

Begoña Díez Unquera

# Desarrollo de un modelo de simulación y optimización adaptado al ovino lechero

Departamento  
Ciencias Agrarias y del Medio Natural

Director/es  
Ruiz Santos, Roberto Javier  
Villalba Mata, Daniel

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

# DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN ADAPTADO AL OVINO LECHERO

Autor

Begoña Díez Unquera

Director/es

Ruiz Santos, Roberto Javier  
Villalba Mata, Daniel

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
Ciencias Agrarias y del Medio Natural

2013





**Universidad**  
Zaragoza

TESIS DOCTORAL

**Desarrollo de un modelo de simulación y optimización  
adaptado al ovino lechero**

Autora

**Begoña Díez Unquera**

Directores

**Roberto Ruiz Santos**

**Daniel Villalba Mata**

**Facultad de Veterinaria**

**Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural**

**2013**





ROBERTO RUIZ SANTOS, Doctor en Veterinaria, Investigador y Jefe del Departamento de Producción Animal del Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, Neiker-Tecnalia, y DANIEL VILLALBA MATA, Doctor Ingeniero Agrónomo y Profesor Titular del Departamento de Producción Animal de la Universitat de Lleida

CERTIFICAN:

Que la presente memoria titulada “Desarrollo de un modelo de simulación y optimización adaptado al ovino lechero”, elaborada por BEGOÑA DÍEZ UNQUERA, ha sido realizada bajo su dirección y reúne las condiciones exigidas para optar al Título de Doctor, por lo que consideran procede su presentación.

Zaragoza, a ..... de.....2012

Fdo: Roberto Ruiz Santos

Fdo: Daniel Villalba Mata



*A Florián y Paulina*



## Agradecimientos

A continuación me gustaría expresar mi agradecimiento a quienes me han acompañado, apoyado y ayudado a lo largo de los últimos ocho años. Gracias a todos ellos he podido finalizar este trabajo que considero tan suyo como mío.

En primer lugar me gustaría mostrar mi mayor agradecimiento a mis directores de tesis, los Drs. Roberto Ruiz y Daniel Villalba, que han logrado complementarse perfectamente en la dirección de esta tesis, haciéndome fácil el camino que parecía tan difícil.

A Roberto, gracias por tu esfuerzo constante en acercar la realidad de la ganadería ovina al trabajo de modelización, por tu sincero optimismo, por el ánimo que me has transmitido en los momentos más duros y por todos los momentos compartidos.

A Dani gracias por la ilusión que has depositado en este proyecto, por aportar una experiencia práctica tan valiosa en el trabajo de modelización, por ayudarme con los “bugs” del código siendo mi “otro par de ojos” y sobre todo gracias por tu cercanía desde la distancia.

Me gustaría recordar con especial cariño a mis compañeros en Arkaute: gracias Ina, Josune, Eva, Nerea, Lurdes, Feli, Aser, Idoia, Maru, Goyo, Larraitz, Inma, y... Evangelina! (antes o después, todos importantes para mí). Necesitaría más espacio para recordar lo que hemos vivido juntos. Siempre habéis estado dispuestos a ayudar y responder cualquier duda con compañerismo y amabilidad, estas dos cosas me llevo de todos vosotros además de muy buenos recuerdos y también muchas risas. Gracias por haberme hecho sentir como en casa.

No puedo olvidar a dos personas que en diferentes momentos me han enseñado mucho en poco tiempo: Neil Jessop and Vicente Silveira, thank you both for explaining to me how the rumen model works.

A los pastores que cada día siguen trabajando para hacer queso Idiazabal que tanto nos gusta, y en especial a las familias de Aser Astorgano y Amelia Jauregi por compartir con generosidad y paciencia su trabajo y su tiempo.

Eskerrik asko nire kotxe-kideei Jone, Lurdes, Larraitz, Maru, Miren eta Amairi goiza poztu eta etxerako itzulera motzagoa egiteagatik.

A Mari, Rafa, Ivana y Úrsula, por ser mi segunda familia, haciendo de los cursos de doctorado y las reuniones en Zaragoza momentos tan especiales, y sobre todo gracias por el cariño que me seguís demostrando cada día.

A mis amigos de siempre, Joseba, Tania, Cris, Yoli... que me hacen reír en los momentos buenos y en los malos, porque vosotros también habéis soportado un poco esta tesis.

Y mil millones de gracias a mi familia por aguantarme cada día!!

A mis padres por velar siempre por mi bienestar, por enseñarme qué es lo verdaderamente importante en la vida y por todo lo que hemos llorado y reído juntos.

A mis tíos, en especial a mi tía Bego por su confianza y saber escuchar.

A mis abuelos, gracias por el tiempo que me habéis regalado, por que sin esos momentos el rumiante nunca me habría interesado y no habría llegado hasta aquí, por eso esta tesis esta dedicada a vosotros.

Por último gracias a mi pequeña Maia que nos da tanta felicidad (“trator-ia-ia-o”), y a Alberto que ha sido el último responsable, literalmente, de que esto haya funcionado (XD) y que me ha cuidado hasta este momento, evitando que esto pudiera conmigo... gracias por lo que nos espera juntos!!

A todos,

Eskerrik asko!!

El presente trabajo ha sido posible gracias a la financiación de los siguientes organismos:

- Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) mediante la concesión a la autora de una beca Predoctoral para la formación de personal investigador (resolución de 12 de mayo de 2005) y la financiación del proyecto OVISAT (Proyecto nº RTA2006-00170-C03-01).
- Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad del Gobierno Vasco.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS



# ÍNDICE

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u></b>	<b><u>31</u></b>
<b>1.1</b>	<b>El sistema de ovino lechero de raza Latxa</b>	<b>31</b>
1.1.1	Introducción	31
1.1.2	Situación actual del sector	32
1.1.3	Manejo del rebaño	33
1.1.4	Descripción del sistema familia-explotación	34
1.1.5	Condicionantes de ubicación	36
1.1.6	Disponibilidad de terreno	37
1.1.7	Manejo reproductivo	37
1.1.8	Implicaciones productivas de la distribución de los partos	39
<b>1.2</b>	<b>Evaluación prospectiva mediante la utilización de modelos</b>	<b>40</b>
1.2.1	Concepto de sostenibilidad	40
1.2.2	Descripción de un sistema: un paso previo a la modelización	44
1.2.3	Modelos de simulación en ganadería	45
1.2.4	Tipos de modelos	46
1.2.5	Utilidad de los modelos	48
1.2.6	Optimización mediante modelos de simulación	48
<b><u>2</u></b>	<b><u>OBJETIVOS DE LA TESIS</u></b>	<b><u>53</u></b>
<b><u>3</u></b>	<b><u>MODELO ANIMAL</u></b>	<b><u>57</u></b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>57</b>
<b>3.2</b>	<b>Módulo de rumen</b>	<b>58</b>
3.2.1	Introducción	58
3.2.2	Modelos actuales adaptados a ovino	61
3.2.3	Origen del módulo	62

3.2.4	Descripción del funcionamiento del módulo	63
	3.2.4.1 <i>Diseño de las dietas</i>	65
3.2.5	Validación del módulo	66
	3.2.5.1 <i>Datos bibliográficos de IV</i>	66
	3.2.5.2 <i>Datos de IV de experiencias realizadas en Neiker</i>	67
	3.2.5.3 <i>Comparación con modelos validados</i>	68
3.2.6	Resultados y Discusión	68
3.2.7	Conclusiones parciales	74
<b>3.3</b>	<b>Módulo de simulación de la partición de nutrientes</b>	<b>75</b>
3.3.1	Introducción	75
3.3.2	Modelos actuales adaptados a ovino	76
3.3.3	Origen del módulo	77
3.3.4	Descripción del funcionamiento del módulo	77
	3.3.4.1 <i>Limitación de la ganancia o pérdida de grasa y masa muscular</i>	79
3.3.5	Validación del módulo	82
	3.3.5.1 <i>Comparación con datos experimentales</i>	82
	3.3.5.2 <i>Evaluación del comportamiento del modelo a medio plazo</i>	83
3.3.6	Resultados y Discusión	83
3.3.7	Conclusiones parciales	90
<b>3.4</b>	<b>Módulo de simulación del comportamiento reproductivo</b>	<b>91</b>
3.4.1	Introducción	91
3.4.2	Origen del módulo	92
	3.4.2.1 <i>Modelización de la estacionalidad reproductiva</i>	92
	3.4.2.2 <i>Modelización de la probabilidad de concepción</i>	96
	3.4.2.3 <i>Modelización de la prolificidad</i>	102
	3.4.2.4 <i>Funcionamiento del módulo de simulación del comportamiento reproductivo</i>	104
3.4.3	Validación del módulo de simulación del comportamiento reproductivo	105
3.4.4	Resultados y Discusión	106
3.4.5	Conclusiones parciales	114

<b>4</b>	<b><u>MODELO DE EXPLOTACIÓN. SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN</u></b>	<b>117</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>117</b>
<b>4.2</b>	<b>Diseño del modelo de explotación</b>	<b>119</b>
4.2.1	Integración de los 3 módulos desarrollados	119
4.2.2	Generación de un rebaño con variabilidad individual	122
4.2.3	Modelización de la alimentación y la utilización de recursos	123
<b>4.3</b>	<b>Adaptación del modelo al método de optimización basado en algoritmos genéticos</b>	<b>124</b>
4.3.1	Optimización mediante AG	124
4.3.1.1	<i>Introducción a la Computación Evolutiva</i>	124
4.3.1.2	<i>Los Algoritmos Genéticos, un tipo de Algoritmo Evolutivo</i>	125
4.3.1.3	<i>Características y funcionamiento de los AAGG</i>	126
4.3.2	Funcionamiento del AG básico o AG canónico	126
4.3.3	Implementación del AG en el simulador PASTOR	128
4.3.3.1	<i>Codificación del problema</i>	128
4.3.3.2	<i>Evaluación del grado de adecuación del individuo</i>	129
4.3.3.3	<i>Configuración del optimizador y operadores genéticos</i>	131
4.3.3.4	<i>Variables de configuración del AG</i>	132
<b>4.4</b>	<b>Evaluación del software pastor</b>	<b>133</b>
4.4.1	Configuración del escenario de simulación	133
4.4.2	Configuración de los escenarios de optimización	136
4.4.2.1	<i>Duración de la optimización</i>	138
4.4.2.2	<i>Configuración de las variables de búsqueda y optimización</i>	139
<b>4.5</b>	<b>Resultados de simulación y validación con datos reales</b>	<b>140</b>
<b>4.6</b>	<b>Resultados de optimización</b>	<b>144</b>
4.6.1	Soluciones encontradas	144
4.6.1.1	<i>Resultados económicos:</i>	148
4.6.1.2	<i>Resultados reproductivos</i>	152
4.6.1.3	<i>Evolución de la nota de CC, del peso y de la producción lechera:</i>	154

4.6.2	Consideraciones metodológicas	160
4.6.2.1	<i>Efecto del rebaño a optimizar</i>	160
4.6.2.2	<i>Variabilidad de la solución encontrada</i>	161
4.6.2.3	<i>Relación entre rendimientos productivos y económicos</i>	163
4.6.2.4	<i>Limitaciones del programa</i>	165
<b>4.7</b>	<b>Discusión</b>	<b>166</b>
<b>4.8</b>	<b>Conclusiones parciales</b>	<b>173</b>
<b>5</b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	<b><u>177</u></b>
<b>6</b>	<b><u>RESUMEN, SUMMARY ETA LABURPENA</u></b>	<b><u>181</u></b>
	Resumen	181
	Summary	185
	Laburpena	189
<b>7</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b><u>193</u></b>
	<b><u>ANEXOS</u></b>	<b><u>211</u></b>
	<b>ANEXO I. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE RUMEN</b>	<b>211</b>
	Variables del modelo	211
	Algoritmo de funcionamiento del bucle hora:	212
	Obtención de las variables relativas a la calidad del alimento: Análisis mediante la técnica de producción de gas	217
	<b>ANEXO II. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL META-ANÁLISIS</b>	<b>220</b>
	<b>ANEXO III. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN PASTOR</b>	<b>222</b>
	Pestaña Simulador (principal)	223
	Pestaña Rebaño	224
	Pestañas Alimentación y Reproducción	225

Pestaña Optimización	225
Pestaña Raza	226
Salidas Gráficas	226



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Esquema general del sistema de producción de ovino lechero con las dos principales opciones productivas (A=leche; B=queso): subsistemas, relaciones, inputs y outputs.....	34
Figura 2.- Relación entre la digestibilidad de la dieta y la ingestión de materia seca (MS) y la energía digestible (ED) (Van Soest, 1994). .....	60
Figura 3. Descripción de los principales mecanismos de regulación de la ingestión.....	60
Figura 4. Estimación de IV de alfalfa de diferente calidad para una oveja lactante de 64 kg de peso produciendo 1,4 l de leche obtenidos con diferentes modelos (Pittroff y Kothmann, 2001b).....	62
Figura 5.- Diagrama de flujo del módulo de rumen (ver Anexo I).....	64
Figura 6. IV real y predicha por el modelo para 24 forrajes tropicales de la bibliografía (B). .....	69
Figura 7. IV de silo de hierba real y predicha por el modelo para las experiencias L2, L13, L12 y L11 (de izquierda a derecha en la gráfica). .....	69
Figura 8.- IV de alfalfa con ovejas de 60 y 80 kg, secas, gestantes o lactantes con tres niveles de producción potencial estimadas por INRA, por SRNS y por el módulo de rumen .....	70
Figura 9.- Peso real y peso simulado por el modelo .....	84
Figura 10.- CC real y CC simulada por el modelo.....	84
Figura 11.- Producción lechera real y producción simulada por el modelo.....	85
Figura 12.- Producción lechera simulada y potencial durante un mes para tres tipos de oveja con potencial productivo de 1, 2 y 3 litros .....	85
Figura 13.- Evolución de la CC de los 5 tipos de oveja simuladas .....	86
Figura 14.- Evolución del peso de los 5 tipos de oveja simuladas.....	86
Figura 15. Ajuste de los datos reales de presencia de celo y modificación de PEstro por presencia de morueco .....	95
Figura 16. Esquema del manejo reproductivo realizado en el rebaño experimental de Arkaute .....	97
Figura 17.- Diagrama del modelo de simulación de la fertilidad de la MN y la IA (F=probabilidad de quedar gestante).....	103

Figura 18. Box-plot representando la distribución de partos de los escenarios simulados correspondientes a cubriciones de larga duración. Arriba: Fecha media de parto y % de Fertilidad de los escenarios 1-8. En la gráfica: En gris se representan los días entre los cuales tiene lugar la paridera, las barras el número de días desde el posible primer parto hasta que tiene lugar el 5% y el 95% de los partos, la caja el 25% y 75% y la línea roja el 50% de los partos. ....	111
Figura 19. Box-plot representando la distribución de partos de los escenarios simulados correspondientes a cubriciones de corta duración. Arriba: Fecha media de parto y % de Fertilidad de los escenarios 9-16. En la gráfica: En gris se representan los días entre los cuales tiene lugar la paridera, las barras el número de días desde el posible primer parto hasta que tiene lugar el 5% y el 95% de los partos, la caja el 25% y 75% y la línea roja el 50% de los partos. ....	111
Figura 20.- Diseño del modelo de explotación. Las variables en cursiva corresponden a decisiones de manejo; €: valor económico input o output; Q: Calidad del alimento; IA: Inseminación artificial .....	120
Figura 21.- Ejemplo de configuración de los periodos de alimentación en lactación en función de la duración de la lactación total y de los porcentajes de duración de los periodos 1, 2 y 3. ....	121
Figura 22.- Esquema general de funcionamiento de los AAGG. ....	128
Figura 23.- Distribución de partos del rebaño simulado durante el tercer año de simulación.....	141
Figura 24.- Resultados de simulación: evolución media de la CC, el peso, la producción lechera y la Ingestión de MS como suma de la ingestión de concentrado, alfalfa y pradera o silo de hierba. Resultados reales: media de la CC, el peso y la producción lechera observados durante 6 años en el rebaño de Neiker .....	142
Figura 25.- Gasto y kg de alimento comprado en los escenarios E1-E4 en las explotaciones de costa (C) e interior (I).....	146
Figura 26.- Resultados de excesos de EM y PM en relación a los valores del E1 en costa	147
Figura 27.- Ejemplo de la distribución de partos encontrada en una optimización de la explotación de costa con secado libre y costes altos (E3_C) .....	153
Figura 28.- Ejemplo de la distribución de partos encontrada en una optimización de la explotación de interior con secado el 10 de julio y costes normales (E2_I) .....	154
Figura 29.- Evolución de la Nota de CC media de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4 .....	155
Figura 30.- Evolución de la Nota de CC media de los rebaños de interior simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4 .....	156

Figura 31.- Evolución del peso medio de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4 .....	156
Figura 32.- Evolución del peso medio de los rebaños de interior simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4 .....	157
Figura 33.- Producción media de leche a lo largo del periodo de lactación de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en cada uno de los escenarios considerados (E1-E4).....	158
Figura 34.- Producción media de leche a lo largo del periodo de lactación de las pruebas de interior simulados con el manejo optimizado en cada uno de los escenarios considerados (E1-E4) .....	158
Figura 35.- Producción lechera encontrada en E1_C .....	159
Figura 36.- Producción lechera encontrada en E2_C .....	159
Figura 37.- Media ( $\pm$ eem) del MEc de las 24 pruebas de optimización realizadas (E1-E4 indican escenario; C o I indican explotación de costa o de interior; a, b y c indican cada una de las 3 repeticiones del mismo tipo de prueba).....	162
Figura 38.- Posible diagrama de Pareto entre dos objetivos. La solución “a” sería la óptima con un mayor peso económico y la “b” con mayor peso de la componente ambiental..	170
Figura 39.- Pestaña principal del programa PASTOR.....	223
Figura 40.- Pestaña de generación del rebaño.....	224
Figura 41.- Pestaña de configuración de las variables relacionadas con el manejo de alimentación .....	225
Figura 42.- Pestaña de configuración de la optimización.....	226
Figura 43.- Gráfica de distribución de partos .....	227
Figura 44.- Gráfica de evolución de la CC durante 3 años .....	228
Figura 45.- Gráfica de evolución del Peso durante 3 años.....	228
Figura 46.- Gráfica de Producción Lechera de un año simulado.....	228
Figura 47.- Gráfica de resultados reproductivos .....	229
Figura 48.- Gráfica de información de la oveja .....	229



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tipos de rebaño descritos por Ruiz (2000) en función de la fecha media de parto (FMP) .....	38
Tabla 2.- Aspectos que pueden afectar a la sostenibilidad en los sistemas ovinos europeos .....	43
Tabla 3. Diferentes tipos de dieta que pueden diseñarse con el modelo.....	65
Tabla 4.- Descripción de los alimentos ofertados a los lotes de las experiencias utilizadas para la validación. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; CCel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas).....	68
Tabla 5. Resumen de resultados de IV real y predicha. ....	69
Tabla 6.- Estimación de EM (MJ/día) ingerida, Necesidades de EM y Ratio EM ingerida/Necesidades de EM obtenidos con el modelo INRA y con el módulo de rumen. ....	71
Tabla 7.- Estimación de PM (g/día) ingerida, Necesidades de PM y Ratio PM ingerida/Necesidades de PM obtenidos con el modelo INRA y con el módulo de rumen. ....	71
Tabla 8.- Balances contemplados en el módulo de simulación de la movilización de reservas y la producción lechera .....	78
Tabla 9.- Variables de entrada de los 4 lotes de animales utilizados en la validación del módulo de simulación de la partición de nutrientes .....	82
Tabla 10.- Variables de entrada para los 5 lotes de animales utilizados en la evaluación del comportamiento a largo plazo del módulo simulación de la partición de nutrientes.....	83
Tabla 11.- Estimación de los excesos de PM y EM una vez cubiertas las necesidades de mantenimiento, producción y crecimiento.....	87
Tabla 12. Parámetros de la Ecuación [8] de .....	94
Tabla 13. Referencias consultadas para la realización del meta-análisis.....	99
Tabla 14. Resultados de los meta-análisis realizados mostrados como diferencia de riesgo de fertilidad o parto doble .....	100
Tabla 15. Resultados de fertilidad de la IA de los rebaños comerciales de raza Latxa en diferentes épocas de cubrición y con diferente CC.....	102
Tabla 16. Resultados de prolificidad de los rebaños comerciales de raza Latxa en diferentes épocas de cubriciones y con diferente CC. ....	104
Tabla 17. Escenarios simulados con el módulo de reproducción .....	105

Tabla 18. Resultados de fertilidad (%) de las cubriciones de MN, de IA y Total, para el rebaño y por grupos de CC obtenida en los 16 escenarios simulados.....	107
Tabla 19. Principales efectos incluidos en el análisis de regresión logística realizado a las tasas de fertilidad de la IA, la MN y Total obtenidas.....	108
Tabla 20. Resultados del análisis de regresión logística realizado.....	109
Tabla 21.- Variables relacionadas con el manejo.....	122
Tabla 22.- Variables que forman parte de la codificación de cada individuo del AG, valores máximos y mínimos que puede tomar la variable y resolución.....	129
Tabla 23.- Variables que forman parte de la función <i>fitness</i> y factor de ponderación.....	130
Tabla 24.- Raciones de alimentación ofrecida en pesebre por lotes en el rebaño de Neiker (kg MS/día).....	134
Tabla 25.- Configuración de las variables de manejo del rebaño.....	134
Tabla 26.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados.....	135
Tabla 27.- Precios de los insumos y de los productos del modelo.....	135
Tabla 28.- Descripción de los escenarios de optimización.....	136
Tabla 29.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados en la explotación de costa. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; C Cel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas).....	137
Tabla 30.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados en la explotación de interior. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; C Cel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas).....	137
Tabla 31.- Predicción del tiempo de trabajo en diferentes escenarios.....	138
Tabla 32.- Resultado de 3 optimizaciones en función del valor de diferentes parámetros de la optimización.....	140
Tabla 33.- Variables de configuración en las optimizaciones.....	140
Tabla 34.- Descripción estadística de la producción potencial en el pico de lactación, el peso y la condición corporal inicial de las 50 ovejas del rebaño.....	144
Tabla 35.- Variables de manejo encontradas en las 3 optimizaciones realizadas para cada prueba (media de 3 repeticiones).....	150

Tabla 36.-Resultados técnico económicos de las 3 optimizaciones realizadas para cada prueba (para calcular la media y SD de las 3 soluciones, cada una se ha simulado 50 veces) .....	151
Tabla 37.-Resultados económicos de las 3 optimizaciones realizadas para cada escenario con un nuevo rebaño (para calcular la media y SD de las 3 soluciones, cada una se ha simulado 50 veces) .....	161
Tabla 38.- Media y SD de los resultados económicos obtenidos con el manejo encontrado por el AG en la explotación COSTA, secado libre y costes normales (E1_Ca) y en 50 simulaciones aplicando el manejo encontrado.....	163
Tabla 39.- Coeficientes de correlación para las variables de entrada y salida de 50 ejecuciones de un manejo generando un nuevo rebaño en cada una .....	164
Tabla 40. Número de alimentos caracterizados procedentes de explotaciones de ovino lechero de la CAPV.....	217



## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>%GCT</b>	Variable de modificación de la máxima ganancia de GCT
<b>%MM</b>	Variable de modificación de la máxima ganancia de MM
<b>AG</b>	Algoritmos genéticos
<b>AGV</b>	Ácidos grasos volátiles
<b>CAPV</b>	Comunidad Autónoma del País Vasco
<b>CC</b>	Condición corporal
<b>CE</b>	Computación evolutiva
<b>CV</b>	Coefficiente de variación
<b>eem</b>	Error estándar de la media
<b>ED</b>	Energía digestible
<b>EM</b>	Energía metabolizable
<b>FMP</b>	Fecha media de parto
<b>FND</b>	Fibra neutro detergente
<b>GCmovil</b>	Máxima ganancia o pérdida diaria de grasa corporal
<b>GCT</b>	Grasa corporal total
<b>GCT1</b>	GCT cuando la CC es igual a 1
<b>GCT5</b>	GCT cuando la CC es igual a 5
<b>IA</b>	Inseminación artificial
<b>I.C.</b>	Intervalo de confianza
<b>IV</b>	Ingestión voluntaria
<b>MEc</b>	Margen económico
<b>MJ</b>	Megajulios
<b>MM</b>	Masa muscular movilizable
<b>MMmáxima</b>	Máximo valor de MM que puede presentar una oveja
<b>MMmínima</b>	Minimo valor de MM que puede presentar una oveja
<b>MMmovil</b>	Máxima ganancia o pérdida diaria de MM
<b>MN</b>	Monta natural
<b>MS</b>	Materia seca
<b>PB</b>	Proteína bruta
<b>PCelo</b>	Probabilidad de presentar celo
<b>PEstro</b>	Probabilidad de estar cíclica
<b>PL</b>	Programación lineal
<b>PM</b>	Proteína metabolizable
<b>PV</b>	Peso vivo
<b>SATD</b>	Sistema de apoyo a la toma de decisiones
<b>SAU</b>	Superficie agraria útil
<b>SD</b>	Desviación estándar
<b>TH</b>	Tratamiento hormonal
<b>TPG</b>	Técnica de producción de gas
<b>UGM</b>	Unidad de ganado mayor



## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL



## **1 INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1 EL SISTEMA DE OVINO LECHERO DE RAZA LATXA**

#### **1.1.1 Introducción**

La producción de ovino lechero es una de las actividades ganaderas más representativas de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV). Esta actividad está basada en la explotación de las razas autóctonas Latxa y Carranzana, si bien esta última se encuentra en peligro de extinción debido al limitado número de animales existentes y es la raza Latxa la que se distribuye mayoritariamente por todo el territorio. La existencia de la ganadería ovina en la CAPV se remonta al neolítico (Barandiarán, 2000), de modo que las características de las razas se han ido definiendo a través de un proceso de adaptación al medio en el que se encuentran.

El manejo tradicional se caracteriza por la trashumancia o trasterminancia ligadas al pastoreo en zonas de valle y montaña, aprovechando a lo largo del ciclo de producción anual los recursos naturales ubicados a diferentes altitudes (Oregui et al., 1997).

Hoy en día la mayoría de los rebaños mantienen cierto carácter tradicional en cuanto a que son explotaciones familiares que aprovechan los recursos pastables cercanos a la explotación. Sin embargo, en los últimos años el sector ovino ha experimentado un proceso de modernización y adaptación a los nuevos condicionantes socio-económicos (Ruiz et al., 2009).

Un momento clave en ese proceso de modernización fue la implantación en 1982 de un plan de conservación, selección y mejora genética de las razas locales promovido por el Dpto. de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco.

A partir de ese momento se ha ido configurando una amplia estructura compuesta por distintos agentes orientados a la realización de programas que contribuyan a la mejora de la actividad (Urarte et al., 1999) en diferentes aspectos: investigación y desarrollo, formación, calidad y seguridad alimentaria, mejora genética y reproducción, asesoramiento en alimentación, gestión técnico-económica, etc.

Hoy en día estas tareas se continúan realizando de forma coordinada entre los Centros Territoriales de Gestión (Abelur, Lurgintza, Lorra y Sergal), el Centro de Selección y Mejora Genética (Ardiekin S.L.), la Confederación de Asociaciones de Criadores de Ovino de razas Latxa y Carranzana (CONFELAC), HAZI (Corporación del Gobierno Vasco para el desarrollo del medio rural y marino), la Denominación de Origen Idiazabal y el centro de Investigación Agraria Neiker-Tecnalia.

Además, existen otros agentes alrededor de esta actividad, como son la Escuela de Pastores de Aranzazu, la asociación de pastores elaboradores de queso artesano, Artzai-Gazta, y el Instituto Lactológico de Lekunberri.

### **1.1.2 Situación actual del sector**

El sector de ovino de leche supone aproximadamente el 3% del PIB dentro del sector agrario con un total de 308129 cabezas ovinas repartidas en 6003 explotaciones. Del total de explotaciones, tan solo el 8% presenta un tamaño de rebaño superior a las 100 cabezas, si bien, se estima que reúnen el 54% del censo total (NASDAP, 2012).

Las explotaciones con un tamaño inferior a las 100 cabezas corresponden principalmente a explotaciones que practican la ganadería a tiempo parcial y que probablemente complementan sus ingresos con el trabajo realizado en otros sectores económicos (industria, servicios, etc.).

La mayoría de los rebaños están compuestos por ovejas de raza Latxa o Carranzana (84,5%) y hay un pequeño porcentaje (1,4%) de ovejas lecheras de razas foráneas, mayoritariamente Assaf, mientras que el resto son ovejas de carne, cruces con ovejas autóctonas u otros cruces.

La producción lechera estimada en 2011 fue de 7,9 millones de litros, los cuales se destinan mayoritariamente a la producción de queso. Un 54% de la leche producida se transformó en queso en las propias explotaciones ganaderas y un 41% se vendió a las centrales lecheras (NASDAP, 2012). En 1999 estos porcentajes eran del 47% y el 52% respectivamente, lo que indica que ha habido una tendencia a apostar por la transformación en queso en la propia explotación y la venta directa (Ruiz et al., 2009). Cabe destacar que aproximadamente un 75% de los litros producidos se comercializa bajo

la Denominación de Origen Protegida (DOP) Idiazabal, lo que supone un valor económico de unos 13,5 millones de €.

La producción de carne, especialmente la venta del cordero lechal, constituye generalmente la segunda fuente de ingresos para la explotación. De hecho, para el conjunto de la CAPV, el valor económico de la producción de carne en 2008 se estimó en 7,3 millones de € (Mediano et al., 2010).

Los rebaños más profesionalizados, en la medida en que participan en los programas de mejora que se llevan a cabo, suponen un porcentaje pequeño del total de los rebaños existentes, sin embargo, son poseedores de una parte importante de la cabaña ovina ya que entre ellos se encuentran los rebaños de mayores dimensiones. De hecho, los 146 rebaños que se encontraban inscritos en el esquema de mejora genética durante la campaña 2011, concentraban el 51% de las ovejas ordeñadas en la CAPV. Gracias a dicho programa, entre estos rebaños, se consigue una mejora genética del 2% anual para la producción lechera (Ugarte et al., 2001).

Como se puede deducir de los datos anteriores, coexisten en el País Vasco sistemas de producción con realidades muy diferentes. De todas ellas, la de los ganaderos que se dedican a esta actividad de manera profesional justifica unas mayores necesidades de apoyo en la toma de decisiones, y por tanto de actuaciones de investigación y desarrollo, al tiempo que son el origen de una mayor cantidad de información.

### **1.1.3 Manejo del rebaño**

El manejo del rebaño está condicionado en gran medida por la disponibilidad de pasto a lo largo del año y por las necesidades nutricionales de los animales en función de su estado fisiológico.

El invierno es la época en la que es preciso realizar un mayor aporte de alimentos en pesebre ya que el pastoreo se ve limitado por los condicionantes climáticos y las necesidades nutricionales y proteicas de los animales aumentan al encontrarse al final de la gestación o principio de la lactación. En este momento los forrajes conservados y piensos concentrados aportan más del 80% de las necesidades de las ovejas (Oregui et al., 1997).

A medida que avanza la primavera, aumenta la disponibilidad de hierba en las praderas y disminuye la producción media del rebaño, reduciéndose así las necesidades de suplementación.

En general, el final de la lactación y el secado de los rebaños tienen lugar entre los meses de junio y julio, momento en el cual algunos rebaños comienzan a hacer uso de los recursos de zonas de montaña.

### 1.1.4 Descripción del sistema familia-explotación

En la Figura 1 se describe el sistema de ovino lechero en función de:

- Los principales subsistemas que pueden llegar a existir y sus componentes biofísicos.
- Las relaciones y los flujos de materias existentes entre dichos subsistemas.
- Los insumos (en rojo) y productos (en azul) del sistema.

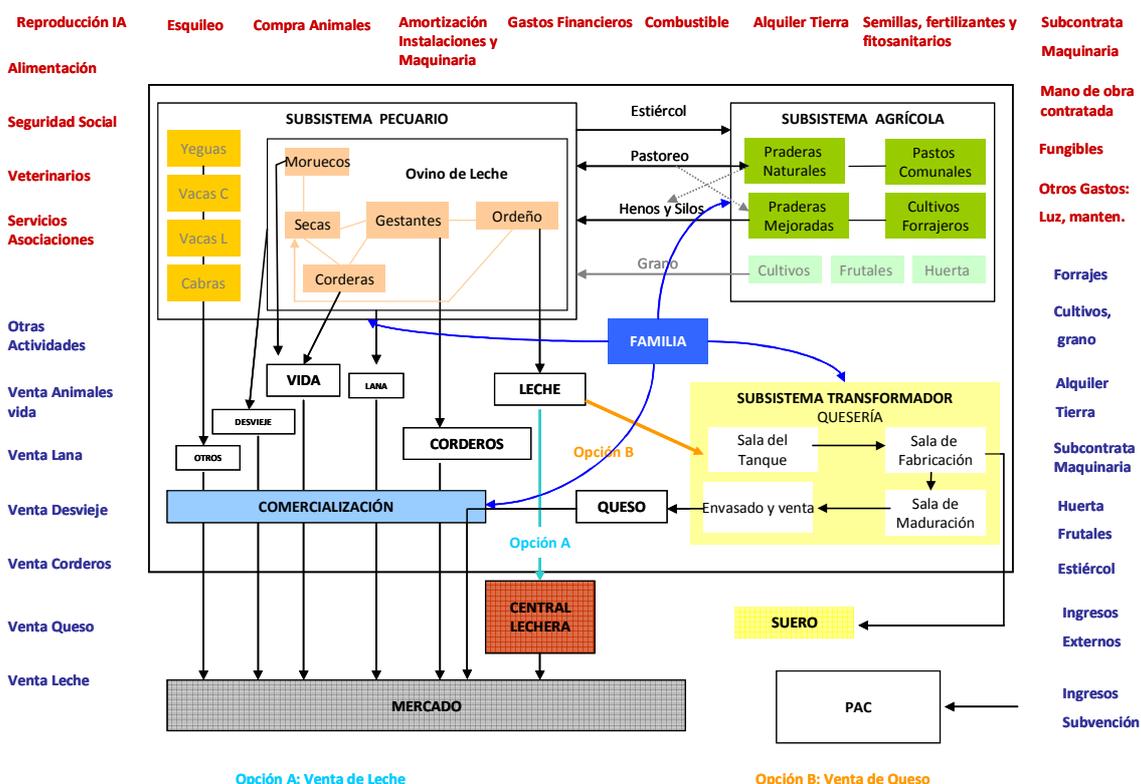


Figura 1.- Esquema general del sistema de producción de ovino lechero con las dos principales opciones productivas (A=leche; B=queso): subsistemas, relaciones, inputs y outputs

1. *Subsistema agrícola o vegetal*: formado por praderas naturales y/o mejoradas (fertilización, resiembras, etc.) aprovechadas mediante pastoreo y/o a través de técnicas de conservación como henificación o ensilado. Además, algunos rebaños tienen derecho de uso de pastos ubicados en zonas de montaña, normalmente gestionados de manera comunal. Aunque no es muy habitual, algunas explotaciones ubicadas en la vertiente mediterránea, donde las condiciones orográficas y climáticas son más favorables, pueden destinar parte de la superficie agraria útil (SAU) para cultivos de cereal.

2. *Subsistema pecuario o ganadero*: constituido por el rebaño de hembras reproductoras (que a lo largo del ciclo productivo irán pasando de manera sucesiva por los estados de gestación, lactación o secas), corderas de reposición y moruecos. Los productos principales son la leche y los corderos lechales (sacrificados en torno a 10-12 kg de peso) mientras que las ovejas de desvieje o las vendidas para vida son productos secundarios de esta actividad. La lana, a pesar de contemplarse como un producto, en la actualidad no supone una fuente de ingreso ya que su valor de mercado es sustancialmente menor que el coste que supone la mano de obra que requiere el esquila. Es relativamente frecuente la coexistencia de un cierto número de animales de otras especies ganaderas (vacuno o equino de carne, y en menor medida vacuno lechero, porcino o caprino) que complementan la actividad principal con el aprovechamiento de recursos alimenticios y de mano de obra, a la vez que generan ingresos y costes adicionales.

3. *Subsistema transformador*: este subsistema se refiere al conjunto de procesos, recursos, instalaciones y medios relativos a la manipulación de la leche destinada a la elaboración de queso, su maduración y venta. Consta por tanto de una quesería, en la que se hace queso cada día o cada dos días, dependiendo del volumen de leche producido. También consta de cámaras de conservación del queso, y en ocasiones de un punto de venta propio en la misma explotación.

4. *Subsistema familiar o de gestión*: Es el núcleo en el que tiene lugar el proceso de toma de decisiones y está formado por el/la titular de la explotación y en ocasiones su cónyuge, hijos, padres u otros familiares. En las explotaciones que realizan la transformación en queso, el reparto de tareas más habitual implica que sea la mujer la responsable de la elaboración y comercialización del queso y el hombre del manejo del

rebaño, praderas y el ordeño. Además de las actividades propias que se realizan con relación a los subsistemas anteriores (ordeño, comercialización, etc.), en ocasiones pueden existir otro tipo de actividades realizadas fuera de la propia explotación agraria (trabajo en la industria, sector servicios, etc.).

### **1.1.5 Condicionantes de ubicación**

En la CAPV existen explotaciones de ovino lechero diseminadas por casi todo el territorio, sin embargo, se observa una concentración mayor en los municipios cercanos a las sierras en las que tradicionalmente se ha realizado el pastoreo estival. Cabe destacar que muchas de estas zonas se corresponden con espacios naturales protegidos (Parques Naturales, LICs, ZEPAS) incluidos en la Red Natura 2000, la cual supone casi el 20% del territorio. En concreto, las zonas de interés para el pastoreo se localizan en la zona central (Parques Naturales de Gorbeia, Urkiola, Aizkorri-Aratz, Izki, sierra de Entzia), este (Parques Naturales de Aralar, Urbasa), oeste (Parque Natural de Valderejo, sierras de Gibijo, Arkamo y Salvada) y noreste (Parques Naturales de Pagoeta y Aiako Harria) del País Vasco.

Se diferencian 4 zonas climáticas de acuerdo al régimen de precipitaciones y temperaturas. De norte a sur, son: i) la zona costera coincidiendo con la vertiente atlántica; ii) una zona central de clima sub-atlántico; iii) una zona de clima sub-mediterráneo; y iv) una zona de clima mediterráneo en el extremo sur de Álava. La mayoría de las explotaciones de ovino lechero se encuentran ubicadas en las tres primeras, mientras que las de ovino de carne lo hacen en las dos zonas situadas más al sur.

En la zona costera las suaves temperaturas y la pluviometría permiten una menor parada invernal en el crecimiento de la hierba y la abundancia de pastos durante una mayor parte del año. La zona de los valles atlánticos por su parte se caracteriza por un clima templado y húmedo sin estación seca. Y por último, la zona sub-mediterránea presenta temperaturas más extremas a lo largo del año y una menor pluviometría, lo cual, por una parte, concentra la producción de pasto en torno a un periodo de tiempo más reducido, pero hace posible el cultivo de cereales o leguminosas, permitiendo a algunos ganaderos complementar la alimentación del rebaño.

### **1.1.6 Disponibilidad de terreno**

La SAU disponible para los rebaños de ovino lechero se encuentra entre las 5-30 ha (Ruiz et al., 1997) propias o alquiladas divididas en parcelas de pequeño tamaño, si bien en algunas de las explotaciones más profesionales como son las que participan en los programas de gestión técnico-económico pueden superar incluso las 40 ha. Estas parcelas suelen estar cercanas a la explotación y suelen ser de praderas naturales y/o mejoradas en distinto grado mediante actividades de fertilización, resiembras, etc. La producción oscila entre los 5000-15000 kg MS/ha dependiendo de la localización geográfica y el manejo realizado, y se utilizan tanto para el pastoreo como para la elaboración de forrajes (henificados y ensilados).

En 2007 se estimaba que entre el 11 y el 18% de las explotaciones de tamaño mayor a 100 ovejas hacían uso de pastos comunales (IKT, 2007), generalmente ubicados en zonas de montaña relativamente cercanas a la explotación. La productividad de estos pastos varía entre 2500 y 6000 kg MS/ha y la duración de la estancia en monte puede oscilar entre los 100 y 160 días (Oregui et al., 1997) entre los meses de mayo a diciembre, dependiendo de la ubicación de la explotación y del calendario productivo. Sin embargo, el porcentaje de rebaños que utilizan los pastos de montaña viene experimentando una constante disminución (de un 85 a un 70% aproximadamente) (Ruiz et al., 1998), así como el tiempo de permanencia de los animales. Esto es consecuencia de múltiples factores entre los que caben destacar aspectos técnicos relacionados con cambios en el manejo de los rebaños (incremento del periodo de ordeño, realización de inseminación artificial (IA)), factores de índole social (búsqueda de mejores condiciones de vida, modernización de instalaciones), y en ocasiones incluso de tipo medioambiental (conflictos con fauna salvaje, principalmente predación por lobos en algunas zonas de la CAPV).

### **1.1.7 Manejo reproductivo**

Debido a la marcada estacionalidad reproductiva de la raza Latxa, por la cual el momento más favorable para las cubriciones tiene lugar alrededor del mes de septiembre, el manejo reproductivo se realiza con el objetivo de obtener un parto al año. La práctica más frecuente entre los rebaños que participan en el esquema de mejora

genética de la raza es la IA de una parte sustancial del rebaño, precedida de tratamiento hormonal (TH) para la sincronización de celos, antes de que comience la época natural de cubriciones. Posteriormente, la monta natural de las ovejas se prolonga hasta el mes de noviembre, si bien en ocasiones el primer ciclo se suele realizar mediante monta natural controlada con el objetivo de lograr descendencia con genealogía conocida. Sin embargo, el comienzo de las cubriciones es variable entre distintos tipos de rebaño. En este sentido, se pueden observar 4 tipos de explotaciones de ovino lechero en función de las características que definen la paridera, básicamente la fecha media de parto (FMP) y la distribución de los partos (Ruiz, 2000), tal como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1.- Tipos de rebaño descritos por Ruiz (2000) en función de la fecha media de parto (FMP)

	<b>TIPO 1</b>	<b>TIPO 2</b>	<b>TIPO 3</b>	<b>TIPO 4</b>
<b>FMP</b>	12 Feb	3 Feb	15 Ene	5 Ene
<b>FMP (Inseminación Artificial)</b>	23 Ene	10 Ene	7 Dic	16 Nov
<b>FMP (Monta Natural)</b>	16 Feb	5 Feb	23 Ene	9 Ene
<b>Duración paridera (meses)</b>	3-4	4-5	6	6-7
<b>Desde</b>	16 Ene	3 Ene	24 Nov	5 Nov
<b>Hasta</b>	18 Abr	2 May	5 May	8 May
<b>% PARTOS DE IA</b>	5,8%	13,2%	14%	14%
<b>FERTILIDAD</b>	72%	76%	80%	80%
<b>PROLIFICIDAD</b>	1,35	1,28	1,21	1,21
<b>Tipo de paridera</b>	Concentrada	Concentrada	Dispersa	Dispersa (bimodal)
<b>Localización Geográfica</b>	Vertiente Mediterránea; Zonas de montaña	Vertiente Mediterránea; Zonas de montaña	Vertiente Atlántica, zonas de valle	Vertiente Atlántica, zonas de valle

El efecto que ejerce la estacionalidad reproductiva hace que se observe una mayor dispersión de la paridera entre los rebaños que adelantan el inicio de los partos a noviembre (tipos 3 y 4). Por su parte los rebaños de tipo 1 y 2 presentan una paridera concentrada hacia el final del invierno. Este tipo de rebaños se ha asociado a un manejo tradicional y/o localizados en zonas de interior o de montaña, mientras que los de paridera de tipo disperso estarían relacionados con un manejo más intensificado en zonas de valle y se localizarían principalmente en zonas de la vertiente atlántica de la CAPV.

### ***1.1.8 Implicaciones productivas de la distribución de los partos***

El adelanto de la FMP supone generalmente un mayor periodo de estabulación del rebaño, debido a que estas fases coinciden con momentos de baja o nula disponibilidad de recursos, y por tanto es necesario ofrecer alimentación en pesebre a los animales que se encuentran al final de la gestación o al inicio de lactación.

A medida que se destetan y/o se sacrifican los corderos, las cinéticas de entrada y salida de las ovejas determinan la estructura del rebaño en ordeño, la cual será más compleja cuanto más se adelante la FMP y se alargue la paridera debido a que los animales se incorporan al ordeño de una forma más escalonada y durante un periodo de tiempo mayor. Lo contrario ocurre con parideras más tardías y concentradas donde el rebaño en ordeño se conforma en un periodo corto de tiempo. Esto tiene consecuencias en la distribución de las necesidades de trabajo, en el manejo alimenticio y en la composición de la leche del tanque. La composición del rebaño en ordeño es más heterogénea en los rebaños de partos dispersos. Es decir, en un momento dado coexisten ovejas que se encuentran en los estadios iniciales de la lactación, y por tanto con producción de leche y necesidades nutricionales mayores, con otras en estados de lactación mucho más avanzados. Esto hace que sea más difícil ajustar la ración del conjunto de los animales a sus necesidades sin recurrir a la formación de lotes, lo que no es una práctica habitual en el caso de la Latxa. Por otro lado, la heterogeneidad del rebaño se traduce en una producción de leche de tanque más homogénea en cantidad y en calidad a lo largo del periodo de ordeño (Ruiz, 2000), lo cual puede ser interesante por motivos de estandarización de la producción del queso, dimensionamiento de las instalaciones de transformación de la leche, y ajuste de las necesidades de trabajo a la disponibilidad existente en la explotación.

Por todo esto, el periodo de partos resulta determinante para la gestión de las necesidades alimenticias y de mano de obra y está condicionado en parte por la decisión del ganadero. La correcta alimentación de las ovejas gestantes o lactantes en periodos de poca disponibilidad de recursos es más accesible y económica en explotaciones con un adecuado dimensionamiento entre cabaña ganadera y disponibilidad de terreno, de modo que es posible la recolección y almacenamiento de forrajes de buena calidad para los periodos de estabulación. En las explotaciones donde esta posibilidad es menor, se

hace necesario adecuar el calendario reproductivo a los recursos de pastoreo, o es preciso recurrir a un mayor gasto en forrajes y concentrados procedentes del exterior.

Con el objeto de facilitar el proceso de toma de decisiones al nivel de la explotación, e identificar en cada caso la estrategia de producción más interesante en términos económicos (disminución de costes y aumento de ingresos), sociales (gestión de la mano de obra) y ambientales (aprovechamiento de recursos naturales), resultaría muy útil disponer de herramientas que permitieran evaluar las posibilidades de gestión reproductiva y alimenticia de una explotación teniendo en cuenta los recursos de los que dispone.

## **1.2 EVALUACIÓN PROSPECTIVA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MODELOS**

Se entiende por prospectiva al conjunto de análisis y estudios realizados con el fin de explorar o predecir el futuro en una determinada materia. La necesidad o interés de la evaluación prospectiva está estrechamente ligada al concepto de sostenibilidad, ya que es el significado de perdurable o sostenible en el tiempo el que hace necesaria la evaluación a medio o largo plazo de determinados sistemas, con el objetivo de potenciar o modificar ciertos rasgos de los mismos.

### **1.2.1 Concepto de sostenibilidad**

La palabra sostenibilidad hace referencia a un concepto muy amplio del que se han llegado a contabilizar hasta 368 definiciones diferentes (Rigby y Cáceres, 2001). Desde que surge este término asociado a la industria minera y forestal hace más de 300 años, el concepto evoluciona desde unos planteamientos más ambientalistas hasta otros mucho más ambiciosos, en los que se incorporan nuevas acepciones e intereses. En ocasiones, esto da lugar a una erosión conceptual del término “desarrollo sostenible” o sostenibilidad (Gamborg y Sandøe, 2005), debido a que dicho término engloba aspectos muy diferentes entre sí (económico, ecológico y social) que son muy difíciles de priorizar, cuantificar y predecir como un único objetivo alcanzable.

