03 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 10.3 | 0.50 | 30 | 9.91 | 0.50 | 30 | 45.00 | Awassi | 0.39 | 0.02 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 10.1 | 0.50 | 30 | 9.91 | 0.50 | 30 | 75.00 | Awassi | 0.19 | 0.02 |
| Hervás <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 5.28 | 0.07 | 12 | 4.80 | 0.07 | 12 | 147.60 | Assaf | 0.48 | 0.00 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 5.27 | 0.20 | 12 | 5.39 | 0.20 | 12 | 147.60 | Assaf | -0.12 | 0.01 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|-------|------|-----|------|------|-----|--------|------------|-------|------|
| Luna <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 7.45 | 0.81 | 240 | 7.49 | 0.81 | 240 | 19.44 | Manchega | -0.04 | 0.01 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 9.29 | 0.95 | 20 | 9.76 | 0.95 | 20 | 28.80 | Lacuane | -0.47 | 0.09 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 9.73 | 0.95 | 20 | 9.76 | 0.95 | 20 | 28.80 | Lacuane | -0.03 | 0.09 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 5.9 | 0.18 | 16 | 5.89 | 0.18 | 16 | 56.98 | Assaf | 0.01 | 0.00 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 5.15 | 0.18 | 16 | 5.89 | 0.18 | 16 | 27.50 | Assaf | -0.74 | 0.00 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 5.14 | 0.18 | 16 | 5.89 | 0.18 | 16 | 75.63 | Assaf | -0.75 | 0.00 |
| Toral <i>et al.</i> (2012) | 2010 | 6.51 | 0.47 | 10 | 6.15 | 0.47 | 10 | 89.63 | Assaf | 0.36 | 0.04 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 5.21 | 0.73 | 20 | 4.96 | 0.73 | 20 | 53.87 | Assaf | 0.25 | 0.05 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 5.09 | 0.73 | 20 | 4.96 | 0.73 | 20 | 101.42 | Assaf | 0.13 | 0.05 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 5.11 | 0.33 | 20 | 4.96 | 0.33 | 20 | 144.43 | Assaf | 0.15 | 0.01 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 6.06 | 0.52 | 110 | 5.91 | 0.52 | 110 | 80.00 | Sarda | 0.15 | 0.00 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 6.102 | 0.52 | 110 | 5.91 | 0.52 | 110 | 160.00 | Sarda | 0.20 | 0.00 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 6.44 | 0.63 | 10 | 6.32 | 0.76 | 10 | 70.00 | Lacaune | 0.12 | 0.10 |
| Bianchi <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 6.25 | 1.29 | 10 | 6.32 | 0.76 | 10 | 105.00 | Lacaune | -0.07 | 0.22 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 4.35 | 1.20 | 12 | 4.98 | 1.20 | 12 | 63.00 | Churra | -0.63 | 0.24 |
| Bittante <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 5.94 | 0.24 | 12 | 6.56 | 0.24 | 12 | 12.00 | Several | -0.62 | 0.01 |
| Ferreira <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 7.5 | 0.22 | 10 | 7.40 | 0.22 | 10 | 84.80 | Santa Ines | 0.10 | 0.01 |

Cuadro S9. Autor, año, media, desviación estándar (DE) y número de unidades experimentales (n) de los grupos grasa protegida (FP) y control, dosis, raza, tamaño del efecto (TE) y varianza (VAR) para el contenido de CLA (mg/g AGM) en respuesta a la adición de grasa protegida.

| Autor | año | media FP | DE FP | n FP | media control | DE control | n control | Dosis | Raza | TE | VAR |
|---------------------------------------|------------|-----------------|--------------|-------------|----------------------|-------------------|------------------|--------------|-------------|-----------|------------|
| Sklan (1992) | 1992 | 0.92 | 0.88 | 48 | 1.49 | 0.88 | 48 | 159.6 | Assaf | -0.57 | 0.78 |
| Perez Alba <i>et al.</i> (1997) | 1997 | 1.2 | 0.19 | 20 | 1.7 | 0.19 | 20 | 199.2 | Manchega | -0.50 | 0.04 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 2.98 | 0.02 | 9 | 1.95 | 0.02 | 9 | 104.0 | Comisana | 1.03 | 0.00 |
| Rotunno <i>et al.</i> (1998) | 1998 | 3.29 | 0.02 | 9 | 1.95 | 0.02 | 9 | 208.0 | Comisana | 1.34 | 0.00 |
| Antongiovanni <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 1.24 | 0.16 | 8 | 1.11 | 0.16 | 8 | 50.0 | Massese | 0.13 | 0.03 |