Probablemente el periodo en el que más ha evolucionado este concepto ha sido durante las dos o tres últimas décadas, lo que por otra parte coincide con un aumento de

la pérdida de biodiversidad y la aparición de ciertos problemas relacionados con la sobreexplotación de los recursos naturales y la producción de alimentos a partir de sistemas de producción sucesivamente más intensificados.

En lo que respecta a la producción animal, la intensificación de la producción contribuye a causar graves daños en el medio ambiente, como la deforestación, la pérdida de praderas permanentes, la compactación del suelo, unificación del terreno con la consecuente pérdida de biodiversidad (Andersen et al., 2007), además de la emisión de efluentes nitrogenados, gases de efecto invernadero, etc.

Debido a la creciente concienciación medioambiental surgida en los años 70, el concepto de sostenibilidad pasa de entenderse como la utilización de un recurso de una forma perdurable en el tiempo, a hablar de conservación y mantenimiento de ecosistemas complejos. Sin embargo no es hasta finales de los 80, con la publicación del informe Brundtland (Brundtland, 1987), que se incluye el matiz de compromiso intergeneracional, entendiendo ésta como el aprovechamiento de los recursos naturales de manera que no se comprometa su uso para las futuras generaciones. Posteriormente, en los años 90 se generaliza la incorporación de una vertiente más social. Así, las desigualdades observadas entre los productores de los diferentes países son tenidas en cuenta en la Cumbre de Río de 1992 y se incluye en el término la distribución equitativa de recursos entre los países en vías de desarrollo y los países desarrollados.

Hoy en día, la idea de un sistema sostenible implica el equilibrio entre la satisfacción de las demandas de la sociedad actual y de las futuras generaciones de manera económicamente rentable, respetuosa con el medio ambiente y socialmente justa. Por tanto, la actual concepción de sostenibilidad gira en torno a criterios de tipo económico, ecológico y social, lo que hace que el planteamiento de sistemas sostenibles sea una tarea compleja en la que entran en juego aspectos políticos, técnicos, biológicos y éticos (Gamborg y Sandøe, 2005), y donde la consecución de objetivos medioambientales y económicos entra generalmente en conflicto (Belcher et al., 2004).

Desde que se publicó el informe Brundtland, se ha tratado de tener en cuenta el concepto de sostenibilidad en el diseño y aplicación de la Política Agraria Comunitaria (Dýrmundsson, 2006), lo que en parte motivó la reforma de 2003. Así, se trató de dar más importancia al desarrollo rural, concediendo ayudas a cambio de criterios de eco-

condicionalidad y desacoplando las ayudas de la producción. La nueva reforma de la PAC publicada en 2010 va aún más lejos y crea el concepto de “greening”, por el cual el 30% de la ayuda concedida dentro del primer pilar está asociado a criterios medioambientales. Por lo tanto la agricultura y ganadería abandonan el criterio del productivismo y evolucionan hacia conceptos como el de multifuncionalidad y sostenibilidad (Revilla, 2002).

La multifuncionalidad agraria supone una visión más amplia del sector primario que comprende no sólo la función tradicional de producción de alimentos y materias primas, sino todas aquellas que están relacionadas principalmente con aspectos de carácter ambiental y social (Gómez-Limón, 2006). En este sentido, el paisaje y la biodiversidad son los servicios no materiales más importantes derivados de los agroecosistemas (Board, 2005). Estos servicios juegan un papel crucial para satisfacer las demandas culturales, recreativas y éticas de la sociedad (Layke, 2009).

Pese a todo esto, la herencia de las anteriores políticas ha dejado una agricultura y ganadería intensificadas, dependientes en gran medida de insumos y desligadas del medio (Revilla, 2002). De hecho, el 75% de la proteína animal consumida en los países desarrollados proviene de sistemas de producción intensificados (Boyazoglu, 2002).

Sin embargo, la producción de ovino todavía se asocia a sistemas relacionados con el pastoreo y el uso de recursos naturales que presentan, por tanto, rasgos más propios de un manejo sostenible. No obstante existe una amplia diversidad dependiendo de las características bioclimáticas, culturales, etc.

Según Dyrmondsson (2006) muchos sistemas de ovino del norte de Europa se ajustan a la definición de sistema sostenible y multifuncional con la excepción de los situados en zonas de valle con poca disponibilidad de tierra, donde la carga ganadera y la erosión del suelo pueden llegar a ser muy altas. Por otro lado, autores como Ronchi y Nardone (2003) y Hadjigeorgiou (2005) plantean la existencia de una serie de problemas que podrían comprometer la sostenibilidad en algunos sistemas de la cuenca del Mediterráneo. En la Tabla 2 se resumen algunos de los aspectos positivos y negativos de los sistemas de ovino en Europa.

En muchas ocasiones, la evolución hacia sistemas más sostenibles pasaría por un proceso de desintensificación basados en un mayor ajuste de los ciclos reproductivos de

los animales a la disponibilidad de alimentos, optimizando la utilización de los recursos pastables (Revilla, 2002), desarrollando sistemas mixtos de ganadería y agricultura (Nardone et al., 2004) con una mayor incorporación de leguminosas, y estableciendo el concepto de carga ganadera óptima de cada sistema en particular (Boyazoglu, 2002). En este sentido la selección de animales adaptados al entorno sería un nuevo objetivo de mejora, integrando el concepto de sostenibilidad en la mejora genética (Gamborg y Sandøe, 2005).

Por todo esto, plantear cambios hacia sistemas más sostenibles requiere de un conocimiento exhaustivo del funcionamiento del sistema y sus relaciones. En esta tarea la modelización es una herramienta muy útil ya que permite comparar a priori las respuestas de los sistemas a determinados cambios, y de esta manera cuantificar las alternativas de producción y evaluar la variabilidad de las respuestas y sus tendencias a largo plazo (López Ridaura, 2009).

Tabla 2.- Aspectos que pueden afectar a la sostenibilidad en los sistemas ovinos europeos

<b>Aspectos que favorecen la sostenibilidad de los sistemas</b>	<b>Aspectos que perjudican la sostenibilidad de los sistemas</b>
Aprovechamiento de recursos naturales: sistemas agrosilvopastorales	Abandono de áreas marginales
Bajo impacto ambiental	Fragmentación de las explotaciones y disminución del tamaño
Mantenimiento del medioambiente y del paisaje	Problemas de acceso a la tierra
Mantenimiento de razas autóctonas adaptadas al medio	Sobrepastoreo
Realización de trashumancia	Pérdida de la biodiversidad
Sistemas transformadores, en el caso del ovino de leche.	Alta dependencia de insumos
Diferenciación de productos en base a atributos de calidad (DOP, IGP)	Selección de animales con altas necesidades nutricionales
Canales cortos de comercialización	Problemas sanitarios (mastitis y parásitos)
Contribución al mantenimiento de valores ecológicos, estéticos y recreativos.	Problemas de bienestar animal ligados tanto a la intensificación como a la extensificación
	Conflictos con fauna salvaje
	Disminución del consumo de carne de ovino y apertura a nuevos mercados

Adaptado de (Boyazoglu, 2002; Revilla, 2002; Ronchi y Nardone, 2003; Nardone et al., 2004; Gamborg y Sandøe, 2005; Hadjigeorgiou et al., 2005)

### **1.2.2 Descripción de un sistema: un paso previo a la modelización**

De cara a modelizar un fenómeno o comportamiento complejo es preciso acotar la parte de éste que se quiere estudiar y entenderlo como un sistema.

La teoría general de sistemas publicada por Ludwing von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1950) abre el camino al estudio de los sistemas complejos desde una perspectiva expansionista. Esta nueva perspectiva, denominada enfoque sistémico, se diferencia en varios aspectos con respecto del enfoque analítico tradicional, entre ellos en que se apoya en la percepción del sistema como un todo y no en la precisión de los detalles, y en que da más importancia a los efectos de las interacciones que a la naturaleza de esas interacciones (Faverdin, 2009). Sin embargo, es importante que ambos métodos de análisis se complementen, ya que para conocer bien un sistema es importante conocer a fondo las partes y viceversa.

Por sistema se entiende un conjunto de elementos en interacción dinámica, organizados en función de una meta (De Rosnay, 1975), de modo que presentan una serie de características:

- **Apertura:** los sistemas en general y los biológicos en particular están influenciados por el medio en el que se encuentran, por lo que puede decirse que son necesariamente abiertos.
- **Interrelación:** están conectados entre sí, de manera que un sistema puede ser causa y causante o ayudado y ayudante de otro.
- **Aglutinación:** son susceptibles de pertenecer a otro más grande (“suprasistema”) y de estar formados por otros más pequeños (“subsistema”).
- **Finalidad:** el sistema en conjunto actúa por y para la consecución de un objetivo común.
- **Auto-organización:** pueden cambiar y adaptarse al entorno en función de sus mecanismos y responder de manera impredecible.

El concepto de auto-organización o supervivencia está relacionado con el concepto de emergencia, una característica que presentan muchos sistemas. La emergencia hace referencia a aquellas propiedades o procesos de un sistema no reducibles a las propiedades o procesos de sus partes constituyentes. Esto quiere decir que un sistema presentará propiedades *macroscópicas* que difieren radicalmente de las de sus

constituyentes; sin embargo son consecuencia de ellos, y es el paso de una escala a la siguiente lo que da origen a comportamientos nuevos o impredecibles (Faverdin, 2009). Un ejemplo sería el comportamiento inteligente emergente del cerebro, que es un sistema formado por la interacción de millones de unidades básicas, las neuronas, cuyo comportamiento aislado no es capaz de razonar o crear pensamientos complejos.

### **1.2.3 Modelos de simulación en ganadería**

La evolución de los modelos de simulación se ha desarrollado de forma paralela a la del resto de disciplinas científicas (Bernués et al., 1995). Esto ha significado la evolución hacia un conocimiento cada vez más profundo de los fenómenos aislados, siguiendo los principios del reduccionismo y el mecanicismo, de forma que la mayoría de los modelos de simulación desarrollados representan elementos individuales y aislados del sistema, lo que limita enormemente su aplicación al mundo real (Bernués et al., 1995).

A medida que las ciencias agrarias avanzan, e influenciadas por la teoría de sistemas, los modelos ganan en perspectiva, integrando los diferentes subsistemas agrarios (animal, rebaño, explotación, territorio, mercado, políticas ...) para tratar de explicar y valorar los sistemas desde sus tres pilares fundamentales: económico, social y medio-ambiental.

Estos modelos facilitan la resolución de ciertos problemas complejos o dinámicos que de otra forma serían muy complicados de abordar (Oriade y Dillon, 1997) y por esta razón su uso como sistemas de apoyo a la toma de decisiones (SATD) está en aumento (Tedeschi, 2006).

En la realización de un modelo, se distinguen dos fases: una cualitativa que se fundamenta en la elaboración de diagramas que muestran la estructura jerárquica de los subsistemas integrantes y los flujos de nutrientes, productos, dinero, etc.; y otra cuantitativa que utiliza las ecuaciones matemáticas para expresar las dinámicas del sistema de manera precisa (Bernués et al., 1995).

Como resultado, el modelo será una representación simplificada de la realidad. De él se espera que represente aquellas facetas del sistema que son relevantes para su aplicación, de modo que el tipo de modelo a utilizar dependerá del uso previsto y de los

objetivos del investigador (Dent y Blackie, 1979). Para ello el investigador debe identificar cuál es la unidad de análisis y cuáles son los procesos modelizados (Thornton, 2009).

#### **1.2.4 Tipos de modelos**

Los modelos se pueden clasificar en función de diferentes aspectos:

##### En función de su objetivo:

- Básicos: su objetivo es ampliar conocimientos;
- Aplicados: utilizan modelos básicos para solucionar un problema;
- De desarrollo: utilizan todo el conocimiento adquirido para solucionar el problema.

##### En función de aspectos relacionados con su construcción:

- Estáticos o Dinámico: los primeros representan el sistema en un instante dado, mientras que los segundos incorporan el tiempo como una variable más del modelo (France y Thornley, 1984);
- Empíricos o Mecanicistas: los modelos empíricos realizan predicciones mediante relaciones estadísticas obtenidas a partir de datos experimentales; sin embargo los mecanicistas describen los mecanismos subyacentes que se combinan para representar el comportamiento de un sistema complejo (Dent et al., 1995). A menudo resulta complicado situar el límite entre modelos mecanicistas y empíricos. Así, un modelo que pretenda simular un sistema ganadero a nivel de rebaño, se podría considerar mecanicista si incluyese referencias al metabolismo de los nutrientes a nivel de animal (Villalba, 2000), aunque estas referencias se basaran en relaciones estadísticas empíricas a un nivel más detallado;
- Deterministas o Estocásticos: los modelos deterministas son los que, con una información conocida, hacen predicciones definitivas. Un ejemplo sería un sistema de predicción de las necesidades energéticas. Los modelos estocásticos utilizan información que se comporta de una manera probabilística y por lo tanto permiten introducir un componente de aleatoriedad (France y Thornley, 1984). En

el ejemplo del cálculo de las necesidades, un modelo estocástico simularía cada animal con cierta variabilidad de manera que el resultado del modelo sería tanto una medida de la media como una medida de la variabilidad de la respuesta, en lugar del valor medio de las variables del modelo (Villalba, 2000).

*En función del nivel de descripción:*

- Niveles inferiores: describen macromoléculas, órganos, el animal y el rebaño;
- Niveles superiores: integran el modelo de rebaño con modelos económicos y de producción forrajera. Estos se denominan modelos bio-económicos y pueden abarcar una explotación o conjunto de explotaciones, pudiéndose agregar a nivel territorial.

*En función de las salidas del modelo:*

- Modelos de optimización: son los que buscan una solución óptima en función de determinadas restricciones (programación lineal multicriterio y dinámica). La salida del modelo encuentra una combinación de factores que minimizan o maximizan uno o varios objetivos. Destaca entre ellos la programación lineal (PL) utilizada mayoritariamente en el campo de la economía agraria durante más de 50 años (Kerselaers et al., 2007);
- Modelos de simulación: obtienen un resultado a partir de grupos de variables predefinidas. La salida del modelo es el resultado de un experimento en el que se valoran unas condiciones concretas (Van Dyne y Abramsky, 1975).

*En función de su enfoque (Janssen y van Ittersum, 2007):*

- Positivo: trata de modelizar el comportamiento actual del ganadero describiendo sus respuestas y tratando de comprenderlas, de manera que presten menos atención a las causas.
- Normativo: trata de buscar soluciones óptimas a alternativas de gestión de los recursos y de localización, prestando más atención a las normas que rigen los sistemas.

### **1.2.5 Utilidad de los modelos**

El trabajo con modelos de simulación ha puesto de relieve la utilidad de los mismos para diferentes fines:

- Recopilar y sintetizar lo que se sabe sobre un determinado proceso.
- Comprender la importancia relativa de los elementos de cada sistema.
- Tratar la complejidad de los sistemas dinámicos (“propiedades de emergencia”) de una manera que el enfoque reduccionista no permite.
- Realizar manipulaciones en los sistemas en estudio que de otra manera serían imposibles de practicar por motivos económicos o de tiempo (controlar el ambiente y experimentar con situaciones hipotéticas, estudiar los efectos a largo plazo de distintas opciones).
- Identificar las mejores estrategias mediante la optimización.
- Poner de relieve las áreas de conocimiento que necesitan más investigación.

### **1.2.6 Optimización mediante modelos de simulación**

Los modelos de simulación forman parte de uno de los grupos de problemas de optimización más difíciles de solucionar (Mayer et al., 1998). Su carácter multidimensional hace que la superficie de respuesta sea discontinua y por lo tanto el escenario de soluciones presente un gran número de óptimos locales (Mayer et al., 2001).

Debido a la complejidad que presentan estos modelos, la aplicación directa de la PL u otros métodos clásicos de optimización resulta en gran medida limitada, de manera que una de las soluciones más utilizadas para combinar simulación y optimización es tomar un número elevado de simulaciones dinámicas que son posteriormente valoradas mediante modelos de PL (Bernués et al., 1995). De esta manera no es seguro identificar la estrategia óptima dentro del espacio total de resultados, ya que la optimización se aplica a una serie de salidas de un número limitado de condiciones ya simuladas.

Con el objetivo de permitir la optimización de modelos complejos referidos a múltiples campos, incluidos los sistemas agrarios, se han probado nuevas metodologías, como los algoritmos evolutivos. Estos algoritmos se basan en imitar el proceso de

selección natural que permite a las especies adaptarse al entorno. Cada solución del problema a optimizar se considera un individuo con un valor que indica el grado de bondad. Aplicando operadores pseudo-genéticos como la selección, mutación, o cruzamiento a estas soluciones, se puede llegar a una solución óptima.

Un caso particular de algoritmos evolutivos son los Algoritmos Genéticos (AG)<sup>1</sup>, éstos han demostrado que pese a requerir más tiempo que los métodos clásicos para evaluar las posibles combinaciones, realizan un recorrido más amplio por el espacio de búsqueda, evitando el problema de caer en mínimos o máximos locales (Hart et al., 1998), con lo cual se adaptan mejor a la solución de problemas complejos y pueden abordar la optimización de problemas no lineales.

---

<sup>1</sup> Una descripción más detallada de este tipo de algoritmos se presenta en el capítulo 3 de esta Tesis.



## 2. OBJETIVOS DE LA TESIS



## 2 OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo principal de la tesis es diseñar un SATD basado en modelos de simulación y optimización para la gestión del sistema de producción de ovino lechero de raza Latxa.

Para ello se han establecido los siguientes objetivos secundarios:

1. Desarrollo y parametrización de un modelo animal que incluya los módulos de simulación de:
  - a) Rumen e ingestión voluntaria.
  - b) Partición de nutrientes.
  - c) Comportamiento reproductivo.
2. Integración del modelo animal dentro de un modelo de explotación y validación de su funcionamiento.
3. Simulación y optimización de escenarios para la identificación de diferentes estrategias de gestión.



### 3. MODELO ANIMAL



### **3 MODELO ANIMAL**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El diseño de un modelo que permita simular el comportamiento de un animal destinado a la actividad ganadera debe contemplar dos funciones fisiológicas fundamentales: la nutrición y la reproducción.

En lo que se refiere a la nutrición, en primer lugar habría que representar el proceso de ingestión voluntaria (IV), la cual está relacionada con la valorización de los recursos propios de la explotación y, por tanto con la utilización de la base territorial y las necesidades de suplementación. Conocida la IV y la composición nutricional de la ingesta, existen diferentes sistemas de valoración nutricional que permiten simular el reparto de la energía y la proteína consumidas, y como resultado estimar la producción de leche y la variación de peso y reservas corporales.

En cuanto a la función reproductiva, el poder relacionar ésta con el estado nutritivo permite ligar los resultados de ingestión y evolución de reservas con el rendimiento animal, y en definitiva, con el resultado final de la explotación.

Por tanto, el modelo animal a desarrollar se ha de dividir en tres módulos: uno de simulación del rumen y de estimación de la IV; otro de cálculo de la evolución del peso, reservas corporales y la producción lechera; y, por último, uno dedicado a la representación del comportamiento reproductivo que tenga en cuenta el estado nutritivo del animal.

En este capítulo se presenta el desarrollo de los 3 módulos que conforman el modelo animal, para lo cual se describen los siguientes pasos o etapas:

- a. Desarrollo y validación de un módulo de rumen para la simulación de la IV.
- b. Desarrollo y validación de un módulo de simulación de la partición de nutrientes para la predicción de la producción lechera y la variación de peso y reservas corporales.
- c. Desarrollo y validación de un módulo de simulación del comportamiento reproductivo que tenga en cuenta la estacionalidad de la raza y el efecto que la CC tiene sobre los resultados reproductivos (fertilidad y prolificidad).

## **3.2 MÓDULO DE RUMEN**

### **3.2.1 Introducción**

La IV es un aspecto clave del rendimiento animal y por esta razón se han desarrollado numerosos modelos teóricos con el objetivo de predecirla (Forbes, 1977; Mertens y Ely, 1979; Illius y Gordon, 1991; Ketelaars y Tolkamp, 1992; Alderman y Cottrill, 1993; Poppi et al., 1994; Herrero, 1997; Forbes y Provenza, 2000; Hackmann y Spain, 2009). Sin embargo, ninguno de estos modelos ha dado unos resultados lo suficientemente robustos y satisfactorios como para ser aceptado como un sistema de predicción de uso generalizado. Por esta razón, la correcta predicción de la ingesta voluntaria se considera un problema aún sin resolver (Pittroff y Kothmann, 2001a), y no existe hoy en día, una teoría única al respecto (Forbes, 2007).

Precisamente el problema radica en que los factores que afectan a la ingestión voluntaria son numerosos y actúan de manera conjunta. Algunos de ellos están relacionados con las características del alimento, como la forma de presentación, la humedad, el contenido en pared celular o la disponibilidad; mientras que otros están relacionados con el propio animal, como el tamaño, la edad, el genotipo, el estado fisiológico, o las condiciones ambientales (temperatura y humedad) en el que éste se encuentra. Por último existen factores relacionados con los mecanismos fisiológicos de regulación como la densidad de la dieta o digestibilidad, la carencia o exceso de algún nutriente, el balance energético o la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) en el rumen.

En este sentido, los mecanismos de regulación de la ingestión son difíciles de estudiar ya que es difícil conocer como se complementan o anulan varios mecanismos simultáneamente (Van Soest, 1994). Estos mecanismos dependen de la interacción entre las características del alimento y del animal, y en ellos está la clave para modelizar y predecir la ingestión voluntaria con cierta aproximación. Por esta razón, una de las bases de la teoría más extendida que existe sobre la regulación de la IV es la de que dicha ingestión está determinada fisiológicamente y limitada físicamente (Ketelaars y Tolkamp, 1992).

Según esta teoría, el mecanismo físico que regula la ingestión es el llenado ruminal, el cual está limitado físicamente por el volumen del rumen, lo que se relaciona con el tamaño del animal, y viene condicionado por el tiempo de retención del alimento. De este modo, la cantidad de residuo indigestible que atraviesa el tracto digestivo junto con la absorción y digestión de nutrientes por parte del animal, determinan la ingestión voluntaria (Van Soest, 1994). Así, en la medida en que las tasas de degradación del alimento son más rápidas, se acelera el vaciado ruminal y se facilita la ingestión voluntaria del alimento.

El componente que más se ha relacionado con la teoría del llenado es el contenido en pared celular (Mertens y Ely, 1979; Waldo, 1986), el cual está negativamente correlacionado con la ingestión y con la densidad energética de la dieta (Jung y Allen, 1995). Sin embargo, la relación entre densidad energética e ingestión es positiva hasta un umbral máximo, a partir del cual no se produce aumento en la ingestión. Este umbral está relacionado con el nivel máximo de demanda energética del animal (Van Soest, 1994). En la Figura 2 se presenta la relación entre la digestibilidad de la dieta y la ingestión de materia seca (MS) o energía digestible (ED), observándose que a niveles altos de digestibilidad el aporte de energía se mantiene constante, disminuyendo la cantidad de alimento ingerida. El valor de digestibilidad en torno al cual se ha observado una mayor ingestión se encuentra alrededor del 70%, si bien esto puede variar ligeramente en función de los requerimientos del animal (Van Soest, 1994). Esta teoría contribuye a explicar por qué las dietas menos digestibles no permiten satisfacer la capacidad máxima de ingestión debido a que requieren más tiempo de ingestión y suponen un mayor llenado ruminal.

De manera paralela, y relacionado con la densidad energética de la dieta, tiene lugar un mecanismo de regulación de la ingestión de tipo metabólico, según el cual la ingestión potencial está determinada por el estado fisiológico y el nivel de producción del animal. Según esta teoría la ingestión máxima potencial es la que permite satisfacer las necesidades de producción y crecimiento máximo (Ketelaars y Tolkamp, 1992). Este nivel máximo de demanda coincide con el umbral máximo de ingestión (Figura 2).

En la Figura 3 se describen los dos mecanismos más conocidos que intervienen en la regulación de la ingestión en una interpretación de cómo se interrelacionan entre ellos

a través del umbral máximo de ingestión. En respuesta a los diferentes mecanismos de regulación metabólica, las tasas de paso y degradación y la tolerancia a la distensión ruminal, las cuales determinan la IV final, variarán en función de si se ha llegado o no al umbral máximo.

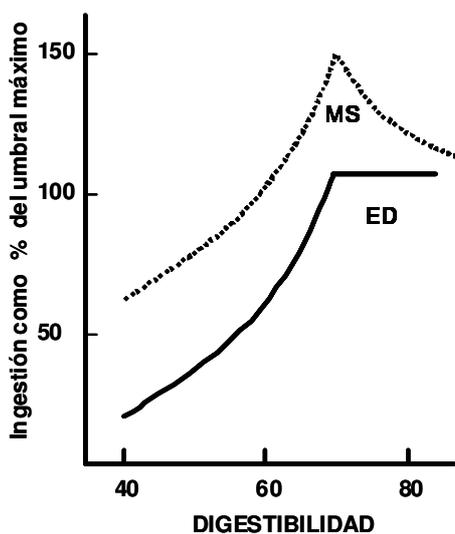


Figura 2.- Relación entre la digestibilidad de la dieta y la ingestión de materia seca (MS) y la energía digestible (ED) (Van Soest, 1994).

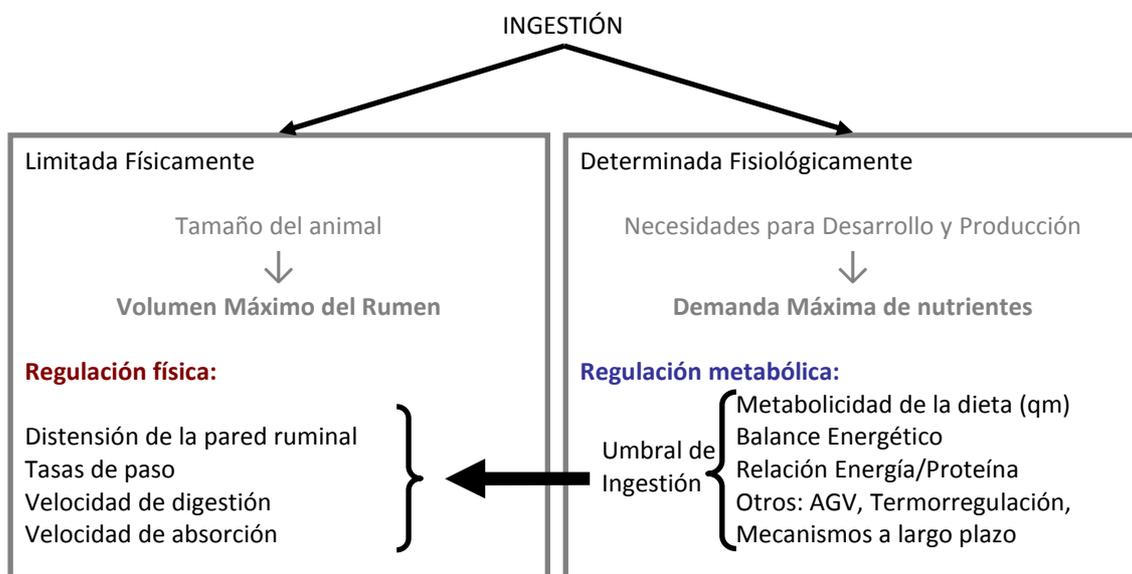


Figura 3. Descripción de los principales mecanismos de regulación de la ingestión

Por otro lado, cabe destacar que el umbral de ingestión metabólico no se alcanza cuando la dieta está basada en forrajes de calidad media ya que la limitación que

imponen las características del forraje hace que la restricción física sea la primera señal de cese de la ingestión que recibe el animal.

Precisamente el principal punto débil en la mayoría de los modelos existentes lo constituye el mecanismo de regulación metabólica. Por otra parte, estos modelos han demostrado su eficacia a la hora de predecir la ingestión de forrajes de poca calidad que responden muy bien a la teoría del llenado del rumen.

Recientemente, autores como Forbes (2007), consideran un nuevo enfoque en la modelización de la IV, entendiendo ésta como una optimización entre costes y beneficios en la cual los factores que afectan a la IV no son independientes unos de otros sino que actúan de forma conjunta sobre el sistema nervioso central de una manera aditiva. Según Forbes y Provenza (2000), el grado de apetencia por un alimento está en relación con la desviación del aporte de un nutriente con respecto de las necesidades óptimas que supone la ingestión de dicho alimento, es lo que se conocería como “*metabolic discomfort*”.

En la línea de esta teoría, algunos de los modelos actuales como el desarrollado por Hackman y Spain (2009) tratan de optimizar el valor de IV que corresponde a la relación más interesante entre los aportes reales y teóricos de distintos nutrientes o componentes de la dieta, como la proteína, la energía neta o la FND.

### **3.2.2 Modelos actuales adaptados a ovino**

En la actualidad no son muchos los modelos de predicción de la IV adaptados a ovino y menos aún los adaptados a ovino lechero. Además cabe señalar que la predicción de la IV suele formar parte de un modelo más amplio, por lo que dependiendo del objetivo de la simulación, el grado de profundidad del modelo de ingestión varía de unos a otros. Algunos modelos predicen la IV únicamente a partir de las necesidades del animal, otros además consideran las características del forraje y otros incluyen un tercer criterio como es la disponibilidad del forraje (Pittroff y Kothmann, 2001a).

Algunos de los problemas que plantean estos modelos es que su validez se limita a un cierto rango de condiciones. En la Figura 4 se observan los valores de IV (kg MS/día) estimada para heno de alfalfa de 4 calidades diferentes, predicha por 7 modelos comparados por Pittroff y Kothmann (2001b) para una oveja de las mismas

características. Es destacable el amplio rango de variación de las estimas, que en algunos casos es superior a 1kg.

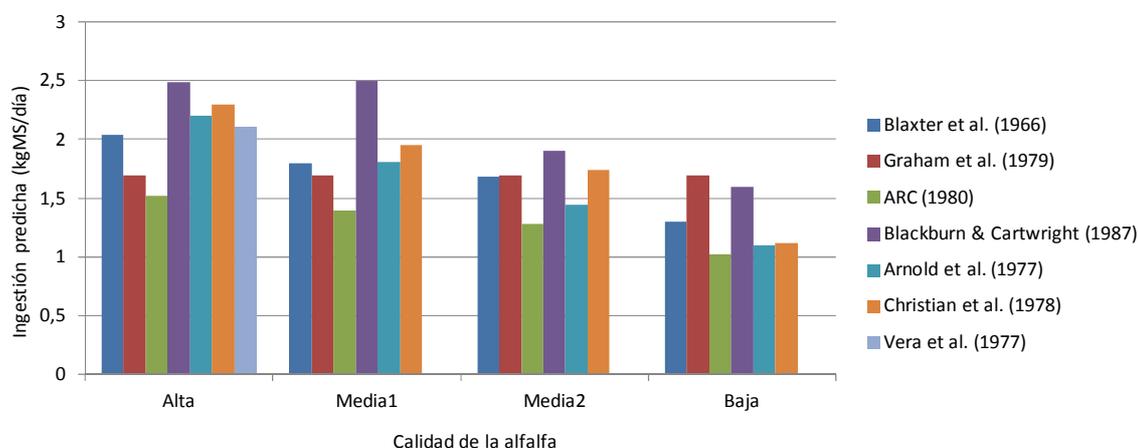


Figura 4. Estimación de IV de alfalfa de diferente calidad para una oveja lactante de 64 kg de peso produciendo 1,4 l de leche obtenidos con diferentes modelos (Pittroff y Kothmann, 2001b).

Los principales modelos de simulación de la ingestión y el crecimiento diseñados para ser utilizados en ovino lechero existentes en la actualidad son el modelo del INRA (Jarrige y Agabriel, 1988) y el Small Ruminant Nutrition Sistem (SRNS) (Cannas et al., 2004). En ambos casos la predicción de la IV se basa en el análisis de datos experimentales a partir de los cuales se desarrollan ecuaciones que tienen en cuenta el tamaño del animal y la producción lechera. En el caso del SRNS el modelo ovino es una adaptación del modelo desarrollado en Cornell para vacuno y predice la IV a partir de la ecuación de regresión desarrollada por Pulina (1996). En el caso del sistema del INRA, la IV se predice a partir del concepto de unidades de llenado (Jarrige et al., 1986).

### 3.2.3 Origen del módulo

La estructura del módulo de rumen toma como referencia principal el trabajo de Illius y Gordon (1991). El modelo de Illius & Gordon (1991) se basa únicamente en la restricción física de la ingestión consecuencia del peso vivo (PV) del animal y de las características del forraje. Es un modelo desarrollado para simular la ingestión de un único forraje y no tiene en cuenta restricciones metabólicas. Este modelo fue ampliado por Herrero (1997) incluyendo la degradación de la proteína en el rumen (Alderman y Cottrill, 1993) y la digestión de la proteína a partir del modelo de Sniffen (1992). Además

se incluyó la posibilidad de añadir a la dieta una cantidad de concentrado repartido en una o dos tomas y se completó el modelo con un mecanismo de regulación metabólica por el cual las tasas de paso del alimento en el tracto digestivo aumentan con el nivel de alimentación del animal (expresado como múltiplos de energía metabolizable para el mantenimiento).

A partir del modelo de Herrero (1997), Silveira (2000) incluyó una nueva regulación metabólica por la cual el tamaño efectivo del rumen se reduce con alimentos de alta metabolibilidad (relación entre la energía metabolizable y la energía bruta que aporta un alimento), y lo validó para alimentación de vacuno.

De este último modelo se ha tomado el módulo de rumen adaptándolo al ganado ovino e incluyendo dos nuevas modificaciones. La primera consiste en la inclusión de un mecanismo de regulación metabólica similar al propuesto por Hackman y Spain (2009), basado en la relación entre aportes de nutrientes reales y teóricos. Para ello se ha tomado la relación existente entre la EM necesaria potencial y la EM aportada como una señal química que regula el tamaño del rumen. La segunda modificación consiste en permitir la inclusión en la dieta de más de un forraje, si bien uno de ellos ha de estar limitado en cantidad y el segundo puede ser consumido a libre disposición.

#### **3.2.4 Descripción del funcionamiento del módulo**

El objetivo final del módulo es obtener los valores de IV (kg/MS) de uno o dos tipos de forraje y de concentrado, la energía metabolizable (EM) (MJ) y la proteína metabolizable (PM) (g) aportados por la dieta. Las ecuaciones empleadas en el módulo se recogen en el Anexo I, si bien a continuación se describe de forma general el funcionamiento del mismo.

La ingestión acumulada a lo largo del día es el resultado de la suma de las ingestiones parciales que tienen lugar durante cada una de las 24 horas del día. Cada hora la ingestión se calcula como la diferencia entre la cantidad de MS que hay en el rumen (MS\_RUMEN) y la que podría haber en función del tamaño máximo del rumen (RUMENMAX) (Figura 5). El tamaño máximo del rumen viene determinado por el peso del animal y se ve modificado en función de la metabolibilidad de la dieta ( $q_m$ ) y del porcentaje de energía aportado en relación a las necesidades ( $S_q$ ).

Los alimentos se describen por sus constituyentes básicos, hidratos de carbono (HC) y proteína bruta (PB). Los componentes de las fracciones carbonada (g/kg MS) y proteica (g/kg PB) de los alimentos son los siguientes (ver Anexo I):

- CCell: contenido celular.
- PCD: pared celular degradable.
- PCnD: pared celular no degradable.
- PB\_sol: proteína soluble rápidamente degradable.
- PB\_deg: proteína lentamente degradable.
- PB\_NoDeg: proteína no degradable.

Estos componentes de los alimentos se degradan y absorben de manera diferente en cada uno de los compartimentos del aparato digestivo (rumen, intestino delgado e intestino grueso). La cantidad de MS de cada fracción es resultado de los parámetros de entrada de los alimentos (la cantidad de esa fracción que aporta el alimento) y de la tasa de digestión y paso que se aplica a cada fracción en cada compartimento.

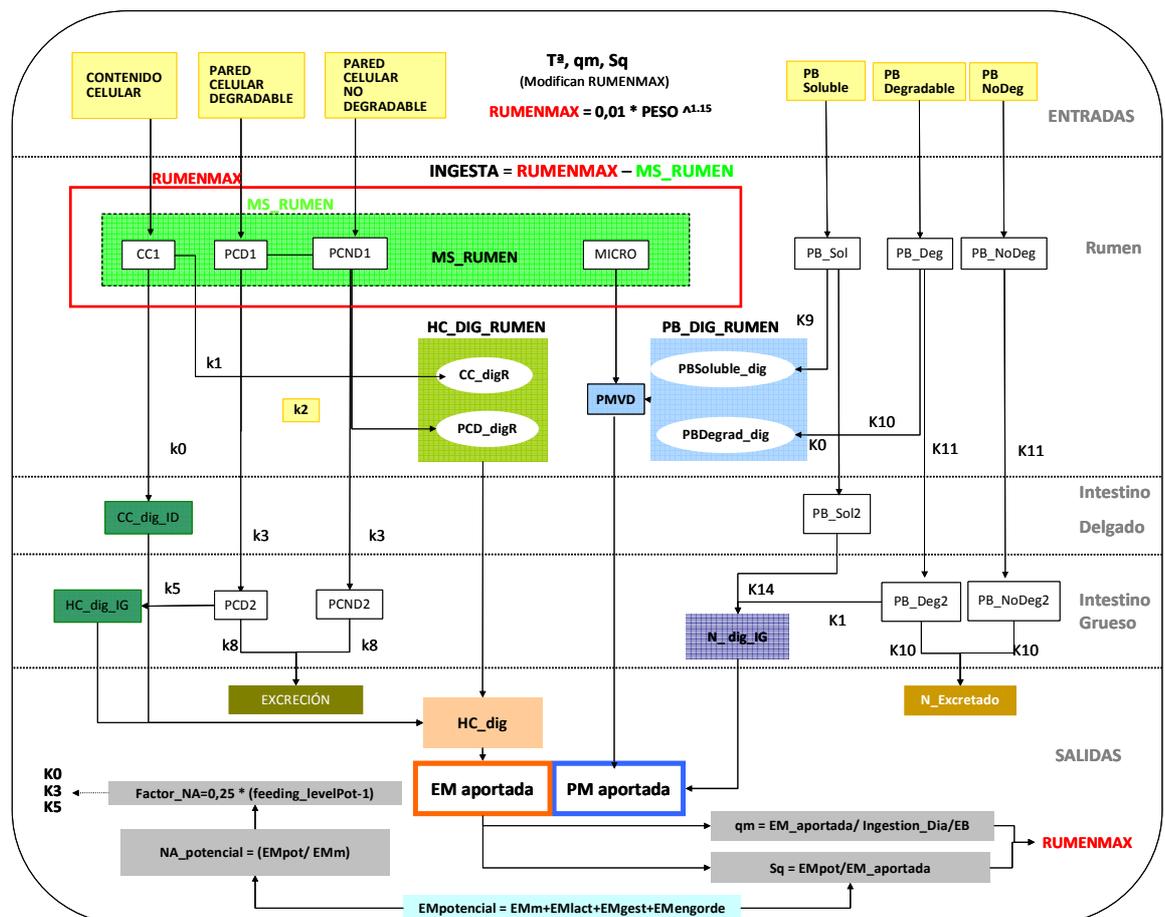


Figura 5.- Diagrama de flujo del módulo de rumen (ver Anexo I)

En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo de las fracciones carbonadas y proteicas a través del rumen, el intestino delgado y el intestino grueso. La cantidad de MS que hay en el rumen, MS\_RUMEN, es la suma de las fracciones de HC más el crecimiento microbiano (MICRO) que tiene lugar en el rumen.

En el ver Anexo I se describen siguiendo el orden del código los cálculos que tienen lugar durante cada iteración del bucle hora del módulo rumen, y cómo se calcula al final del día la IV, la energía metabolizable y la proteína metabolizable aportada. Además se recogen todas las variables de entrada, salida, constantes y variables inicializadoras del modelo y se describe el método de obtención de las variables relativas a la calidad del alimento mediante la técnica de producción de gas (TPG).

### 3.2.4.1 Diseño de las dietas

El módulo diseñado está programado para ser ejecutado sobre una base temporal de 24 horas, de modo que cada hora se estima la cantidad de alimento ingerida. Las dietas que el modelo permite diseñar pueden variar desde una dieta simple constituida por un único forraje (Tipo 1, Tabla 3), hasta una dieta integrada por dos forrajes y un concentrado (Tipo 4, Tabla 3).

El módulo de rumen simula la ingestión de los alimentos en el orden que aparece en la Tabla 3. En las dietas 2-4 las cantidades de “forraje limitado” y “concentrado” deben estar determinadas por el usuario del modelo, de modo que se asume que serán consumidas en su totalidad siempre y cuando no se supere la capacidad de ingestión prevista. Si antes de finalizar el bucle del día se permite la ingestión de alimento, el tipo de alimento que entra es forraje “ad libitum”.

Tabla 3. Diferentes tipos de dieta que pueden diseñarse con el modelo

<b>Dieta Tipo 1</b>	<b>Dieta Tipo 2</b>	<b>Dieta Tipo 3</b>	<b>Dieta Tipo 4</b>
Forraje <i>ad libitum</i>	Concentrado	Forraje limitado	Concentrado
	Forraje <i>ad libitum</i>	Forraje <i>ad libitum</i>	Forraje limitado
			Forraje <i>ad libitum</i>

### **3.2.5 Validación del módulo**

A la hora de validar un modelo de predicción de la IV en ovino lechero es interesante evaluar el funcionamiento del mismo bajo un rango de condiciones fisiológicas y tipos de alimento diferente. Por lo tanto es necesario contar con datos relativos a las características de los animales (peso, día de lactación, producción lechera, CC) y de los alimentos ofertados (CCel, PCD, k, etc.). Esto hace que sea difícil utilizar en la validación muchos de los datos de IV que se encuentran en la bibliografía ya que no siempre están acompañados de este tipo de información, en particular, la relativa a la cinética de degradación del alimento.

Para la validación de este módulo se han tomado por una parte, datos de IV de un único forraje *ad libitum* reportados por Nsahlai y Apaloo (2007), y por otra parte datos de IV de silo de hierba correspondientes a una dieta compuesta por concentrado, heno de alfalfa y silo *ad libitum* consumidos por diferentes lotes de ovejas de raza Latxa que participaron en ensayos del departamento de Producción Animal de Neiker-Tecnalia.

Por último, se realiza una comparación de las estimas de IV calculadas por el modelo para una oveja tipo consumiendo heno de alfalfa frente a las estimas que ofrecen los modelos habitualmente empleados para ovino lechero, como son el modelo de INRA (Jarrige y Agabriel, 1988) y el SRNS (Cannas et al., 2004).

#### **3.2.5.1 Datos bibliográficos de IV**

Se han tomado los datos recopilados por Nsahlai y Apaloo (2007) para la validación de un modelo similar. En total se cuenta con el dato medio de IV de 24 forrajes diferentes ofrecidos *ad libitum* a animales mantenidos en estabulación. Las experiencias se realizaron con moruecos con un PV medio de 25,6 kg, excepto en dos casos donde no se especifica el sexo y el PV es de 16,2 kg.

Con los parámetros especificados de calidad del forraje, el peso y el estado de los animales (estabulados y secos), se valida el módulo para una dieta tipo 1 (Tabla 3). Los datos de estas experiencias se denominan con la letra "B".

### 3.2.5.2 Datos de IV de experiencias realizadas en Neiker

Los datos corresponden a dos experiencias de control de la ingestión realizadas en años diferentes que en total permiten validar información de IV de cuatro lotes de ovejas de raza Latxa en distinto estado fisiológico.

En la **primera experiencia** se controlaron durante 16 días, dentro del pico de producción, tres lotes de 12 ovejas (192 datos) con diferente potencial de producción lechera: alta (lote L11), media (lote L12) o baja (lote L13). El peso medio de los lotes fue de 68, 60 y 60 kg para los lotes L11, L12 y L13 respectivamente. La producción lechera media en el pico de lactación fue de 2,14, 1,64 y 1,43 l/día y el día de lactación al comienzo de la experiencia fue el 24, 22 y 30 para los lotes L11, L12 y L13, respectivamente.

La oferta de concentrado fue la misma para los tres lotes (700 g MS/día), mientras que la alfalfa se ofreció ajustada al nivel productivo de los animales (650 g MS/día, 500 g MS/día y 450 g MS/día para los lotes L11, L12 y L13 respectivamente). El silo de hierba se ofreció *ad libitum*, y posteriormente se pesaron tanto las ofertas como los rechazos por lote para obtener la IV del mismo. Este dato permite validar el modelo para dietas de tipo 4 (Tabla 3) y para tres tipos de oveja de acuerdo con los datos de la experiencia.

Los parámetros de los alimentos necesarios para ejecutar el modelo (Tabla 4) se han tomado de alimentos analizados mediante la TPG que presentan características similares a los de la experiencia (Tabla 40 del Anexo I).

En la **segunda experiencia** utilizada para la validación se controló durante 32 días un lote de 24 ovejas (768 datos) de 56 kg de PV medio, a mitad de lactación (lote L2).

La oferta de concentrado fue de 700 g MS/día mientras que la de alfalfa fue de 460 g MS/día. El silo de hierba se ofreció *ad libitum* y de la misma manera que en la experiencia anterior, se pesaron ofertas y rechazos para obtener el dato de IV de silo. Con estos datos se valida una dieta de tipo 4 (Tabla 3) para una oveja con una producción lechera en el pico de 1,4 l/día en el día 80 de lactación.

En este caso se dispuso de una muestra de cada alimento utilizado durante la experiencia, los cuales se analizaron mediante la TPG para la obtención de los parámetros de entrada del modelo (Tabla 4).

Tabla 4.- Descripción de los alimentos ofertados a los lotes de las experiencias utilizadas para la validación. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; C Cel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas)

Lotes	Alimento	% PB	%FND	CCel	PCD	k
L11, L12, L13	Alfalfa	18,5	52,0	0,55	0,11	0,06
	Concentrado	18,6	32,0	0,68	0,13	0,08
	Silo de Hierba	11,0	64,0	0,46	0,18	0,04
L2	Alfalfa	19,2	40,4	0,60	0,12	0,07
	Concentrado	20,8	22,4	0,78	0,13	0,08
	Silo de Hierba	6,4	63,3	0,37	0,14	0,03

### 3.2.5.3 Comparación con modelos validados

Con el objetivo de comparar el funcionamiento del módulo de rumen con los modelos de INRA y SRNS se ha diseñado una dieta de tipo 1 (Tabla 3) basada en alfalfa de una calidad como la del lote L2 de la Tabla 4, y se ha simulado con cada modelo, la ingestión de 30 ovejas diferentes correspondientes al rango de combinaciones de PV y estado fisiológico que se describe a continuación:

- PV: 60 y 80 kg.
- Estado fisiológico: seca, gestante (en el último mes de gestación) y lactante (con 1, 2 ó 3 litros de leche en el pico de lactación)

Las salidas, tanto de IV como de EM y PM, estimadas por el módulo de rumen se han comparado con las estimadas por INRA y por SRNS.

### 3.2.6 Resultados y Discusión

En la Figura 6 se representa la ingestión real y predicha de los 24 forrajes tomados de la bibliografía (B) con los que se ha realizado la validación de la IV de una dieta tipo 1 (Tabla 3). Las predicciones presentan un porcentaje medio de subestimación de -17,5% (Tabla 5) y el coeficiente de determinación presenta un valor de 0,54. Tomando como referencia el valor absoluto de 10% que tiene en cuenta Casasús et al. (2004) para diferenciar entre predicción precisa o predicción tolerable, ésta se consideraría una predicción tolerable, aunque no precisa.

En la Figura 7 se muestran los valores medios de IV real y predicha de silo de hierba para las experiencias en lactación (L2, L13, L12, L11) con dietas tipo 4 (Tabla 3). La relación entre la ingestión real y la predicha presenta un coeficiente de determinación de

0,99, lo cual indica que el modelo es adecuado para estas condiciones. El porcentaje de diferencia en las experiencias L11, L12, L13 (Tabla 5) confirma que el modelo presenta un buen grado de precisión con ovejas que están en el pico de lactación. En la experiencia L2 (con ovejas en el día 80 de lactación) la IV se sobreestima en un 11,9%, lo cual indica que si bien el modelo no es tan preciso como en las experiencias L1, presenta un resultado tolerable.