| Mozzon <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 1.59 | 0.09 | 10 | 0.68 | 0.05 | 10 | 54.3 | Sarda | 0.91 | 0.01 |
| Mozzon <i>et al.</i> (2002) | 2002 | 2.96 | 0.12 | 10 | 0.68 | 0.05 | 10 | 69.8 | Sarda | 2.28 | 0.01 |
| Kitessa <i>et al.</i> (2003) | 2003 | 5.6 | 0.16 | 8 | 2.9 | 0.16 | 8 | 150.0 | Awassi | 2.70 | 0.03 |
| Martini <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 1.07 | 1.08 | 11 | 0.73 | 0.08 | 11 | 138.6 | Massese | 0.34 | 1.16 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 2.9 | 0.30 | 4 | 3 | 0.30 | 4 | 96.2 | Polipay | -0.10 | 0.09 |
| Appeddu <i>et al.</i> (2004) | 2004 | 2.8 | 0.22 | 5 | 2.7 | 0.22 | 6 | 81.0 | Polipay | 0.10 | 0.05 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 1.62 | 0.25 | 9 | 1.8 | 0.25 | 9 | 45.0 | Manchega | -0.18 | 0.06 |
| García <i>et al.</i> (2005) | 2005 | 2.7 | 0.25 | 9 | 1.8 | 0.25 | 9 | 45.0 | Manchega | 0.90 | 0.06 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 2.22 | 0.82 | 16 | 0.386 | 0.82 | 16 | 83.2 | Sarda | 1.83 | 0.67 |
| Mele <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.806 | 0.82 | 16 | 0.582 | 0.82 | 16 | 77.2 | Sarda | 1.22 | 0.67 |
| Casals <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 0.5 | 0.25 | 47 | 0.55 | 0.25 | 47 | 77.7 | Manchega | -0.05 | 0.06 |
| Lock <i>et al.</i> (2006) | 2006 | 1.05 | 0.07 | 10 | 0.82 | 0.07 | 10 | 25.0 | Several | 0.23 | 0.00 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 3.78 | 1.01 | 30 | 2.62 | 1.01 | 30 | 45.0 | Awassi | 1.16 | 1.01 |
| Titi y Obeidat (2008) | 2008 | 3.97 | 1.01 | 30 | 2.62 | 1.01 | 30 | 75.0 | Awassi | 1.35 | 1.01 |
| Hervás <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 3.6 | 0.54 | 12 | 0.936 | 0.54 | 12 | 147.6 | Assaf | 2.66 | 0.29 |
| Luna <i>et al.</i> (2008) | 2008 | 0.85 | 0.19 | 240 | 0.47 | 0.19 | 240 | 19.4 | Manchega | 0.38 | 0.03 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.71 | 0.06 | 20 | 0.55 | 0.06 | 20 | 28.8 | Lacuane | 0.16 | 0.00 |
| Castro <i>et al.</i> (2009) | 2009 | 0.63 | 0.06 | 20 | 0.55 | 0.06 | 20 | 28.8 | Lacuane | 0.08 | 0.00 |
| Lurueña-Martinez <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 0.33 | 0.16 | 30 | 0.54 | 0.16 | 30 | 74.4 | Several | -0.21 | 0.03 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|------------|------|------|
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 2.31 | 0.40 | 16 | 0.64 | 0.40 | 16 | 57.0 | Assaf | 1.67 | 0.16 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 1.66 | 0.40 | 16 | 0.64 | 0.40 | 16 | 27.5 | Assaf | 1.02 | 0.16 |
| Toral <i>et al.</i> (2010) | 2010 | 2.83 | 0.40 | 16 | 0.64 | 0.40 | 16 | 75.6 | Assaf | 2.19 | 0.16 |
| Toral <i>et al.</i> (2012) | 2010 | 1.23 | 0.25 | 10 | 0.44 | 0.25 | 10 | 89.6 | Assaf | 0.79 | 0.06 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 1.08 | 0.14 | 10 | 0.67 | 0.14 | 10 | 69.2 | Assaf | 0.41 | 0.02 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 1.05 | 0.14 | 10 | 0.55 | 0.14 | 10 | 75.6 | Assaf | 0.50 | 0.02 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2011) | 2011 | 1.14 | 0.14 | 10 | 0.59 | 0.14 | 10 | 73.2 | Assaf | 0.55 | 0.02 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 2.41 | 0.37 | 110 | 2.16 | 0.37 | 110 | 29.0 | Sarda | 0.25 | 0.14 |
| Mughetti <i>et al.</i> (2012) | 2012 | 2.42 | 0.37 | 110 | 2.16 | 0.37 | 110 | 58.0 | Sarda | 0.26 | 0.14 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 0.97 | 0.28 | 12 | 0.35 | 0.28 | 12 | 63.0 | Churra | 0.62 | 0.08 |
| Gómez-Cortés <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 0.81 | 0.28 | 12 | 0.39 | 0.28 | 12 | 63.0 | Churra | 0.42 | 0.08 |
| Pellattiero <i>et al.</i> (2015) | 2015 | 0.46 | 0.05 | 12 | 0.39 | 0.05 | 12 | 12.0 | Several | 0.07 | 0.00 |
| Ferreira <i>et al.</i> (2014) | 2014 | 1.34 | 0.20 | 10 | 0.75 | 0.20 | 10 | 84.8 | Santa Ines | 0.59 | 0.04 |