Tabla 5. Resumen de resultados de IV real y predicha.

Lote	IV Forraje Real(kg MS/día)	IV Forraje Estimada(kg MS/día)	%Diferencia
<b>B*</b>	0,63	0,52	-17,5%
<b>L11</b>	1,13	1,12	-0,9%
<b>L12</b>	0,87	0,95	9,2%
<b>L13</b>	0,85	0,91	7,1%
<b>L2</b>	0,67	0,75	11,9%

\*media de 24 forrajes

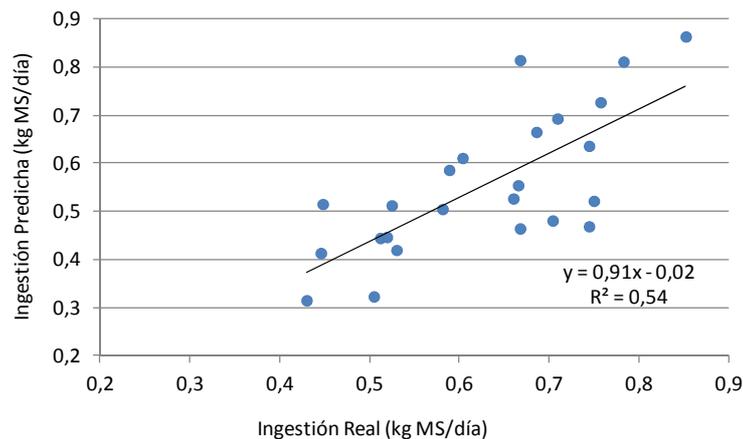


Figura 6. IV real y predicha por el modelo para 24 forrajes tropicales de la bibliografía (B).

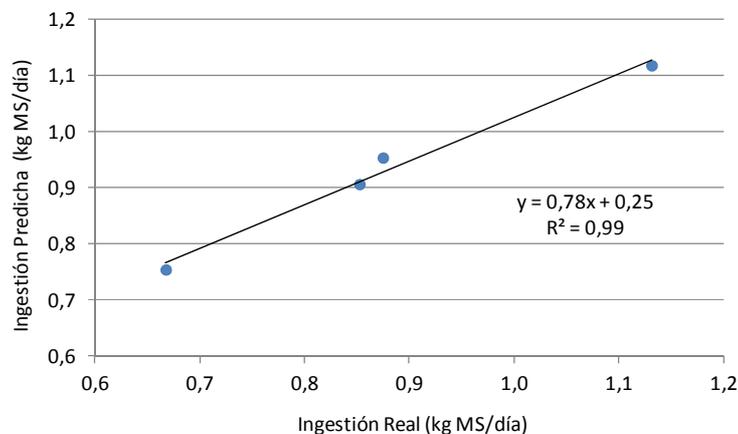


Figura 7. IV de silo de hierba real y predicha por el modelo para las experiencias L2, L13, L12 y L11 (de izquierda a derecha en la gráfica).

En la Figura 8 se muestran los resultados de ingestión predicha por el módulo desarrollado, por INRA y por SRNS para una dieta basada en alfalfa con ovejas de distinto peso y estado fisiológico. Puede observarse que las estimas del módulo de rumen se sitúan más cerca de las de INRA que de las de SRNS, con una ligera subestimación con respecto de INRA en algunos casos y una subestimación mayor con respecto a SRNS en la mayoría de los casos, concretamente se observa que para ovejas secas y lactantes con baja producción el modelo predice una IV más baja que los modelos con los que se ha comparado.

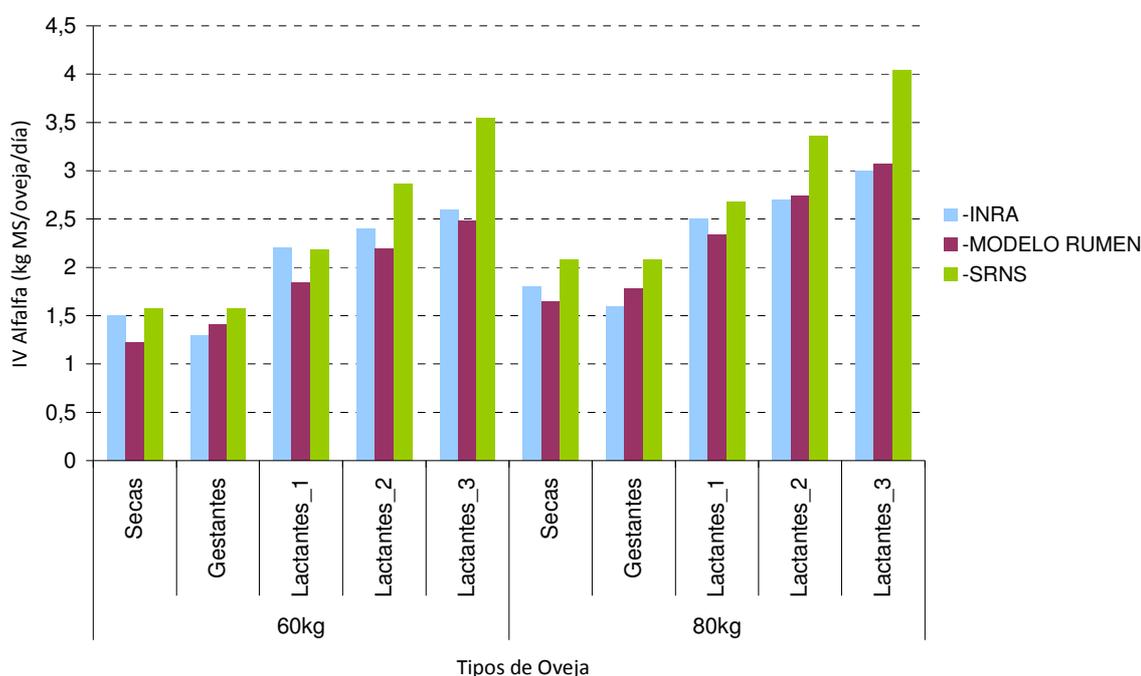


Figura 8.- IV de alfalfa con ovejas de 60 y 80 kg, secas, gestantes o lactantes con tres niveles de producción potencial estimadas por INRA, por SRNS y por el módulo de rumen

En las Tablas 6 y 7 se muestran los valores de EM y PM calculados con INRA y con el módulo de rumen para la dieta propuesta, y los valores que tanto INRA (Jarrige y Agabriel, 1988) como el AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) (sistema de reparto de la energía y la proteína que tiene en cuenta el módulo de rumen para calcular las necesidades potenciales) estiman necesarios para los estados fisiológicos propuestos. Se observa que en ambos modelos la ingestión de EM y PM de las ovejas *Secas* y *Lactantes\_1* está por encima de las necesidades, mientras que las *Lactantes\_2* y *Lactantes\_3* no llegan a cubrir las necesidades de producción con la dieta simulada ya que o bien la PM, o la EM, o

ambas, están por debajo de las necesidades establecidas por los sistemas de racionamiento. En cuanto a los ratios ingestión/necesidades, los valores más altos son los relativos a la PM, que en el caso de las ovejas *Secas* con el modelo INRA presenta un valor máximo de 2,2. En general el modelo de rumen muestra unos ratios similares a los de INRA.

Los resultados de la validación indican que el módulo de rumen predice la IV de forma más o menos precisa en función de las condiciones de la validación (tipo de animal y tipo de alimento).

Tabla 6.- Estimación de EM (MJ/día) ingerida, Necesidades de EM y Ratio EM ingerida/Necesidades de EM obtenidos con el modelo INRA y con el módulo de rumen

	INRA			Módulo de Rumen		
	Ingestión	Necesidades INRA (1988)	Ratio	Ingestión	Necesidades AFRC (1993)	Ratio
<b>Secas</b>	12	9	1,4	10	6	1,6
<b>Gestantes</b>	10	14	0,7	12	12	1,0
<b>Lactantes_1</b>	18	16	1,1	16	14	1,1
<b>Lactantes_2</b>	19	23	0,8	19	21	0,9
<b>Lactantes_3</b>	21	31	0,7	21	28	0,8

Tabla 7.- Estimación de PM (g/día) ingerida, Necesidades de PM y Ratio PM ingerida/Necesidades de PM obtenidos con el modelo INRA y con el módulo de rumen

	INRA			Módulo de Rumen		
	Ingestión	Necesidades INRA (1988)	Ratio	Ingestión	Necesidades AFRC (1993)	Ratio
<b>Secas</b>	143	64	2,2	138	68	2,0
<b>Gestantes</b>	117	98	1,2	160	95	1,7
<b>Lactantes_1</b>	209	149	1,4	210	149	1,4
<b>Lactantes_2</b>	233	233	1,0	251	229	1,1
<b>Lactantes_3</b>	257	318	0,8	286	308	0,9

El mayor porcentaje de infraestimación fue de -17,5% para los datos de ingestión tomados de la bibliografía. Esta subestimación puede deberse a dos condiciones particulares que presentan estos datos. En primer lugar los animales con los que se realizaron los controles de ingestión fueron machos castrados de tamaño pequeño, muy diferentes a las hembras secas, lactantes o gestantes para las que se pretende validar el modelo, y de un tamaño considerablemente superior. Por tanto, esta diferencia podría

deberse a la mayor IV que presentan los machos frente a hembras, que según los valores calculados por Lewis y Emmans (2010) para las razas Suffolk y Scottish Blackface, está entre un 20% y un 15,5%, respectivamente.

En segundo lugar los forrajes tropicales utilizados presentan una calidad inferior a la del tipo de forrajes para los que fue diseñado el modelo original (Herrero, 1997) en el que se basa el actual módulo. Precisamente son las características de los forrajes y del animal, las que diferencian las condiciones bajo las que se desarrollan los modelos, y por las cuales es difícil generalizar su uso fuera del alcance para el que fueron diseñados (Casasús et al., 2004). Esto indicaría que el módulo de rumen presentaría ciertas limitaciones para el uso con dietas basadas exclusivamente en forrajes de muy baja calidad.

El módulo desarrollado ha sido modificado a partir del modelo original para poder incluir 3 tipos de alimentos de manera que pueda simular la dieta de una oveja en lactación. Los resultados de ingestión de silo en este tipo de dietas con ovejas lactantes de diferente nivel productivo indican que el modelo predice de manera aceptable la IV bajo las condiciones para las que ha sido diseñado, si bien se observa una sobreestimación del 11,9% con las ovejas de menor nivel productivo en la experiencia L2. Es posible que esta desviación esté relacionada con las condiciones de estabulación bajo las que se encontraron las ovejas de esta experiencia, las cuales permanecieron separadas individualmente durante un mes en una zona dotada de emparrillado (separadas del rebaño habitual que se aloja sobre cama caliente). El estrés que esto pudo provocar podría haber disminuido la capacidad de ingestión de las ovejas (Caja et al., 2002).

Para los restantes lotes en lactación considerados en la validación, la IV se estima con un buen grado de precisión, encontrándose diferencias en porcentaje que no superan el 10%. Este resultado es muy satisfactorio dado que el objetivo del modelo es la simulación de ovejas lecheras.

Cuando se comparan las estimas de IV de alfalfa de el módulo de rumen con las de INRA y SRNS, se observa que en general los valores de las estimas del módulo de rumen y los de INRA se distancian de los valores estimados por SRNS. Sin embargo, esto no es así en todos los estados fisiológicos tenidos en cuenta.

Las mayores diferencias encontradas entre las estimas del módulo de rumen y las de los modelos comparados se dan cuando se simulan ovejas secas. Esta diferencia se da sobre todo con las ovejas de 60 kg para las cuales el módulo de rumen predice una IV de alfalfa un 22,2% menor que SRNS y un 18,5% menor que INRA. También se observa una subestimación con respecto a dichos modelos en las ovejas lactantes de baja producción (1 l). A medida que aumenta tanto la producción como el tamaño de la oveja, las estimas del módulo de rumen y las de INRA toman valores más cercanos. Por ejemplo, para las ovejas lactantes de 80 kg la IV que predice el módulo de rumen es entre un 1,4% y un 2,2% mayor que la que predice el sistema INRA, lo cual supone una diferencia prácticamente despreciable, mientras que con ovejas de 60 kg las estimas están entre un 8,7% y un 4,3% por debajo de las de INRA. Al comparar las estimas de los tres modelos con ovejas lactantes se observa que la IV estimada por el sistema SRNS responde al aumento del nivel de producción en mayor medida que la de INRA o la del módulo de rumen, de manera que en los niveles medio-alto de producción los valores de SRNS son hasta un 30% superiores con respecto a los otros dos modelos, llegando a suponer una cantidad de más de 1 kg de forraje.

Con respecto a las ovejas gestantes, el módulo de rumen predice una IV de alfalfa intermedia entre las estimas de INRA y SRNS.

En general, tomando en cuenta el total de las cantidades estimadas para todos los tipos de oveja simulados, se observa que el modelo SRNS es el que predice una mayor IV, seguido de INRA y del módulo de rumen.

En cuanto a los valores de EM y PM, la dieta ofertada presenta valores de PM por encima de las necesidades en casi todos los estados fisiológicos y lo mismo ocurre con la EM en ovejas secas y lactantes de 1 litro. Cabe destacar que esta no es una característica única del modelo de rumen, ya que INRA presenta resultados similares cuando se simula una dieta basada en alfalfa.

En este sentido Robinson (2002) indica que se deberían aumentar un 20% las necesidades de PM del sistema AFRC y además revisar el valor de las tasas de degradación efectiva de la proteína del rumen, las cuales podrían estar sobreestimadas. Esta corrección reduciría el ratio entre aportes y necesidades de la PM.

### **3.2.7 Conclusiones parciales**

- Se ha diseñado un modelo de rumen mecanicista y dinámico para simular la ingestión en ovino lechero.
- La validación de este módulo de rumen con ovejas en lactación que son alimentadas con una dieta mixta de concentrado, alfalfa y silo presenta un coeficiente de determinación de 0,99, lo cual indica que el modelo es adecuado para simular la IV con este tipo de dietas y estado fisiológico.
- La comparación del módulo de rumen con dos modelos validados adaptados a ovino lechero (SRNS e INRA) permite afirmar que, pese a las diferencias observadas entre modelos, los resultados de la validación son satisfactorios debido a la cercanía de las estimas del modelo a las de un modelo ya validado (INRA).
- El módulo de rumen diseñado tiende a subestimar la IV de forrajes de baja calidad con animales secos y en estabulación.
- El modulo de ingestión por tanto, es comparable a los modelos de referencia, pero es más flexible puesto que su base es mecanicista y por tanto debería predecir mejor la ingestión de dietas complejas.
- La comparación de las estimas de EM y PM que se calculan en el módulo de rumen cuando se aporta una dieta basada en alfalfa de buena calidad presentan valores similares a los estimados por INRA.

### **3.3 MÓDULO DE SIMULACIÓN DE LA PARTICIÓN DE NUTRIENTES**

#### **3.3.1 Introducción**

A partir de las salidas del módulo de rumen (EM y PM que aporta la ingestión de forraje y concentrado) se debe simular el reparto de nutrientes y su utilización para cubrir las necesidades de mantenimiento y productivas, así como las consecuencias que el balance entre aportes y necesidades tienen sobre la condición corporal y el peso de los animales. Esta tarea no es sencilla, ya que como señalan (Friggens y Newbold, 2007), la correcta predicción de la partición de nutrientes es un viejo problema de la nutrición animal que aún no ha sido solucionado de manera completamente satisfactoria.

La mayoría de los modelos calculan los requerimientos de energía y proteína neta (EN, PN) para mantenimiento, producción de lana, crecimiento, gestación, lactación y variación de reservas; y las transforman en necesidades de EM o PM multiplicándolas por las eficiencias de utilización de cada una de las funciones fisiológicas (Fox et al., 1992). En función del modelo la fórmula para el cálculo de la EN y PN, así como los coeficientes de utilización de la energía pueden variar (Bernués et al., 1995).

El cálculo de las necesidades de mantenimiento se realiza en la mayoría de los modelos a partir de las necesidades para el metabolismo basal, que dependen del PV o metabólico del animal más el gasto por actividad (en el caso de la proteína se calculan las necesidades en nitrógeno endógeno basal que dependen del peso metabólico y de las pérdidas dérmicas). De manera más completa algunos modelos incluyen el gasto debido al stress por frío y el debido a las pérdidas urinarias. A pesar de la variabilidad genética existente entre razas ovinas, ninguno de los sistemas existentes ajusta los requerimientos a la raza (Cannas et al., 2004).

Las necesidades nutricionales para el crecimiento del vellón son tratadas explícitamente por algunos autores, mientras que otros las ignoran por considerarlas irrelevantes, quedando incluidas en las necesidades de mantenimiento (Bernués et al., 1995).

Las necesidades energéticas y proteicas para la gestación se incrementan exponencialmente en función del día de gestación y son función del tamaño de la camada.

Las necesidades para la lactación se calculan en la mayoría de los modelos a partir de la producción potencial, la cual depende del tiempo transcurrido desde el parto y del potencial genético de la oveja. En función del balance energético y proteico en el que se encuentre la oveja y de la movilización de reservas la producción real calculada será igual o menor que la producción potencial.

En cuanto a las necesidades para el crecimiento y cambio de peso básicamente pueden diferenciarse dos formas de calcularla, dependiendo de si contemplan o no por separado los diferentes componentes de la ganancia: la grasa y la proteína. Otro aspecto fundamental en los modelos son las limitaciones a la ganancia o pérdida de peso, las cuales están incluidas en la mayoría de ellos. Como resultado de las diferencias entre modelos en el cálculo de las necesidades, de las ganancias y en los límites impuestos, para un mismo tipo de oveja, se encuentran predicciones de ganancia de peso considerablemente distintos entre modelos (Wallach et al., 1986).

Por último, algunos modelos, además de predecir la variación en peso, relacionan el estado de engrasamiento del animal con la nota de CC propuesta por Russel et al. (1969).

### **3.3.2 Modelos actuales adaptados a ovino**

Entre los modelos adaptados a ovino lechero, el modelo SRNS (Cannas et al., 2004) y el de INRA (Jarrige y Agabriel, 1988), se pueden observar algunas diferencias y similitudes.

Ambos tienen en cuenta la energía y la proteína a la hora de elaborar las recomendaciones nutricionales para las diferentes funciones fisiológicas, si bien las unidades utilizadas son diferentes. El modelo de Cannas utiliza EM (MJ) y PM(g), ya que es un modelo basado en el sistema de valoración proteica y energética desarrollado por la Universidad de Cornell. Por su parte, el modelo de INRA utiliza unidades forrajeras para la energía (UFL, para el caso de ovino de leche) y proteína digestible intestinal (PDI) para la proteína, que son unidades equivalentes, directa (PDI expresada en g de proteína) o

indirectamente (UFL como ratios entre MJ) a las de SRNS pero proceden de sistemas distintos de valoración de los alimentos.

Ambos modelos se basan en el mismo sistema de reparto de la energía, aunque en cuanto a las eficiencias de utilización de la EM, SRNS utiliza valores fijos para km y kl, mientras que el sistema de INRA calcula la eficiencia en función de la metabolicidad de la dieta. También se encuentran diferencias en la eficiencia para la variación de peso, ya que SRNS utiliza un valor fijo tanto para la ganancia como para la pérdida e INRA utiliza un valor distinto para cada caso (Chilliard et al., 1987).

Por último, a la hora de predecir la CC, el modelo SRNS desarrolla una ecuación a partir de 10 publicaciones que relacionan el PV adulto y la CC en 12 razas diferentes. Para relacionar ambas variables se utiliza el valor de PV adulto de referencia que corresponde al peso con una nota de CC igual a 2,5. En cuanto a INRA, Chilliard et al. (1987) relaciona la valoración subjetiva de CC con diferentes parámetros de cantidad y composición de las variaciones de peso y reservas corporales.

### **3.3.3 Origen del módulo**

Este módulo de simulación de la partición de nutrientes es una adaptación para ovino de leche del modelo de simulación del crecimiento, producción y engorde desarrollado para bovino por Silveira (2000), el cual está basado en los modelos de (ARC, 1980), AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) y CSIRO (1990). Para adaptar el modelo a ovino lechero se han substituido las ecuaciones del AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) por las correspondientes a ovino, y la CC se calcula a partir de la variación diaria en PV según la relación observada en la raza Latxa.

### **3.3.4 Descripción del funcionamiento del módulo**

Las variables de entrada en el modelo son las siguientes:

- Energía metabolizable (EM) (MJ/día)
- Proteína metabolizable (PM) (gramos/día)
- PV y PV de referencia (PV adulto)
- CC y CC de referencia (2,5)

- Estado fisiológico (día de lactación, producción potencial en el pico de lactación, día de gestación y número de corderos)
- Actividad (estabulada o pastoreo)

Considerando las variables de entrada y las ecuaciones descritas por el AFRC (Alderman y Cottrill, 1993), se calculan las necesidades de energía y proteína para:

- Mantenimiento: en función del estado fisiológico en el que se encuentra (seca, lactante o gestante) y del nivel de actividad de la oveja (estabulada o pastoreo).
- Gestación: en función del día de gestación y el número de corderos.
- Producción de leche potencial: en función de la curva de lactación teórica.
- Crecimiento: para lo cual se considera el depósito de masa muscular máximo que puede tener lugar en función de su PV de referencia.

Tal y como describe (Silveira, 2000), como resultado del equilibrio entre aportes y necesidades de energía y proteína se distinguen 6 balances nutricionales posibles (Tabla 8).

Tabla 8.- Balances contemplados en el módulo de simulación de la movilización de reservas y la producción lechera

Balace	1				2		3		4	5	6	
Relación Aportes/ Necesidades	Déficit de E y P				Déficit de P		Déficit de E		Necesidades cubiertas (±5%)	Exceso de E y P	Exceso de E y P	
Energía	-				+		-		=	+ exceso	+ limitante	
Proteína	-				-		+		=	+ limitante	+ exceso	
Movilización de masa muscular	Si				Si		No		No	No	No	
Movilización de Grasa	No	Si	No	Si	No		Si	No	No	No	Si	
Grasa	=↑	↓	=	↓	↑		↓	0	0	=↑	↓ Max↓	
Masa Muscular	↓		Max↓		↓	Max↓		0	↑	Max↑	Max↑	Max↑
Leche Real/ Potencial	=		<		=	<		<	=	=		

(=↑): mantenimiento o incremento del compartimento; (↓): Reducción del compartimento; (Max↓): Movilización máxima del compartimento; (=): Producción real= Producción potencial; (<): Producción real < Producción potencial

Las salidas que proporciona este módulo son las siguientes:

- Producción diaria de leche (litros)
- Variación diaria de PV (kg)
- Nota de Condición Corporal

### 3.3.4.1 Limitación de la ganancia o pérdida de grasa y masa muscular

#### Limitaciones diarias

El modelo simula dos compartimentos que pueden movilizar o depositar: la masa muscular movilizable (MM) que se compone de músculo y de una pequeña porción de grasa, y la grasa corporal total (GCT) que está directamente relacionada con los depósitos subcutáneos y abdominales, y que dan lugar a la nota de CC del animal.

La parametrización de las tasas de depósito y movilización para cada uno de los citados compartimentos (MM y GCT) es compleja, y la literatura disponible al respecto es muy limitada. Jeanplong (2003) en un estudio de subnutrición prolongada obtenía datos de peso del músculo mediante sacrificios seriados y a partir de esos datos podía estimar una tasa diaria de movilización de la MM de hasta un 0,1% de su PV, mientras que la tasa diaria de depósito podía llegar a un 0,3% del PV de referencia. En nuestro caso se ha optado por tomar un valor intermedio de 0,2 % del PV para establecer tanto la máxima ganancia de MM como la máxima pérdida de MM (MMmovil).

En cuanto a la movilización de grasa, en la raza Latxa se ha observado que, en condiciones de subnutrición, una oveja puede variar un máximo de 0,25 puntos de CC al mes y que un punto de cambio supone un 14,9% de PV (Oregui, 1992). Tomando estos datos como referencia, la máxima ganancia o pérdida de grasa corporal (GCmovil) que puede sufrir una oveja al día, sería el 0,124% de su PV de referencia.

#### Limitaciones a largo plazo

Además de limitar la ganancia o pérdida diaria de grasa y músculo mediante unos valores máximos o mínimos, es interesante introducir una regulación a largo plazo de los depósitos de GCT y MM, ya que cuando tiene lugar una situación prolongada de exceso o carencia de energía y/o proteína el modelo podría llegar a una situación de deposición excesiva de grasa o de pérdida total de la masa muscular. Además, en una situación de exceso de energía, la consecuencia sería el aumento constante del PV del animal, el cual incide directamente en el cálculo de la IV, que en lugar de disminuir aumentaría, favoreciendo así el engrasamiento ilimitado del animal.

A la hora de limitar la ganancia o pérdida a largo plazo, en función del estado de la oveja, se establecen unos valores máximo y mínimo de MM y de GCT que sirven como

referencias. La regulación consiste en limitar la ganancia cuando el estado del animal se acerca al extremo superior y limitar la pérdida cuando se acerca al extremo inferior. La forma de hacerlo es reduciendo los valores de  $MM_{movil}$  o  $GC_{movil}$  previamente calculados.

Encontrar referencias que permitan establecer los límites de movilización de la MM no es sencillo. (Botts et al., 1979) encontró movilizaciones de hasta el 25-30% de la proteína materna en vacas en lactación. Considerando que el músculo esquelético contiene un 45% de la proteína (Young, 1970), se podría asumir una movilización de aproximadamente el 50% de masa muscular. En nuestro caso, se asume que una oveja puede movilizar hasta el 45% de su masa muscular. Teniendo en cuenta que un 55% del PV de un animal es canal y que de esa canal un 60% es músculo (Kempster et al., 1986) asumimos que el porcentaje de PV que podría movilizar un animal como músculo es igual a 14,85%. Tomando ese porcentaje del PV como la MM máxima que puede presentar una oveja ( $MM_{máxima}$ ), en el modelo se ha incluido una limitación a la deposición de músculo cuando la MM se acerca a ese valor. Para ello, al inicializar la simulación se asigna un valor a la  $MM_{real}$  de cada oveja que se establece por defecto como la mitad de la  $MM_{máxima}$  (un 7,42% de su PV). Partiendo de ese valor se considera que el animal simulado gana o pierde MM en función del balance en el que se encuentre. Si pierde MM hasta que ésta toma el valor de 0, entonces ha llegado al valor de  $MM_{mínima}$ .

Para regular la ganancia de músculo se crea la variable %MM [1]:

$$\%MM = 1 - \frac{MM}{MM_{máxima}} \quad [1]$$

Esta variable (%MM) modifica los valores  $MM_{movil}$  en función del estado del animal. Los valores previamente calculados se multiplican en el caso de ganancia por la variable %MM, y en el caso de pérdida por  $(1-\%MM)$ . Si la deposición de músculo llega al máximo y MM es igual a  $MM_{máxima}$ , %MM toma el valor de 0, limitando de esta manera que siga depositando MM. En el caso contrario, si ha habido una movilización total de la MM y  $MM_{real}$  es igual a 0, el valor de %MM es igual a 1, limitando así la pérdida de MM.

Con respecto a la grasa, ya que no existe para la raza Latxa una fórmula que relacione la GCT con la CC, se ha tomado la ecuación [2], propuesta para la oveja Churra por Frutos et al. (1995) , que relaciona GCT(g) con la nota de CC.

$$GCT = 1811 + 17964 \cdot \log CC \quad [2]$$

Se establecen dos valores máximo y mínimo que puede alcanzar la variable. El valor máximo corresponde a la GCT de una CC igual a 5 (GCT5), y el valor mínimo a una CC igual a 1 (GCT1). Para regular la ganancia o pérdida de grasa se crea la variable [3].

$$\%GCT = \frac{GCT5 - GCT}{GCT5 - GCT1} \quad [3]$$

Tal y como se hace con la MM, %GCT modifica los valores de GCTmovil previamente calculados. La variable %GCT multiplica el valor GCTmovil en caso de ganancia y (1-%GCT) en caso de pérdida de grasa. Cuando el valor de GCT es igual al máximo (GCT5), la variable %GCT toma el valor de 0 y no es posible ganar más grasa, por el contrario, cuando GCT es igual a GCT1, no es posible perder más grasa.

La inclusión en los modelos de limitaciones a las ganancias es un recurso muy utilizado y necesario ya que se ha comprobado que tanto el módulo de rumen validado en el apartado 3.2 del presente capítulo como modelos ya validados (INRA, SRNS) pueden estimar aportes de EM y PM que llegan a doblar las necesidades de las ovejas secas si se ofrece un alimento con una buena digestibilidad. Por esta razón, lejos de ignorar estos excesos, consideramos que es importante contabilizarlos para conocer el grado de sobrealimentación que puede ocurrir bajo determinados manejos alimenticios. Para ello se han creado dos variables, EMexceso y PMexceso que contabilizan los MJ de EM y g de PM aportados por encima del total de necesidades correspondientes a las funciones fisiológicas. Posteriormente, cuando se realiza la optimización de las estrategias de alimentación, estas variables se incluyen en los criterios de optimización (apartado 4.3.3.2 del capítulo 4), con el objetivo de minimizar su valor. Para ello estos valores se transforman en cifras económicas (apartado 4.3.3.2 [10] y [11]).

Al final de cada iteración diaria, después de calcular la energía y proteína que puede ser transformada en músculo y grasa según los balances de la Tabla 8 y los límites del modelo, se calcula la variación de MM (VMM) y la variación de grasa (VG) las cuales se utilizan para actualizar las variables MM [4], GCT [5], CC [6] y PV [7].

$$MM = MM + VMM \quad [4]$$

$$GCT = GCT + VG \quad [5]$$

$$CC = CC + \frac{VMM + VG}{PV * 0,149} \quad [6]$$

$$PV = PV + VMM + VG \quad [7]$$

Si la CC calculada es menor de 1,1 se simula la muerte de la oveja por subnutrición. Esto correspondería a un 6% de grasa corporal, un valor superior, aunque cercano a lo establecido por Blackburn y Cartwright (1987), que consideran que hasta un 3% de grasa corporal las ovejas pueden adelgazar sin que incremente el riesgo de muerte.

### 3.3.5 Validación del módulo

#### 3.3.5.1 Comparación con datos experimentales

Para la validación del modulo se han tomado datos de control de PV, CC y producción lechera de los 4 lotes de animales que se describen en el apartado 3.2.5.2 del presente capítulo.

Tabla 9.- Variables de entrada de los 4 lotes de animales utilizados en la validación del módulo de simulación de la partición de nutrientes

Lote	Peso Inicial (kg)	CC	Día de lactación	Producción en el pico lactación(l)	EM ingerida (MJ/d)	PM ingerida (g/d)
L11	68,6	2,6	24	2,14	17,4	204,3
L12	60,4	2,8	22	1,64	15,3	182,2
L13	60,1	2,8	30	1,43	14,5	174,1
L2	55,7	2,0	80	1,40	13,8	163,1

Los lotes L11, L12 y L13 se controlaron durante un periodo de 21 días y el lote L2 durante 43 días, durante este periodo se midió la CC y el peso 3 veces a los lotes L11, L12 y L13, y 7 veces al lote L2. La producción lechera se controló 9 veces a los tres primeros lotes y 21 al lote L2. En el modelo se introducen como variables de entrada los valores medios de las ovejas de cada lote (CC, peso, día y producción lechera en torno al pico de lactación), y los valores de EM y PM que predice el módulo de rumen para estas ovejas (Tabla 9). Los datos observados (valor medio de todas las ovejas de cada lote) se comparan con las estimas.

### 3.3.5.2 Evaluación del comportamiento del modelo a medio plazo

Para evaluar como se comporta el módulo con distintos tipos de oveja teóricos, se ha simulado la evolución del PV, la CC y la producción lechera de 5 tipos de oveja que comienzan con 60 kg y un valor de CC de 2,5, cuyos estados fisiológicos son *seca*, *gestante* (en el día 120) y *lactante* y cuya producción potencial en el pico es de 1, 2 y 3 litros. La simulación tiene una duración de 30 días y como variables de entrada se introducen la EM y PM estimadas con el módulo de rumen (apartado 3.2.5.3) a partir de una alimentación basada en alfalfa de buena calidad (Tabla 10).

Tabla 10.- Variables de entrada para los 5 lotes de animales utilizados en la evaluación del comportamiento a largo plazo del módulo simulación de la partición de nutrientes

Tipos de Oveja	Peso Inicial(kg)	CC	Día Lactación/ Gestación	pico lactación(l)	EM ingerida (MJ/d)	PM ingerida (g/d)
Lactantes (1l)	60	2,5	10	1	15,8	210
Lactantes (2l)	60	2,5	10	2	18,8	251
Lactantes (3l)	60	2,5	10	3	21,4	286
Gestantes	60	2,5	120	-	12,1	160
Secas	60	2,5	-	-	10,4	138

### 3.3.6 Resultados y Discusión

En las Figuras 9-11 se muestran los datos observados y simulados para las variables PV, CC y producción lechera respectivamente. En el caso del PV se han encontrado errores de predicción de entre 0% y 7%; para la CC el rango es más amplio con errores de entre -5% y 12% y en el caso de la leche los errores más extremos en las estimas fueron de -18% y 14%. El coeficiente de determinación de las tres validaciones

toma valores altos, de entre 0,84 y 0,98, lo que permite afirmar que el modelo predice los tres parámetros de forma aceptable y con una pauta de evolución parecida. Con esta validación no sólo se comprueba que el módulo puede ser utilizado para predecir peso, CC y producción lechera sino también que el módulo de rumen, del cual provienen los inputs para el módulo de reservas, aporta valores de EM y PM que permiten alcanzar estos valores y por lo tanto ambos módulos son compatibles a la hora de simular ovejas en lactación.

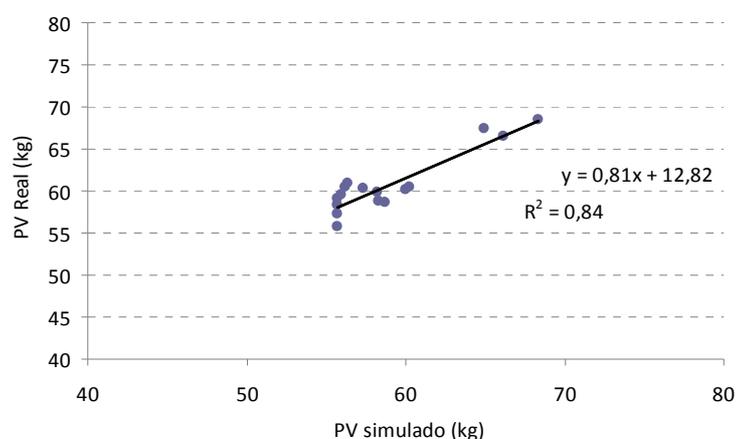


Figura 9.- Peso real y peso simulado por el modelo

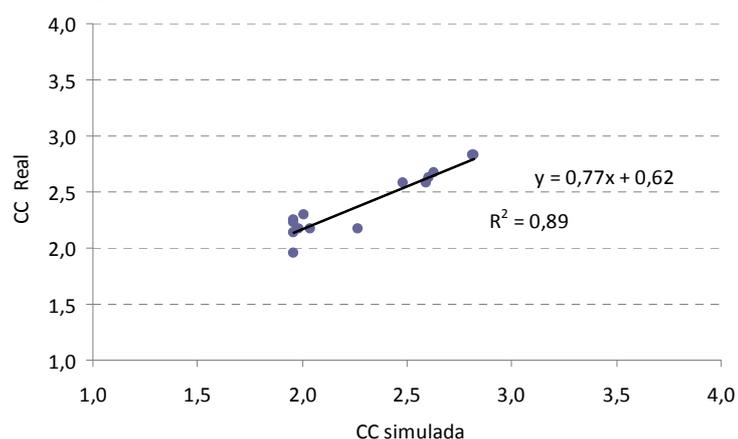


Figura 10.- CC real y CC simulada por el modelo

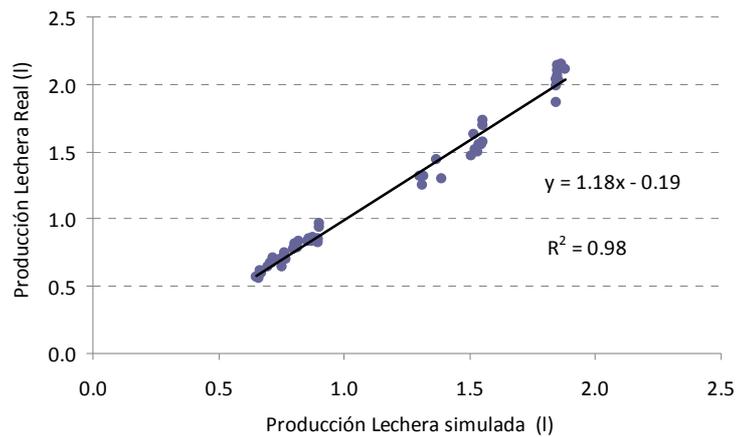


Figura 11.- Producción lechera real y producción simulada por el modelo

En las Figuras 12-14 se muestran los litros de leche simulada y potencial en el pico de lactación y la evolución de la CC y el peso de 5 tipos de oveja alimentados con una dieta de alfalfa *ad libitum*. Se observa que las únicas ovejas que llegan a producir el potencial son las *Lactantes\_1*, mientras que las de mayor potencial productivo, no alcanzan el máximo posible, y su producción sólo llega a cubrir un 82% del potencial.

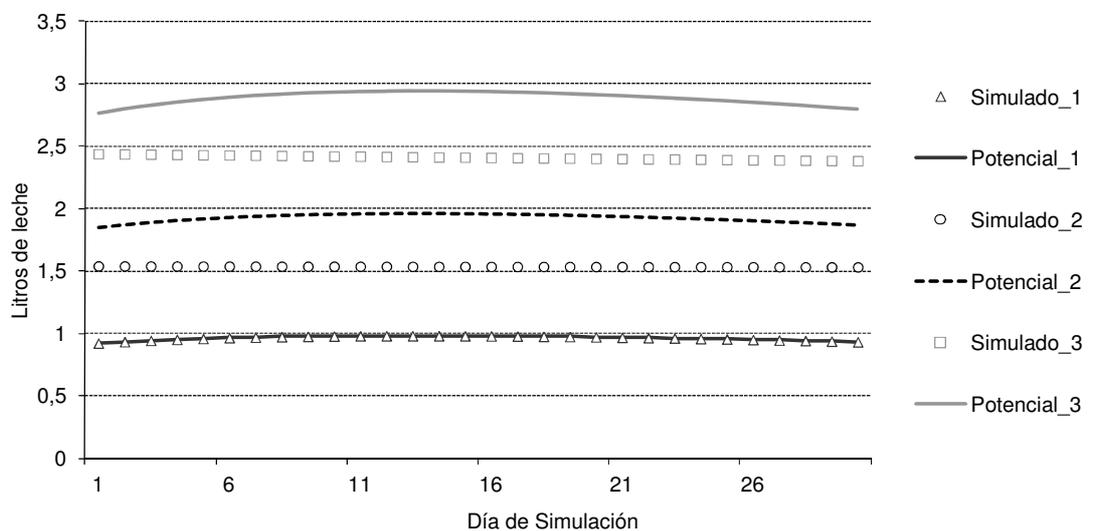


Figura 12.- Producción lechera simulada y potencial durante un mes para tres tipos de oveja con potencial productivo de 1, 2 y 3 litros

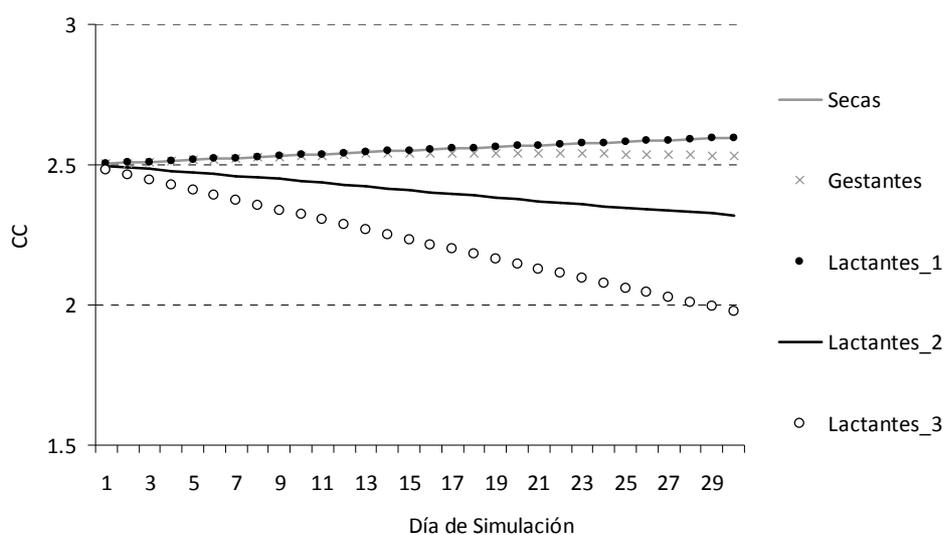


Figura 13.- Evolución de la CC de los 5 tipos de oveja simuladas

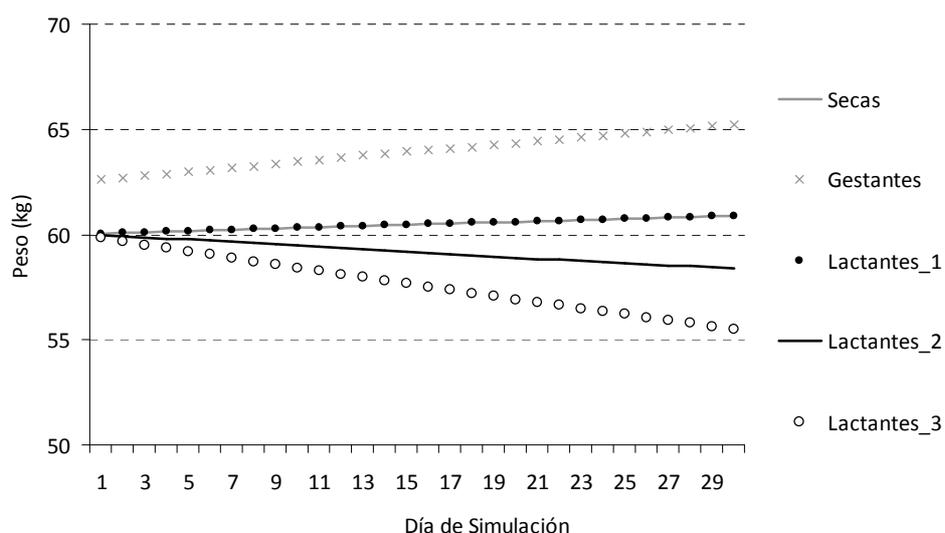


Figura 14.- Evolución del peso de los 5 tipos de oveja simuladas

En cuanto a la evolución de la CC (Figura 13), las ovejas *Secas* y *Lactantes\_1* ganan el máximo posible. Ambos tipos de oveja están alimentadas por encima de sus necesidades (ver apartado 3.2.5.3) tanto en EM como en PM, por el contrario las *Lactantes\_2* y *Lactantes\_3* pierden CC, ya que necesitan movilizar reservas para cubrir las necesidades de producción. Las ovejas *Gestantes* ganan CC hasta el día 135 de gestación, momento a partir del cual comienzan a perder CC.

La evolución del peso es coherente con la evolución de la CC. Las ovejas con producción potencial de 3 litros son las que más kg pierden (Figura 14), seguidas de las

*Lactantes\_2*. Las ovejas *Secas* y *Lactantes\_1* ganan peso hasta donde permite el límite impuesto por el modelo.

La evolución de estos 5 tipos de oveja es consecuencia de los resultados del apartado 3.2.5.3. donde se muestra que con la dieta propuesta (basada exclusivamente en alfalfa) el ratio aportes/necesidades no está equilibrado para todos los estados fisiológicos propuestos y por eso algunas ovejas ganan peso y CC, y otras pierden. Sin embargo esta evolución está limitada por las restricciones impuestas al modelo, y por eso se observan ovejas que a pesar de recibir una alimentación con diferente ratio entre aportes y necesidades, evolucionan de la misma manera, como por ejemplo las ovejas *Lactantes\_1* y las *Secas*, que presentan la misma curva de evolución de peso y CC, y sin embargo sus excesos de energía y proteína son diferentes (Tabla 11). Los valores de exceso diario en energía (MJ) y proteína (g) se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11.- Estimación de los excesos de PM y EM una vez cubiertas las necesidades de mantenimiento, producción y crecimiento

<b>Tipos de Oveja</b>	<b>Exceso de EM (MJ/d)</b>	<b>Exceso de PM (g/d)</b>
<b>Secas</b>	4,2	70,5
<b>Gestantes</b>	0,4	17,0
<b>Lactantes (1l)</b>	0,9	37,2
<b>Lactantes (2l)</b>	0,0	0,0
<b>Lactantes (3l)</b>	0,0	0,0

Para el desarrollo del módulo de partición de nutrientes se ha tomado un modelo que ha demostrado ser válido para la predicción del peso en engorde de vacuno de carne (Silveira, 2000) y se ha adaptado y evaluado para permitir su utilización en ovino de leche. La principal modificación del modelo, además de incluir las ecuaciones correspondientes a ovino propuestas por el AFRC (Alderman y Cottrill, 1993), ha sido la inclusión de limitaciones a la ganancia y pérdida de grasa y músculo, tanto diarias como a largo plazo.

Introducir este tipo de restricciones en un modelo no es sencillo, ya que no hay un consenso a la hora de establecer las proporciones de grasa y proteína que puede movilizar una oveja ni los valores de eficiencias de utilización de la energía para estos fines, lo cual puede ser debido a que son parámetros dependientes de la raza (Wallach et al., 1986). De hecho hoy en día la correcta predicción de las relaciones entre la CC o el peso y la composición corporal continúa siendo un tema que requiere más investigación

ya que se encuentran importantes diferencias entre especies y razas debido a los escasos datos de los que se dispone (Tedeschi et al., 2010).

Por todo esto, el cálculo de la CC dentro del modelo se ha realizado tomando como referencia el porcentaje de cambio en PV por cada punto de CC observado en la raza Latxa, ya que de esta manera se evita depender de modelos generalistas que se desvíen demasiado de los valores encontrados en la raza.

La validación del modelo mediante ajuste de regresión de los datos simulados a los datos reales demuestra que predice de manera aceptable la evolución del peso, la CC y la producción lechera de ovejas lactantes. Los valores de sobre y subestimación encontrados siguen la línea de lo observado en otros modelos, en los cuales se aprecia que los porcentajes mas bajos de desviación se dan en la estimación del peso (alrededor de  $\pm 7\%$ ), seguidos de la CC (alrededor de  $\pm 20\%$ ) y por último de la producción lechera (alrededor de  $\pm 30\%$ ) (Finlayson et al., 1995). En este sentido las desviaciones encontradas en el módulo validado se consideran satisfactorias ya que la mayor desviación del modelo con respecto de los valores reales es de  $-18\%$  en un dato puntual de producción lechera, si bien la desviación media en este parámetro es de  $-0,6\%$ , de  $4\%$  en la CC y de  $3\%$  en el peso.

No obstante, tal y como sugiere Harrison (1990) los resultados de regresión lineal aislados pueden inducir interpretaciones erróneas del comportamiento de los modelos, y es la comparación gráfica y subjetiva la que permite interpretar la validez y alcance de los mismos. Por eso se ha realizado una comparación de ovejas en diferente estado fisiológico alimentadas con alfalfa a libre disposición.

Los resultados de producción lechera, evolución del peso y CC de las ovejas tipo son coherentes con las dietas aportadas. Se observa que la producción lechera no llega al potencial cuando el ratio entre aportes y necesidades está por debajo de 1 en EM o PM. En esos casos la CC y el peso de las ovejas disminuye debido a la necesidad de movilizar reservas para producir leche y esta movilización es mayor cuanto mayor es el potencial de producción.

En el otro extremo, las ovejas que son sobrealimentadas aumentan de peso y de CC de manera constante. Este aumento es limitado por el modelo y como consecuencia de esto se generan unos excesos de EM y PM que son interesantes desde el punto de

vista del análisis del sistema pues permiten indicar puntos débiles que presenta el modelo, bien porque calcula unos aportes demasiado elevados para ser sostenidos en el tiempo, o bien porque la dieta diseñada no es la adecuada. En este caso, la incapacidad del módulo de simulación de la partición de nutrientes de utilizar las entradas de EM y PM del módulo de rumen sería un cuello de botella (Blackburn y Cartwright, 1987) a tener en cuenta en el modelo global. Por esta razón sería interesante revisar el control de la ingestión a largo plazo y el efecto que el estado de reservas tiene en ella, para poder incluir un mecanismo de retroalimentación que relacione el módulo de reparto de nutrientes y el módulo de rumen, donde se calculan los aportes de EM y PM.

En nuestro caso las entradas de EM y PM que provienen del módulo de rumen demuestran ser adecuadas en las validaciones de datos de experiencias reales, ya que permiten alcanzar el potencial lechero simulado y la evolución del peso y la CC, pero esto no demuestra que no se esté calculando la energía y/o la proteína en exceso.

En este sentido la validación de la IV es mucho más sencilla que la validación de los aportes de energía y proteína. Dentro de la comparación realizada en el apartado 2.2 del módulo de rumen con modelos ya validados, se observaron estimaciones de EM y PM similares a las obtenidas utilizando el sistema INRA. Sin embargo, la comparación con otros modelos no siempre ayuda, pues la sobreestimación de los aportes es un viejo problema en modelización, y tradicionalmente se viene observando que algunos modelos sobreestiman las tasas de ganancia debido a una subestimación de las necesidades en mantenimiento de ovejas en pastoreo (Dryden, 1981), o alimentadas con forrajes conservados (Robinson, 2002). Estas inconsistencias en los modelos traen consecuencias diversas como que un modelo estime adecuadamente la IV y sin embargo sobreestime la ganancia media diaria (Regadas Filho et al., 2011).

A efectos del modelo a desarrollar, la producción lechera y la CC son los parámetros más importantes a tener en cuenta. La primera porque es la variable que más relación tendrá con los ingresos del modelo y la segunda por permitirnos ligar el estado de reservas de la oveja con el mayor o menor éxito reproductivo. En cuanto a la CC, al tratarse de un valor subjetivo, se considera que el modelo la predice con suficiente corrección como para representar el estado de reservas de la oveja. En cuanto a la predicción de la producción lechera, la regresión realizada presenta un buen ajuste, sin

embargo, al tratarse de una de las salidas más importantes, ha de ser tenida en cuenta de manera especial en el proceso de mejora continua que experimenta todo modelo.

### **3.3.7 Conclusiones parciales**

- El establecimiento de limitaciones a la ganancia o pérdida de músculo y grasa es un aspecto crucial en el desarrollo de un modelo de partición de nutrientes, y sin embargo resulta difícil encontrar referencias que permitan su parametrización.
- La predicción del peso, la CC y la producción lechera de los lotes de animales en lactación ofrece valores razonables y comparables a los observados en condiciones reales, indicando no solamente que el módulo es adecuado sino que es compatible con el módulo de rumen.
- La evolución del peso, la CC y la producción lechera de ovejas en distinto estado fisiológico permite comprobar que las limitaciones a la ganancia o pérdida funcionan correctamente y permiten estimar la nota de CC y la producción lechera que corresponde al balance entre aportes y necesidades en el que se encuentran las ovejas.
- De cara a mejorar el modelo sería interesante establecer una regulación de la IV a largo plazo que tenga en cuenta el estado de reservas de la oveja.
- En las futuras mejoras y usos del modelo conviene prestar especial atención a los excesos de EM y PM y validar siempre que sea posible la predicción de la producción lechera.

### **3.4 MÓDULO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REPRODUCTIVO**

#### **3.4.1 Introducción**

En las últimas décadas el conocimiento de la biología de la reproducción es cada vez más cuantitativo y ha permitido el desarrollo de modelos que van desde la representación de los mecanismos endocrinos que desencadenan la ovulación hasta la predicción de los resultados reproductivos de un rebaño de animales (Blanc et al., 2001).

Pese a todo esto, la reproducción ovina es un sistema muy complejo y difícil de modelizar debido a que entran en juego diferentes componentes como son la edad, el estado nutritivo, la sensibilidad al fotoperiodo, la genética del animal y el manejo reproductivo realizado por el ganadero.

En relación al efecto de la nutrición, tradicionalmente se han distinguido dos efectos en la reproducción de las ovejas adultas: un efecto estático o a medio plazo, y un efecto dinámico o a corto plazo. El primero hace referencia al hecho de que los animales con un mejor estado de reservas (medido como la nota de CC) presentan mejores resultados reproductivos que los animales con notas bajas de CC (Gunn, 1983). Por otra parte, el efecto a corto plazo, hace referencia a que el rendimiento reproductivo puede mejorarse mediante una sobrealimentación anterior a la cubrición (*flushing*) (Rattray et al., 1980). El grado en que la respuesta reproductiva mejora en función de la nutrición ha sido ampliamente estudiado bajo diferentes condicionantes (raza, época de cubriciones o tipo de cubrición). Dependiendo de las características de la experiencia estudiada el resultado reproductivo puede variar, por lo que la cuantificación y predicción de este efecto es complicada.

El momento en el que se realiza la cubrición es otro aspecto que afecta al éxito reproductivo debido a la estacionalidad que presenta el ganado ovino. El comportamiento reproductivo consiste en un ciclo anual en el que se diferencia un periodo de actividad sexual que coincide con el periodo de acortamiento de los días y otro de inactividad sexual o anestro estacionario que coincide con la época de alargamiento de los días. Sin embargo, la duración del anestro y los momentos de entrada y salida en actividad sexual varían considerablemente entre razas y latitudes. Los

principales factores que modulan la estacionalidad sexual que presenta el ganado ovino son el fotoperiodo, la nutrición y el manejo social del animal (especialmente el efecto macho).

Por último, el tipo de cubrición que se realice también influye en los resultados reproductivos, siendo mayor la fertilidad que se obtiene en las cubriciones de MN que con IA. Además, cuando la cubrición viene precedida de un tratamiento hormonal (TH) mediado por la hormona eCG (coriogonadotropina equina), el resultado es una sincronización de las cubriciones, además de una mayor prolificidad debida al aumento de la tasa de ovulación (TO).

### **3.4.2 Origen del módulo**

#### *3.4.2.1 Modelización de la estacionalidad reproductiva*

Probablemente el origen, localización geográfica y sistema de producción de la raza Latxa hacen que ésta presente una marcada estacionalidad reproductiva. Esto se manifiesta en el hecho de que los partos tienden a concentrarse entre los meses de diciembre y febrero, independientemente de cuando tenga lugar el inicio de la época de cubrición (Ruiz, 2000). Por esta razón, la correcta simulación de la estacionalidad o presencia de celo que presenta la raza a lo largo del año es fundamental para el desarrollo de un modelo de rebaño.

De cara a simular dicha estacionalidad se ha optado por utilizar el modelo propuesto por Dzakuma y Harris (1989a) adaptándolo al sistema en estudio. Este modelo permite simular cada día del año la probabilidad de que una oveja esté cíclica (ecuación [8]) a partir de los siguientes parámetros:

- $d$  = día del año (del 1 de enero (1) al 31 de diciembre (365))
- $DA$  =  $d$  que corresponde a la mitad del periodo de anestro
- $d^*$  = número de días transcurridos desde el inicio del último  $DA$
- $DE$  =  $d^*$  que corresponde a la mitad del periodo de estro
- $MX^*$  = Parámetro adimensional

$$PEstro = MX \cdot \exp\left(\frac{-(d * -DE)^2}{2 \cdot S^2}\right) \quad [8]$$

(Si  $PEstro > MX$  entonces  $PEstro = MX$ )

Donde,

- S = El valor de este parámetro es diferente en función de si la probabilidad a calcular corresponde a un d posterior o anterior al DA, de la siguiente manera:
- S = SA – ASI, si d es posterior a DA
- S = SA + ASI, si d es anterior a DA

Donde,

- SA = días de dispersión del estro
- ASI = medida de la asimetría en días

Se establece un porcentaje máximo de celos presentes ( $PEstroMax$ ), y si  $PEstro > PEstroMax$  entonces  $PEstro = PEstroMax$ .

Tomando el valor  $PEstro$ , el modelo simula la probabilidad de presentar celo una vez cada 17 días (la duración del ciclo sexual en la oveja) mediante la siguiente ecuación propuesta por Dzakuma y Harris (1989b):

$$PCelo = (PEstro(d)) \cdot Pn^{\circ} Celos \quad [9]$$

Donde,

- $PCelo$  = probabilidad de presentar celo
- $PEstro(d)$  = probabilidad de presentar estro en el día d del año
- $Pn^{\circ} Celos$  = modificación de la probabilidad en función del número de celos anteriores (>2= 1, 1=0,95, 0=0,9)

Al simular los eventos reproductivos, es conveniente que estos sean tratados como eventos discretos cuando son considerados a nivel de individuo y como eventos continuos cuando se considera el rebaño completo (Agabriel y Ingrand, 2004). Por esta razón, la  $PCelo$  calculada se ha de transformar en un evento discreto mediante una variable aleatoria, de manera que para cada individuo tengamos como resultado presencia o ausencia de celo.

### Parametrización de la ecuación de estacionalidad

Para simular la probabilidad de presentar celo en las ovejas de la raza Latxa, de la manera que propone Dzakuma en su modelo, los parámetros de la ecuación [8] se han ajustado a los datos reales de dicha raza. Para ello se han tomado datos del rebaño experimental de Neiker relativos a la presencia de estro medida mediante niveles de progesterona y en ausencia de moruecos. Estos datos recogen el porcentaje de ovejas que están sexualmente activas a lo largo del año.

El ajuste de los parámetros se ha realizado mediante PL. Para ello se ha utilizado la herramienta Solver de MS-Excel, minimizando la suma de las diferencias de cuadrados de los datos reales frente a los teóricos. Los valores obtenidos para dichos parámetros se indican en la Tabla 12, y en la Figura 15 se muestran los datos reales y la curva teórica tras el ajuste de los datos (PEstro).

Tabla 12. Parámetros de la Ecuación [8] de Dzakuma y Harris (1989b) para la raza Latxa:

<b>Parámetros</b>	<b>Latxa</b>
<b>DA</b>	149
<b>DE</b>	200
<b>MX</b>	100
<b>MX*</b>	1632,3
<b>SA</b>	37,3
<b>ASI</b>	-4,58

Como puede observarse en la Figura 15 la raza Latxa presenta una estacionalidad muy marcada que se refleja en un anestro profundo durante los meses de mayo a junio. Tras este periodo tiene lugar una transición hacia la plena estación sexual y es a finales de agosto, cuando comienza por fin la estación sexual propiamente dicha.

### Introducción del efecto de la presencia de moruecos

Debido a que los datos con los que se ha obtenido la curva PEstro fueron medidos en ausencia de moruecos, se ha considerado que PEstro cuando hay moruecos presentes al comienzo de la estación sexual debe ser mayor, es decir, que la salida en celo se ha de adelantar cuando se introducen moruecos en el rebaño debido a la respuesta fisiológica que estos inducen en ovejas que están en anestro (efecto macho) (Martin et al., 1986). Para ello en el modelo se introduce una modificación de PEstro que se aplica pasados 18

días de introducir los moruecos, puesto que es el número mínimo de días para obtener respuesta a dicho efecto (Thimonier et al., 2000). En ese momento, si las ovejas están en anestro profundo ( $PEstro < 10\%$ ), se produce un aumento de  $PEstro$  del 31%, tal y como observó Beltrán de Heredia (2003), y si están dentro del periodo de transición hacia la plena estación sexual ( $PEstro > 0$ ) se produce un aumento de  $PEstro$  del 90% (Beltrán de Heredia, 2007), (Figura 15).

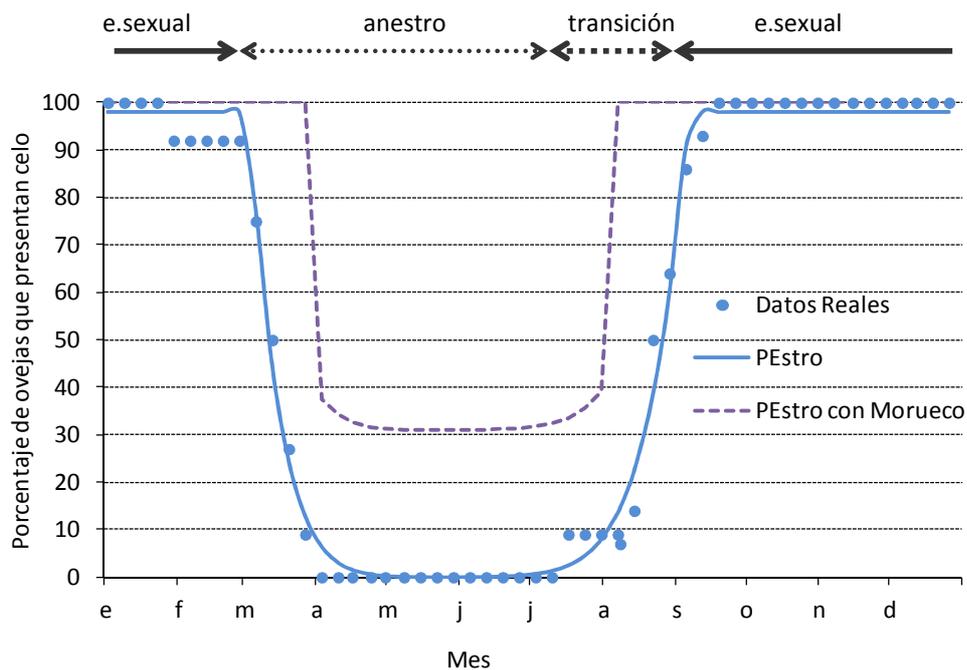


Figura 15. Ajuste de los datos reales de presencia de celo y modificación de  $PEstro$  por presencia de morueco

Este mismo incremento de  $PEstro$  se aplica también a las ovejas que habiendo recibido TH no han quedado gestantes de IA, ya que el TH al que son sometidas ejerce un efecto de adelanto de la salida en celo similar al producido por la presencia de los moruecos.

La manera de diferenciar en el modelo tanto el anestro y el periodo de transición de estación sexual propiamente dicha es el porcentaje teórico de ovejas cíclicas que hay en el rebaño. De esta manera, se ha establecido que cuando  $PEstro$  es mayor de 98% los animales están en plena estación sexual. La diferenciación de estos dos momentos será importante a la hora de aplicar las modificaciones que el estado nutritivo ejerce en los resultados de prolificidad y fertilidad (Figura 17).

### 3.4.2.2 Modelización de la probabilidad de concepción

Como ya se ha comentado, dentro del funcionamiento del modelo el valor de porcentaje de ovejas cíclicas que se calcula con PEstro se transforma en un evento discreto; es decir, el porcentaje obtenido se utiliza para calcular PCelo de cada oveja con una frecuencia de 17 días y se asume que el valor de PCelo es la probabilidad de que esa oveja presente celo ese día. Si dentro de la aleatoriedad con la que ocurren los eventos, la oveja muestra celo, se estará cumpliendo la primera condición para poder quedar gestante. La segunda condición es que haya presencia de morueco, en cuyo caso la concepción tendrá lugar según otro valor de probabilidad.

La probabilidad de que una oveja cíclica pueda quedar gestante será igual a un valor de fertilidad decreciente en función de si se trata del primer celo en presencia de morueco, el segundo, o el tercero o sucesivos. Se adopta este diseño debido a que se dispone de datos observados en la raza Latxa sobre fertilidad al primer, segundo y tercer o sucesivos celos tras la IA. Estas probabilidades se modifican en función del estado nutricional de la oveja, para lo cual se ha realizado una revisión bibliográfica sobre las interacciones entre nutrición y reproducción.

Por último, la probabilidad de concepción de la IA, al ser una cubrición programada que no depende de la presencia espontánea de celo sino de la sincronización mediante TH, se ha modelizado de una forma diferente a la de las cubriciones por MN. En este caso, la IA se simula un día del año que se configura previamente y dependiendo de la época (fin de estación sexual o plena estación sexual), de la CC del animal y del manejo (*flushing*), la fertilidad tendrá un valor diferente.

#### Parametrización de la probabilidad de concepción para la raza Latxa

Para obtener la probabilidad de concepción en cada oportunidad de quedar gestante se han analizado datos de resultados reproductivos procedentes del registro del rebaño de Arkaute de los últimos 10 años. El rebaño experimental se compone de aproximadamente 150 ovejas adultas, cuyo manejo reproductivo consiste en realizar IA al 100% del rebaño durante la estación sexual (a partir del 15 de agosto) seguida de cubriciones mediante MN durante un periodo que se puede prolongar hasta 5 ciclos después de la IA. Tres semanas antes de la IA se evalúa la CC de las ovejas y se hacen dos

lotes de manejo, utilizando como criterio de clasificación la puntuación de la CC. El grupo de CC menor de 2,5 es sometido a *flushing* durante 6 semanas (Figura 16). Debido a este manejo se considera que los parámetros reproductivos observados no están afectados por el estado nutritivo de la oveja.

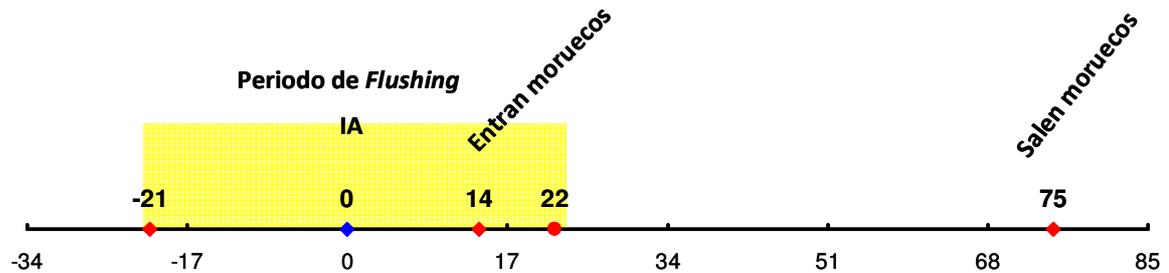


Figura 16. Esquema del manejo reproductivo realizado en el rebaño experimental de Arkaute

Del análisis de los partos de MN de ovejas adultas que tuvieron lugar durante el periodo 2000-2010, se ha calculado que la probabilidad media de quedar gestante observada en los tres sucesivos celos tras la IA ha sido la siguiente:

- Primer retorno: 68,6%
- Segundo retorno: 47,4%
- Tercero y sucesivos: 29,6%

Parametrización del efecto del estado nutritivo sobre la probabilidad de concepción: Meta-análisis sobre las interacciones nutrición-reproducción

Para cuantificar el efecto que el estado nutritivo de las ovejas tiene sobre el éxito reproductivo se ha realizado una revisión bibliográfica y un meta-análisis del efecto que la CC y la realización de *flushing* tienen sobre la fertilidad y la prolificidad ovina.

El meta-análisis es una técnica estadística que consiste en reunir un conjunto de estudios clínicos con el objetivo de aceptar o rechazar una hipótesis. El objetivo del meta-análisis es integrar resultados y de esta forma aumentar el tamaño muestral con el que se trabaja (Petitti, 2000). Para realizarlo se necesita que cada estudio aporte datos relativos

a un grupo tratado y otro control, que todos los estudios queden incluidos dentro de unos criterios de selección y que el efecto se mida en unidades similares.

La razón por la cual se ha escogido esta metodología es porque permite obtener la diferencia media observada de un parámetro que es medido en dos grupos comparados. El objetivo es disponer del valor de diferencia de riesgo (o probabilidad) de fertilidad y prolificidad (medida como probabilidad de parto doble) que presentan dos grupos de animales, uno de los cuales presenta mayor CC o ha recibido *flushing*, mientras que el otro no.

Para este estudio se han utilizado los datos extraídos de 20 referencias de un total de 46 artículos bibliográficos revisados, con ensayos realizados en 18 razas diferentes.

Para analizar el efecto de la CC se han comparado grupos de animales “control” con CC baja (<2,5) y grupos de animales “tratamiento” con CC alta ( $\geq 2,5$ ). Para evaluar el efecto del *flushing* se han seleccionado aquellas experiencias en las que un grupo de animales “tratamiento” se sometió a *flushing* de entre 3 y 6 semanas de duración, y el grupo “control” se mantuvo con las condiciones iniciales.

En todos los artículos la fertilidad se expresa como el número de ovejas paridas con relación al número de ovejas puestas en cubrición, y la prolificidad se expresa como el número de corderos nacidos por oveja parida. Se diferencian dos tipos de cubriciones: con TH o sin TH.

Entre los artículos revisados, 26 se han descartado por diferentes razones (resultados agregados para diferentes épocas de reproducción, ausencia del número de animales por grupo, resultados mostrados como una ecuación de regresión, resultados medidos como fertilidad y/o prolificidad potencial, CC fuera del rango, *flushing* de corta duración y razas hiperprolíficas o no estacionales). Los artículos seleccionados para la realización del meta-análisis se muestran en la Tabla 13. En el Anexo II se describe el análisis estadístico realizado.

El cálculo de las diferencias de riesgo para fertilidad y prolificidad se ha realizado teniendo en cuenta el efecto de la nutrición (CC o *flushing*), la interacción nutrición y época de cubrición (anestro o estación sexual), y la interacción nutrición, época de cubrición y TH (sí, no).

En la Tabla 14 se muestran los resultados de cada uno de los 28 meta-análisis realizados. Se ha decidido expresar la diferencia de riesgos en términos porcentuales en lugar de como proporción, ya que así es como se expresan frecuentemente la fertilidad y la incidencia de partos dobles.

Tabla 13. Referencias consultadas para la realización del meta-análisis

Nº	Referencia	Raza	n	EC	TC	Efecto	P
1	Atti et al., 2001	Barbarine	569	1	MN	1	1,2
2	Carcangiu et al., 2008	Sarda	40	2	EM, MN	1	2
3	Confelac, 2008	Latxa	2650	1,2	IA, TH	1	1,2
4	Folch et al., 1987	Rasa	86	1	EM, TH	1,2	1,2
5	Folch et al., 1985	Rasa	59	1	EM	1	1,2
6	Forcada et al., 1998	Rasa	175	1	MN, TH	1	1,2
7	Forcada et al., 1992b	Rasa	91	2	MN	2	1,2
8	Gunn et al., 1972	Scottish Blackface	28	2	MN	1	1,2
9	Gunn et al., 1969	Scottish Blackface	228	2	MN	1	1,2
10	Gunn et al., 1991	North Country Cheviot	406	2	MN	1,2	1,2
11	Lassoued et al., 2004	D'man, D'man x QFO*	85	2	MN, TH	2	1,2
12	Molle et al., 1995	Sarda	38	2	MN	1	2
13	Molle et al., 1997	Sarda	29	2	MN, TH	2	1,2
14	Mori et al., 2006	4 razas**	72	2	MN	2	1,2
15	Nowers et al., 1994	Dohne Merino	271	1	MN	2	1,2
16	Paramio y Folch, 1985	Rasa	1007	1	MN, EM, TH	1	1,2
17	Santos et al., 2009	Santa Inés x Suffolk	46	1	MN	2	1,2
18	Thomson et al., 1988	Awassi	170	2	MN	1	1,2
19	Torre et al., 1991	Ripollesa	145	1	MN	1,2	1,2
20	Venter y Greyling., 1994	Merino	60	2	MN, TH	2	1,2

n= número de animales incluidos en el estudio. EC= época de cubriciones (1=fin anestro, 2=plena estación sexual). TC=tipo de cubrición (MN=monta natural, EM=efecto macho, TH=tratamiento hormonal, IA=inseminación artificial), Efecto (1=efecto de la CC, 2=efecto del *flushing*) P=parámetros medidos (1=fertilidad, 2=prolificidad). \*Queu fine d'Ouest \*\*Datos de 4 razas: Hampshire Down, Ile de France, Corriedale y Suffolk.

Tabla 14. Resultados de los meta-análisis realizados mostrados como diferencia de riesgo de fertilidad o parto doble

nº	Efecto de la Nutrición	Época de cubriciones	TH	Diferencia de Riesgo % Fertilidad (I.C.)	n	Diferencia de Riesgo % Partos dobles (I.C.)	n	Referencias Incluidas (Tabla 13)
<b>1</b>	CC (>2,5 vs <2,5)	Anestro	No	19,0 (14,2 - 23,8)	1593	6,2 (2,8 - 9,6)	1445	(1,2,4,5,16,19)
<b>2</b>			Si	10,4 (5,5 - 15,3)	2284	16,0 (11,0 - 21,0)	2182	(3,6,16)
<b>3</b>			Total	14,8 (11,4 - 18,2)	3876	*9,3 (6,5 - 12,1)	3895	(1,2,3,4-6,16,19)
<b>4</b>		E.Sexual	No	*18,9 (10,1 - 27,7)	832	*37,8 (8,8 - 66,8)	691	(8,9,10,18)
<b>5</b>			Si	5,0 (-2,2 - 12,2)	918	2,0 (1,9 - 2,1)	918	(3)
<b>6</b>			Total	*16,1 (7,9 - 24,3)	1750	*31 (10,8 - 51,2)	1609	(3,8,9,10,18)
<b>7</b>		Total	Total	*14,9 (10,5 - 19,3)	5626	*16,5 (9,2 - 23,9)	5504	(1-7,8-10,16,18-19)
<b>8</b>	Flushing (Sí vs NO)	Anestro	No	4,9 (-2,3 - 12,1)	403	3,5 (0,3 - 6,7)	349	(4,15,17)
<b>9</b>			Si	13,4 (12,1 - 14,7)	60	11,0 (10,1 - 11,9)	60	(20)
<b>10</b>			Total	5,6 (-1,3 - 12,5)	463	3,8 (0,6-7,0)	409	(4,15,17,20)
<b>11</b>		E.Sexual	No	9,2 (2,5 - 15,9)	643	9,9 (1,8 - 18,0)	601	(7,10,12,14)
<b>12</b>			Si	5,2 (-2,6 - 13,0)	114	14,4 (-2,9 - 31,7)	109	(11,13)
<b>13</b>			Total	7,5 (2,4 - 12,6)	757	10,7 (3,4 - 18,0)	710	(7,10,11,12-14)
<b>14</b>		Total	Total	6,8 (2,4 - 7,4)	1220	4,8 (1,9 - 7,8)	1119	(4,7,10,11,12-15,17,20)

\*meta-análisis que presentaron heterogeneidad entre estudios.

En general, tanto para la fertilidad como para la prolificidad, se observan valores de diferencia de riesgo mayores cuando se estudia el efecto de la CC que cuando se estudia el efecto del *flushing*, lo cual indicaría que la primera estrategia es más efectiva a la hora de buscar un mayor rendimiento reproductivo (Tabla 14).

La fertilidad durante el anestro se ve mejorada tanto por la CC (incremento del 14,8% con  $CC \geq 2,5$  frente a  $CC < 2,5$ ) como por el *flushing* (5,6%), si bien el efecto de este último es casi la mitad que el de la CC. Esto se observa tanto con TH como sin TH y coincide con lo observado por algunos autores que indican que en las cubriciones de primavera, una CC mayor (Oregui et al., 2004) o la realización de *flushing* (Folch et al., 1987) mejoran los rendimientos reproductivos de los animales. Durante la estación sexual el efecto de la CC en la fertilidad da un resultado heterogéneo (difícil de aplicar por su escasa precisión) pero su valor (16,1%) indica que también en esta época existiría un efecto positivo de la CC en la fertilidad. El *flushing* por su parte, mejora en un 7,5% la fertilidad durante esta época, según el resultado del análisis. Estos valores sorprenden en una época en la que los animales presentan de forma espontánea una mayor fertilidad, por lo que sería esperable que tanto la CC como el *flushing* no ejercieran un efecto tan alto como en anestro.

En cuanto a la prolificidad se observa que el efecto del *flushing* y de la CC son mayores (pese a presentar heterogeneidad en algunos casos) durante la estación sexual que durante el anestro. Esta diferente respuesta de la prolificidad en anestro y en estación sexual es debida a que durante la estación sexual la respuesta ovulatoria a las estrategias nutricionales es mayor debido a la mayor sensibilidad ovárica que presenta el animal en esa época (Forcada et al., 1992a).

#### Aplicación de los parámetros obtenidos sobre la probabilidad de concepción

Los porcentajes de fertilidad obtenidos a partir de los datos del rebaño se modifican en caso de que la oveja tenga una CC inferior a 2,5 y en caso de que se someta a *flushing* antes de la cubrición. Para ello se utilizan los resultados del meta-análisis siempre que sean homogéneos. Cuando los resultados no son homogéneos se utiliza el valor obtenido en el meta-análisis una vez eliminados los estudios que aportan heterogeneidad.

En concreto cuando la oveja presenta CC inferior a 2,5 se reduce la fertilidad en un 19% en anestro (resultado de análisis 1). En estación sexual se debería utilizar el valor que aparece en la Tabla 14 para el análisis 4, pero al presentar heterogeneidad se repite el análisis eliminando los estudios que la causan (referencias 8 y 9 de la Tabla 13), el resultado obtenido muestra una diferencia de riesgos de 12,8% (con un intervalo de confianza de entre 7,5% y 18,0%), dato que se utiliza en este caso.

Por último, si la oveja recibe *flushing*, se aumenta la fertilidad un 4,9% en anestro y un 9,2% en estación sexual (según los resultados de los análisis 8 y 11, Tabla 14).

En la Figura 17 se observa un diagrama de decisión del funcionamiento del modelo para calcular la probabilidad de quedar gestante (denominada "F"), y los valores que la modifican en función de cada situación.

#### Parametrización de la fertilidad de la IA

Para el modelo se toman los valores de fertilidad de la IA obtenidos en rebaños comerciales de raza Latxa (CONFELAC, 2008) (Tabla 15). En estos rebaños las cubriciones más tempranas tuvieron lugar entre junio y julio y las de estación sexual entre agosto y septiembre. Se ha considerado que cuando una oveja se encuentre en *flushing* estas probabilidades se deben aumentar en un valor correspondiente a los resultados de los análisis 9 y 12 para anestro y estación sexual, respectivamente. Los valores aplicados se muestran en la Figura 17.

Tabla 15. Resultados de fertilidad de la IA de los rebaños comerciales de raza Latxa en diferentes épocas de cubrición y con diferente CC

Época	CC	FERTILIDAD
Anestro	<2,5	39,56%
	≥2,5	52,61%
Estro	<2,5	58,31%
	≥2,5	57,86%

#### 3.4.2.3 Modelización de la prolificidad

Para simular la prolificidad se aplican los valores mostrados en la Tabla 16 procedentes de rebaños comerciales de raza Latxa (CONFELAC, 2008). Estas probabilidades se modifican en el caso de que la oveja se encuentre en *flushing* según los

resultados de los análisis 8 y 9 (Tabla 14) para MN e IA en anestro, y 11 y 12 para MN e IA en estación sexual (Figura 17).

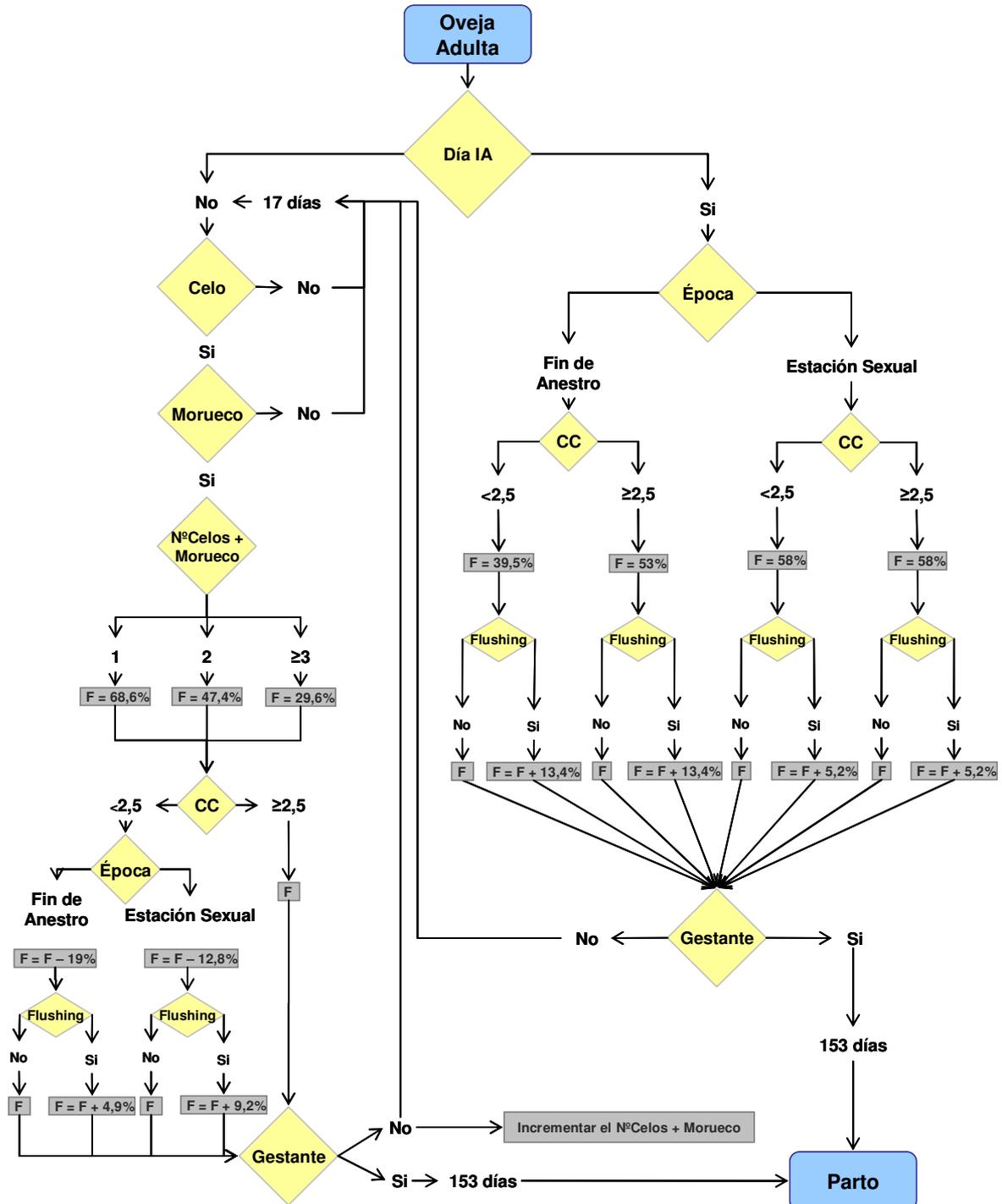


Figura 17.- Diagrama del modelo de simulación de la fertilidad de la MN y la IA (F=probabilidad de quedar gestante).

Tabla 16. Resultados de prolificidad de los rebaños comerciales de raza Latxa en diferentes épocas de cubriciones y con diferente CC.

Época	CC	MN	IA
Anestro	<2,5	1,23	1,44
	≥2,5	1,27	1,59
Estro	<2,5	1,33	1,54
	≥2,5	1,36	1,56

#### 3.4.2.4 Funcionamiento del módulo de simulación del comportamiento reproductivo

El modelo funciona sobre una base temporal de un día y simula para cada animal la probabilidad de presentar celo cada 17 días, y en caso de que éste tenga lugar dentro del periodo de cubriciones (morueco presente), se simula también la probabilidad de quedar gestante. Si la oveja queda gestante se asigna un valor de prolificidad a la gestación.

Se han de tener en cuenta las siguientes variables de la oveja y de manejo del rebaño:

- Día de IA (variable de manejo)
- Porcentaje de ovejas que se inseminan (variable de manejo)
- Día de entrada de moruecos (variable de manejo)
- Día de salida de moruecos (variable de manejo)
- Realización o no de *flushing* (variable de manejo)
- CC de la oveja
- Estado fisiológico de la oveja

Los eventos que se simulan son: la presencia de celo (cada 17 días con una probabilidad que depende de la época); la gestación con una duración de 153 días, que es la duración media de la raza Latxa (Urarte, 1983); los abortos con una frecuencia del 4% (Urarte, 1988); el parto, y la lactación, la cual puede finalizar por una baja producción de leche, cuando llega el día de secado general del rebaño, o cuando vuelve a comenzar la siguiente temporada de cubriciones o se realiza IA (el modelo no permite solapar los estados fisiológicos lactante y gestante). Todas estas condiciones vienen determinadas desde el módulo de manejo del rebaño. Para dar aleatoriedad a los eventos, la duración del celo y de la gestación se simulan con una SD entre animales de 0,44 y 2 días

respectivamente. Tras el aborto o el destete, las ovejas pueden volver a mostrar presencia de celo, habiéndose determinado un periodo mínimo de 34 y 17 días de anestro respectivamente.

Este módulo es el responsable de los cambios de un estado fisiológico a otro (gestante, lactante o seca), de la fecha en la cual tiene lugar cada evento y de el número de corderos nacidos de cada oveja.

En la Figura 17 se muestra un diagrama de funcionamiento del cálculo de la probabilidad de quedar gestante, incluidas todas las posibilidades contempladas (tipo de cubrición, época, estado nutritivo y manejo nutricional).

### 3.4.3 Validación del módulo de simulación del comportamiento reproductivo

Se han diseñado diferentes escenarios (Tabla 17) con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo mediante la evaluación de los resultados de fertilidad y de distribución de partos.

Tabla 17. Escenarios simulados con el módulo de reproducción

Nº escenario	Día IA	Entrada Moruecos	Salida Moruecos	Días Moruecos	Posibles ciclos Fértiles en MN	Flushing
1	01-Jun	15-Jun	29-Oct	136	8	Si
2	01-Jun	15-Jun	29-Oct	136	8	No
3	-	15-Jun	29-Oct	136	5-7	Si
4	-	15-Jun	29-Oct	136	5-7	No
5	03-Ago	17-Ago	31-Dic	136	8	Si
6	03-Ago	17-Ago	31-Dic	136	8	No
7	-	17-Ago	31-Dic	136	7-8	Si
8	-	17-Ago	31-Dic	136	7-8	No
9	01-Jun	15-Jun	05-Ago	51	3	Si
10	01-Jun	15-Jun	05-Ago	51	3	No
11	-	15-Jun	05-Ago	51	0-2	Si
12	-	15-Jun	05-Ago	51	0-2	No
13	03-Ago	17-Ago	07-Oct	51	3	Si
14	03-Ago	17-Ago	07-Oct	51	3	No
15	-	17-Ago	07-Oct	51	2-3	Si
16	-	17-Ago	07-Oct	51	2-3	No

En la mitad de los escenarios las cubriciones comienzan en junio y en la otra mitad en agosto. Se ha simulado la realización de IA previa a la MN y también la MN sin inseminación previa. La duración del periodo de cubriciones por MN se ha establecido en

51 ó 136 días con el objetivo de simular un máximo de 3 u 8 oportunidades de celo. Por último se ha simulado la realización o no de *flushing* para cada una de las posibilidades. En total se han diseñado 16 escenarios diferentes y cada uno se ha simulado 10 veces.

En cada ejecución se simulan 100 ovejas con una CC que sigue una distribución normal en torno a una media de  $2,5 \pm 0,5$ . De esta manera se puede comparar el rendimiento de ovejas de diferente CC.

#### **3.4.4 Resultados y Discusión**

En la Tabla 18 se muestra el porcentaje de fertilidad de las cubriciones de IA, de MN y total que se han obtenido en cada uno de los 16 escenarios simulados.

El máximo valor de fertilidad total obtenido fue de 96% en el escenario 5 y el mínimo de 47% en el escenario 12. El primero corresponde a cubriciones de IA seguidas de MN en estación sexual con una duración de 136 días y realizando *flushing* antes de la IA mientras que el segundo corresponde a cubriciones de MN en anestro durante un periodo de 51 días sin realización de *flushing*. El resultado que se obtiene en cada uno, junto con los valores intermedios de los demás escenarios, indican que el modelo responde de manera razonable y flexible a los diferentes manejos simulados.

Los escenarios de cubriciones de larga duración con realización de IA (1, 2, 5 y 6) son los que más se asemejan al manejo realizado en los rebaños comerciales y presentan una fertilidad total media de 94%. Este valor es ligeramente superior al observado en rebaños comerciales de raza Latxa, en los cuales se encuentra una fertilidad de entre 90% y 92% en las ovejas adultas (Ruiz, 2000), aunque cabe señalar que los datos reales corresponden a un manejo ligeramente distinto, ya que no es frecuente que la IA se realice al 100% del rebaño, como en el caso de las simulaciones realizadas. Al simular la IA del 100% del rebaño se está dando más facilidad para quedar gestante de monta natural a las ovejas que no tengan éxito en la IA, por el incremento en la probabilidad de presentar celo que se les aplica tras el fallo en la IA. Esto podría justificar que la fertilidad simulada sea ligeramente mayor.

En las cubriciones de larga duración, la fertilidad de la MN presenta un valor promedio de 78% cuando las cubriciones comienzan en junio y de 86% cuando comienzan

en agosto. Este último valor coincide exactamente con el valor encontrado por Urarte (1988) en rebaños de raza Latxa con cubriciones de MN durante la estación sexual.

Estos resultados de fertilidad total, se consideran satisfactorios y representativos de los valores que presentan los rebaños de ovino lechero de raza Latxa, sin embargo, no se dispone de datos con los que comparar todos los escenarios diseñados.

Los resultados de fertilidad de la IA obtenidos con el modelo, al ser el producto de aplicar un valor de probabilidad a una única oportunidad de quedar gestante, corresponden a los parámetros que se muestran en la Tabla 15 modificados por la realización o no de *flushing*. En la Tabla 18 se observa un valor mínimo de 35% (escenario 2, ovejas en baja CC y sin *flushing*) y máximo de 64% (ovejas con CC alta y *flushing*) lo cual permiten comprobar que la parametrización se ha aplicado correctamente.

Tabla 18. Resultados de fertilidad (%) de las cubriciones de MN, de IA y Total, para el rebaño y por grupos de CC obtenida en los 16 escenarios simulados

Escenario	IA			MN			Total
	CC≥2,5	CC<2,5	Total	CC≥2,5	CC<2,5	Total	
1	60	49	54	90	89	89	95
2	51	35	43	88	83	85	92
3				70	68	69	69
4				72	64	68	68
5	58	59	59	90	91	91	96
6	54	52	53	90	86	88	94
7				83	84	83	83
8				84	77	81	81
9	64	49	57	68	68	68	86
10	48	39	43	70	63	66	81
11				54	44	49	49
12				58	37	47	47
13	61	59	60	74	76	75	90
14	56	55	55	77	67	72	87
15				69	68	68	68
16				70	58	64	64

Para estudiar en qué grado afectan los diferentes parámetros incluidos en el modelo (época, duración de las cubriciones, tipo de cubrición, CC y realización de *flushing*), se ha realizado un análisis de regresión logística para las tasas de fertilidad (IA, MN y Total) de los escenarios simulados. Los efectos incluidos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Principales efectos incluidos en el análisis de regresión logística realizado a las tasas de fertilidad de la IA, la MN y Total obtenidas

EFFECTO	NIVELES	Tasa IA	Tasa MN	Tasa TOTAL
IA	SI			<input checked="" type="checkbox"/>
	NO			<input checked="" type="checkbox"/>
INICIO CUBRICIONES	Junio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Agosto	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CC	<2,5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	≥2,5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
FLUSHING	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
DÍAS	51	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	136	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Se ha implementado un modelo de selección paso a paso “stepwise” con el procedimiento LOGISTIC (SAS, 2009) situando el nivel de significación de entrada en el modelo en 0,10. En la Tabla 20 se muestran los resultados del análisis realizado para las tres tasas consideradas.

Según el análisis de regresión, el factor que más afecta a la fertilidad total es el tipo de cubrición realizada, de manera que cuando ésta consiste en IA seguida de MN la probabilidad de quedar gestante es 5,05 veces mayor que cuando sólo se realiza MN. Esta *odds ratio* correspondería a una fertilidad total media un 24% mayor en los escenarios en los que se realiza IA frente a los escenarios en los que no se practica. Esta diferencia es debida al mayor número de oportunidades de quedar gestante que tienen las ovejas en dichos escenarios. En primer lugar porque la IA es una oportunidad añadida, antes de comenzar las cubriciones de MN, que no depende de la salida en celo y que se realiza al 100% de los animales, y en segundo lugar por el efecto de adelanto de la salida en celo que ejerce el TH, el cual se traduce en una fertilidad de las cubriciones de MN un 13% mayor en los escenarios con IA frente a los que no presentan IA (ya que pueden ocurrir entre 1 y 3 celos más durante el periodo en el que los moruecos están presentes). Los resultados encontrados en rebaños comerciales también muestran una diferencia grande entre la fertilidad media de los lotes de IA (95%), frente a la del resto del rebaño (68%) (REFERENCIA CORREO DE INA). Estos datos presentan una diferencia de un 27% entre lotes, un valor cercano al 24% encontrado en las simulaciones.

El siguiente factor en importancia en el resultado de fertilidad total es la duración de las cubriciones, y es el primer factor en importancia en el resultado de fertilidad de la

MN, la cual es un 18% mayor cuando los moruecos están presentes 135 días frente a 51 (*Odds ratio* = 2,48).

Tabla 20. Resultados del análisis de regresión logística realizado a las salidas de fertilidad de los escenarios simulados

FACTORES	Fertilidad IA		Fertilidad MN		Fertilidad TOTAL	
	Odds ratio	Sig.	Odds ratio	Sig.	Odds ratio	Sig.
IA si vs no					5,05	***
INICIO CUBRICIONES Agosto vs Junio	1,36	***	1,78	***	1,89	***
CC ≥2.5vs <2.5	1,33	***	1,33	***	1,33	***
FLUSHING si vs no	1,43	***	1,1	n.s.	1,21	**
DÍAS 136 vs 51			2,48	***	2,43	***

n.s.  $p > 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ .

Según los resultados de fertilidad total y fertilidad de la MN de la Tabla 20, el siguiente factor en importancia es el momento de inicio de las cubriciones, observándose una fertilidad media de la MN un 10% mayor en los escenarios de agosto frente a los de junio. Este efecto no repercute igual a la fertilidad de la IA, la cual se ve más afectada por la realización o no de *flushing*, mientras que con la MN, la CC tiene más impacto que el *flushing*.

De lo observado en la Tabla 18 se desprende que el efecto positivo de la CC sigue las tendencias observadas en el meta-análisis y es más importante en los escenarios de cubriciones de junio frente a los de agosto. El *flushing* por su parte, contribuye a disminuir la diferencia entre las ovejas de CC alta y baja.

Con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo a la hora de simular la sucesión de los partos en los distintos escenarios, se ha representado la distribución de los mismos mediante gráficas de tipo box-plot (Figuras 18-19) a partir del momento teórico en el que debería tener lugar el primer parto, es decir, aproximadamente 153 días después de la primera cubrición posible (entrada de moruecos o IA).

Se observa que la época de partos dura entre 154 y 155 días en los escenarios de cubriciones largas con IA, tanto cuando las cubriciones comienzan en anestro (escenarios

1 y 2) como cuando comienzan en estación sexual (escenarios 5 y 6). En estos escenarios, el efecto del TH favorece el inicio de las cubriciones de MN tras la IA. En el caso del anestro (escenarios 5 y 6) el inicio de las cubriciones de MN no se retrasa tanto como en los escenarios donde no se realiza IA (3 y 4).

Sin embargo, la concentración de la paridera si que se ve afectada por la época. En los escenarios 1 y 2 el efecto del TH hace que las ovejas que no quedan preñadas en la IA tengan una buena fertilidad en el retorno, pero tras este momento el porcentaje de animales cíclicos parece ser más bajo que en los escenarios 5 y 6, lo cual se deduce del mayor tamaño de la caja en la Figura 18. Los escenarios 5 y 6, debido a la época, presentan un mayor número de animales fértiles y esto hace que muestren una paridera más concentrada que los escenarios 1 y 2.

En las cubriciones que comienzan en anestro (escenarios 1-4 y 9-12) la realización de *flushing* contribuye a concentrar los partos ya que se obtiene una mayor fertilidad de la IA en una época en la que esta técnica suele dar unos resultados de fertilidad más bajos (escenario 1 frente al 2). Sin embargo, el efecto del *flushing* no es tan relevante en las cubriciones realizadas en plena estación sexual, lo cual representa correctamente la mayor efectividad que el tratamiento a corto plazo tiene al inicio de la estación sexual (Theriez, 1984).

Para los escenarios sin IA y periodo largo de cubriciones (3, 4, 7 y 8) se observa una diferencia en la duración de la paridera entre los que comienzan en anestro frente a los que comienzan en estación sexual. En los primeros (escenarios 3 y 4), debido a un retraso en el inicio de las cubriciones provocado por el anestro en el que se encuentran los animales, la paridera comienza 25 y 26 días después del momento teórico y por lo tanto, su fertilidad es menor que la de los escenarios 7 y 8, ya que los moruecos están presentes el mismo tiempo y por lo tanto las ovejas no tienen tantas oportunidades de quedar gestantes.

En cuanto a los escenarios de cubriciones de corta duración (Figura 19), se observa un comportamiento parecido al de sus equivalentes de la Figura 18 en lo relativo a la diferencia de dispersión cuando se hace o no IA y al retraso en el comienzo de las cubriciones de MN en anestro (11 y 12).

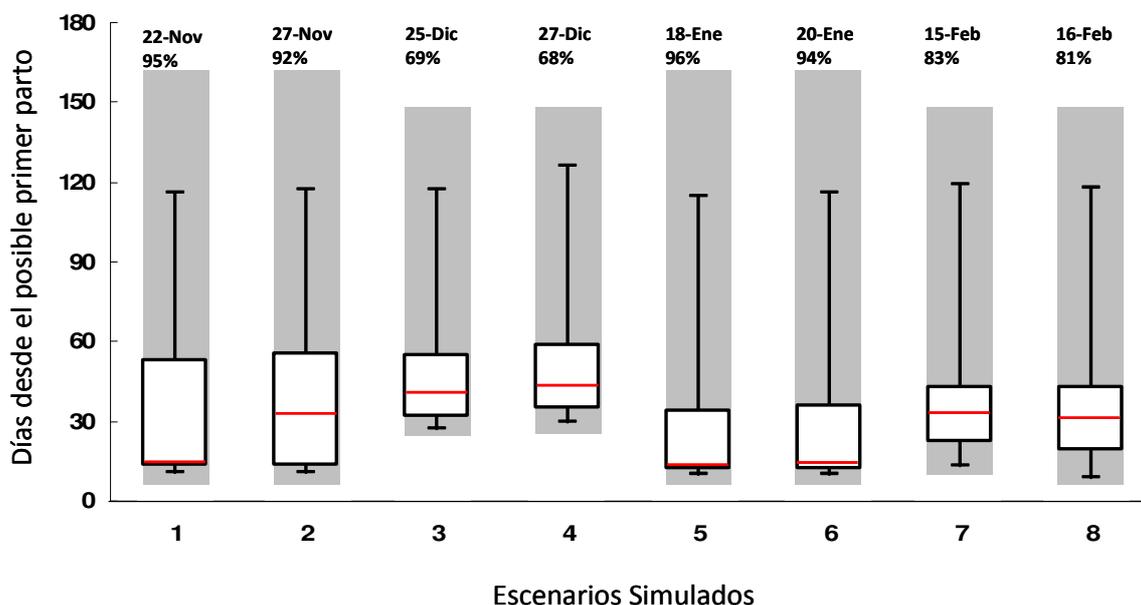


Figura 18. Box-plot representando la distribución de partos de los escenarios simulados correspondientes a cubriciones de larga duración. Arriba: Fecha media de parto y % de Fertilidad de los escenarios 1-8. En la gráfica: En gris se representan los días entre los cuales tiene lugar la paridera, las barras el número de días desde el posible primer parto hasta que tiene lugar el 5% y el 95% de los partos, la caja el 25% y 75% y la línea roja el 50% de los partos.

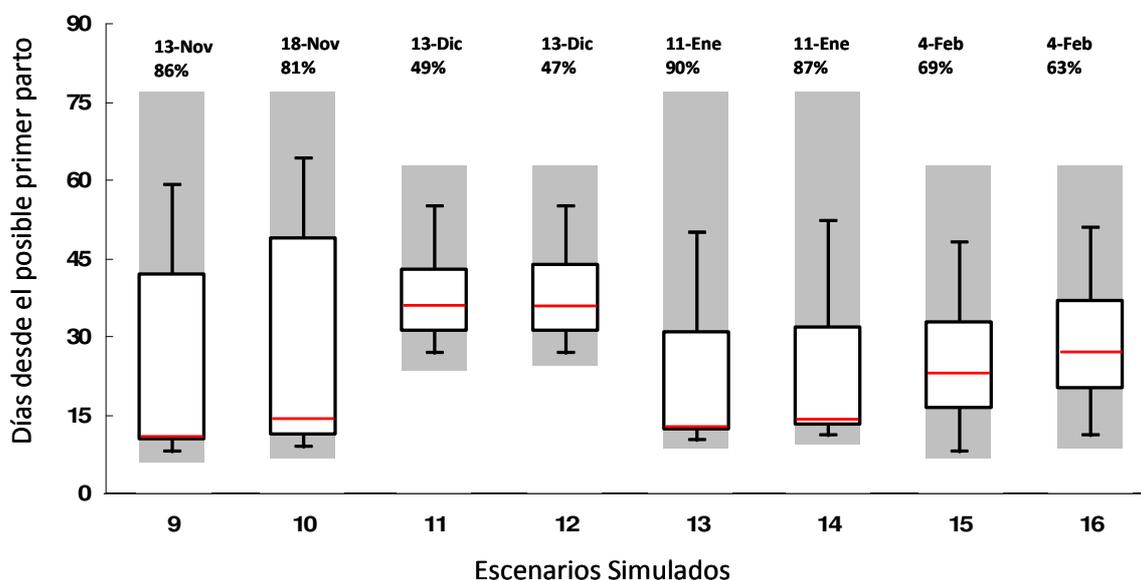


Figura 19. Box-plot representando la distribución de partos de los escenarios simulados correspondientes a cubriciones de corta duración. Arriba: Fecha media de parto y % de Fertilidad de los escenarios 9-16. En la gráfica: En gris se representan los días entre los cuales tiene lugar la paridera, las barras el número de días desde el posible primer parto hasta que tiene lugar el 5% y el 95% de los partos, la caja el 25% y 75% y la línea roja el 50% de los partos.

Cabe destacar el escenario 13, (cubriciones con IA y *flushing* que comienzan en agosto), en el cual se obtiene un 90% de fertilidad en 69 días, frente al escenario 5 (Figura 18) en el que la fertilidad total es de 95% pero con una duración de la paridera de 154 días, es decir, más de el doble que en escenario 13. Tal y como se ha modelizado la concepción, al aumentar el periodo de cubriciones, se aumenta las oportunidades de quedar gestante y por lo tanto la fertilidad. Sin embargo, la probabilidad de quedar gestante disminuye en función del número de saltos fallidos, y por lo tanto a medida que se prolonga el periodo de cubriciones, más improbable es la concepción de las ovejas. Por esta razón se observa que un porcentaje importante (entre el 19% y el 39%) de la duración de la paridera corresponde a los últimos partos, los cuales suponen sólo el 5% del total. Este tipo de análisis es interesante de cara a ajustar los periodos de cubriciones si se desea obtener parideras más concentradas y homogéneas.

En cuanto a su diseño, el modelo es el resultado de adaptar un modelo ya existente (Dzakuma y Harris, 1989a) a un sistema de manejo del que se dispone de datos para realizar su parametrización. Se trata de un modelo dinámico y estocástico que funciona con una base temporal de un día; mecanicista en la forma de simular el ciclo sexual de la oveja, la manifestación de celo y el momento de cubrición; y a la vez empírico en la parametrización de algunas de sus variables (probabilidad de concepción, prolificidad, etc.). El interés del modelo radica en que la modelización de la respuesta reproductiva se realiza de forma individual. Esto permite que tal y como ocurre en otros modelos dinámicos y estocásticos (Oltenacu et al., 1980; Pleasants, 1997; Cournut y Dedieu, 2004), al final de cada evento reproductivo tenga lugar una acción que bien sigue distribuciones de probabilidad o bien leyes empíricas que hacen que el estado fisiológico de la oveja cambie o no. Esta simulación de la trayectoria de cada animal de forma individual hace de este tipo de modelos de simulación herramientas de predicción más fiables a la hora de comparar diferentes estrategias reproductivas (Blanc et al., 2001).

Del modelo original de Dzakuma y Harris (1989a) se ha tomado la fórmula de estacionalidad y se ha parametrizado para representar la presencia de celo de la raza Latxa. Además, se ha incluido el adelantamiento de la salida en celo inducida por el efecto macho (Martin et al., 1986) y por el efecto del TH, el cual es un aspecto que no estaba reflejado y se considera fundamental ya que sin él, la fuerte estacionalidad registrada en

la raza no permitiría simular cubriciones hasta el mes de septiembre. Sin esta modificación el modelo no sería válido para representar el comportamiento de rebaños que realizan IA e introducen los moruecos a partir de mayo o junio.

La probabilidad de quedar gestante se simula de una manera diferente a la del modelo original, a partir de las probabilidades observadas en el rebaño experimental de la Granja Modelo de Arkaute. Este diseño permite obtener una distribución de la paridera similar a la encontrada en rebaños comerciales, y evita la excesiva concentración de partos que se ha observado al aplicar el modelo original (Dzakuma y Harris, 1989b) .

Un aspecto fundamental que se ha incluido es el efecto de la CC o la realización de *flushing* en la fertilidad y prolificidad. A la hora de parametrizar este efecto, el meta-análisis es una técnica estadística interesante que permite obtener información cuantitativa a partir del análisis de varias experiencias realizadas (Lopez-Gatius et al., 2003). Sin embargo la rigurosidad que esta metodología requiere a la hora de establecer los criterios de aceptación de las referencias, hace que en producción animal (donde los ensayos están afectados por condiciones que presentan una gran variabilidad) sea difícil encontrar muchos análisis homogéneos, y por esta razón, más de la mitad de las referencias consultadas tuvieron que ser excluidas del análisis estadístico.

En este sentido, es importante encontrar un equilibrio entre construir un modelo demasiado generalista que no refleje de manera suficientemente precisa las características del sistema, y diseñar un modelo demasiado específico que requiera de una parametrización muy compleja, para la cual no siempre hay datos disponibles.

Para la evaluación del funcionamiento del módulo de reproducción, se ha realizado una validación funcional (Banks, 1998) que constituye el tipo de validación apropiada cuando no se dispone de datos equivalentes o cuando no es posible trabajar con una muestra aleatoria de los datos iniciales. Supone comprobar la influencia que los cambios en los parámetros tienen en las salidas y el correcto funcionamiento del modelo. Además una parte de las salidas se han considerado comparables con algunos datos de explotaciones reales de los que se dispone.

Tras la validación realizada, se considera que el modelo simula correctamente los valores de fertilidad observados en rebaños reales y la dispersión de la paridera en función del manejo realizado. La respuesta del modelo ante variaciones en el tipo de

cubrición, la duración de las cubriciones, la fecha de entrada de los moruecos o el estado nutritivo de las ovejas se considera adecuada y permite simular un amplio rango de manejos reproductivos dentro de las posibilidades que ofrece el sistema de la Latxa.

### **3.4.5 Conclusiones parciales**

- Para la simulación del comportamiento reproductivo, se ha diseñado un modelo dinámico, mecanicista y estocástico, que permite representar de manera satisfactoria el anestro que muestra la raza Latxa mediante una función que se ajusta a la presencia de celo real.
- Además, el módulo de comportamiento reproductivo permite simular el efecto que la CC y el flushing tienen sobre los resultados reproductivos.
- Existen muchos estudios del efecto de la nutrición en los resultados reproductivos de las ovejas, sin embargo, su análisis y agregación mediante la técnica del meta-análisis se ve condicionado por las diferencias existentes entre cada experiencia.
- Los resultados de fertilidad obtenidos con el modelo para un manejo similar al de la Latxa están dentro de lo encontrado en los rebaños comerciales.
- El modelo responde de manera flexible y coherente a diferentes condiciones como son la época y el tipo de cubrición, la duración del periodo de cubriciones o la realización o no de flushing; tanto en lo referente a distribución y duración de la paridera como a la fertilidad obtenida.
- El diseño del modelo representa el manejo reproductivo de una forma realista, ya que permite tomar decisiones como realizar *flushing*, separar el morueco para realizar efecto macho o realizar IA a un porcentaje del rebaño.
- Es un módulo que requiere de una gran cantidad de parámetros adaptados al comportamiento de la raza, por lo tanto su aplicación para otros sistemas pasa por obtener datos válidos con los que parametrizar el modelo.

## 4. MODELO DE EXPLOTACIÓN. SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN



## **4 MODELO DE EXPLOTACIÓN. SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior de la presente tesis se ha desarrollado un modelo animal a partir de tres módulos que permiten simular aspectos fundamentales de la fisiología ovina, como son la ingestión, la partición de nutrientes y la reproducción. Sin embargo desde el punto de vista del apoyo a la toma de decisiones, estos módulos biológicos son insuficientes a la hora de proveer soluciones frente a problemas concretos de gestión (Bernués et al., 1995). Por eso es necesario agregar o integrar los modelos parciales que simulan los distintos subsistemas para que estos tengan validez en el proceso de toma de decisiones.

Los modelos de dinámicas de rebaño pretenden contribuir a alcanzar este objetivo mediante la simulación de animales individuales manejados con reglas que afectan al rebaño completo o a los lotes que lo integran. El interés de estos modelos reside en su utilidad para estudiar el comportamiento a largo plazo de los sistemas simulados y para comparar diferentes decisiones de manejo (Romera et al., 2004), como por ejemplo la planificación de la época de cubriciones o el manejo de alimentación de los lotes.

Muchos modelos de simulación de rumiantes consideran el rebaño como un grupo de individuos cuyo rendimiento está basado en el rendimiento medio animal, de modo que consideran el rebaño como un conjunto de individuos de las mismas características, con lo que la variabilidad de los individuos no está suficientemente representada (Puillet et al., 2010). En este sentido se ha comprobado que la respuesta media de un rebaño simulado estocásticamente no es equivalente a la respuesta de una simulación determinista (Villalba, 2000). Teniendo eso en cuenta, la programación orientada a objetos (POO) se presenta como el paradigma de programación más adecuado para la simulación de sistemas complejos (Romera et al., 2004) y permite relacionar los distintos submodelos y simular cada animal de manera individual. De esta manera cada objeto de la clase oveja, se genera con el grado de variabilidad deseada, representando el comportamiento del rebaño mediante una aproximación más realista.

El rebaño generado de esta manera, junto con los recursos disponibles y los precios de mercado que se establecen de partida, podrían configurar el marco o escenario de simulación con el que trabajar.

Por otro lado, además de simular, es interesante optimizar el manejo de un rebaño en un escenario dado. El interés de las técnicas de optimización radica en que permiten reflexionar acerca de hasta que punto las estrategias de producción de una determinada explotación se pueden mejorar dadas unas condiciones.

Algunos autores (Herrero et al., 1994) han utilizado las salidas de diferentes simulaciones como entradas en modelos de optimización multiobjetivo para establecer las combinaciones de factores y las estrategias de producción que proporcionan el mejor compromiso entre los diferentes recursos de acuerdo a los objetivos fijados por el ganadero. Sin embargo otros autores (Woodward et al., 2008) consideran que utilizar los modelos de simulación para buscar la explotación “óptima” podría ser inapropiado dada la complejidad que supone contemplar los múltiples puntos de vista de los diferentes actores y la naturaleza dinámica de los problemas de los sistemas agrarios.

Dada la enorme cantidad de combinaciones de valores que existen para las variables de manejo de una explotación, la búsqueda mediante los clásicos métodos exhaustivos no parece ser la más viable (Hart et al., 1998). La clave del éxito en la búsqueda estaría en comparar las soluciones tratando de encontrar la solución de compromiso entre aspectos tales como: los ingresos percibidos por los productos, los costes que implican los insumos, la utilización de recursos propios y el requerimiento de mano de obra (Villalba et al., 2010). Para ello, el modelo debería estar integrado en un algoritmo de optimización que pueda identificar la combinación de opciones de manejo que proporcione un mayor rendimiento económico y/o técnico (Mayer et al., 2001) y también, un menor impacto ambiental.

A la hora de escoger que tipo de técnica de optimización utilizar, la computación evolutiva se presenta como una alternativa a los métodos clásicos. En concreto los AAGG han demostrado ser más eficientes en la búsqueda de soluciones óptimas (Mayer et al., 1996; Hart et al., 1998).

En este capítulo se presenta la integración de los módulos de simulación animal en un software diseñado como un modelo de rebaño y su inclusión dentro de un método de

optimización que busca la estrategia más interesante en un escenario dado. Las etapas que se describen son las siguientes:

- a. Diseño del modelo de rebaño
- b. Adaptación del modelo al método de optimización mediante AAGG
- c. Simulación y validación con un rebaño conocido
- d. Optimización de un conjunto de escenarios teóricos

## **4.2 DISEÑO DEL MODELO DE EXPLOTACIÓN**

Tomando como referencia los tres módulos de simulación a nivel del animal (ingestión, partición de nutrientes y reproductivo) y mediante la agregación que permite la programación orientada a objetos, se ha creado un modelo que representa el manejo de un rebaño de ovino lechero. El modelo de simulación, programado en JAVA, se incluye dentro de un sistema de optimización mediante AAGG.

El programa se ha denominado PASTOR (Programa para el ASesoramiento Técnico en producción Ovina y gestión de Recursos)

En el Anexo III se describe el software desarrollado.

### **4.2.1 Integración de los 3 módulos desarrollados**

Los módulos desarrollados en el capítulo anterior de la presente tesis se han integrado para poder simular el animal individual en todos sus aspectos (ingestión, nutrición y reproducción) y a la vez poder simularlo como parte de un lote, al nivel del cual se suele realizar la toma de decisiones de manejo en la explotación ovina.

Se incluyen los recursos disponibles a partir de un módulo que simula la disponibilidad de pasto y forraje conservado en el almacén de una manera simplificada, y un módulo de simulación de los precios de mercado tanto de los insumos (forraje y concentrado) como de los productos (leche y corderos).

El diseño de los flujos e interacciones entre los diferentes componentes del modelo se muestra en la Figura 20.

Los animales que conforman el rebaño se agrupan en lotes en función de su estado fisiológico y de su manejo de alimentación como se muestra en el componente

“Rebaño” de la Figura 20. El paso de un lote a otro es consecuencia de los eventos discretos que suceden a nivel individual, como por ejemplo la concepción o el parto, y de las decisiones de manejo que se toman en el nivel de explotación, como por ejemplo la fecha de realización de la IA o los periodos en los que se divide la lactancia. Algunos de estos eventos ocurren de manera estocástica obedeciendo a una distribución de probabilidad, tal y como se describe en el capítulo 3.4 (Ej. duración de la gestación).

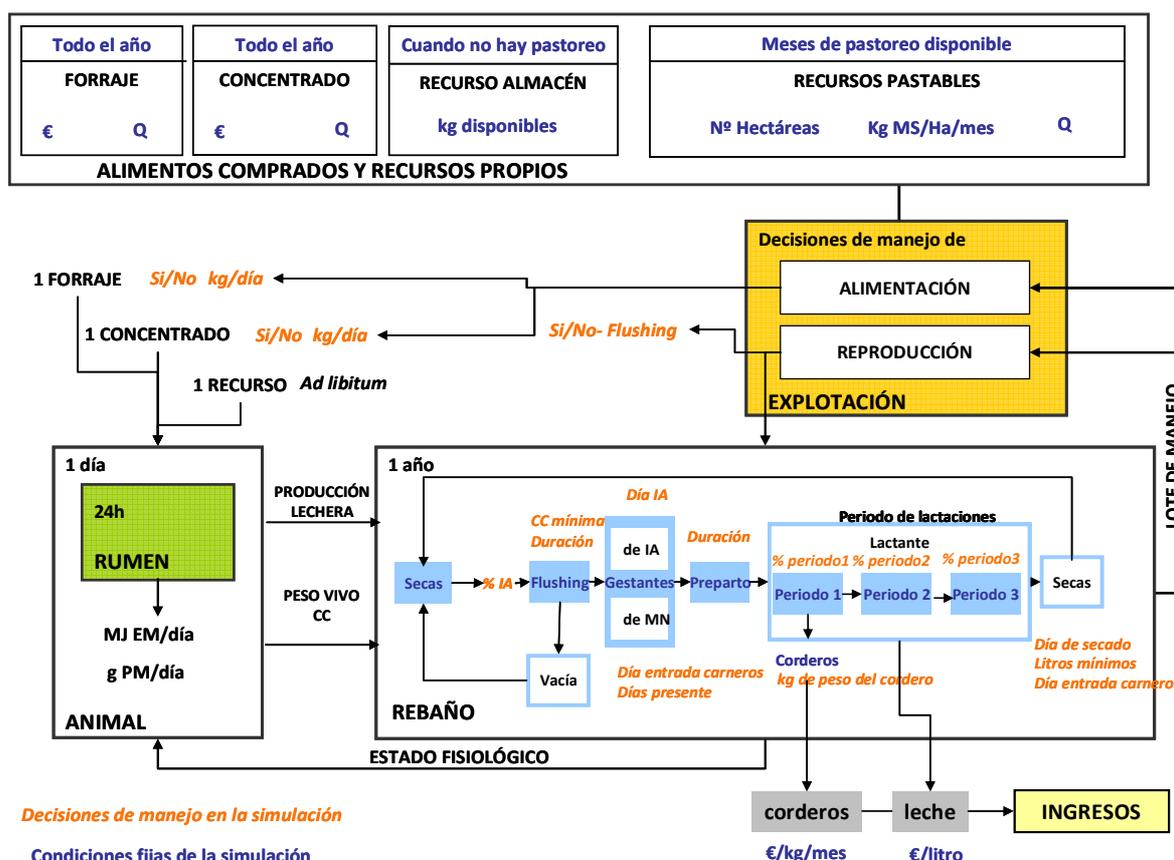


Figura 20.- Diseño del modelo de explotación. Las variables en cursiva corresponden a decisiones de manejo; €: valor económico input o output; Q: Calidad del alimento; IA: Inseminación artificial

En relación al manejo alimenticio se distinguen 7 lotes diferentes:

1. **Mantenimiento:** formado por ovejas que se encuentran secas y que aún no han quedado gestantes.
2. **Flushing:** corresponde a las ovejas que reciben una suplementación alrededor de la IA. En la simulación se decide el criterio de CC que deben de cumplir las ovejas para entrar en este lote.

3. Gestantes: son las ovejas que han quedado preñadas durante las cubriciones.
4. Preparto: son las ovejas que reciben una alimentación suplementaria al final del periodo de gestación. El número de días que dura la alimentación preparto es configurable como variable de manejo.
5. Lactantes 1, 2 y 3: Se establecen tres periodos con el objetivo de adaptar la dieta de las ovejas lactantes al nivel de producción (dieta en periodo 1, 2 y 3 de lactación). Para delimitar la paridera se ha establecido que ésta comienza cuando pare el 10% de las ovejas que están gestantes (si alguna oveja pare antes de este momento recibe la alimentación correspondiente al periodo 1). Tomando esa fecha como fecha inicial, y la fecha de secado como fecha final (en el caso de que haya previsto un secado, si no se toma la próxima fecha de cubriciones), el periodo de lactación se divide en tres bloques según el valor en porcentaje que se asigna a cada uno de esos tres periodos (Figura 21). Los porcentajes y la fecha de secado del rebaño son variables de manejo a configurar en el modelo.

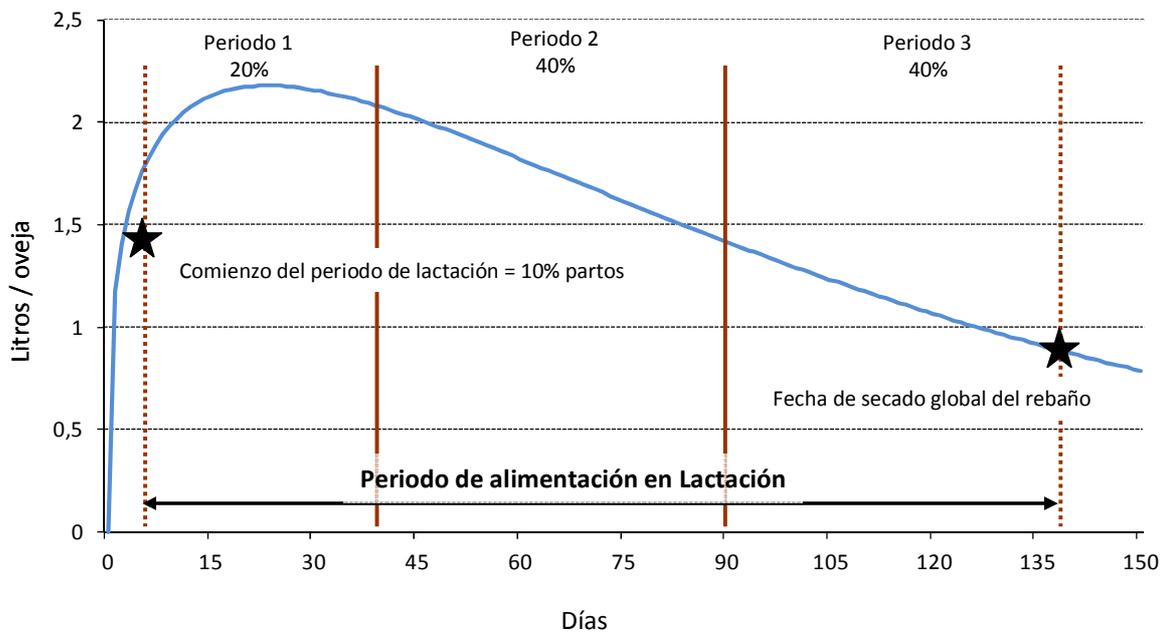


Figura 21.- Ejemplo de configuración de los periodos de alimentación en lactación en función de la duración de la lactación total y de los porcentajes de duración de los periodos 1, 2 y 3.

El modelo diseñado asume un tamaño de rebaño estable, salvo que se produzcan problemas de mortalidad relacionados con carencias nutricionales (se ha asumido que cuando la CC de alguna oveja es menor de 1,1, esa oveja muere).

En la Tabla 21 se muestran todas las variables de manejo de entrada que necesita el modelo. Para realizar una simulación hay que indicar: la ración de forraje y/o concentrado que se aporta a cada uno de los 7 lotes de alimentación posibles; los porcentajes de duración de cada periodo de lactación (1, 2 y 3); el número de días de alimentación preparto y de alimentación en *flushing*; la fecha de IA; el porcentaje de ovejas que se van a inseminar; el día de entrada y salida de los moruecos; si se realiza o no *flushing* antes de la IA; la nota de CC por debajo de la cual una oveja entraría en el lote de *flushing*; el criterio de producción aplicado para el secado individual de las ovejas; el día de secado global del rebaño; el peso de venta de los corderos y la carga ganadera.

Tabla 21.- Variables relacionadas con el manejo

nº	Variable	nº	Variable	nº	Variable
1	Concentrado <i>Flushing</i> (kg)	11	Forraje Lactación_3 (kg)	21	Peso venta cordero (kg)
2	Concentrado Lactancia_1 (kg)	12	Forraje Gestación (kg)	22	Secado (litros mínimos)
3	Concentrado Lactancia_2 (kg)	13	Forraje Mantenimiento (kg)	23	Secado (día)
4	Concentrado Lactancia_3 (kg)	14	Forraje Preparto (kg)	24	Inicio cubriciones (día)
5	Concentrado Gestación (kg)	15	Periodo Lactancia 1 (%)	25	Moruecos presentes (días)
6	Concentrado Mantenimiento (kg)	16	Periodo Lactancia 2 (%)	26	Emplear IA (si/no)
7	Concentrado Preparto (kg)	17	Periodo Lactancia 2 (%)	27	%IA
8	Forraje <i>Flushing</i> (kg)	18	Duración <i>flushing</i> (días)	28	Carga ganadera
9	Forraje Lactación_1 (kg)	19	Duración Preparto (días)		
10	Forraje Lactación_2 (kg)	20	CC mínima para <i>flushing</i>		

#### 4.2.2 Generación de un rebaño con variabilidad individual

Para generar el rebaño inicial se define el número de ovejas y el valor medio y la SD para los siguientes parámetros:

- PV (kg)
- Nota de CC
- Producción potencial en el pico de lactación (l)

De esta manera el programa crea un rebaño en el que cada oveja presenta unas características únicas. El PV, la CC y la producción potencial de cada oveja del rebaño se simula a partir de la media y asignando a cada animal una desviación que se muestrea de

una distribución normal con media 0 y la SD del parámetro simulado. Así, se simula un grado de variabilidad entre animales que será mayor cuanto mayor sea la SD con la que se han definido los parámetros del animal tipo.

#### **4.2.3 Modelización de la alimentación y la utilización de recursos**

El manejo alimentario y de pastos y recursos disponibles se simula de una manera simplificada y adaptada al funcionamiento del módulo de rumen, por el cual después de una cantidad de alimento limitado (concentrado y/o forraje) entra a formar parte de la ración un solo tipo de recurso a libre disposición.

Debido a que el forraje a libre disposición sólo puede ser uno en cada ración diaria, durante los meses del año en los cuales tiene lugar el pastoreo en praderas, este forraje es un pasto, y cuando esto no es posible por razones climáticas, este lugar lo ocupa un forraje conservado (heno o silo de hierba almacenado). La disponibilidad por mes de uno u otro tipo de forraje permite definir distintos escenarios.

La carga ganadera de la explotación se calcula a partir del tamaño del rebaño y del número de ha mediante la función [10].

$$Carga\_ganadera = \frac{n^{\circ}ovejas * 0,15}{Ha} \quad [10]$$

Además se establece la existencia de una cantidad de recurso forrajero (kg de heno o silo) en almacén.

En función del tipo de escenario que se desee configurar se establece en qué meses se realiza pastoreo y en qué meses se utiliza forraje propio almacenado. Asimismo se modifica la calidad, tanto del pasto como del forraje almacenado, y la productividad del pasto disponible (kg MS/ha). Los parámetros de calidad que describen los forrajes son los descritos en el Anexo I. Cada mes del año, la cantidad de pasto disponible, en el caso de ser un mes de pastoreo, vendrá dado por el número de ha de la explotación y la productividad de pasto. Por su parte, el límite de alimento a consumir cada día del mes será el resultado de dividir los kg de pasto disponibles entre el número de días del mes y el número de animales que tiene el rebaño. Si al final del mes el rebaño ha ingerido

menos cantidad de forraje que el disponible en la pradera, el excedente de forraje se transforma en recurso en el almacén. Este recurso se va sumando al que hay previamente en el almacén y durante los meses en los que no hay pastoreo se consume este recurso a libre disposición.

Se ha asumido que los recursos pastables y el recurso en almacén no presentan precio de mercado y por lo tanto se ha considerado que su coste es cero.

### **4.3 ADAPTACIÓN DEL MODELO AL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN BASADO EN ALGORITMOS GENÉTICOS**

#### **4.3.1 Optimización mediante AG**

##### *4.3.1.1 Introducción a la Computación Evolutiva*

Se conoce como Computación Evolutiva (CE) a un conjunto de algoritmos que, inspirados por el proceso de evolución natural de las especies, se aplican en la resolución de problemas de búsqueda y optimización (Goldberg, 1989).

Los orígenes de la CE se sitúan a mediados del siglo XX como resultado del trabajo de Bremermann, Friedberg, Box y otros (Box, 1957; Friedberg, 1958; Friedberg et al., 1959) y hoy en día es fácil encontrar aplicaciones de la CE en muchos dominios. Algunos ejemplos de estos dominios son el diseño industrial (Kordon et al., 2006), el del arte (Chen, 2007) o la agronomía (Wang, 1991; Mayer et al., 1996; Hart et al., 1998; Parsons, 1998).

La CE se plantea como una alternativa a los métodos tradicionales de búsqueda y optimización: métodos numéricos (directos e indirectos), métodos enumerativos y otros métodos estocásticos. Es por este motivo que el interés de la comunidad científica por la CE ha ido en aumento desde su aparición.

Las principales críticas recibidas por la CE están relacionadas con la incapacidad del algoritmo de garantizar la obtención de la mejor solución al problema planteado. La experiencia ha demostrado que este inconveniente no lo es tanto, dado que en la gran

mayoría de las aplicaciones de la CE basta con encontrar una solución satisfactoria que se encuentre dentro de los límites de aceptación definidos.

#### *4.3.1.2 Los Algoritmos Genéticos, un tipo de Algoritmo Evolutivo*

Los Algoritmos Genéticos (AAGG) fueron introducidos por primera vez por John Holland en los años 70 (Holland, 1992) y dados a conocer al gran público gracias a David Goldberg (Goldberg, 1989). Desde entonces han demostrado ser un método robusto y eficiente en la resolución de distintos tipos de problemas (Bäck y Schwefel, 1993; Michalewicz, 1996).

Como todos los algoritmos evolutivos, su funcionamiento se basa en la imitación del proceso de selección natural que permite a las especies adaptarse al medio que las rodea. En la naturaleza, los individuos compiten entre ellos por diferentes recursos necesarios para la supervivencia, como el agua y la comida, y los miembros de una misma especie también compiten por aparearse. De todos ellos, los que tienen más éxito en sobrevivir y aparearse conseguirán un mayor número de descendientes. Esto significa que los genes de los individuos de mayor adaptación al medio serán heredados por un número creciente de individuos en cada generación. Así como la combinación de buenas características de generaciones pasadas puede generar una descendencia altamente adaptada al medio, también es posible que la combinación de genes de individuos bien adaptados genere otra descendencia con peores características. En ese caso, estos individuos tenderán a desaparecer.

Al aplicar el mecanismo de la selección natural en la resolución de un problema, cada solución de dicho problema se considera un individuo con un valor que indica su grado de bondad. Los individuos mejor adaptados, esto es, los que mejores soluciones representan, tienen mayor oportunidad de reproducirse, o cruzarse con otros individuos de la población (de individuos-soluciones) que probablemente representan también buenas soluciones al problema. Así, se genera una descendencia cuyos individuos comparten características de cada uno de los padres. Las nuevas generaciones presentan, por tanto, una proporción mayor de individuos mejor adaptados, y con el paso de las generaciones, permanecen en la población los individuos que aportan mejores

soluciones. Si el AG ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia la solución óptima del problema.

Los AAGG son algoritmos de búsqueda global, los cuales constituyen un método de búsqueda más robusto (encuentra de manera más fiable el óptimo global) que los algoritmos de búsqueda local. Este hecho los hace adecuados para la resolución de problemas donde el espacio de búsqueda es discontinuo, contiene muchos máximos o mínimos locales o presenta regiones para las cuales no hay solución a los valores de entrada (Hart et al., 1998), características que se suelen dar en los modelos de simulación de sistemas agronómicos (Mayer et al., 2001).

#### *4.3.1.3 Características y funcionamiento de los AAGG*

Los AAGG comienzan con una muestra aleatoriamente elegida en el espacio de soluciones, para ir transformándola paso a paso hasta llegar a un estado estacionario en el cual la muestra contiene alguna de las soluciones del problema. Un AG no actúa, en general, directamente sobre el espacio de soluciones, sino sobre una codificación de éste, haciendo interaccionar entre sí y operando sobre las cadenas resultantes de dicha codificación. Esta acción tiene como consecuencia la progresiva transformación del conjunto de elementos evaluados, hasta llegar al estado final. Para ello, los algoritmos genéticos se valen de la acción de los llamados operadores genéticos, tales como reproducción, cruce y mutación, a la que es sometida la población.

#### **4.3.2 Funcionamiento del AG básico o AG canónico**

El funcionamiento de un AG consiste en los siguientes pasos (Figura 22):

1. Inicialización o generación de la población: se parte de una población de  $n$  individuos generados aleatoriamente los cuales representan las posibles soluciones del problema.
2. Evaluación: cada individuo (representado por un cromosoma virtual) se evalúa en relación al total de la población para saber en qué grado es adecuado. Esa evaluación se traduce en un valor llamado "fitness". Su probabilidad de ser seleccionado como individuo progenitor en el futuro será proporcional a su valor "fitness".

3. Criterio de Parada: El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos: ejecutar el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población o haya convergido. Se dice que un AG converge cuando su población está formada por individuos muy cercanos a un punto. Mientras no se cumpla el criterio de parada se hace lo siguiente:

4. Selección de individuos progenitores: dependiendo del valor fitness de un individuo, éste puede ser seleccionado ninguna, una o más de una vez en función de la configuración del operador.

5. Cruce: el operador de cruce o recombinación es el principal operador genético y su función es la de combinar a los individuos progenitores para generar la descendencia. La manera en que combina el código genético de los individuos progenitores es la que determinará el proceso de búsqueda del AG. Un cruce simple sería el que tiene lugar entre dos puntos del cromosoma elegidos al azar.

6. Mutación: consiste en la modificación al azar de parte del cromosoma de los individuos y es el mecanismo que emplean los AAGG para evitar los problemas de convergencia prematura. El problema de la convergencia prematura se manifiesta cuando no existe suficiente diversidad genética y el proceso de búsqueda se estanca en un área muy reducida del espacio de búsqueda. La mutación permite encontrar nuevas regiones del espacio de soluciones, que de otro modo serían inaccesibles.

7. Búsqueda Local: la búsqueda global que se realiza por medio de los operadores genéticos tradicionales del algoritmo genético es, en ocasiones, complementada con un operador que se encarga de realizar búsquedas en áreas restringidas del espacio de búsqueda: el operador de búsqueda local. El proceso de búsqueda en zonas concretas del espacio de búsqueda se conoce como explotación, en contraposición al término empleado para referirse al proceso de búsqueda en todo el espacio de búsqueda: exploración.

8. Reemplazo: consiste en reemplazar los descendientes en la nueva generación. La población total que formará parte de la segunda generación será del mismo tamaño ya que los peores individuos son eliminados de la población. En algunas configuraciones se impide la existencia de individuos repetidos (mismo genotipo) a la hora de reemplazar la población.

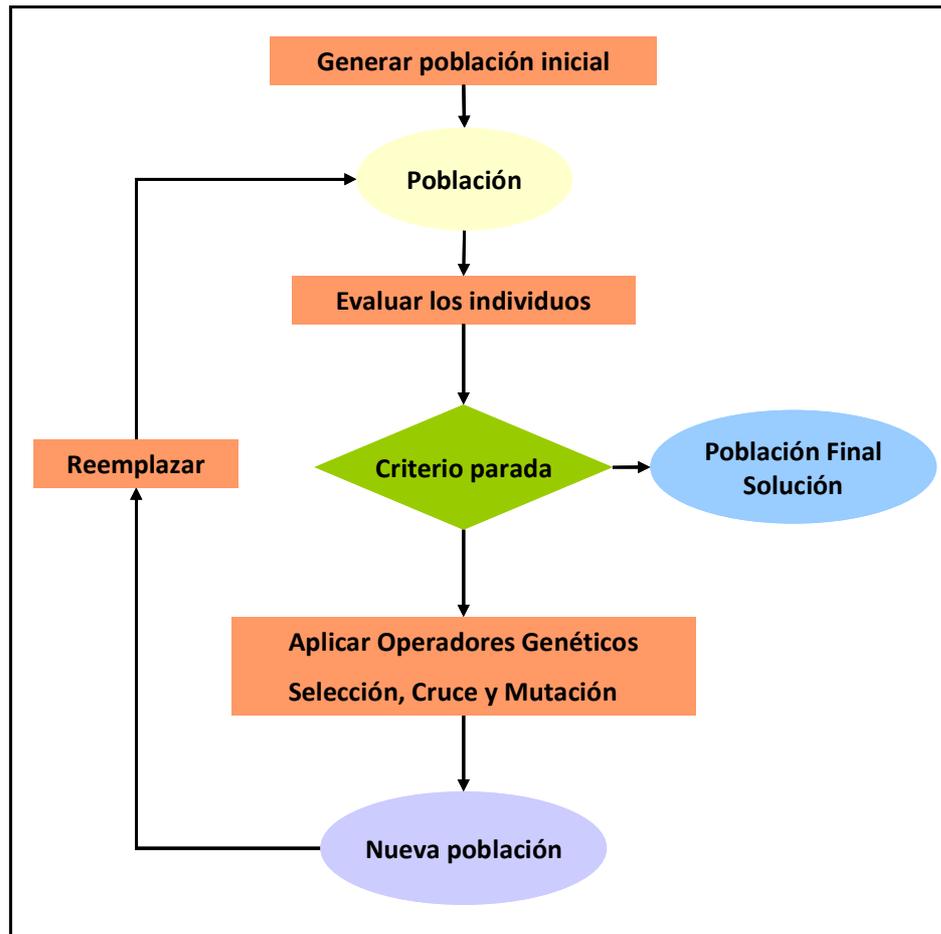


Figura 22.- Esquema general de funcionamiento de los AAG.

### 4.3.3 Implementación del AG en el simulador PASTOR

#### 4.3.3.1 Codificación del problema

En este caso el problema a resolver consiste en encontrar la mejor estrategia de manejo alimenticio y reproductivo dentro de un escenario conformado por el tipo de rebaño, la disponibilidad de recursos y los precios del mercado.

Dado que la estrategia de manejo se puede describir a partir de las entradas del modelo, el manejo buscado será representado por un conjunto de las mismas. Por lo tanto los individuos del AG o cromosomas son el resultado de la codificación en representación real de las 23 variables de manejo que se muestran en la Tabla 22.

El AG busca valores reales para cada una de esas variables entre el valor máximo y el mínimo indicado. Son posibles tantos valores como exprese la resolución de la variable. La precisión de una variable vendrá dada como (máximo – mínimo)/resolución. Al acotar la resolución de las variables se consigue reducir el espacio de búsqueda.

Tabla 22.- Variables que forman parte de la codificación de cada individuo del AG, valores máximos y mínimos que puede tomar la variable y resolución.

Variable	Resolución <sup>1</sup>	Mínimo	Máximo
Concentrado <i>Flushing</i> (kg)	10	0	0,5
Concentrado Lactancia_1 (kg)	20	0	1
Concentrado Lactancia_2 (kg)	20	0	1
Concentrado Lactancia_3 (kg)	20	0	1
Concentrado Gestación (kg)	10	0	0,5
Concentrado Mantenimiento (kg)	10	0	0,5
Concentrado Parto (kg)	10	0	0,5
Forraje <i>Flushing</i> (kg)	20	0	1
Forraje Lactación_1 (kg)	50	0	2,5
Forraje Lactación_2 (kg)	50	0	2,5
Forraje Lactación_3 (kg)	50	0	2,5
Forraje Gestación (kg)	40	0	2
Forraje Mantenimiento (kg)	40	0	2
Forraje Parto (kg)	40	0	2
Periodo Lactancia 1 (%)	20	0	1
Periodo Lactancia 2 (%)	20	0	1
Periodo Lactancia 3 (%)	20	0	1
Parto (días)	61	30	90
Emplear IA (si o no)	2	0	1
Inicio Cubriciones (día)	216	150	365
Moruecos presentes (días)	216	1	215
Secado (litros)	20	0	1,1

1 Resolución: Número de valores entre el mínimo y el máximo que puede tomar la variable.

#### 4.3.3.2 Evaluación del grado de adecuación del individuo

Para cada individuo o solución propuesta, la simulación del rebaño genera una serie de salidas con las que se evalúa el grado de “fitness” o aptitud. Las variables que se han tenido en cuenta a la hora de evaluar la aptitud de cada solución se presentan en la Tabla 23.

La sobrealimentación en términos de EM y/o de PM con respecto a las necesidades de la oveja se multiplican por sendos factores de conversión para dotar a esas unidades de un valor económico. La fórmula que se emplea para esta transformación es la de tomar un alimento modelo (en el caso de la energía la cebada y en el caso de la proteína la soja) que sirva de factor de conversión de los MJ de energía [11] o gramos de proteína [12] excedentarios, en kg de alimento. Una vez obtenido el resultado en kg, éste se multiplica por el factor de ponderación que transforma todas las unidades a €.

Tabla 23.- Variables que forman parte de la función *fitness* y factor de ponderación

Variable	Objetivo	Unidades	Unidades AG (factor de ponderación)
Ingresos por venta de leche	maximizar	€	*1
Ingresos por venta de corderos	maximizar	€	*1
Gastos de forraje	minimizar	€	*1
Gastos de concentrado	minimizar	€	*1
Gastos de inseminaciones	minimizar	€	*1
Exceso de PM	minimizar	mg proteína	0,001
Exceso de EM	minimizar	MJ energía	0,0153
Muertes	minimizar	Oveja	100

$$PesoEnergía = \left( \frac{1MJ}{13,05MJ / kgCebada} \right) * 0,2€ / kgCebada = 0,0153 \quad [11]$$

$$Peso Pr oteína = \left( \frac{1g Pr oteína}{400g / kgSoja} \right) * 0,4€ / kgSoja = 0,001 \quad [12]$$

Para ponderar el valor de una oveja adulta muerta se ha tomado un valor medio de 100 €.

Ponderando cada variable por su factor de conversión y teniendo en cuenta si la variable representa un efecto positivo (i.e. eurosCorderos) o negativo (i.e. eurosConcentrado) se calcula el valor *fitness* de cada solución [13]. El AG busca los individuos con valores *fitness* más altos.

$$\begin{aligned}
 \text{Fitness} = & \text{eurosCorderos} * \text{peso\_eurosCorderos} \\
 & + \text{eurosLeche} * \text{peso\_eurosLeche} - \text{eurosForraje} * \text{peso\_eurosForraje} - \\
 & \text{eurosConcentrado} * \text{peso\_eurosConcentrado} - \text{excesoPr oteína} * \text{peso\_excesoPr oteína} - \\
 & \text{excesoEnergía} * \text{peso\_excesoEnergía} - \text{Inse min aciones} * \text{peso\_Inse min aciones} - \\
 & \text{Muertes} * \text{peso\_Muertes}
 \end{aligned}$$

[13]

#### 4.3.3.3 Configuración del optimizador y operadores genéticos

El operador de cruce empleado es una adaptación a valores reales del operador basado en un punto, el cual está definido originalmente para valores binarios. Este operador de cruce toma dos individuos progenitores, selecciona un punto de corte al azar en sus cromosomas, e intercambia las subcadenas generadas dando lugar a dos individuos descendientes. Existe un valor de probabilidad de cruce, que normalmente toma el valor de 1, que determina si el cruce será realizado o no.

En cuanto al operador de selección empleado, se trata del conocido como método de la ruleta. Este método escoge a los individuos con una probabilidad proporcional a su *fitness*  $f_i$ , siendo esa probabilidad  $f_i / f_T$  con  $f_T$  la suma de los *fitness* de los individuos de la población. Dado que este operador de selección se ha empleado en combinación con el operador de cruce basado en un punto, el número de individuos progenitores a seleccionar es normalmente 2.

Las mutaciones son realizadas empleando un operador que se define mediante dos valores de probabilidad: uno que determina si el individuo ha de ser mutado, y otro que determina si un gen en concreto ha de ser mutado. De producirse la mutación, ésta se realiza de forma aleatoria entre los valores posibles para un gen.

El operador de búsqueda local realiza pequeñas modificaciones aleatorias en los genes de los individuos (existe un factor que determina el porcentaje de cambio máximo admitido para cada gen en tanto por uno) y presenta dos posibles modos de funcionamiento: *impaciente* o *perezoso*. En modo de funcionamiento *impaciente*, tras cada cambio en un gen, el individuo vuelve a ser evaluado. En modo de funcionamiento *perezoso* el individuo es evaluado una vez se hayan modificado todos los genes del individuo. En ambos casos, tras la evaluación, si el *fitness* del individuo ha mejorado, el

cambio realizado se fija permanentemente en el cromosoma del individuo. Este proceso se repite tantas iteraciones como indique un parámetro definido para tal fin.

El cálculo del *fitness* de los individuos toma en cuenta el resultado medio de un número configurable de simulaciones de cada individuo a evaluar, éstas se denominan *repeticiones*. Dado que la simulación de un individuo está afectada por eventos estocásticos (éxito de las inseminaciones, abortos, gestaciones, etc.), el hecho de trabajar con valores medios de *fitness*, en lugar de con valores únicos, hace que el proceso de evaluación esté menos condicionado por excepciones que puedan ocurrir en alguna de las simulaciones.

Las condiciones de parada del optimizador empleadas en PASTOR son dos: por número de iteraciones máximas o por estabilidad; esta última condición actúa cuando el valor de *fitness* permanece invariable durante un número determinado de iteraciones (por defecto 500).

#### 4.3.3.4 Variables de configuración del AG

Las variables que hay que configurar antes de lanzar una optimización son las siguientes:

- Natalidad: número de individuos que nacen tras cada cruce.
- Número de individuos que tiene la población.
- Número de padres en cada cruce (normalmente son 2)
- Probabilidad de cruce entre los individuos (normalmente es 1).
- Probabilidad de mutación del gen.
- Probabilidad de mutación del individuo (normalmente es 1).
- Admitir individuos repetidos (si o no).
- Factor de búsqueda local (valor entre 0 y 1)
- Búsqueda local en modo impaciente o perezoso.
- Iteraciones del operador de búsqueda local.
- Iteraciones del AG (número de iteraciones máximo del algoritmo genético).
- Repeticiones (número de evaluaciones de cada individuo con el que calcular el *fitness* medio).

#### **4.4 EVALUACIÓN DEL SOFTWARE PASTOR**

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento de la herramienta diseñada, se ha configurado un *escenario de simulación* con unas características similares a las de una explotación conocida, de la que se cuenta con información con la cual comparar las salidas. Además para comprobar el funcionamiento del optimizador, se han configurado varios *escenarios de optimización* basados en dos explotaciones diferentes y se han optimizado bajo diferentes circunstancias.

##### **4.4.1 Configuración del escenario de simulación**

De cara a realizar una simulación de una explotación conocida, se ha tomado como modelo el rebaño experimental de Neiker.

Dicho rebaño consta de alrededor de 150 ovejas y 50 corderas. Ubicada en una zona con un clima de transición atlántico-mediterráneo, la base territorial comprende 15 ha repartidas entre 5 ha de praderas de cultivo y 10 ha de praderas de pastoreo. El manejo reproductivo se realiza conforme a lo descrito en el apartado “Parametrización de la probabilidad de concepción para la raza Latxa” del capítulo 3.

Tras el parto, las ovejas pasan directamente al ordeño. Durante este periodo se encuentran en estabulación permanente y se mantienen así hasta finales de marzo y en abril comienzan a salir al pasto. El 28 de junio se produce el secado y a partir de ese momento las ovejas permanecen el máximo tiempo posible fuera del establo.

En cuanto al manejo alimenticio, a los animales que entran al ordeño se les suplementa con forrajes y concentrado y a medida que aumenta la ingestión de pasto se van reduciendo estos aportes. En la Tabla 24 se muestra la alimentación que reciben en pesebre los diferentes lotes de animales. Durante los meses en que es posible el pastoreo (de abril a noviembre) a estos aportes hay que añadirle la ingestión en pastoreo.

Con estas características se ha creado en el software PASTOR (Anexo III) un escenario cuya configuración se muestra en la Tabla 25 en el que se simula un rebaño de 100 animales con un peso medio de 65 kg (SD= 3 kg), una CC de 2,5 (SD= 0,2) y un pico de producción potencial de 2,5 l (SD= 0,2 l).

Tabla 24.- Raciones de alimentación ofrecida en pesebre por lotes en el rebaño de Neiker (kg MS/día)

	Concentrado	Alfalfa	Silo Hierba	Silo Maíz	Silo Veza-Avena	Cereal	Paja
Lactantes 1	0,7	0,6	1				
Lactantes 2	0,7	0	0,5				
Lactantes 3	0,5						
Secas*				0,8			0,3
Flushing					0,5	0,3	
Gestantes					0,5		
Preparto	0,2	0,3	0,5	0,5		0,15	

\*sólo mientras están estabuladas, de enero a marzo, el resto del año pastoreo

Tabla 25.- Configuración de las variables de manejo del rebaño

VARIABLE	Valor
Concentrado Flushing (g)	0,3
Concentrado Gestación (g)	0,0
Concentrado Preparto (g)	0,6
Concentrado Lactancia_1 (g)	0,8
Concentrado Lactancia_2 (g)	0,6
Concentrado Lactancia_3 (g)	0,4
Concentrado Mantenimiento (g)	0,0
Forraje Flushing (g)	0,5
Forraje Gestación (g)	0,5
Forraje Preparto (g)	0,3
Forraje Lactación_1 (g)	0,8
Forraje Lactación_2 (g)	0,4
Forraje Lactación_3 (g)	0,0
Forraje Mantenimiento (g)	0,0
Periodo Lactancia 1 (%)	50
Periodo Lactancia 2 (%)	30
Periodo Lactancia 2 (%)	20
Emplear IA	Si
IA (%)	100
Inicio Cubriciones (día)	20-ago
Días moruecos presentes	133
Alimentación Flushing (días)	40
Alimentación preparto (días)	60
Día de secado	28-Jun
Secado (l)	0,18

En la Tabla 26 se presentan los parámetros de calidad de los alimentos utilizados en la simulación así como la cantidad y las características del pasto disponible por mes. La calidad de los alimentos se ha tomado de muestras representativas caracterizadas mediante las analíticas nutricionales habituales así como mediante la TPG. La carga ganadera se establece en 2,75 (tomando como referencia el rebaño real en el que cada

oveja adulta supone 0,15 UGM y cada cordera 0,1 UGM en una superficie de 10 ha). En el almacén se establece una cantidad de silo de hierba no limitante para los 3 años que dura la simulación.

Los alimentos comprados son el concentrado (pienso para ovejas lactantes) y el forraje limitado (alfalfa) (Tabla 26). El precio de los insumos y los productos se muestra en la Tabla 27. Se ha tomado como referencia el precio pagado por los ganaderos en el año en el que se analizaron las muestras de alimento que se utilizan en el modelo (2009). Se tomó el precio del cordero registrado mes a mes en el mercado de Ordizia durante el 2009. El precio medio de la leche se ha considerado constante y con un valor de 1 €/litro.

Tabla 26.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; CCel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas)

Mes	Recurso	kg MS/ha*	% PB	%FND	CCel	PCD	k
Enero	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Febrero	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Marzo	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Abril	Pradera	800	20,6	47,5	0,52	0,26	0,06
Mayo	Pradera	900	20,6	47,5	0,52	0,26	0,06
Junio	Pradera	900	18,7	43,0	0,57	0,25	0,06
Julio	Pradera	500	12,1	58,3	0,42	0,12	0,03
Agosto	Pradera	500	12,1	58,3	0,42	0,12	0,03
Septiembre	Pradera	700	17,7	48,8	0,52	0,18	0,06
Octubre	Pradera	900	18,7	43,0	0,57	0,25	0,06
Noviembre	Pradera	800	16,8	43,9	0,56	0,25	0,06
Diciembre	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Ene-Dic	Alfalfa	-	19,2	40,4	0,6	0,12	0,071
Ene-Dic	Concentrado	-	20,8	22,4	0,78	0,13	0,08

\*: Para los recursos pastables

Tabla 27.- Precios de los insumos y de los productos del modelo

Mes	Cordero (€/kg canal)	Pienso	Forraje	Leche (€/l)
Enero	3,0	0,22	0,16	1
Febrero	3,0	0,22	0,16	1
Marzo	3,2	0,22	0,16	1
Abril	3,0	0,22	0,16	1
Mayo	2,5	0,22	0,16	1
Junio	3,5	0,22	0,16	1
Julio	4,0	0,22	0,16	1
Agosto	4,2	0,22	0,16	1
Septiembre	4,2	0,22	0,16	1
Octubre	4,5	0,22	0,16	1
Noviembre	4,0	0,22	0,16	1
Diciembre	4,5	0,22	0,16	1

#### 4.4.2 Configuración de los escenarios de optimización

Para evaluar la capacidad de optimización del software PASTOR, se han diseñado dos explotaciones diferentes:

- Explotación de costa: basada en explotaciones que presentan un periodo de pastoreo largo debido a su ubicación en zonas de climatología suave a poca altura sobre el nivel del mar.
- Explotación de interior: basada en explotaciones que presentan un periodo de pastoreo más corto debido a su ubicación en zonas de mayor altitud.

En las Tablas 29 y 30 se muestran las características del forraje en almacén y del pasto de los cuales dispone cada explotación tipo. Para los datos de productividad se han tenido en cuenta los trabajos de Ferrer et al. (1990) en la explotación de costa y de Besga (1996) en la explotación de interior. Se ha establecido que la cantidad inicial de silo en almacén de cada explotación sea equivalente a 1 kg por cada día que cada animal pasa en estabulación. Puesto que se simulan 50 animales en cada rebaño la cantidad de silo en el almacén de costa es de 3000 kg y en el almacén de interior de 7500 kg. La carga ganadera es de 2,5 UGM/ha.

Las explotaciones se han simulado en 4 escenarios diferentes (Tabla 28), los cuales son resultado de la modificación de la estrategia de secado (con fecha de secado preestablecida o libre) y los costes de los alimentos (normales o altos).

Tabla 28.- Descripción de los escenarios de optimización

Escenario	Nombre	Secado	Coste de los alimentos
1	E1	libre	Normal
2	E2	10 de julio	Normal
3	E3	libre	+ 40%
4	E4	10 de julio	+ 40%

La estrategia de secado puede consistir en que las ovejas se secan en una fecha preestablecida, que se ha determinado sea el 10 de julio (escenarios 2 y 4) o que el secado no sea forzado y el ordeño cese, bien cuando la producción individual sea menor que un criterio que marca la optimización, o bien cuando tengan lugar las cubriciones (escenarios 1 y 3). El secado fijo simula la decisión de no realizar ordeño durante el verano, muy común entre los ganaderos.

Por otro lado en los escenarios 1 y 2 el precio de los alimentos comprados es el mismo que los que se muestran en la Tabla 27, mientras que en los escenarios 3 y 4 el precio se ha incrementado un 40%.

La combinación de explotación tipo (costa o interior) y escenario (1-4) da lugar a 8 pruebas diferentes. La optimización de cada una de las 8 pruebas se repite 3 veces, lo cual da lugar a 24 optimizaciones en total.

Tabla 29.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados en la explotación de costa. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; C Cel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas)

Mes	Recurso	kg MS/ha	% PB	%FND	CCel	PCD	k
Enero	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Febrero	Pradera	800	12,7	42,2	0,58	0,28	0,07
Marzo	Pradera	900	16,8	43,9	0,56	0,25	0,06
Abril	Pradera	1000	18,7	43,0	0,57	0,25	0,06
Mayo	Pradera	1200	20,6	47,5	0,52	0,26	0,06
Junio	Pradera	1300	21,5	39,2	0,61	0,17	0,07
Julio	Pradera	1200	18,0	49,0	0,52	0,18	0,06
Agosto	Pradera	1100	18,0	49,0	0,52	0,18	0,06
Septiembre	Pradera	900	21,5	39,2	0,61	0,17	0,07
Octubre	Pradera	800	16,8	43,9	0,56	0,25	0,06
Noviembre	Pradera	800	12,7	42,2	0,58	0,28	0,07
Diciembre	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Ene-Dic	Alfalfa	-	19,2	40,4	0,60	0,12	0,07
Ene-Dic	Concentrado	-	20,8	22,4	0,78	0,13	0,08

Tabla 30.- Descripción del tipo de recurso disponible por mes, y de los alimentos comprados en la explotación de interior. (PB: Proteína bruta; FND: Fibra neutro detergente; C Cel: Contenido Celular (g/g); PCD: Pared celular digestible (g/g); k: tasa de producción de gas)

Mes	Recurso	kg MS/ha	% PB	%FND	CCel	PCD	k
Enero	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Febrero	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Marzo	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Abril	Pradera	800	18,7	43,0	0,57	0,25	0,06
Mayo	Pradera	900	20,6	47,5	0,52	0,26	0,06
Junio	Pradera	900	21,5	39,2	0,61	0,17	0,07
Julio	Pradera	1200	18,0	49,0	0,52	0,18	0,06
Agosto	Pradera	1100	18,0	49,0	0,52	0,18	0,06
Septiembre	Pradera	1000	21,5	39,2	0,61	0,17	0,07
Octubre	Pradera	900	16,8	43,9	0,56	0,25	0,06
Noviembre	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Diciembre	Silo	-	16,0	49,1	0,51	0,13	0,03
Ene-Dic	Alfalfa	-	19,2	40,4	0,6	0,12	0,071
Ene-Dic	Concentrado	-	20,8	22,4	0,78	0,13	0,08

La simulación de cada explotación en cada escenarios tiene una duración de 3 años ( $numDiasSimulación = 1094$ ) y para la optimización se tienen en cuenta los resultados económicos del último año.

Aunque el software permite generar un rebaño único en cada proyecto se ha decidido utilizar en todas las pruebas el mismo rebaño, evitando que las diferencias entre las salidas provengan de diferencias iniciales entre rebaños a nivel de producción lechera, peso o CC. El rebaño inicial consiste en 50 ovejas secas con un peso medio de 60 kg (SD= 3,0 kg), una CC de 2,5 (SD= 0,5) y un pico de producción potencial de 2 l (SD= 0,5 l).

#### 4.4.2.1 Duración de la optimización

El tiempo de trabajo necesario para realizar una optimización es variable en función de la configuración del AG (número de iteraciones y de repeticiones por iteración), la duración de la simulación (días) y el tamaño de rebaño. En la Tabla 31 se muestra la estimación del tiempo de optimización en función de los citados condicionantes utilizando un ordenador con un procesador Intel® Core™ i5 3.10 Mhz y una memoria RAM de 4.0 Gb. Estos valores son estimaciones, ya que la duración exacta de una optimización varía cada vez que ésta se repite, puesto que el AG puede necesitar diferente número de iteraciones para llegar a la solución óptima.

Tabla 31.- Predicción del tiempo de trabajo en diferentes escenarios

Configuración AG		Simulación	Tamaño de rebaño		
Iteraciones	Repeticiones	días	10 ovejas	50 ovejas	100 ovejas
1000	10	1095	8'	42'	1 h
1000	10	2190	17'	1 h	3 h
1000	50	1095	42'	3 h	7 h
1000	50	2190	1 h	7 h	14 h
1000	100	1095	1 h	7 h	14 h
1000	100	2190	3 h	14 h	28 h
2000	10	1095	17'	1 h	3 h
2000	10	2190	33'	3 h	6 h
2000	50	1095	1 h	7 h	14 h
2000	50	2190	3 h	14 h	28 h
2000	100	1095	3 h	14 h	28 h
2000	100	2190	6 h	28 h	56 h

#### 4.4.2.2 Configuración de las variables de búsqueda y optimización

Dado que las condiciones de la optimización determinan la duración de la misma, se han hecho pruebas para evaluar cuál es la configuración que permite obtener una solución aceptable en el menor tiempo. Para realizar las pruebas se ha buscado únicamente una variable (realización o no de IA), ya que el objetivo, en esta ocasión, no es tanto encontrar el mejor manejo, sino analizar cómo de variable es la solución encontrada. Como criterio de variabilidad se ha tomado la SD del MEc medio de la solución que encuentra el AG.

En cuanto al número de iteraciones se ha comprobado que con 20 ovejas y 1095 años el AG converge a una solución óptima entre la iteración 1000 y 1500, por lo cual se decide tomar 2000 como cifra de iteraciones mínimas que debe realizar el AG en caso de no haber convergido antes.

En cuanto a las repeticiones que se han de tener en cuenta para realizar la media con la que se evalúa el individuo, en la Tabla 32 se observa el resultado de MEc, SD, error estándar de la media (eem) y coeficiente de variación (CV) con 10, 50 y 100 repeticiones. Cabe destacar que aparentemente el balance mejora al reducir el número de repeticiones. Sin embargo teniendo en cuenta que el manejo es el mismo, esta mejoría se debe a que, con pocas repeticiones por solución, el efecto que varios resultados excepcionalmente buenos tienen es mucho mayor que con 50 ó 100 repeticiones por solución.

Por otro lado, al aumentar el tamaño del rebaño (Tabla 32), el CV disminuye en mayor medida que al aumentar el número de repeticiones. La duración de la simulación por su parte, añade variabilidad a las soluciones, encontrándose un CV mayor en simulaciones de mayor duración (número de días, Tabla 32).

A partir de lo observado se concluye que con 2000 iteraciones, 50 repeticiones, 1095 días y 100 ovejas se alcanzaría la mejor configuración en cuanto a homogeneidad de la solución. Sin embargo, la duración de la optimización sería de 14 horas (Tabla 31) frente a 7 horas que tardaría con la misma configuración y un rebaño de la mitad de tamaño. Por esta razón se decide realizar las optimizaciones con 50 ovejas y asumir un CV de 2,4% en las soluciones encontradas. En la Tabla 33 se muestran todas las variables de configuración del AG.

Tabla 32.- Resultado de 3 optimizaciones en función del valor de diferentes parámetros de la optimización

		<b>MEc (€/oveja)</b>	<b>SD</b>	<b>CV (%)</b>	<b>eem</b>
<b>Repeticiones (1 iteración, 20 ovejas y 1095 días)</b>	<b>10</b>	403,2	23,7	5,9	7,5
	<b>50</b>	398,9	20,0	5,3	3,0
	<b>100</b>	397,5	18,6	4,7	1,9
<b>Ovejas (2000 iteraciones, 50 repeticiones, 1095 días)</b>	<b>20</b>	399	21,0	5,3	3,0
	<b>50</b>	391	9,4	2,4	1,3
	<b>100</b>	401	5,5	1,4	0,8
<b>Días (2000 iteraciones, 50 repeticiones, 20 ovejas)</b>	<b>1095</b>	398,9	21,0	5,3	3,0
	<b>2190</b>	448,4	23,6	5,3	3,3
	<b>3185</b>	403,4	38,7	9,6	5,5

Tabla 33.- Variables de configuración en las optimizaciones

<b>Variable de configuración</b>	<b>valor</b>
<b>Natalidad</b>	4
<b>Número de individuos</b>	60
<b>Número de padres</b>	2
<b>Probabilidad de cruce</b>	1
<b>Probabilidad de mutación del gen</b>	0,05
<b>Probabilidad de mutación del individuo</b>	1
<b>Individuos repetidos</b>	Si
<b>Factor de búsqueda local</b>	0,1
<b>Modo <i>impaciente o perezoso</i></b>	<i>perezoso</i>
<b>Iteraciones del operador de búsqueda local</b>	0
<b>Iteraciones del AG</b>	2000
<b>Repeticiones</b>	50

#### **4.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN CON DATOS REALES**

En la Figura 23 se observa el número de partos que hay cada semana del año durante el tercer año de simulación. Esta gráfica permite observar en qué momento del año se produce el pico de partos y, por lo tanto, saber cuándo tiene lugar el momento de mayores necesidades de alimentación y mano de obra. En este caso, en las cuatro primeras semanas desde que comienzan los partos se produce el 75% de los partos totales, lo cual indica que es una paridera concentrada.

Los resultados obtenidos coinciden con el tipo de paridera habitual que tiene lugar en el rebaño de Neiker, donde los partos comienzan alrededor de la tercera semana de enero y el 80% de los partos suceden durante los primeros 30 días de paridera.

En cuanto a la fertilidad y prolificidad media observadas, éstas fueron de 93% y 1,27 corderos nacidos por oveja parida respectivamente.

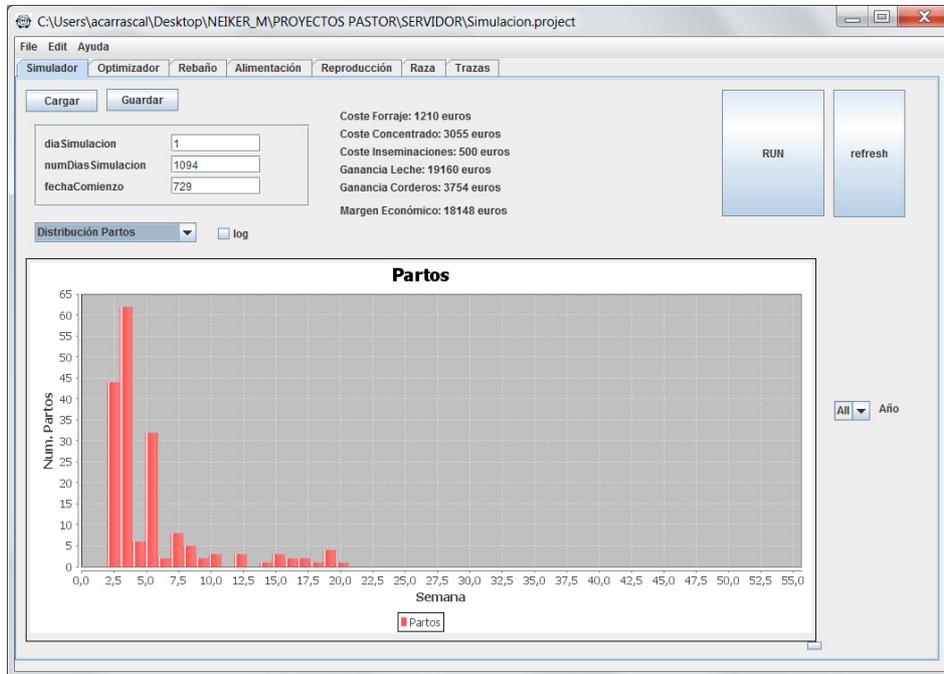


Figura 23.- Distribución de partos del rebaño simulado durante el tercer año de simulación

En la Figura 24 se muestran los valores medio de evolución de la CC, el peso, la producción lechera y la ingestión (kg MS/día) junto con los datos reales tomados del rebaño experimental de Arkaute.

En términos generales, se observa que los resultados de las simulaciones con relación a los tres parámetros analizados (peso, CC y producción lechera) reflejan de manera aceptable las tendencias o evoluciones observadas a partir de los datos reales.

La CC simulada presenta un valor medio máximo de 2,75 antes de que comiencen los partos, y a partir de ese momento experimenta un ligero descenso durante el pico de lactación (0,25 puntos) hasta el mes de abril, que es cuando más cantidad de pasto disponible hay.

De abril a julio el modelo simula una tendencia creciente de la CC hasta un valor de 2,63. A partir de este momento la CC baja bruscamente debido a la peor calidad y disponibilidad del pasto, el cual no permite por sí solo satisfacer las necesidades de mantenimiento de los animales, a pesar de que en ese momento las ovejas se encuentran secas. La bajada de la CC se ve atenuada alrededor del 1 de agosto gracias a la dieta de

*flushing* que reciben las ovejas que presentan una CC menor de 2,5 puntos. A partir de la IA, gracias a la suplementación de concentrado que se realiza durante la gestación y a la mejor calidad y disponibilidad del pasto de los meses de septiembre y octubre, la CC del rebaño aumenta durante la gestación.

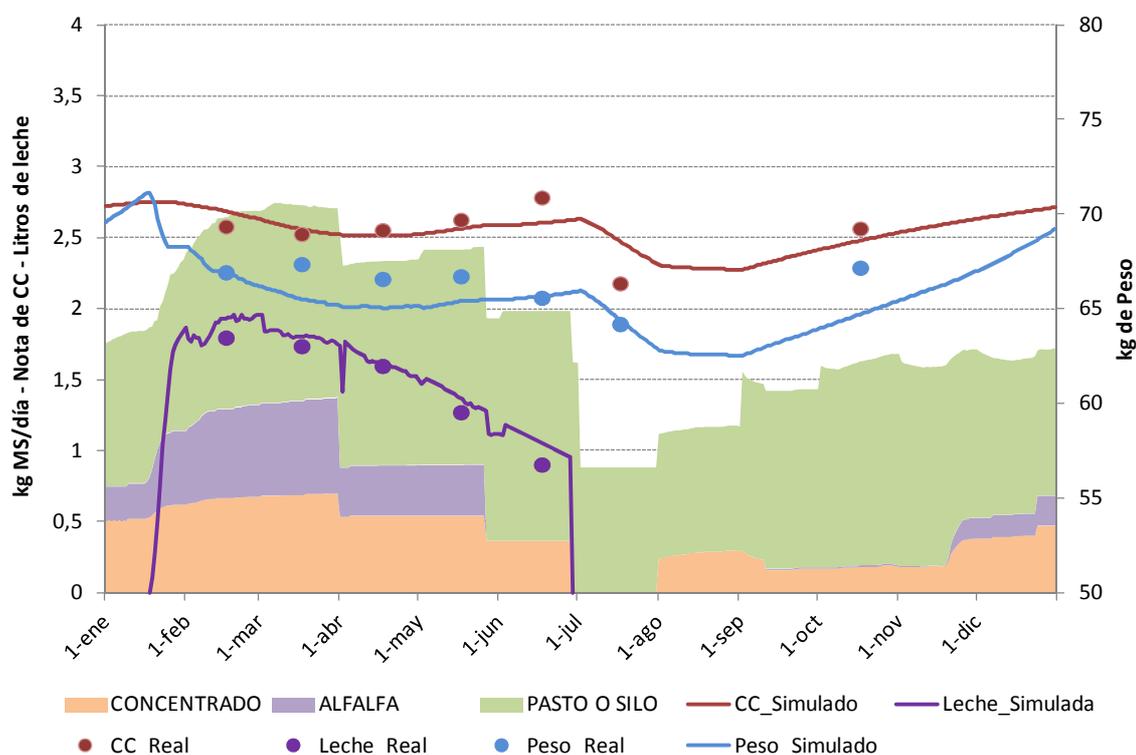


Figura 24.- Resultados de simulación: evolución media de la CC, el peso, la producción lechera y la Ingestión de MS como suma de la ingestión de concentrado, alfalfa y pradera o silo de hierba. Resultados reales: media de la CC, el peso y la producción lechera observados durante 6 años en el rebaño de Neiker

El peso simulado sigue una evolución paralela a la de la CC, aunque en este caso se añade el peso del cordero y los anejos, motivo por el cual se observa una bajada de peso durante la paridera más pronunciada que la de la CC, de 71 kg que presentan antes de la paridera a 65 kg que presentan en plena lactación.

La producción de leche simulada presenta la curva habitual, con una mayor producción en el pico, y se observa también que los periodos de alimentación en lactación se adaptan bien a la producción lechera media. Sin embargo, el rebaño no alcanza el valor potencial de 2,5 litros en el pico.

Además de los datos medios, en las Figuras 44-46 del Anexo III pueden observarse las evoluciones de la CC, el peso y la producción de cada una de las 100 ovejas del rebaño

En la Figura 46 se observa que algunas ovejas paren cuando ya está avanzado el periodo de alimentación 1, o incluso en el periodo 2 y 3, y que esas ovejas no pueden expresar todo su potencial debido a que su pico de producción se produce cuando la dieta está diseñada para cubrir las necesidades de mitad o final de lactación.

En cuanto a la evolución individual de la CC, durante el primer año de simulación hasta que tienen lugar los primeros partos, todas las ovejas del rebaño, pese a ser distintas en CC y peso, presentan una evolución paralela (Figura 44). Pero la diferencia que muestran entre ellas en la fecha de parto y en la dieta aportada, hace que algunas tengan que movilizar más reservas que otras y durante el primer periodo de lactación se comienzan a observar simultáneamente ovejas que ganan CC y otras que pierden.

En cuanto a la comparación de estas salidas con los datos reales del rebaño experimental de Neiker, en la Figura 24 se muestran los valores medios controlados durante un periodo de 6 años (2007-2012). Las estimaciones en dichos puntos presentan una desviación media con respecto a los datos reales de 1,42 kg en peso (c.v.=2%), 0,14 puntos en CC (c.v.=6%) y 0,10 litros en leche (c.v.=7%). Estos resultados se consideran satisfactorios teniendo en cuenta que el rebaño simulado guarda algunas diferencias con el rebaño real (composición de la dieta, disponibilidad de praderas del rebaño real variable), y que lo que se pretende evaluar es el comportamiento general más que la predicción exacta, para lo cual se han realizado previamente las validaciones de los módulos que integran el modelo.

En definitiva, como resultado de las simulaciones realizadas se puede concluir que el programa diseñado permite simular las tendencias o evoluciones de los tres parámetros (peso, CC y producción lechera) de manera aceptable, así como la distribución de la paridera y la ingestión en cada periodo, por lo que podría utilizarse para experimentar con manejos alternativos y como herramienta de asesoramiento.

En el Anexo III se muestran todas las salidas gráficas correspondientes a la simulación realizada.

#### 4.6 RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN

Para realizar las 24 pruebas se han necesitado 8 días de computación. Cada una de las optimizaciones ha tardado aproximadamente 8 horas en encontrar una solución optimizada (1 hora más de lo estimado). Cabe destacar que en todas las pruebas realizadas el AG convergió antes de las 2000 iteraciones.

En la Tabla 34 se muestra la descripción estadística de las tres variables que caracterizan a las 50 ovejas que resultaron al generar el rebaño inicial con el que se realizan las pruebas de optimización.

Tabla 34.- Descripción estadística de la producción potencial en el pico de lactación, el peso y la condición corporal inicial de las 50 ovejas del rebaño

	<b>Pico de lactación (l)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>CC</b>
<b>Media</b>	1,99	59,78	2,39
<b>Mediana</b>	2,02	59,85	2,38
<b>SD</b>	0,46	2,80	0,45
<b>Rango</b>	2,34	11,83	1,86
<b>Mínimo</b>	0,75	55,41	1,46
<b>Máximo</b>	3,09	67,24	3,33

##### 4.6.1 Soluciones encontradas

En la Tabla 35 se muestran las variables de manejo correspondientes a las soluciones encontradas por el AG para cada prueba y en la Tabla 36 los resultados técnico-económicos que se obtienen al aplicar dichas soluciones. Los valores se expresan como €/oveja/año para simplificar la interpretación de los mismos.

En cuanto a las soluciones o manejos encontrados, lo primero que destaca es que el manejo reproductivo varía en función del escenario. Tanto en E1 como en E3 (los escenarios donde no hay restricción en la fecha de secado), las cubriciones comienzan a finales de agosto en la explotación de costa y aproximadamente un mes después en la de interior (Tabla 35). Cuando se fija el secado el 10 de julio (E2 y E4) el AG encuentra soluciones en las que la fecha de IA tiene lugar alrededor de la segunda mitad de junio en ambas explotaciones. Esto supone un adelanto del inicio de cubriciones de entre 2-2,5 meses en los rebaños de costa, y más de 3,5 meses en los de interior, comparando E1-E3 con E2-E4.

Como resultado de lo anterior, se observan diferencias en la fecha de inicio del periodo de lactación y en la duración de la campaña de ordeño. En el escenario E1, el inicio de los partos tiene lugar más temprano en el caso del rebaño de costa (26 de enero) que en el de interior (2 de marzo). Lo mismo ocurre en el escenario E3, y en ambos casos (E1 y E3) parece que se trata de una estrategia orientada a producir leche a partir de pasto. En los escenarios E2 y E4, los partos comienzan en noviembre (Tabla 36) y en ambos casos la diferencia en el inicio entre explotaciones de costa e interior no es tan marcada como en los escenarios en los que no se fija el secado. En cuanto a la campaña de ordeño, ésta tiene una duración aproximada de 212 días en los escenarios con fecha de secado abierta, en los que la lactación se prolonga hasta la siguiente fecha de cubriciones, y en los escenarios donde se seca el 10 de julio ésta dura aproximadamente 20 días más. En ambos escenarios, la duración de la campaña de ordeño se puede considerar elevada, y es similar a la encontrada en los rebaños de tipo dispersos caracterizados por (Ruiz, 2000), que con campañas de entre 217 y 238 días son los que presentan periodos de ordeño más largos.

La diferencia de manejo en función del escenario y del tipo de explotación se ve reflejada en la cantidad de alimento comprado que se emplea en cada solución. En la Figura 25 se observa que la explotación de costa, con mayor disponibilidad de recursos pastables, presenta una menor cantidad de alimentación comprada en comparación con la de interior (en cualquiera de los escenarios), y en ambas son necesarias mayores cantidades de alimento cuando las cubriciones comienzan antes (E2 y E4) ya que esto hace que aumenten la duración del periodo de estabulación así como las necesidades durante el invierno, momento en el que comienzan los partos. Estos resultados coinciden con lo observado por Oregui (1997) entre rebaños trasterminantes, en los cuales se vio que las necesidades de suplementación son mayores en los rebaños en los que el desfase entre partos y el crecimiento primaveral de la hierba es mayor; ya sea por un adelanto de los primeros, o por el retraso del segundo debido a su localización en zonas de climatología más adversa.

Las cantidades de forraje y concentrado están en general muy ajustadas (Figura 25 y Tabla 35) sobre todo en el caso del concentrado, para el cual se encuentran valores de entre 9 y 67 kg/oveja/año (Figura 25). Estos resultados son inferiores a los que presentan

las explotaciones de ovino lechero de raza Latxa. En las explotaciones de la CAPV, el consumo mínimo estimado está por encima del máximo encontrado en las optimizaciones, con valores entre 74 y 108 kg/oveja/año en las explotaciones que venden leche y entre 90 y 152 kg/oveja/año en las explotaciones que venden queso (Lursail, 2013). Las explotaciones de Navarra por su parte presentan valores de consumo medio aún mayores, llegando hasta los 162kg/oveja/año (ITG Ganadero, 2009).

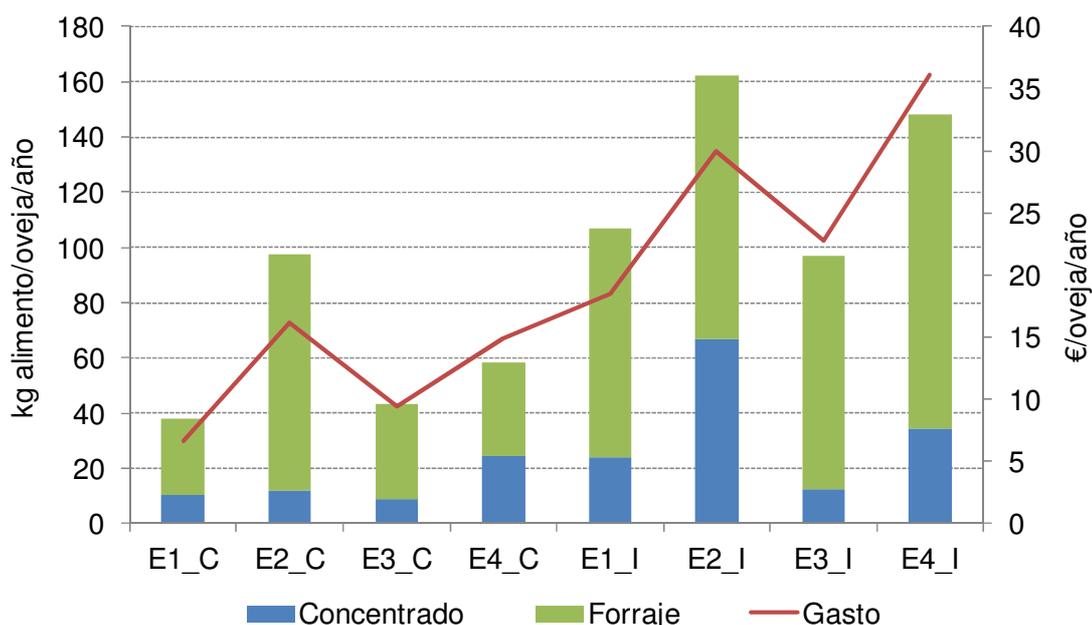


Figura 25.- Gasto y kg de alimento comprado en los escenarios E1-E4 en las explotaciones de costa (C) e interior (I)

Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

La gran diferencia en el consumo de concentrado encontrada al comparar las explotaciones reales con las soluciones optimizadas podría deberse en primer lugar a una sobreestimación de la producción forrajera de las praderas disponibles. Pero también cabe contemplar otros factores relacionados con la toma de decisiones que no están incluidos en el modelo de optimización, como por ejemplo la gestión de la mano de obra que supone el pastoreo o las interacciones entre climatología y producción y disponibilidad de forraje. Estos factores estarían relacionados con un mayor consumo en pesebre en determinados momentos (periodos de mayor demanda de trabajo en el establo, como la paridera o el pico de producción de leche del rebaño, épocas de climatología adversa, etc.) y con una disminución del aprovechamiento de las praderas. A

pesar de las limitaciones del modelo a la hora de reflejar la realidad de las explotaciones, la diferencia encontrada es tan grande, que indica que podría existir en las mismas cierto margen de reducción del consumo de concentrado.

En este sentido, Jouven y Baumont (2008) sugieren que puede haber una tendencia en algunos modelos a subestimar el uso de concentrados y sobreestimar la producción cuando se comparan con resultados de explotaciones reales. Entre las causas de este comportamiento observado en los modelos se apuntan diversos factores: i) la asunción de condiciones reproductivas y sanitarias óptimas, ii) los errores de predicción de los modelos biológicos, iii) la dificultad de llevar a cabo una aplicación estricta de las recomendaciones de alimentación en los rebaños reales y iv) la falta de consideración en las optimizaciones de restricciones que en los rebaños reales juegan un importante papel, como la mano de obra.

En cuanto a los aportes de EM y PM, en todos los escenarios simulados estos son superiores a las necesidades estimadas. En la Figura 26 se muestra el porcentaje de sobrealimentación de EM y PM que se ha obtenido en las diferentes pruebas con respecto a los resultados de la prueba del escenario E1 en costa. Se observa que las pruebas de costa presentan una sobrealimentación mayor que las de interior, debido no tanto a la cantidad de alimento comprado sino a la cantidad de forraje disponible en las praderas. Probablemente éste sea el motivo por el cual en los escenarios E2 y E4 el exce-

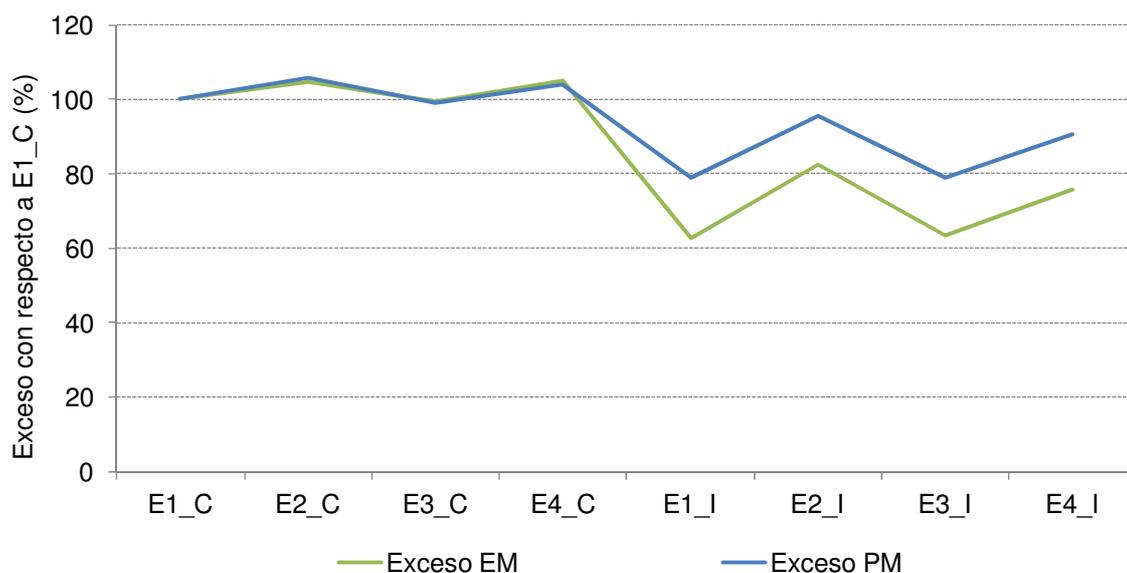


Figura 26.- Resultados de excesos de EM y PM en relación a los valores del E1 en costa Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

so en EM y PM es mayor que en los escenarios E1 y E3 (Figura 26), ya que en estos últimos la época de mayor disponibilidad de forraje de las praderas coincide con el momento de mayor necesidad, y por lo tanto el manejo está más adaptado a los alimentos disponibles y en consecuencia el exceso de EM y PM es menor.

#### *4.6.1.1 Resultados económicos:*

Dentro de las salidas económicas obtenidas se observa un gradiente en los resultados de MEc (Tabla 36), situándose los valores más altos en el rebaño de costa en el escenario E1, y los más bajos en el rebaño de interior en el escenario E4. Este gradiente se explica en primer lugar por las diferentes características de las explotaciones comparadas, ya que la explotación de costa dispone de recursos pastables durante más tiempo y en mayor cantidad que la de interior, lo que permite realizar un menor gasto en alimentación obteniendo sin embargo mayores ingresos por leche vendida. En segundo lugar las diferencias en MEc son debidas a los diferentes escenarios planteados. Los escenarios donde se fija el secado (E2 y E4) presentan un MEc más bajo en relación a los escenarios E1 y E3 debido al gasto en alimentación. Cabe destacar que se observa una mayor diferencia en el MEc entre tipos de explotación (interior o costa) que entre diferentes escenarios (secado y precios).

En cuanto a la importancia de los dos tipos de ingresos considerados, se observa que la leche contribuye en un 80% a los ingresos totales y los corderos suponen el 20% restante. Según datos de los servicios de gestión técnico-económica, el 69% del producto bruto del ovino lechero corresponde a la venta de leche, el 15% a la venta de corderos, otro 15% a las subvenciones y el 1% restante a la venta de animales o forraje (Lana, 2008). Tomando estos datos como referencia y eliminando subvenciones y otros ingresos, la importancia que tienen en los rebaños reales la leche y los corderos sería del 82% el 18% respectivamente, un reparto muy parecido al que se observa en las soluciones optimizadas.

Los ingresos por producción lechera de cada tipo de explotación varían muy poco entre los 4 escenarios, presentando en promedio un valor de 192 €/oveja en costa y de 188 €/oveja en interior. Teniendo en cuenta que el rebaño simulado es siempre el mismo, las diferencias encontradas son debidas a la disponibilidad de alimento y al manejo

aplicado en cada escenario y explotación. En relación a los ingresos por corderos vendidos, en los escenarios E2 y E4 el AG encuentra soluciones en las que la IA tiene lugar al comienzo del verano y los corderos son vendidos en Navidad, alcanzando así un precio más alto que en los escenarios E1 y E3, y compensando el mayor gasto en alimentación que se realiza durante el invierno. El adelanto de los partos supone un aumento en el ingreso percibido por la venta de corderos de entre un 10,7% (E4\_C vs. E3\_C) y un 13,5% (E2\_C vs. E1\_C) en el caso del rebaño de costa, y en torno a un 21% en el rebaño de interior (tanto E4\_I vs. E3\_I como E2\_I vs. E1\_I).

El gasto en IA no presenta diferencia entre pruebas, ya que en todos los casos se encontró como solución hacer IA, y ésta se realiza siempre al 50% del rebaño con un coste de 5 euros por oveja.

Los gastos en forraje y en concentrado constituyen los resultados económicos que más varían entre escenarios y tipo de explotación. Las pruebas de costa muestran un gasto en alimentación de entre 6,7 y 14,8 €/oveja/año, lo cual es un valor muy bajo en relación a los valores que presentan las explotaciones reales, en las cuales el gasto en alimentación comprada alcanza los 56 €/oveja/año (Lana, 2008). En las pruebas de interior, el gasto en alimentación aumenta, aunque sigue siendo un valor bajo en comparación con la realidad (entre 18,5 y 36 €/oveja/año). En cuanto a los escenarios se observa que el gasto aumenta en E2 y E4 con respecto a E1 y E3 en torno a un 60% salvo en el caso de E2\_C vs. E1\_C, donde prácticamente se triplica. Ello es debido a que las épocas de mayores necesidades de los animales (fin de la gestación y comienzo de la lactación) no coinciden con los momentos de mayor disponibilidad de alimento y por lo tanto en esos escenarios de secado fijado se debe hacer un mayor gasto en alimentación.

Tabla 35.- Variables de manejo encontradas en las 3 optimizaciones realizadas para cada prueba (media de 3 repeticiones)

VARIABLE	COSTA E1	COSTA E2	COSTA E3	COSTA E4	INTERIOR E1	INTERIOR E2	INTERIOR E3	INTERIOR E4
Concentrado <i>Flushing</i> (g)	50	233	283	183	67	183	217	167
Concentrado Gestación (g)	0	17	0	0	17	50	0	0
Concentrado Parto (g)	150	100	183	417	317	33	283	183
Concentrado Lactancia_1 (g)	167	467	400	400	367	767	650	583
Concentrado Lactancia_2 (g)	533	33	217	100	350	117	33	467
Concentrado Lactancia_3 (g)	333	283	33	100	600	167	167	33
Concentrado Mantenimiento (g)	17	83	17	50	217	100	200	117
Forraje <i>Flushing</i> (g)	150	33	83	17	200	217	367	183
Forraje Gestación (g)	17	83	17	0	83	317	83	100
Forraje Parto (g)	50	83	33	100	317	200	400	200
Forraje Lactación_1 (g)	850	633	1500	450	667	433	567	933
Forraje Lactación_2 (g)	50	433	267	367	233	217	700	1183
Forraje Lactación_3 (g)	33	317	50	100	417	117	167	83
Forraje Mantenimiento (g)	150	133	150	33	250	400	317	317
Periodo Lactancia 1 (%)	11,2	29,9	1,4	25,6	42,0	45,7	14,2	11,9
Periodo Lactancia 2 (%)	39,1	47,2	38,6	31,5	28,4	42,4	37,2	37,9
Periodo Lactancia 3 (%)	49,7	22,9	60,0	42,9	29,6	11,9	48,6	50,2
Emplear IA	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Inicio Cubriciones (día)	26-Ago	13-Jun	23-Ago	26-Jun	30-Sep	19-Jun	8-Oct	22-Jun
Alimentación parto (días)	44	57	60	38	60	67	51	44
Secado (l)	0,18	0,20	0,17	0,17	0,28	0,29	0,20	0,07

Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

Tabla 36.-Resultados técnico económicos de las 3 optimizaciones realizadas para cada prueba (para calcular la media y SD de las 3 soluciones, cada una se ha simulado 50 veces)

	COSTA E1		COSTA E2		COSTA E3		COSTA E4		INTERIOR E1		INTERIOR E2		INTERIOR E3		INTERIOR E4	
RESULTADO	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD
<b>Margen Económico (€)</b>	230,8	8,75	225,1	9,22	228,2	8,66	220,9	11,73	208,7	8,84	206,8	10,46	205,7	10,8	202,2	8,69
<b>Ingresos Leche (€)</b>	195,0	6,82	192,9	7,21	193,5	6,98	186,8	9,48	187,5	7,04	188,3	8,32	188,5	8,02	189,4	8,13
<b>Ingresos Corderos (€)</b>	44,9	4,73	51,0	5,57	46,5	6,24	51,5	6,58	42,1	2,87	51,0	5,36	42,5	2,76	51,4	5,41
<b>Coste Forraje (€)</b>	4,4	1,06	13,6	1,93	6,7	2,59	7,4	4,03	13,2	2,74	15,4	1,26	18,8	3,70	25,5	3,44
<b>Coste Concentrado (€)</b>	2,3	2,60	2,6	1,39	2,7	2,89	7,4	4,55	5,3	1,85	14,6	1,44	4,0	1,57	10,5	4,48
<b>Coste Inseminaciones (€)</b>	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0	2,5	0,0
<b>Fertilidad (%)</b>	94,7	0,03	95,5	0,03	94,5	0,03	94,8	0,04	93,4	0,04	95,7	0,03	93,2	0,04	95,8	0,03
<b>Prolificidad</b>	1,39	0,07	1,36	0,08	1,38	0,08	1,37	0,08	1,37	0,08	1,34	0,08	1,38	0,08	1,36	0,07
<b>Inicio partos (aprox.)</b>	26-Ene		13-Nov		23-Ene		26-Nov		02-Mar		19-Nov		10-Mar		22-Nov	

Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

#### 4.6.1.2 Resultados reproductivos

Los resultados medios obtenidos presentan pocas diferencias entre optimizaciones, encontrándose una fertilidad y prolificidad promedio de 95% y 1,37 respectivamente. Estas cifras son superiores a los valores encontrados en ovejas adultas de raza Latxa de rebaños comerciales, con valores de fertilidad de entre 77 y 88% y de prolificidad de entre 1,22 y 1,29 (CONFELAC, 2012). Sin embargo, al tratarse de optimizaciones, cabría esperar una mejoría con respecto a los valores reales, ya que en todos los resultados se realiza *flushing* antes de la IA. Por tanto, teniendo esto último en cuenta, y que además existen valores máximos registrados de fertilidad y prolificidad de 92% y 1,35 respectivamente (Ruiz, 2000) en ovejas adultas, los rendimientos reproductivos obtenidos se consideran razonables.

En cuanto a la distribución de los partos, los escenarios E1 y E3 presentan una evolución similar (Figura 27). Las cubriciones tienen una duración aproximada de entre 6 y 7 meses en ambos escenarios y en los dos tipos de explotación, y los partos muestran una distribución de tipo concentrada donde el 80% de los mismos ocurren en las primeras 7 semanas, situándose el pico de partos a finales del mes de febrero y prolongándose la paridera hasta el mes de mayo. Como resultado, la lactación tiende a coincidir con los meses de primavera e inicio de verano hasta el momento en el que vuelve a tener lugar la IA.

Este tipo de estrategia encontrada en los escenarios E1 y E3, coincide con lo reportado para el sistema de la oveja Latxa, el cual se caracteriza porque trata de hacer coincidir el periodo de partos y lactación con la época de mayor oferta de hierba en las praderas de valle (Ruiz et al., 2008). La distribución de la paridera que presenta es similar a la de los rebaños de tipo concentrado descritas por Ruiz (2000). Como se cita en el apartado 1.1.8 de la Introducción de la presente tesis, se han tipificado hasta 4 tipologías de rebaño, las cuales se relacionan, entre otros factores, con la ubicación y localización geográfica de los rebaños (costa o interior). Así, los sistemas ubicados en zonas de interior o de montaña, tienden a ser más estacionales e inician la paridera en torno a mediados de enero, es decir 72 días más tarde que los sistemas ubicados en la costa (Ruiz, 2000).

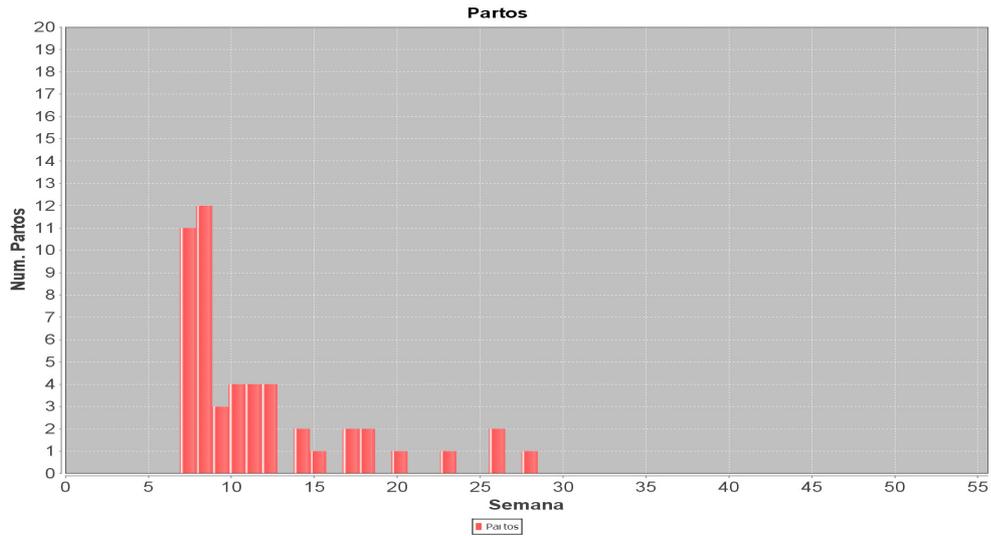


Figura 27.- Ejemplo de la distribución de partos encontrada en una optimización de la explotación de costa con secado libre y costes altos (E3\_C)

En este sentido, entre las soluciones optimizadas sí se observa un inicio más temprano de los partos en las explotaciones de costa, que en promedio comienzan 1 mes antes que en las de interior. Sin embargo son los distintos escenarios de secado los que dan lugar a una mayor diferencia en el inicio de los partos, observándose en promedio una diferencia de 86 días entre el inicio de los partos en los escenarios E1 y E3 frente a E2 y E4. En estos últimos el primer pico de partos se sitúa entre noviembre y diciembre en ambas explotaciones (Figura 28) y la lactación dura hasta el 10 de julio, día en el que se ha fijado el secado. La distribución de los partos en comparación con E1 y E3 es diferente, de tipo más disperso, y se observan dos picos de partos correspondientes a las cubriciones de IA y a las cubriciones de los retornos en celo, respectivamente. Estos escenarios muestran un comportamiento similar al de las explotaciones de tipo disperso descritas por Ruiz (2000), en las cuales el adelantamiento de los partos implica un aumento de la longitud de la paridera. De hecho, en estos escenarios se necesitan 119 días aproximadamente para alcanzar el 80% de los partos, mostrando un patrón similar al descrito por Ruiz (2000) para los rebaños de tipo disperso (130 días para conseguir el 90% de los partos).

En resumen, se observa que cuando no hay una restricción en la fecha de secado, tiene lugar una paridera de tipo tardío y concentrada, mientras que cuando se incluye una restricción en la fecha de secado la paridera se adelanta y como consecuencia de este

adelantamiento se produce una dispersión de la misma. Esto refleja perfectamente el comportamiento observado en la raza, cuyo carácter estacional dificulta lograr simultáneamente el adelanto de la paridera y el incremento de la concentración de la misma (Ruiz, 2000).

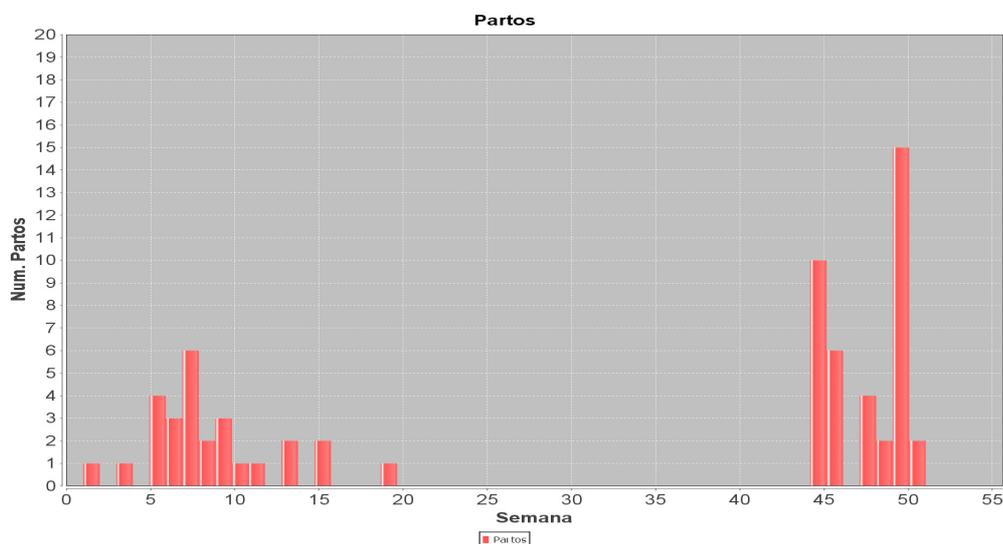


Figura 28.- Ejemplo de la distribución de partos encontrada en una optimización de la explotación de interior con secado el 10 de julio y costes normales (E2\_1)

#### 4.6.1.3 Evolución de la nota de CC, del peso y de la producción lechera:

La evolución anual de la CC es el resultado de la relación entre las necesidades fisiológicas del rebaño y el manejo alimentario o la disponibilidad de recursos. En este sentido, se encuentran diferencias en la evolución de la CC entre las optimizaciones de los escenarios E1 y E3, frente a E2 y E4, ya que los estados fisiológicos que presentan las ovejas, son distintos para la misma época del año. En los escenarios de partos tempranos, las lactaciones comienzan en noviembre y diciembre, cuando el único recurso propio disponible consiste en silo de hierba (de diciembre a enero en la explotación de costa, y de noviembre a marzo en la de interior). Esta menor disponibilidad de alimento durante un periodo en el que las necesidades son máximas hace que sean las reservas corporales las que cubran buena parte de las mismas, a pesar de los aportes de alimentación comprada, que como ya se ha comentado están muy ajustadas en general en todas las soluciones. Por esta razón, en los escenarios de secado forzado (E2 y E4) la CC comienza a

bajar en noviembre (Figura 29 y Figura 30) hasta el mes de abril, alcanzando valores mínimos más bajos que en los escenarios E1 y E3.

Este comportamiento difiere del descrito por Oregui (2001a) para rebaños comerciales. En ellos se observó un incremento de la CC durante el conjunto de la lactación y una movilización de reservas cuantitativamente escasa, y limitada a las 2-3 primeras semanas post-parto.

Los valores mínimos de CC alcanzados en los distintos escenarios, son del orden de 2,2-2,6 en función del escenario y el tipo de explotación (valores más bajos en escenarios de secado forzado y en la explotación de interior), y tienen lugar en abril en los escenarios E2 y E4 para los dos tipos de explotación, en mayo en los escenarios E1 y E3 para la explotación de costa y en junio para la de interior. A partir de este momento y como consecuencia del descenso en la producción lechera, el aumento de la disponibilidad de pasto en primavera y verano (especialmente en la explotación de costa) y la suplementación que tiene lugar en mayor o menor medida en función del tipo de explotación (mayor suplementación en mantenimiento, flushing y gestación en la explotación de interior), la CC aumenta de manera que no llega a comprometer los resultados reproductivos y permite que al final de la gestación todas presenten valores cercanos a 2,75 en los cuatro escenarios.

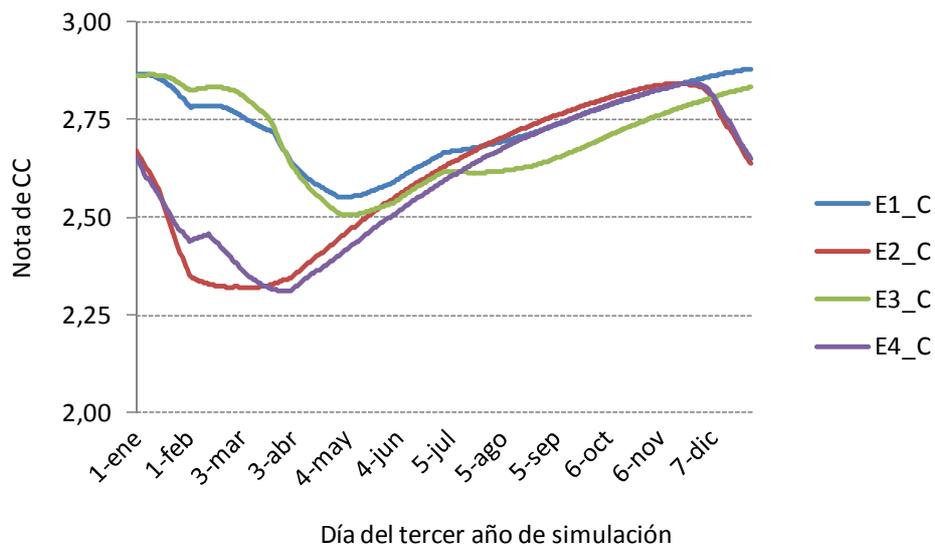


Figura 29.- Evolución de la Nota de CC media de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4  
Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

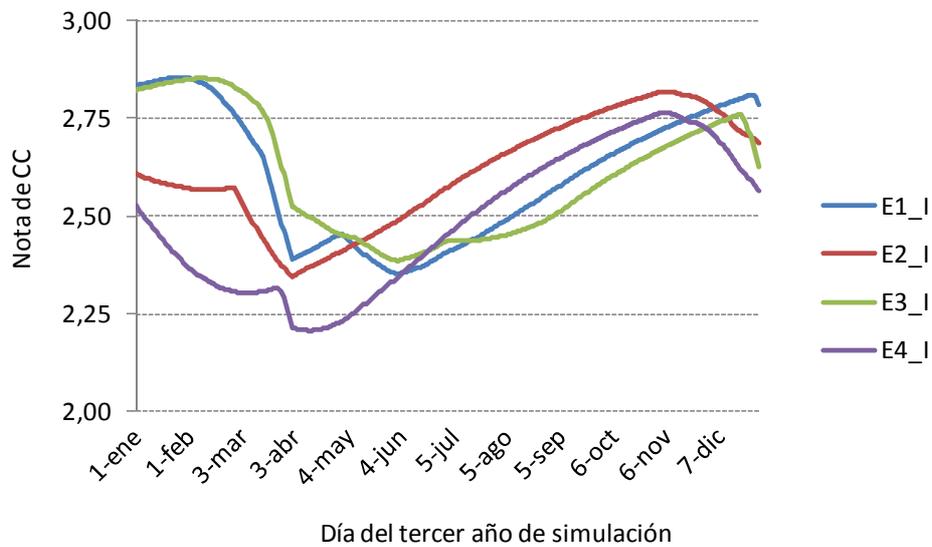


Figura 30.- Evolución de la Nota de CC media de los rebaños de interior simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4  
Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

La evolución del peso a lo largo del año es similar a la de la CC. El aumento de peso durante la gestación hace que se observe una fuerte bajada del PV tras el parto. Tal y como ocurre con la CC, el peso de las ovejas durante la lactación es mayor en los escenarios E1 y E3 frente a E2 y E4, debido a unas condiciones de alimentación más favorables (Figura 31 y Figura 32).

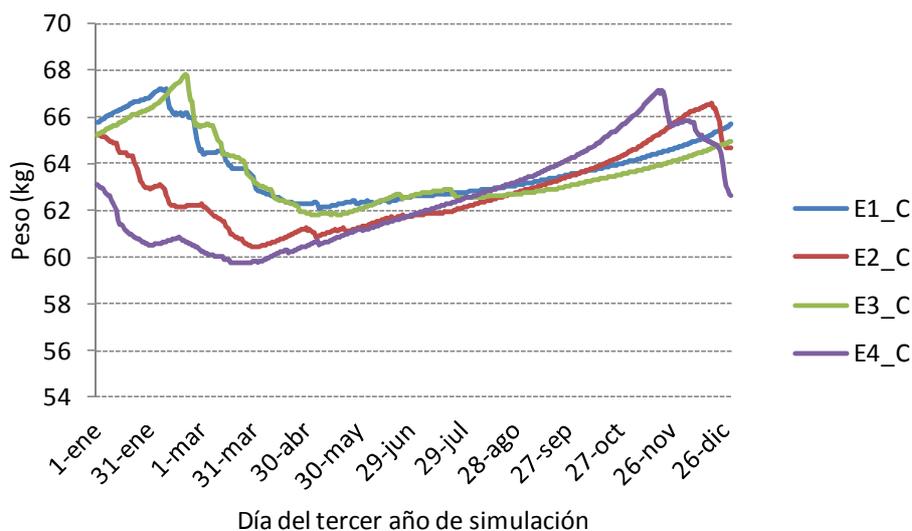


Figura 31.- Evolución del peso medio de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4  
Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

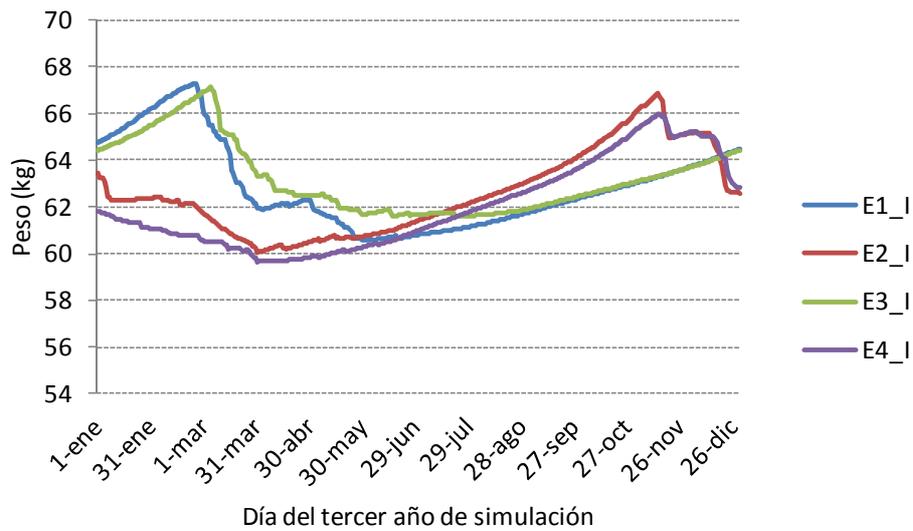


Figura 32.- Evolución del peso medio de los rebaños de interior simulados con el manejo optimizado en los escenarios E1-E4  
Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

En cuanto a la producción lechera (Figuras 33 y 34), las estrategias de alimentación simuladas permiten que la mayoría de las ovejas presenten producciones cercanas al potencial en el pico de producción, excepto en los rebaños de interior en los escenarios E1 y E3. Este hecho se podría explicar por el menor gasto en alimentación comprada observado en dichos escenarios. Sin embargo en la Tabla 36 se observa que su MEc es ligeramente mayor que el de los escenarios E2 y E4. Esto significa que el AG ha seleccionado como manejos óptimos aquellos que sacrifican la producción lechera a favor del ahorro en alimentación, lo cual indica que es capaz de encontrar soluciones de compromiso (*trade-offs*) entre objetivos de producción y costes de alimentación.

Al observar las producciones individuales se aprecia que en los escenarios de partos concentrados (E1 y E3) las ovejas disminuyen la producción al pasar al periodo 2 sobre todo cuando presentan producciones mayores de 2l (Figura 35). Esto ocurre en ambas explotaciones y es debido a la disminución del aporte de forraje en dicho periodo.

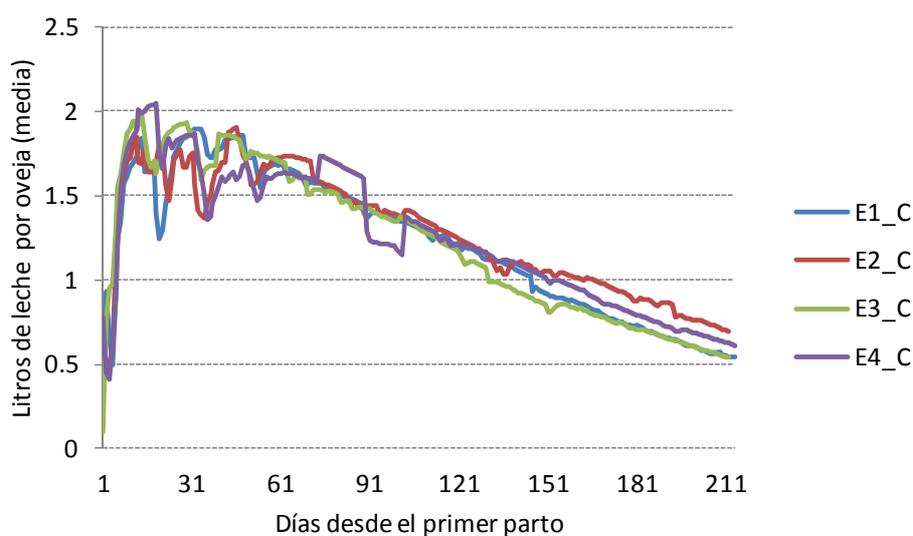


Figura 33.- Producción media de leche a lo largo del periodo de lactación de los rebaños de costa simulados con el manejo optimizado en cada uno de los escenarios considerados (E1-E4) Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

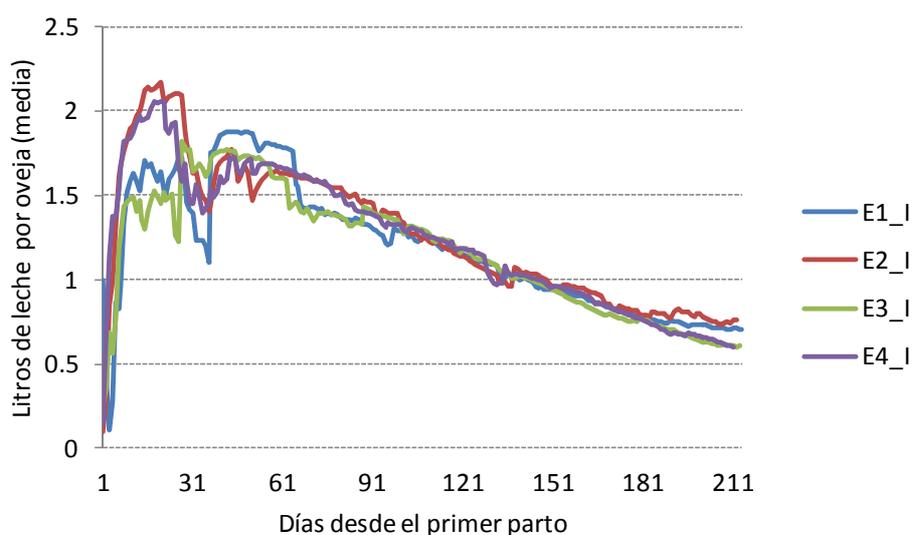


Figura 34.- Producción media de leche a lo largo del periodo de lactación de las pruebas de interior simulados con el manejo optimizado en cada uno de los escenarios considerados (E1-E4) Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

El AG ha seleccionado soluciones en las cuales se suplementa con forraje y concentrado en mayor cantidad durante el periodo en el que tiene lugar el pico de lactación y en el siguiente periodo se hace mayor uso de los pastos disponibles. Sin embargo algunas ovejas que han parido más tarde alcanzan su pico de producción cuando termina el periodo 1 y por lo tanto no son capaces de expresar todo su potencial. En los

escenarios E2 y E4 donde los partos se encuentran más dispersos (Figura 36), la solución para que un mayor número de ovejas puedan alcanzar su potencial es alimentar más a todas y en todos los periodos, esta es una de las razones por las cuales estos escenarios presentan mayores excesos de EM y PM (Figura 26). En los rebaños con este tipo de paridera coexisten animales en estados de lactación muy diferentes y esto hace que la gestión de la alimentación sea más compleja y menos eficiente que en los rebaños de partos concentrados ya que al tratar de racionar en función de las ovejas más productoras, se tiende a sobrealimentar al resto del rebaño (Oregui et al., 2001b).

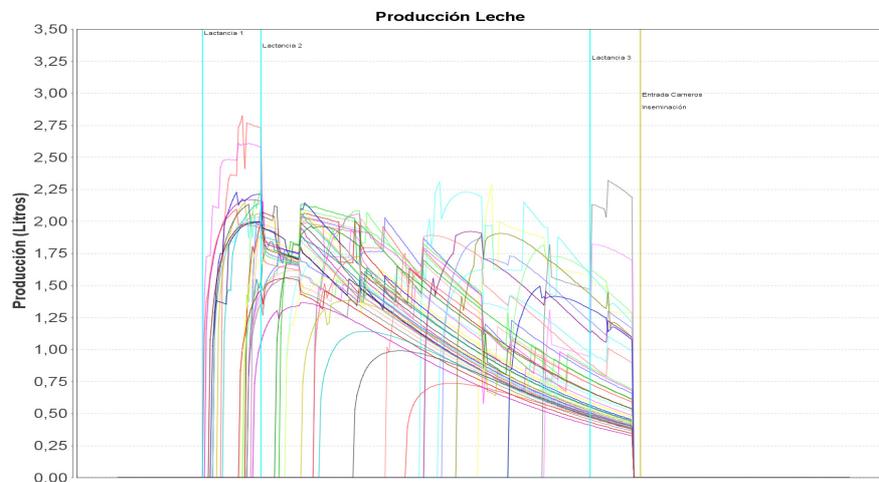


Figura 35.- Producción lechera encontrada en E1\_C



Figura 36.- Producción lechera encontrada en E2\_C

## **4.6.2 Consideraciones metodológicas**

### *4.6.2.1 Efecto del rebaño a optimizar*

Cuando se crea un nuevo rebaño con PASTOR es importante conocer el potencial de producción lechera real que resulta al generar dicho rebaño de forma estocástica a partir de unas características medias. Una pequeña diferencia en el valor de la variable que determina dicho potencial se traduce en importantes diferencias en las salidas económicas. Por lo tanto a la hora de realizar comparaciones entre simulaciones u optimizaciones es importante saber si los rebaños han sido generados de manera independiente y por lo tanto con diferencias entre ellos, o si se trata del mismo rebaño repetido en diferentes simulaciones.

En las optimizaciones realizadas se ha trabajado siempre con el mismo rebaño, es decir con idénticas ovejas de partida (mismo peso, CC y producción potencial). Para observar qué consecuencia tiene el hecho de generar el rebaño de nuevo, se han realizado 6 nuevas optimizaciones de la explotación de costa: 3 en el escenario E1 y otras 3 en el escenario E2. En estas nuevas optimizaciones se ha generado un rebaño que , aunque parte de los mismos parámetros, presenta, por efecto del azar un pico de producción potencial medio de 1,90 en lugar de 1,99 que presentaba el rebaño de las optimizaciones anteriores (Tabla 34).

En la Tabla 37 se muestran las salidas económicas de las simulaciones realizadas con el manejo optimizado para los nuevos rebaños. Como puede observarse la producción lechera es inferior a la de las simulaciones que se muestran en la Tabla 36, e incluso está por debajo de las producciones de las explotaciones de interior (las que presentaban menor producción lechera) optimizadas anteriormente. Esta diferencia de 0,09 litros en la producción lechera en torno al pico de lactación da lugar a diferencias en el MEc de entre un 3,2% y un 6% con respecto a los valores obtenidos en las optimizaciones anteriores.

Esto indica que a la hora de comparar escenarios de precio y disponibilidad de recursos, el efecto de la variabilidad con la que se generan las ovejas del rebaño tiene consecuencias en los ingresos por venta de leche que afectan al MEc tanto como pueden afectar las condiciones (escenarios) de la simulación. Esto se observa con claridad al

comparar el peor resultado del rebaño de costa en las primeras optimizaciones (221,7 €/oveja/año en E4, Tabla 36) con el mejor resultado de las segundas optimizaciones (217,5 €/oveja/año en E1, Tabla 37), siendo el último 4,2 €/oveja/año menor pese a corresponder al escenario que presenta las condiciones de mercado y disponibilidad de recursos más favorable.

Tabla 37.-Resultados económicos de las 3 optimizaciones realizadas para cada escenario con un nuevo rebaño (para calcular la media y SD de las 3 soluciones, cada una se ha simulado 50 veces)

RESULTADO	COSTA E1_R		COSTA E2_R	
	Media	SD	Media	SD
<b>Margen Económico (€)</b>	217,5	7,1	217,9	8,7
<b>Ingresos Leche (€)</b>	186,0	6,0	180,3	6,1
<b>Ingresos Corderos (€)</b>	42,4	1,3	53,2	2,9
<b>Coste Forraje (€)</b>	6,5	2,98	8,6	1,00
<b>Coste Concentrado (€)</b>	1,9	1,65	4,7	1,35
<b>Coste Inseminaciones (€)</b>	2,5	0,0	2,5	0,0

Escenarios Secado libre (E1) y secado 10 julio (E2)

#### 4.6.2.2 Variabilidad de la solución encontrada

Además de considerar cómo afecta la estocasticidad con la que se genera el rebaño a los resultados de simulaciones y optimizaciones, otra cuestión importante es saber si la solución encontrada es efectivamente la mejor, ya que las soluciones optimizadas siempre presentan variabilidad.

En la Figura 37 se muestran todos los valores de MEc de las 24 optimizaciones realizadas (cada una de las tres repeticiones que se realizan de las 8 pruebas con rebaños iguales que se muestran en la Tabla 36). En cada resultado se muestra la media y el eem de 50 simulaciones que se han realizado tras aplicar el manejo optimizado.

Se observa que en algunos casos las tres repeticiones varían considerablemente entre sí o incluso hay resultados de MEc más cercanos entre repeticiones con distinto escenario y explotación que entre las 3 repeticiones de cada prueba. Por ejemplo éste es el caso de las repeticiones E2\_C\_b, E3\_C\_c, y E4\_C\_a.

Cabe destacar que la diferencia entre el mínimo y el máximo MEc encontrados en cada conjunto de 50 simulaciones para cada repetición presenta un valor medio de 40,29 €/oveja/año, lo cual supone el 19% del valor medio de MEc (216,05 €/oveja/año). Esta diferencia es mayor que la diferencia entre el mayor (E1\_C\_c) y el menor (E4\_I\_b) valor

de MEc que se muestran en la Figura 37, e indica la variabilidad que cabría esperar al realizar una simulación de un manejo (optimizado o no).

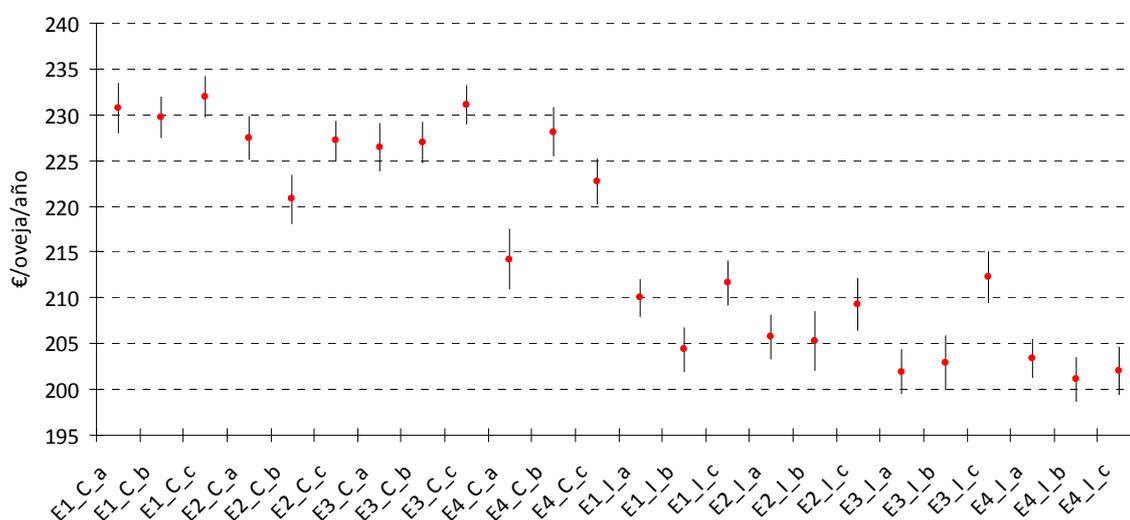


Figura 37.- Media ( $\pm$  eem) del MEc de las 24 pruebas de optimización realizadas (E1-E4 indican escenario; C o I indican explotación de costa o de interior; a, b y c indican cada una de las 3 repeticiones del mismo tipo de prueba)

Escenarios Secado libre (E1 costes normales, E3, costes altos) y secado 10 julio (E2 costes normales, E4, costes altos)

El origen de esta variabilidad podría estar en el azar con el que ocurren algunos eventos reproductivos, los cuales condicionan los ingresos de la explotación. Esto también ocurre en las explotaciones ganaderas, en las cuales los resultados reproductivos obtenidos no son predecibles con exactitud ni exactamente iguales año tras año. Por lo tanto, esta variabilidad hace del modelo una herramienta interesante para analizar, evaluar y cuantificar la sensibilidad del sistema a las fluctuaciones anuales que se pueden producir en los sistemas ganaderos con relación a determinadas variables (incidencia de abortos, mortalidades, etc.).

Cabe suponer pues, que dentro del proceso iterativo seguido por el AG también se haya presentado esta variabilidad al hacer la media con la que evaluar las 50 repeticiones de cada individuo. De hecho, la solución que presentó el AG para cada prueba siempre fue mejor en cuanto a MEc que la media de las 50 simulaciones que se realizan tras aplicar la solución. Esto puede observarse en la Tabla 38 donde se muestran a modo de ejemplo las salidas económicas que encontró el AG en la prueba E1\_C\_a y el resultado medio obtenido para esas variables tras aplicar el manejo en 50 simulaciones. La

diferencia observada entre estos dos valores medios, podría deberse a que el AG escoge siempre manejos que presentan los mejores resultados, entre los cuales están los mejores manejos y también los que tuvieron “buena suerte” en muchas de las 50 repeticiones (un ejemplo de “buena suerte” sería un gran número de simulaciones con fertilidad efectiva cercana a 1). Esto significa que a pesar de haber tomado la decisión de repetir en el AG cada individuo 50 veces, al aplicar la solución del AG se obtienen resultados que si bien entran dentro de la desviación de la solución, no alcanzan valores de MEc tan altos como los que se encontraron al valorar dicha solución.

Dado que la variabilidad encontrada es resultado de la aleatoriedad que presenta el modelo en estudio, una utilidad de dicha variabilidad sería la de realizar análisis de sensibilidad del sistema para buscar soluciones con distinto nivel de aversión al riesgo y analizar el impacto que éste tiene en el manejo (Kingwell, 1994).

Tabla 38.- Media y SD de los resultados económicos obtenidos con el manejo encontrado por el AG en la explotación COSTA, secado libre y costes normales (E1\_Ca) y en 50 simulaciones aplicando el manejo encontrado

Resultados	Solución del AG (media de 50 repeticiones del individuo o manejo seleccionado)		50 simulaciones realizadas tras aplicar la solución propuesta por el AG	
	Media	SD	Media	SD
MEc	234,84	8,10	230,73	9,99
Leche	196,42	6,78	194,02	7,24
Corderos	50,86	2,42	49,06	5,20
Forraje	3,96	0,20	3,93	0,25
Concentrado	5,98	0,54	5,91	0,47
Inseminaciones	2,5	0,0	2,5	0,0

#### 4.6.2.3 Relación entre rendimientos productivos y económicos

Por último, para comprobar en qué grado afectan las características del rebaño y de los resultados reproductivos a los ingresos y gastos se ha realizado un análisis de correlación con datos de 50 nuevas ejecuciones de la solución optimizada de la prueba E1\_C\_a, en las cuales se ha generado un nuevo rebaño en cada ejecución. Los resultados se muestran en la Tabla 39.

Las correlaciones más altas se encuentran entre ingreso por leche y MEc (0,97) y entre la prolificidad y el ingreso por venta de corderos (0,81). También se observa una correlación positiva entre la fertilidad y el MEc y entre la fertilidad y los ingresos por

venta de leche, así como también hay correlación positiva entre el gasto en forraje y el MEc y entre el gasto en forraje y los ingresos por leche. Sin embargo no hay correlación entre la prolificidad y el MEc, mientras que sí la hay entre ingreso por venta de corderos y el MEc, lo que indicaría que tiene más importancia la fertilidad y no la prolificidad en los ingresos por corderos.

Otro factor que presenta una correlación positiva con los ingresos por leche y con el MEc es el pico de producción potencial, mientras que no presenta correlación con los gastos en alimentación (forraje o concentrado). Esto último se debe a que el gasto en alimentación es el mismo independientemente de la producción individual. Por lo tanto, la capacidad que presentan los rebaños generados con mayor potencial para producir más litros con el mismo manejo que los de menor potencial solo podría explicarse con el hecho de que la producción lechera se mantiene en parte gracias al pastoreo.

El gasto en concentrado, el peso y la CC son factores que no están correlacionadas con el resto de factores tenidos en cuenta. En el caso del gasto en concentrado, esta baja correlación se podría explicar por las generalmente bajas cantidades de concentrado que se han encontrado como solución de manejo, e indicaría, que dentro de los manejos optimizados con el modelo, el mayor gasto en suplementación no implica necesariamente unos mayores ingresos, teniendo más relación en estos últimos otros aspectos como el manejo reproductivo o los recursos disponibles.

Tabla 39.- Coeficientes de correlación para las variables de entrada y salida de 50 ejecuciones de un manejo generando un nuevo rebaño en cada una

	Fertilidad	Prolificidad	Forraje	Concentrado	Leche	Corderos	MEc	peso	CC	Pico
<b>Fertilidad</b>	1									
<b>Prolificidad</b>	-0,40**	1								
<b>Forraje</b>	0,52**	0,03	1							
<b>Concentrado</b>	-0,01	-0,02	-0,08	1						
<b>Leche</b>	0,57***	-0,16	0,61***	0,06	1					
<b>Corderos</b>	0,16	0,81***	0,33*	-0,01	0,17	1				
<b>MEc</b>	0,56***	0,06	0,64***	0,05	0,97***	0,42**	1			
<b>peso</b>	-0,14	0,11	-0,03	0,08	-0,26	0,07	-0,23	1		
<b>CC</b>	-0,10	-0,05	-0,01	0,03	-0,02	-0,14	-0,06	-0,15	1	
<b>Pico</b>	0,09	-0,19	0,03	0,16	0,65***	-0,14	0,57***	-0,36*	0,11	1

\*\*\* p<0,001, \*\*p<0,01, \*p<0,05

La correlación positiva encontrada entre el MEc, tanto con la fertilidad como con el pico de producción, confirman lo discutido anteriormente sobre la importancia de las características del rebaño de partida (valor genético y producción potencial) y sobre el efecto de los resultados reproductivos (manejo reproductivo, eventos aleatorios, etc.) en los resultados económicos de la explotación.

#### *4.6.2.4 Limitaciones del programa*

Durante el desarrollo del modelo se han encontrado dificultades que se han salvado gracias a la simplificación y a la adaptación del modelo a las condiciones de manejo con la que se desea validar (ovino lechero de raza Latxa). Por esta razón, a la hora de evaluar su aplicabilidad, se han de tener en cuenta las limitaciones que presenta actualmente el programa PASTOR con respecto al manejo real de una explotación de ovino lechero.

En primer lugar el programa no contempla el crecimiento de las corderas del rebaño, y por lo tanto no se simula la reposición ni las muertes por desvieje. La muerte de la oveja puede tener lugar por una nota de CC extremadamente baja ( $CC = 1$ ), pero dejando a parte esta casuística, el programa considera que el rebaño se mantiene constante tanto en el número de animales como en la edad de los mismos.

En segundo lugar el modelo no permite cubrir ovejas en lactación. Las implicaciones que tendría la lactación sobre los resultados reproductivos de la oveja Latxa no han sido suficientemente estudiados como para ser modelizados y por esa razón el modelo no permite que se solapen esos dos estados fisiológicos.

Además de estas dos limitaciones, hay ciertos aspectos que convendría ampliar o mejorar en el programa para hacer de éste una herramienta de asesoramiento global, de utilidad tanto para investigadores como para ganaderos, técnicos de centros de gestión, administraciones públicas, organismos de gestión del territorio, e incluso diseñadores de políticas. Algunos de estos aspectos son:

- Reducir el tiempo de optimización.
- Permitir el diseño de dietas más complejas.
- Generalizar el módulo de reproducción para poder utilizarlo con sistemas de manejo en los cuales se realicen varios lotes de cubrición.

- Relacionarlo con modelos de crecimiento del pasto y del clima.
- Incluir la mano de obra como un componente más del modelo, que también pudiera ser optimizable.
- Desarrollar un módulo de cálculo de la huella de carbono, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental de las explotaciones ganaderas.
- Agrupar las salidas en forma de indicadores.

#### **4.7 DISCUSIÓN**

El modelo de explotación desarrollado integra de manera satisfactoria el modelo animal de ovino en un software (PASTOR) que permite simular tanto el rebaño como el manejo habitual de una explotación de ovino lechero de raza Latxa. La combinación de este modelo con un algoritmo genético que permite su optimización, proporciona una herramienta flexible para abordar la complejidad de los sistemas ganaderos. Además, según nuestro conocimiento, éste es el primer software diseñado para un sistema ganadero en el que se simula y optimiza mediante algoritmos genéticos un sistema ganadero descrito a nivel de granja.

La posibilidad que ofrece el software para optimizar conjuntamente el manejo de la alimentación, el manejo de la reproducción, y las interacciones entre ambas, difícilmente sería posible con los modelos de programación lineal utilizados habitualmente, y facilita la obtención de soluciones de manejo integrales.

En el caso de la adecuación de la oferta de alimento a las necesidades de los animales, PASTOR permite evaluar soluciones de compromiso entre objetivos de producción y criterios económicos. Un ejemplo de esto se observa en las optimizaciones de la explotación de interior, donde pese a presentar menor producción lechera, los escenarios E1 y E3 son económicamente tan viables o más que los escenarios E2 y E4. Tanto en estos casos como en los de las optimizaciones de la explotación de costa, el método de búsqueda mediante AAGG demuestra que es capaz de adecuar el manejo encontrado a los escenarios planteados en términos de recursos disponibles, condicionantes de mercado y restricciones en el manejo (fecha de secado fija o libre). Por ejemplo, cuando no se fija la fecha de secado del rebaño, el AG selecciona los manejos que implican el inicio de los partos hacia el final del invierno aprovechando así los pastos

de primavera y el inicio del verano durante la lactación. Estos escenarios presentan menor gasto en alimentación comprada y menor exceso de EM y PM que los escenarios en los que la fecha de secado está fijada de antemano. Estos últimos, representan un manejo relativamente frecuente entre los rebaños comerciales y para ellos el AG selecciona manejos que implican un adelantamiento de los partos hacia el final del otoño, de modo que la duración del periodo de ordeño es tan largo o más que en los escenarios de secado libre, y además se consiguen unos mejores precios por la venta de corderos.

Las soluciones encontradas permiten afirmar que bajo las condiciones de manejo y disponibilidad de recursos consideradas, los manejos de los rebaños de costa e interior optimizados con PASTOR permiten obtener mayor MEc cuando las cubriciones se realizan alrededor de septiembre y no se fuerza el secado del rebaño de cara al verano. Sin embargo, el ordeño durante el verano es una práctica poco frecuente en el sistema de ovino lechero de raza Latxa por diferentes circunstancias (fecha de cierre de las queserías, subida a pastos de monte, preparación de animales para la próxima cubrición, etc.)

El verano es una época en la que la producción de pasto en las zonas de valle suele reducirse de manera considerable, y precisamente éste era el motivo principal de la trasterminancia de los rebaños hacia las zonas de pastos comunales ubicados a mayor altitud (Urarte, 1988). En el supuesto del pastoreo en comunales de montaña el coste de la alimentación sería prácticamente nulo, sin embargo habría que considerar otros aspectos relacionados con el manejo general del rebaño, la disponibilidad de infraestructuras de acceso a esas zonas, o para el ordeño y las posibilidades de transformación quesera, pero también la propia disponibilidad de mano de obra y los condicionantes a los que se puede ver sujeto el ganadero o incluso el grupo familiar implicado de forma más o menos directa.

Tal y como señalan distintos autores (Villalba et al., 2010; Sabatier et al., 2012), en los modelos de apoyo a la toma de decisiones es necesario tener en cuenta las implicaciones que los distintos manejos tienen en la mano de obra, ya que esta puede tener un alto coste de oportunidad (García-Martínez et al., 2009). Además la mano de obra está relacionada con aspectos familiares y de calidad de vida que para los ganaderos, pueden ser objetivos tanto o más importantes que el propio rendimiento técnico-económico (García-Martínez et al., 2007). Sin embargo, la mayoría de los modelos

de simulación agroganaderos que incluyen una componente de optimización consideran únicamente el criterio económico a la hora de buscar el manejo más interesante (Gouttenoire et al., 2011).

En nuestro caso, aunque los condicionantes relacionados con la gestión del trabajo y la mano de obra disponible no están incluidos en la simulación, se puede discutir con los resultados obtenidos si la estrategia de ordeño durante el verano (o incluso durante el invierno) es posible dentro del contexto socio-económico de las explotaciones, y sobre todo, si la mejora de los rendimientos productivos compensa el coste adicional, tanto económico como social, de esta práctica.

Además, habría que considerar aspectos relacionados con la calidad de la leche producida, el rendimiento quesero y la problemática relacionada con la transformación. En este sentido, por un lado cabe indicar que las industrias elaboradoras de queso de D.O. Idiazabal cierran habitualmente en verano, lo que supone un condicionante para los rebaños lecheros. Los elaboradores de queso consideran que las condiciones del verano no son las más adecuadas para la transformación, ni en términos ambientales (temperaturas elevadas, baja humedad relativa del aire), ni de composición de leche, dado que normalmente suele presentar un contenido demasiado alto de grasa y proteína. Además se ha observado que los quesos elaborados en invierno presentan una mayor actividad lipolítica, interesante a la hora de desarrollar el gusto típico del queso Idiazabal (Barron et al., 2001). No obstante, los ensayos realizados por Piras et al., (2007) indican el posible interés de producir leche fuera de temporada en los sistemas de Cerdeña, por lo que sería interesante realizar una evaluación similar en el caso de la Latxa.

En el caso de descartar la opción del ordeño en verano, quedarían por valorar las soluciones de los escenarios de secado fijado el 10 de julio, en los cuales los partos se adelantan al mes de noviembre con la consiguiente dispersión del trabajo que conlleva y con unos excesos de nutrientes mayores que los que se obtienen en los escenarios de partos más tardíos.

Este tipo de discusión centrada en los “trade-offs”<sup>2</sup> de las diferentes opciones que se barajan en la toma de decisiones es fundamental si se desea optimizar el manejo de

---

<sup>2</sup> Término utilizado habitualmente en inglés equiparable en este contexto a “relación de compensación” o “coste de oportunidad”

una explotación con objetivos de sostenibilidad, tanto si afectan al pilar medio-ambiental como al económico o social (Ripoll-Bosch et al., 2012). En este sentido, los sistemas basados en recursos naturales, aunque pueden tener un mayor impacto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, desempeñan un importante papel en cuanto a los servicios ecosistémicos que generan, por esta razón, un tipo de trade-off muy interesante en ganadería es el que existe entre el manejo del pastoreo y las consecuencias que éste tiene en el entorno, como por ejemplo su relación con los incendios forestales (Liedloff et al., 2001) o con la conservación de la biodiversidad (Sabatier et al., 2010).

Debido a la existencia de este tipo de relaciones de compromiso, un aspecto importante, tanto a nivel metodológico como para el uso del software PASTOR en un futuro, es el de la optimización multiobjetivo realizada. En el caso de PASTOR, para poder combinar en un único valor de “fitness” los resultados del sistema de producción se han tenido que definir unos factores de ponderación de cada uno de los componentes que forman parte de la función de optimización. Estos factores de ponderación afectan directamente a los resultados de la optimización y pueden ser diferentes para cada uno de los agentes implicados en la toma de decisiones. Existen alternativas para optimizar un sistema mediante AAGG reduciendo al máximo la importancia de los factores de ponderación, o más bien dejando esta ponderación como una decisión final que tomará el usuario a partir de la información proporcionada por el programa de simulación/optimización. Una de ellas es la presentación de resultados en forma de diagrama de Pareto (Groot et al., 2012).

En la Figura 38 se presenta un posible diagrama de Pareto entre dos objetivos: el margen económico y un determinado servicio ecosistémico. La solución “a” sería la óptima con un mayor peso en la componente económica y la “b” la óptima con un mayor peso en la componente ambiental. Así, dentro de las soluciones óptimas que se presentan en la Figura 38, se observa una disminución de 3500 unidades económicas al incrementar 10 unidades (de 5 a 15) el servicio ecosistémico, es decir, al pasar de la solución óptima “a” a la solución óptima “b”. Esta presentación permitiría por un lado que el usuario pueda tomar la decisión en función de sus objetivos y expectativas, y por otro lado, definir y cuantificar la solución de compromiso (trade-off) entre objetivos.

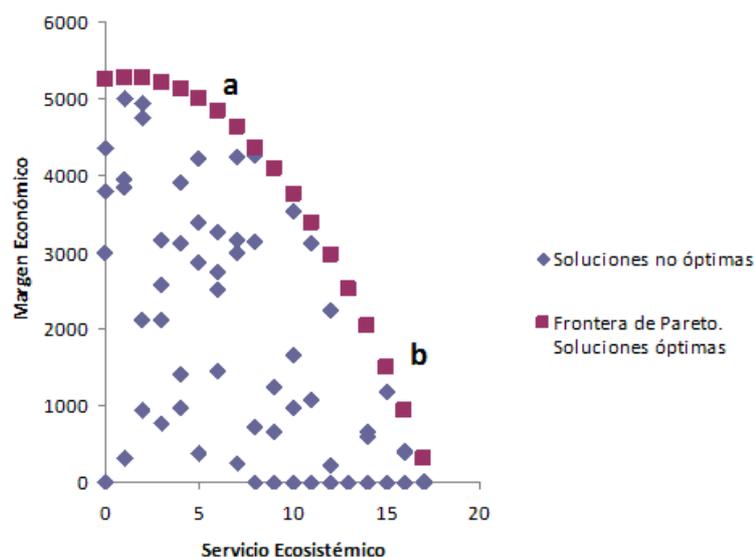


Figura 38.- Posible diagrama de Pareto entre dos objetivos. La solución “a” sería la óptima con un mayor peso económico y la “b” con mayor peso de la componente ambiental.

En cuanto a la simulación a nivel del animal, la posibilidad de inclusión en el modelo de tres tipos de raciones durante la lactación permite simular estrategias dirigidas a adecuar la oferta de alimento a las necesidades del rebaño. Las simulaciones y optimizaciones realizadas demuestran que esta estrategia continúa siendo insuficiente, puesto que un buen número de ovejas no recibe una alimentación adaptada a sus necesidades, sobre todo cuanto más dispersa es la paridera. Esto tiene dos consecuencias principales: la primera es la dificultad de las mejores ovejas del rebaño para expresar el potencial productivo que presentan y la segunda la sobrealimentación del resto.

La estrategia de la sobrealimentación ha demostrado ser interesante con animales que presentan una gran producción potencial, ya que el gasto en alimentación se ve compensado por la producción lechera (Puillet et al., 2010). Sin embargo, en el caso de un rebaño que presenta gran variabilidad individual, se produce la sobrealimentación de los animales menos productivos. En el caso de la Latxa, las simulaciones realizadas por Oregui et al. (Oregui et al., 2001b) encuentran que el nivel de sobrealimentación recomendado para que el rebaño produzca el máximo con respecto a su máxima producción controlada consistiría en una dieta con una concentración energética del 112% de las necesidades medias del rebaño, y este valor asciende al 125% cuando no se tiene en cuenta la ingestión individual de cada oveja (lo cual demuestra el interés de simular los animales

individualmente). Sin embargo, estas estimaciones no contemplan la capacidad de movilización de reservas de los animales. Está estudiado que el nivel máximo de producción, como respuesta a un mayor aporte energético conlleva aumentos de peso (Álvarez y Guada, 1982) y por lo tanto es incompatible con el aprovechamiento de las reservas. Por esta razón, es necesario seguir investigando en el desarrollo de estrategias de manejo alimenticio que no solo incluyan entre sus objetivos la maximización de la producción lechera, sino también el aprovechamiento de la capacidad de movilización de reservas del ovino o la minimización de los excesos de nutrientes.

En el caso de PASTOR, a pesar de que la movilización de reservas no es directamente un objetivo de optimización, el programa ha encontrado en todos los casos soluciones que presentan una disminución de la CC y del peso durante la primera mitad de la lactación (cuando la producción potencial es mayor). Esto indica que dentro de la optimización realizada, es económicamente y energéticamente más “rentable” producir por debajo del máximo, minimizando así el gasto en alimentación gracias a la utilización de las reservas corporales.

En cuanto al problema de la coexistencia en el rebaño en ordeño de animales en distinto momento de lactación y distinta producción potencial, la solución pasaría por plantear dos posibilidades: separar los animales en lotes de manejo en función del nivel de producción o manejar un rebaño más uniforme con una paridera muy concentrada. La primera solución probablemente sería la más eficiente ya que permitiría ajustar el manejo a los recursos disponibles y a los mercados. Sin embargo ello requiere una adecuación de las instalaciones y de la gestión de la mano de obra disponible, lo que a menudo supone una limitación importante. La segunda solución es la más habitual, y en el caso de la oveja Latxa, corresponde a la opción de manejo de muchos ganaderos que presentan parideras concentradas al final del invierno. Teniendo esto en cuenta, cabe señalar que en los escenarios en los que no se ha incluido ninguna restricción en la fecha de secado, el AG ha encontrado como solución óptima el manejo de rebaños con paridera concentrada, que además resultan ser los que menores excesos de EM y PM presentan. Esto indica que se ha alcanzado un nivel de suplementación óptimo en el que la relación entre los costes de alimentación y los ingresos es la más interesante.

El modelo de simulación introduce el concepto de variabilidad mediante dos componentes, la variabilidad simulada entre animales dentro del rebaño y la variabilidad introducida en la evolución individual de cada animal, generada tanto por la estocasticidad con la que se producen algunos eventos (por ejemplo, la probabilidad de concepción) como por el manejo en un mismo lote de animales con diferentes potenciales de producción. La obtención en la simulación y optimización de medidas de variabilidad de la respuesta es una ventaja desde el punto de vista del apoyo en la toma de decisiones ya que nos permite comparar el riesgo de diferentes estrategias, un análisis que sería imposible en el caso de un modelo determinista, donde se simulase la producción de un animal medio. Sin embargo, tan importante como incluir la variabilidad en la simulación, es la capacidad del modelo de simular una variabilidad real, ya que el grado de ésta puede afectar a los resultados de la simulación (Shafer et al., 2007).

En nuestro caso, el primer componente de variabilidad del modelo es la variabilidad entre animales, la cual se implementa utilizando la media y desviación típica de tres parámetros: producción lechera potencial en el pico de lactación, PV y CC. La generación de un rebaño de ovejas utilizando el muestreo de una distribución normal hace que, sobre todo en rebaños pequeños, existan diferencias entre rebaños simulados. Esto se puede interpretar como un rebaño genéticamente mejor o peor.

Por tanto, tiene interés discutir la gran influencia que ejercen las características del rebaño inicial en los resultados obtenidos. Así, se podría afirmar, que en condiciones optimizadas y en los escenarios que se han planteado, tiene más importancia el valor genético de los animales que las estrategias de manejo. El modelo puede servir entonces, como una herramienta para calcular el peso económico que se debería asignar a la mejora genética de los parámetros que definen el rebaño (Conington et al., 2004).

El segundo componente de variabilidad que aparece en las optimizaciones es la variabilidad en las respuestas, especialmente reproductivas. Así, por ejemplo, si un parámetro como la fertilidad tiene un valor medio del 70%, la simulación de un rebaño de 50 ovejas debería hacer que 35 quedaran gestantes. En un 90% de las repeticiones de la simulación quedarán gestantes entre 30 y 40 ovejas, pero en un 5% de las repeticiones más de 40 ovejas quedarán gestantes obteniéndose en esas repeticiones una fertilidad superior al 80%. Evidentemente esta diferencia entre repeticiones se puede equiparar a la

diferencia entre explotaciones, lo cual enriquece la discusión de los resultados obtenidos, pero también genera una incertidumbre en cuanto a la idoneidad de los manejos optimizados que puede hacer difícil la interpretación y utilización de los mismos en la práctica. El reto que se presenta es utilizar la información obtenida en las optimizaciones, tanto en relación a la media de resultados como a la variabilidad de los mismos, para detectar manejos óptimos, aplicables al mayor número de explotaciones posibles y con resultados repetibles. Por lo tanto, para superarlo sería necesario que dentro del proceso iterativo que sigue el AG, el fitness de cada individuo seleccionado sea nuevamente calculado cada vez que vaya a compararse con el de una nueva generación, ya que se ha observado que pese a simular cada individuo 50 veces para calcular su fitness, el efecto del azar en esa única evaluación puede favorecer algunas soluciones que si bien son buenas, una vez aplicadas dan resultados ligeramente inferiores que el que se tomó como referencia en la evaluación realizada por el AG.

Por último incidir en que para una aproximación más completa a la evaluación de la sostenibilidad es necesario continuar con el desarrollo del modelo para incluir en la función de optimización objetivos relacionados con aspectos ambientales (como la producción de gases de efecto invernadero) y sociales (como las necesidades de mano de obra y la distribución del trabajo entre la misma).

#### **4.8 CONCLUSIONES PARCIALES**

- Se ha diseñado un modelo (PASTOR) de simulación y optimización, de tipo dinámico, mecanicista y estocástico que integra correctamente el modelo animal en un modelo de explotación que permite simular y optimizar el manejo habitual de una explotación de ovino lechero de raza Latxa. Además el modelo dispone de una interfaz gráfica que ayuda a la comprensión de las salidas del rebaño e individuales.
- La validación del modelo de simulación con datos reales de una explotación conocida ha ofrecido resultados muy satisfactorios, presentando los valores estimados frente a los reales una desviación de 2% en el PV, de 6% en la CC y de 7% en la producción lechera.

- La simulación individual de las ovejas permite identificar los momentos en los cuales no se cubren de forma homogénea las necesidades de producción de todos los animales, lo cual es muy interesante de cara a optimizar el manejo de alimentación.
- La optimización mediante AAGG encuentra manejos adaptados a los diferentes escenarios y explotaciones simuladas, minimizando los costes en alimentación y maximizando el aprovechamiento de los recursos pastables.
- Dentro de los manejos optimizados, la diferencia genética del rebaño junto con la disponibilidad de recursos pastables, inciden más en los resultados económicos que los escenarios de secado y de precios de mercado propuestos.
- El azar con el que ocurren los eventos aleatorios que condicionan los resultados reproductivos del rebaño da lugar a que exista una variabilidad entre las distintas simulaciones de un mismo manejo y rebaño que puede llegar a suponer el 20% del margen económico.
- Desde el punto de vista del tiempo de computación, el modelo de simulación presenta una velocidad aceptable (segundos), mientras que el tiempo necesario para la optimización (horas) debe ser mejorado notablemente para poder ser utilizado como SATD.
- El programa PASTOR presenta una serie de limitaciones que hacen necesaria la mejora y validación continua así como la inclusión de aspectos decisivos en la toma de decisiones y necesarios a la hora de utilizar la herramienta para la evaluación de conceptos como la sostenibilidad de las explotaciones, tales como la mano de obra y la estimación del impacto medioambiental.

## 5. CONCLUSIONES



## 5 CONCLUSIONES

1. El desarrollo y validación de diferentes modelos de simulación que permiten representar el componente animal de los rebaños de ovino lechero (nutrición, reproducción y producción de leche), y su integración con un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos ha permitido desarrollar un SATD para las explotaciones de ovino lechero de raza Latxa dirigido a analizar y optimizar la sostenibilidad de diferentes estrategias de manejo. Para ello, el sistema incorpora datos de disponibilidad de recursos de alimentación y los precios de mercado de los principales insumos y productos obtenidos.

2. El módulo de rumen diseñado ofrece resultados comparables a los proporcionados por los principales sistemas de alimentación en la predicción de la IV, la EM y la PM. Sin embargo, su principal ventaja radica en su diseño mecanicista y su carácter dinámico, lo que aumenta su potencialidad para estimar la ingestión de dietas complejas. Además, la combinación del módulo de rumen con las ecuaciones de reparto de la proteína y energía permite predecir de manera aceptable la producción de leche, PV y CC.

3. El módulo de reproducción implementado permite representar el profundo anestro estacional que muestra la raza Latxa, y se puede ajustar para las condiciones particulares de las distintas razas ovinas. Se considera que el modelo simula correctamente la fertilidad observada en rebaños reales y la dispersión de la paridera en función del manejo realizado. La respuesta del modelo ante variaciones en el tipo de cubrición, la duración de las cubriciones, la fecha de entrada de los moruecos o el estado nutritivo de las ovejas se considera adecuada y permite simular un amplio rango de manejos reproductivos.

4. La integración del modelo animal (módulo de rumen, módulo de reparto de nutrientes y módulo de comportamiento reproductivo) en un modelo de rebaño mediante programación orientada a objetos permite una simulación estocástica de los animales y de los procesos que se tienen lugar en el sistema, obteniéndose predicciones de la respuesta media y de la variabilidad de la respuesta.

5. La validación del modelo de rebaño con datos de un rebaño real se considera satisfactoria y reafirma la complementariedad de los módulos que lo integran además de la idoneidad del modelo para el fin propuesto: la simulación de la respuesta de un rebaño de ovino lechero de raza Latxa ante el manejo alimenticio y reproductivo.

6. La simulación estocástica de los animales permite por una parte diseñar un rebaño con las características de variabilidad que se desee y por otra parte observar la evolución individual de cada oveja, lo cual es clave a la hora de analizar el manejo desde el punto de vista de la adecuación de los aportes a las necesidades y de la gestión de los recursos disponibles.

7. El software de simulación y optimización diseñado, PASTOR, presenta la originalidad de aproximarse a la optimización multiobjetivo de un sistema ganadero complejo mediante algoritmos genéticos. Esta aproximación heurística facilita la optimización del manejo alimenticio y reproductivo incorporando las interacciones que se producen entre ellos en un rebaño complejo con acceso a recursos pastables, y en un periodo de tiempo de varios años.

8. La optimización multiobjetivo utilizada requiere la definición de factores de ponderación de cada uno de los objetivos, lo que encorseta en parte las soluciones óptimas. Es necesario explorar otras alternativas para mejorar la utilidad del modelo en la toma de decisiones y evaluar las situaciones de compromiso entre diferentes objetivos o trade-offs.

9. En las condiciones de simulación en las que se han realizado las optimizaciones de dos explotaciones de producción de leche de raza Latxa, y bajo diferentes escenarios de manejo y precios, la optimización ha sido capaz de encontrar soluciones a la medida de cada escenario y tipo de explotación. Para el análisis y toma de decisiones basados en estas soluciones es necesario completar el modelo de simulación con aspectos relacionados con la disponibilidad y gestión de la mano de obra y con indicadores de tipo ambiental.

## 6. RESUMEN, SUMMARY ETA LABURPENA



## 6 RESUMEN, SUMMARY ETA LABURPENA

### *RESUMEN*

En la presente tesis se desarrolla un modelo de simulación y optimización que representa los principales aspectos bio-económicos del sistema de ovino lechero de raza Latxa. Para ello se han implementado tres modelos fisiológicos que operan a nivel de la oveja.

El primero, denominado Módulo de Rumen, está basado en un modelo de tipo mecanicista que representa el funcionamiento del rumen. Partiendo de las características del animal (peso vivo, estado fisiológico, etc.) y de las características de la dieta (contenido de nutrientes, cinética de degradación), el modelo calcula diariamente los kg de materia seca ingerida así como la energía metabolizable y la proteína metabolizable que corresponden al alimento ingerido.

El segundo se ha denominado Módulo de simulación de la partición de nutrientes y es un modelo de tipo determinista que representa el reparto de la energía y la proteína para las diferentes necesidades fisiológicas (mantenimiento, gestación, lactación). Este modelo simula, como respuesta al balance energético y proteico en el que se encuentra la oveja, la movilización o depósito de reservas y la producción lechera.

El tercero se denomina Módulo de simulación del comportamiento reproductivo y se ha desarrollado adaptando a la raza Latxa un modelo que representa la estacionalidad reproductiva del ovino y la probabilidad de gestación. Además se ha incluido el efecto que la condición corporal y la realización de flushing tienen sobre la fertilidad y la prolificidad, tanto en monta natural como en inseminación artificial.

Cada uno de los tres módulos se ha validado por separado. En el caso de los dos primeros la validación se ha realizado con datos reales de experiencias de control y mediante la comparación con otros modelos desarrollados para ovino lechero. Para el tercer módulo se ha realizado una validación funcional y además se han comparado algunas salidas con datos de explotaciones reales.

Los tres módulos se han integrado en un software que simula cada oveja, de forma individual, tanto en sus características físicas como en su respuesta productiva,

pero que sin embargo permite representar el comportamiento de un rebaño real en cuanto que las decisiones se aplican a lotes de manejo. Para esto último las ovejas se agrupan en función de su estado fisiológico (seca, gestante o lactante), de las decisiones de manejo del ganadero (realizar flushing y/o alimentación preparto) o del momento en el que se encuentra el rebaño en ordeño (al comienzo de la lactación, en plena lactación o al final de la lactación).

Las variables de manejo o de entrada que necesita el modelo corresponden a las fechas de entrada y salida de los moruecos, a la decisión de realizar o no inseminación artificial, al diseño de la dieta (permitiendo combinar concentrado, forraje comprado y un recurso propio) y a la cantidad de alimento que se ofrece a cada lote de alimentación.

La simulación del animal de manera individual de forma estocástica hace posible asignar a cada oveja un valor diferente para las características principales que la definen (peso, condición corporal y producción lechera potencial), pudiendo diseñar así, rebaños más o menos uniformes. Además el software permite establecer la calidad y cantidad de recursos disponibles, tanto como forraje conservado como en pastoreo, y asignar un precio a los insumos y productos de la explotación. Estos aspectos hacen posible configurar diferentes escenarios que representan la realidad de las explotaciones de la CAPV.

El grado de adecuación del modelo de simulación se ha validado con datos propios del rebaño experimental de Arkaute, obteniéndose unos resultados satisfactorios que avalan la idoneidad del modelo como SATD.

Con el objetivo de añadir utilidad al modelo, éste se ha integrado en un sistema de búsqueda de soluciones y optimización mediante algoritmos genéticos. El criterio de búsqueda incluye de forma ponderada la maximización de los beneficios económicos y la minimización del exceso de energía y proteína, en la selección de la mejor combinación de variables de manejo.

Para su evaluación se han diseñado dos explotaciones representativas con distinta disponibilidad de recursos (explotación de costa vs. interior) ante cuatro escenarios de secado (fecha de secado fijada vs. libre) y precios de mercado diferentes (precio medio vs. 40% superior). De las salidas encontradas se concluye que el método de optimización

empleado encuentra manejos que se adaptan de manera razonable a los escenarios planteados.

Las soluciones de manejo propuestas generan datos y elementos para la discusión acerca de la necesidad de incluir criterios de sostenibilidad a la hora de ponderar los objetivos de optimización.

En el futuro se considera interesante completar el modelo diseñado con aspectos relacionados con el impacto ambiental y la gestión de la mano de obra, así como el método de optimización, de manera que permita la comparación de soluciones optimizadas con diferentes criterios y grados de ponderación para poder identificar de esta manera, la solución que más se adapta a los objetivos propuestos.



## ***SUMMARY***

A simulation and optimisation model representing the main bio-economic dimensions of the Latxa sheep dairy system has been developed within the present thesis. To do so, three models that work at the animal level are implemented.

The first one, named Rumen model, represents the rumen function in a mechanistic way. Starting from the characteristics of the animal (body weight, physiological state, etc.) and the characteristics of the diet (nutrient content, digesta kinetics, etc.), the model assesses the daily intake (kg of dry matter) and the amount of metabolizable energy and protein provided by the diet.

The second model is named Nutrient partitioning model and simulates in a deterministic way the partition of energy and protein to the different physiological functions (maintenance, pregnancy, lactation). Depending on the energy and protein balance of the ewe, this model simulates the body reserves storage or mobilisation, or the daily milk production.

The third model, named Reproductive model, represents sheep seasonality and the probability of conception. In addition, the effect that body condition score and the implementation of flushing have on the reproductive results, have been included.

Each one of the previously mentioned physiological model has been validated separately. The outputs of the first two models have been compared with the data achieved by existing validated models and with observed field data. With the third model a functional validation approach has been carried out and also a comparison with observed farm data.

The three models have been integrated in a software package that operates at the farm level. This model simulates each animal individually, either in his intrinsic physical attributes or in his productive performance. Nevertheless, the management rules are applied at the herd level, trying to mimic the decision making rationale generally followed by farmers in real farms. Therefore, in order to simulate the flock management, sheep are grouped into homogeneous batches according to their physiological state (dried,

pregnant or lactating), by management rules (flushing, pre-lambing feeding) or by the state of lactation (early, middle or final lactation).

Inputs of the model are related with management decisions such as the date when rams join the female flock, the decision whether to apply artificial insemination, the formulation of the diet (combining concentrate, purchased forage and farm produced forage) or the amount of feed that is offered to each sheep batch.

The stochastic simulation of every single animal allows the generation of individual traits such as body weight, body condition score or milk production potential, making possible to design different types of flocks in terms of variability. It is also possible to define the quality and quantity of the resources available and the assignation of different prices to the model inputs and outputs. Therefore, different scenarios representing the complex reality of the dairy sheep farms of the Basque Country can be simulated.

The farm model has been validated with observed data coming from the experimental flock of Neiker-Tecnalia in Arkaute. The results obtained were considered to represent the original flock with an acceptable level of accuracy, which means that the tool can be a helpful decision support system.

The model has been integrated in a genetic algorithm based optimization routine, which opens outstanding opportunities to the software. For instance, to identify the best management variables for a given farm, the maximization of the economical profit and the minimal energy and protein exceed have been weighed and included as selection criteria.

To assess the optimization tool, a 2x2x2 factorial simulation has been conducted. It takes into account two different geographical locations for the Latxa dairy sheep farms (inlands vs. seaside), two different drying off scenarios (fixed date vs open date) and two different input prices scenarios (average vs. +40% more expensive). The diversity of solutions achieved show that the optimization method is able to identify specific management practices that are best-adapted to the designed scenarios.

The proposed solutions can also generate data and elements for discussion about the necessity of inclusion of some extra criteria of sustainability when weighing the optimization objectives.

For the next versions of the software, some aspects related with the environmental impact of livestock and management of labour resources should be included in order to make the model a more complete tool. The possibility of inclusion of different weighing degrees for the selection criteria will also enhance the optimization process in order to compare the solutions that are achieved, and to identify those ones that perform better for all the objectives.



**LABURPENA**

Hurrengo tesian, Latxa arrazako ardi esne sistemaren alderdi bioekonomiko garrantzitsuenak erakusten dituen simulazio eta optimizazio modelo bat garatzen da. Horretarako, ardiaren mailan lan egiten duten hiru modelo fisiologiko ezarri dira.

Lehenengoa, Errumenaren modeloa deitua, errumenaren funtzionamendua azaltzen duen modelo mekanizista batean oinarritua dago. Modelo hau erabiliz, irentsitako materia lehor kg-ak naiz metabolizagarria den energia eta irentsitako elikagaiari dagokion proteina metabolizagarria kalkulatu dira.

Bigarrena, Elikagaien banaketaren simulazio modeloa deitua da eta behar fisiologiko desberdinei dagokien energia eta proteina banaketa azaltzen duen modelo determinista bat da. Modelo honek, ardiaren erreserben mobilizazioa eta esne ekoizpena simulatzen ditu, ardiaren oreka energetiko eta proteikoa kontutan hartzen dituelarik.

Hirugarrena Ugaltze-portaeraren simulazio modeloa izendatzen da eta Latxa arraza, ardiaren ugaltze urterokotasuna eta ernatze probabilitatea azaltzen dituen modelo batera egokituz garatu da. Gorputzaren egoeraren eragina ere gehitu da eta baita flusihing egiteak ugalkortasunean eta umetsutasunean duen eragina ere, bai estaltze naturalean baita hazi-jartzean ere.

Modulu bakoitza bakarka balioetsi da. Lehenengo biak kontroleko esperientzietako benetako datuekin eta ardi esnearentzako garatutako beste modelo batzuekin alderatuz balioetsi dira. Hirugarren moduluarentzako balidazio funtzional bat egin da eta egiazko ustategien datuekin alderatu da.

Hiru moduluak ardi bakoitza simulatzen duen software batean txertatu dira, banaka, bai bere ezaugarri fisikoetan baita ugaltze erantzunetan ere. Hala ere, artalde erreale baten jokaera irudikatzea lortzen du. Horretarako, ardiak bere egoera fisiologikoaren arabera (antzua, umedun edo esnealdian), abeltzainaren hazkuntza erabakiengatik (flushing egin edo/eta erditze aurreko elikadura) edo artaldea jezte prozesuaren zein ataletan dagoen arabera (esnealdiaren hasieran, esnealdi betean edo esnealdiaren bukaeran) taldekatzen dira.

Programak behar dituen hazkuntza edo sarrera aldagaiak aharien sarrera eta irteeran datei, hazi-jartzea egitea edo ez egitearen erabakiari, dietaren diseinuari

(kontzentratua, erositako bazka eta norberaren baliabideak konbinatzen uzten du) eta elikadura lote bakoitzari ematen zaion elikagai kantitateari dagokie.

Animalia bakoitza bakarka simulatzeak, ardi bakoitzari definitzen duten ezaugarri nagusietarako balio desberdin bat esleitzea baimentzen du (pisua, gorputz baldintza eta esne ekoizpen potentziala). Horrela, gutxi gora beherako artalde uniformeak diseinatu daiteke. Gainera, softwareak eskura dauden baliabideen kalitatea eta kantitatea neurtzeko aukera ematen du, nahiz mantendutako beza bezala nahiz larretze bezala, eta baita ustiategiaren salgai eta produktuei salneurria jartzea ere. Alderdi hauek EEA-ko ustiategiaren errealitatearen egoera desberdinak konfiguratzea baimentzen dute

Simulazio modeloaren egokitze maila Arkauteko artalde esperimentalaren datuekin egiaztatu da. Horrela, erabakiak hartzerako orduan modeloa lagungarria eta egokia dela abalatzten duten ondorioak atera dira.

Modeloa baliagarriagoa izan dadin, algoritmo genetikoaren bidez eginiko erantzun eta optimizazio bilatzaile sistema batean txertatu da. Hazkuntzaren aldagaien konbinazio hobereana aukeratzeko orduan, bilaketa irizpideak irabazi ekonomikoaren maximizazio ponderatua eta energia eta proteina gehiegikeriaren minimizazio hartzen ditu kontuan

Ebaluaketarako bi ustiategi adierazgarri diseinatu dira, bakoitza antzuteko lau egoeren aurrean baliabide desberdinekin eta merkatuko salneurri desberdinekin. Aurkitutako irteeretatik, erabiltzen den optimizazio metodoak planteatutako egoeretara bidezkoak diren hazkuntzak bilatzen dituela ondorioztatzen da.

Proposatutako hazkuntza irtenbideek, optimizazio helburuak ponderatzeko orduan jasangarritasun irizpideak kontuan hartzeari buruzko eztabaidarako datuak eta elementuak sortzen dituzte.

Etorkizunean interesgarria ikusten da diseinatutako modeloa eta optimizazio metodoa ingurumen inpaktuarekin eta lanekuaren kudeaketaren zerikusia duten alderdiekin osatzea. Horrela, optimizatutako irtenbideak ponderazio irizpide eta mailekin alderatu daitezke.

## 7. BIBLIOGRAFÍA



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Agabriel J y Ingrand S** (2004). Modelling the performance of the beef cow to build a herd functioning simulator. *Animal Research*. 53(5): 347-361.
- Alderman G y Cottrill B** (1993). Energy and protein requirements of ruminants: an advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients. Cab International.
- Álvarez P y Guada J** (1982). Respuesta de la producción de leche al plano de ingestión de ovejas en ordeño de raza Churra. ITEA. Extra 1: 202-204.
- Andersen E, Elbersen B, Godeschalk F y Verhoog D** (2007). Farm management indicators and farm typologies as a basis for assessments in a changing policy environment. *Journal of Environmental Management*. 82(3): 353-362.
- AOAC Association of Official Analytical Chemist** (2004). Official methods of analysis. AOAC. Arlinton, VA.
- ARC** (1980). The Nutrient requirements of ruminant livestock: technical review. Cab International.
- Atti N, Thériez M y Abdennebi L** (2001). Relationship between ewe body condition at mating and reproductive performance in the fat-tailed Barbarine breed. *Animal Research*. 50(2): 135-144.
- Bäck T y Schwefel HP** (1993). An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary computation*. 1(1): 1-23.
- Banks J** (1998). Principles of simulation. En: Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications, and practice (p. 3-30). Wiley.
- Barandiarán JMd** (2000). Ganadería y pastoreo en Vasconia. Etniker Euskalerraia.
- Barron LJR, de Labastida EF, Perea S, Chavarri F, de Vega C, Vicente MS, Torres MI, Najera AI, Virto M, Santisteban A, Perez-Elortondo FJ, Albisu M, Salmeron J, Mendía C, Torre P, Ibanez FC y de Renobales M** (2001). Seasonal changes in the composition of bulk raw ewe's milk used for Idiazabal cheese manufacture. *International Dairy Journal*. 11(10): 771-778.

- Belcher KW, Boehm MM y Fulton ME** (2004). Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural Systems*. 79(2): 225-241.
- Beltrán de Heredia I** (2007). Gestión y técnicas de la reproducción del rebaño. Curso Avanzado sobre Nuevas tecnologías para la producción de ovino de leche, FAO-CIHEAM. 14-19 Mayo, Vitoria-Gasteiz
- Beltrán de Heredia I, Ugarte E y Bodin L** (2003). Response to the male effect in sheep of the Latxa breed in spring. *ITEA. Extra* 24(1): 339-341.
- Bernués A, Herrero M y Dent JB** (1995). Simulation of livestock farming systems: a review of sheep models at animal, herd and farm levels. *Investigación Agraria, Producción y Sanidad Animales*. 10(3): 243-272.
- Besga G, Albizu I, Rodríguez M, Onanindia M, Domingo M y Amezaga I** (1996). Pasture Productivity and utilization in communal grazing land in the Basque Country. Proc of the 9th meeting of the FAO working group for mountain pastures. Eslovaquia.
- Blackburn H y Cartwright T** (1987). Description and validation of the Texas A&M sheep simulation model. *Journal of Animal Science*. 65(2): 373-386.
- Blanc F, Martin GB y Bocquier F** (2001). Modelling reproduction in farm animals: a review. *Reproduction Fertility and Development*. 13(5-6): 337-353.
- Board MA** (2005). Millennium Ecosystem Assessment. Washington: Island Press.
- Botts R, Hemken R y Bull L** (1979). Protein reserves in the lactating dairy cow. *Journal of Dairy Science*. 62(3): 433-440.
- Box GEP** (1957). Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity. The Royal Statistical Society. Series C, Applied Statistics. 6(2): 81-101.
- Boyazoglu J** (2002). Livestock research and environmental sustainability with special reference to the Mediterranean basin. *Small Ruminant Research*. 45(2): 193-200.
- Brundtland GH** (1987). Report of the World Commission on environment and development: "Our common future.". United Nations.
- Caja G, Bocquier F, Ferret A, Gasa J, Pérez-Oguez L, Plaixats J y Oregui L** (2002). Intake capacity of dairy sheep: effects of the main variation factors. *Options Méditerranéennes. Série B, Études et Recherches*. 42: 9-36.

- Cannas A, Tedeschi L, Fox D, Pell A y Van Soest P** (2004). A mechanistic model for predicting the nutrient requirements and feed biological values for sheep. *Journal of Animal Science*. 82(1): 149.
- Carcangiu V, Vacca GM, Pazzola M, Luridiana S, Dettori ML, Mura MC y Bini PP** (2008). Response to reproductive treatments with melatonin (Melovine®) in Sarda breeds sheep with different BCS (Body Condition Score). *Rivista di Zootecnia e Veterinaria*. 39(2): 3-7.
- Casasús I, Sanz A, Villalba D, Ferrer R y Revilla R** (2004). Intake capacity of two breeds of suckler cattle of different milk yield potential and validation of prediction models. *Livestock Production Science*. 89(2-3): 195-207.
- CONFELAC** (2008). Mejorar los resultados de la inseminación artificial ovina a través de un mejor conocimiento de los problemas de manejo del ganado (sanitarios y alimenticios) en los sistemas de producción de ovino de leche pirenaicos. Proyecto de cooperación Aquitania-Euskadi. Campaña 2007-2008.
- CONFELAC** (2012). Memoria de actividades.  
<http://www.confelac.com/es/catalogos/Memoria>
- Conington J, Bishop SC, Waterhouse A y Simm G** (2004). A bioeconomic approach to derive economic values for pasture-based sheep genetic improvement programs. *Journal of Animal Science*. 82: 1290-1304.
- Cournut S y Dedieu B** (2004). A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years. *Animal Research*. 53(5): 383-403.
- CSIRO** (1990). Feeding standards for Australian livestock: Ruminants. CSIRO Australia. East Melbourne.
- Chen Y** (2007). Interactive music composition with the CFE framework. *ACM SIGEVolution*. 2(1): 9-16.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J y Vérité R** (1987). Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin Technique CRZV Theix-INRA*. 70: 117-131.
- De Rosnay J** (1975). *Le macroscopie*. Editions du Seuil. Paris.
- Dent JB y Blackie MJ** (1979). *Systems simulation in agriculture*. Applied Science Publishers Ltd. London.

- Dent JB, Edwards-Jones G y McGregor MJ** (1995). Simulation of ecological, social and economic factors in agricultural systems. *Agricultural Systems*. 49(4): 337-351.
- DerSimonian R y Laird N** (1986). Meta-analysis in clinical trials. *Controlled clinical trials*. 7(3): 177-188.
- Dryden GM** (1981). The simulation of growth rate in grazing sheep—A comparison of the NRC and ARC feeding standards. *Agricultural Systems*. 7(3): 189-197.
- Dýrmundsson ÓR** (2006). Sustainability of sheep and goat production in North European countries--From the Arctic to the Alps. *Small Ruminant Research*. 62(3): 151-157.
- Dzakuma JM y Harris DL** (1989a). Computer Modeling of Sheep Reproduction .1. an Algorithm for Quantifying Anestrous Cycles in Ewes. *Journal of Animal Science*. 67(9): 2197-2211.
- Dzakuma JM y Harris DL** (1989b). Computer Modeling of Sheep Reproduction .2. Accelerated Reproduction in Sheep. *Journal of Animal Science*. 67(9): 2212-2221.
- Egger M, Smith G y Phillips A** (1997). Meta-analysis: principles and procedures. *British Medical Journal*. 315(7121): 1533.
- EPIDAT** (2008). Programa para análisis epidemiológico de datos tabulados. Xunta de Galicia-Organización Panamericana de la Salud. <http://dxsp.sergas.es>
- Faverdin P** (2009). Teoría de sistemas aplicada a la producción animal. Curso avanzado sobre Análisis y evaluación prospectiva de sistemas de producción de rumiantes, FAO-CIHEAM. 23-27 Febrero, Zaragoza.
- Ferrer C, Amella A, Maestro M y Ocaña M** (1990). I. Forage production. En: Utilization of grasslands on farms in Guipuzcoa (p. 9-53). Instituto de Economía y Producciones Ganaderas del Ebro. Zaragoza.
- Finlayson JD, Cacho OJ y Bywater AC** (1995). A simulation model of grazing sheep: I. Animal growth and intake. *Agricultural Systems*. 48(1): 1-25.
- Folch J, Paramio MT, Muñoz F y Saiz Cidoncha F** (1987). Influencia de la alimentación sobre la actividad reproductiva de la oveja Rasa Aragonesa en primavera. II. Efecto del nivel alimenticio y del "flushing" en estabulación permanente. *ITEA*. 18(68): 3-14.
- Folch J, Paramio MT, Sainz Cidoncha F y Valderrábano J** (1985). Influencia de la alimentación sobre la actividad reproductiva de la oveja rasa aragonesa en primavera. I. Efecto del nivel alimenticio en pastoreo. *ITEA*. 16(60): 35-45.

- Forbes JM** (1977). Interrelationships between physical and metabolic control of voluntary food intake in fattening, pregnant and lactating mature sheep: a model. *Animal Production*. 24(1): 91-101.
- Forbes JM** (2007). A personal view of how ruminant animals control their intake and choice of food: minimal total discomfort. *Nutrition research reviews*. 20(2): 132-146.
- Forbes JM y Provenza FD** (2000). Integration of learning and metabolic signals into a theory of dietary choice and food intake. En: *Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction* (p. 3–19). Leeds, UK.
- Forcada F, Abecia JA, Lozano JM y Ferrer LM** (1998). Utilización de implantes subcutáneos de melatonina en combinación con esponjas vaginales con progestágenos sobre los parámetros reproductivos de ovejas Rasa Aragonesa durante el anoestro estacionario. *Proc. 22 nd Nat. Meet. Spanish Soc. Sheep Goat Prod., SEOC, Vitoria, Spain*. 563-566.
- Forcada F, Abecia JA y Sierra I** (1992a). Seasonal changes in oestrus activity and ovulation rate in Rasa Aragonesa ewes maintained at two different body condition levels. *Small Ruminant Research*. 8(4): 313-324.
- Forcada F, Abecia JA, Zarazaga Garcés L y Lozano Cantín JM** (1992b). Influencia del plano de alimentación sobre los parámetros reproductivos en ovejas de reducido nivel ovulatorio. *Archivos de Zootecnia*. 41(152): 113-120.
- Fox D, Sniffen C, O'connor J, Russell J y Van Soest P** (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: III. Cattle requirements and diet adequacy. *Journal of Animal Science*. 70(11): 3578-3596.
- France J y Thornley JHM** (1984). *Mathematical models in agriculture*. Butterworths. London.
- Friedberg RM** (1958). A learning machine: Part I. *IBM Journal of Research and Development*. 2(1): 2-13.
- Friedberg RM, Dunham B y North JH** (1959). A Learning Machine: Part II. *IBM Journal of Research and Development*. 3(7): 282-287.
- Friggens N y Newbold J** (2007). Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. *Animal*. 1(1): 87.
- Frutos P, Hervás G, Ramos G, Giráldez F y Mantecon A** (2002). Condensed tannin content of several shrub species from a mountain area in northern Spain, and its

relationship to various indicators of nutritive value. *Animal Feed Science and Technology*. 95(3-4): 215-226.

**Frutos P, Mantecón ÁR, Rodríguez Revesado P y González JS (1995).** Body fat depots and body condition score relationship: a comparison of two Spanish sheep breeds (Churra vs Merina). *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*. 27: 19-23.

**Gamborg C y Sandøe P (2005).** Sustainability in farm animal breeding: a review. *Livestock Production Science*. 92(3): 221-231.

**García-Martínez A, Olaizola A y Bernués A (2007).** Objetivos y opiniones de los ganaderos de vacuno de carne en el Pirineo Central. *ITEA. Extra 28 (1)*: 324-326.

**García-Martínez A, Olaizola A y Bernués A (2009).** Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. *Animal*. 3(1): 152-165.

**Goldberg DE (1989).** Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-wesley.

**Gómez-Limón JA, Barreiro, J. (2006).** La multifuncionalidad de la agricultura en España. Concepto, aspectos horizontales, cuantificación y casos prácticos. Eumedia y MAPA. Madrid, España.: 303.

**Gordon I y Illius A (1994).** The functional significance of the browser-grazer dichotomy in African ruminants. *Oecologia*. 98(2): 167-175.

**Gouttenoire L, Cournut S y Ingrand S (2011).** Modelling as a tool to redesign livestock farming systems: a literature review. *Animal*. 5(12): 1957-1971.

**Groot JCJ, Oomen GJM y Rossing WAH (2012).** Multi-objective optimization and design of farming systems. *Agricultural Systems*. 110: 63-77.

**Gunn R, Doney J y Russel A (1972).** Embryo mortality in Scottish Blackface ewes as influenced by body condition at mating and by post-mating nutrition. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 79: 19-25.

**Gunn RG (1983).** The influence of nutrition on the reproductive performance of ewes. En: *Sheep production* (p. 99-110). Butterworths. London.

**Gunn RG, Doney JM y Russel AJF (1969).** Fertility in Scottish Blackface Ewes as Influenced by Nutrition and Body Condition at Mating. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 73: 289-294.

- Gunn RG, Smith WF, Senior AJ, Barthram E, Sim DA y Hunter EA (1991).** Pre-Mating Herbage Intake and the Reproductive-Performance of North Country Cheviot Ewes in Different Levels of Body Condition. *Animal Production*. 52: 149-156.
- Hackmann T y Spain J (2009).** A mechanistic model for predicting intake of forage diets by ruminants. *Journal of Animal Science*. (88): 1108-1124.
- Hadjigeorgiou I, Osoro K, Fragoso de Almeida JP y Molle G (2005).** Southern European grazing lands: Production, environmental and landscape management aspects. *Livestock Production Science*. 96(1): 51-59.
- Harrison S (1990).** Regression of a model on real-system output: an invalid test of model validity. *Agricultural Systems*. 34(3): 183-190.
- Hart RPS, Larcombe MT, Sherlock RA y Smith LA (1998).** Optimisation techniques for a computer simulation of a pastoral dairy farm. *Computers and electronics in agriculture*. 19(2): 129-153.
- Herrero M (1997).** Modelling dairy grazing systems: an integrated approach. Thesis. University of Edingburgh. 282 pp.
- Herrero M, Fawcett RH y Dent JB (1994).** Integrating simulation models to optimise nutrition and management in dairy farms. *Proc. of the 2nd. Int. Livestock Farming Systems Symp.: Research, Development, Socio-economics and the Land Manager*. EAAP. Aberdeen 1994. Wageningen Pers Publishers.
- Holland JH (1992).** Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT press.
- IKT (2007).** El sector ovino en la CAE. Primer seminario transfronterizo de razas ovinas locales Latxa y Manech. Octubre, 2007, Sara.
- Illius AW y Gordon IJ (1991).** Prediction of Intake and Digestion in Ruminants by a Model of Rumen Kinetics Integrating Animal Size and Plant Characteristics. *Journal of Agricultural Science*. 116: 145-157.
- ITG Ganadero SA (2009).** Boletín Informativo Ovino. nº 103 boletín IV/2009.
- Janssen S y van Ittersum MK (2007).** Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*. 94(3): 622-636.
- Jarrige R y Agabriel J (1988).** Alimentation des bovins, ovins & caprins. INRA. Paris, France.

- Jarrige R, Demarquilly C, Dulphy JP, Hoden A, Robelin J, Beranger C, Geay Y, Journet M, Malterre C, Micol D y Petit M** (1986). The INRA fill unit system for predicting the voluntary intake of forage-based diets in ruminants - A review. *Journal of Animal Science*. 63(6): 1737-1758.
- Jouven M y Baumont R** (2008). Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. *Agricultural Systems*. 96(1): 260-272.
- Jung H y Allen M** (1995). Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants. *Journal of Animal Science*. 73(9): 2774.
- Kempster AJ, Cook GL y Grantley-Smith M** (1986). National estimates of the body composition of British cattle, sheep and pigs with special reference to trends in fatness. A review. *Meat Science*. 17(2): 107-138.
- Kerselaers E, De Cock L, Lauwers L y Van Huylenbroeck G** (2007). Modelling farm-level economic potential for conversion to organic farming. *Agricultural systems*. 94(3): 671-682.
- Ketelaars J y Tolkamp BJ** (1992). Toward a New Theory of Feed-Intake Regulation in Ruminants .1. Causes of Differences in Voluntary Feed-Intake - Critique of Current Views. *Livestock Production Science*. 30(4): 269-296.
- Kingwell RS** (1994). Risk attitude and dryland farm-management. *Agricultural Systems*. 45(2): 191-202.
- Kordon A, Castillo F, Smits G y Kotanchek M** (2006). Application issues of genetic programming in industry. En: *Genetic Programming Theory and Practice III* (p. 241-258). Springer. Ann Arbor, Michigan.
- Krisnamoorthy U, Soller H, Steingass H y Menke KH** (1991). A comparative study on rumen fermentation of energy supplements in vitro. *Journal of animal Physiology and Nutrition*. 65: 28-35.
- Lana MP** (2008). Viabilidad y rentabilidad económica de las explotaciones de pequeños rumiantes: posibilidad de intervención en los costes y en los beneficios. Jornada satélite SEOC 08. Almería, 24 de septiembre.
- Lassoued N, Rekik M, Mahouachi M y Hamouda MB** (2004). The effect of nutrition prior to and during mating on ovulation rate, reproductive wastage, and lambing rate in three sheep breeds. *Small Ruminant Research*. 52(1-2): 117-125.

- Layke C** (2009). Measuring nature's benefits: A preliminary roadmap for improving ecosystem service indicators. World Resources Institute: Washington.
- Lewis RM y Emmans GC** (2010). Feed intake of sheep as affected by body weight, breed, sex, and feed composition. *Journal of Animal Science*. 88(2): 467-480.
- Liedloff AC, Coughenour MB, Ludwig JA y Dyer R** (2001). Modelling the trade-off between fire and grazing in a tropical savanna landscape, northern Australia. *Environment International*. 27(2-3): 173-180.
- Lopez-Gatius F, Yaniz J y Madriles-Helm D** (2003). Effects of body condition score and score change on the reproductive performance of dairy cows: a meta-analysis. *Theriogenology*. 59(3-4): 801-812.
- López Ridaura S** (2009). Construcción de indicadores y su aplicación a nivel de explotación. Curso avanzado sobre Análisis y evaluación prospectiva de sistemas de producción de rumiantes, FAO-CIHEAM. 23-27 Febrero, Zaragoza.
- Lursail** (2013). Datos no publicados.
- Martin G, Oldham C, Cognié Y y Pearce D** (1986). The physiological responses of anovulatory ewes to the introduction of rams--A review. *Livestock Production Science*. 15(3): 219-247.
- Mauricio R, Mould F, Dhanoa M, Owen E, Channa K y Theodorou M** (1999). A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Animal Feed Science and Technology*. 79(4): 321-330.
- Mayer D, Belward J y Burrage K** (1998). Optimizing simulation models of agricultural systems. *Annals of Operations Research*. 82: 219-232.
- Mayer D, Belward J y Burrage K** (2001). Robust parameter settings of evolutionary algorithms for the optimisation of agricultural systems models. *Agricultural Systems*. 69(3): 199-213.
- Mayer DG, Belward JA y Burrage K** (1996). Use of advanced techniques to optimize a multi-dimensional dairy model. *Agricultural Systems*. 50(3): 239-253.
- McDougall E** (1948). Studies on ruminant saliva. 1. The composition and output of sheep's saliva. *Biochemical Journal*. 43(1): 99.
- Mediano L, Mitxeo J, Villalba FJ, Beristain JJ y Elizagarate V** (2010). Análisis del sector del cordero lechal de oveja Latxa en la Comunidad Autónoma de Euskadi (C.A.E.)

diagnóstico de la situación y estrategias de actuación. Departamento de Economía Financiera II. Universidad del País Vasco.(Proyecto de Investigación (PA09/04)).

**Mertens D y Ely L (1979).** A dynamic model of fiber digestion and passage in the ruminant for evaluating forage quality. *Journal of Animal Science*. 49(4): 1085.

**Michalewicz Z (1996).** Genetic algorithms+ data structures. Springer.

**Molle G, Branca A, Ligios S, Sitzia M, Casu S, Landau S y Zoref Z (1995).** Effect of grazing background and flushing supplementation on reproductive performance in Sarda ewes. *Small Ruminant Research*. 17(3): 245-254.

**Molle G, Landau S, Branca A, Sitzia M, Fois N, Ligios S y Casu S (1997).** Flushing with soybean meal can improve reproductive performances in lactating Sarda ewes on a mature pasture. *Small Ruminant Research*. 24(3): 157-165.

**Mori RM, Ribeiro ELdA, Mizubuti IY, Rocha MAd y Silva LdDFd (2006).** Desempenho reprodutivo de ovelhas submetidas a diferentes formas de suplementação alimentar antes e durante a estação de monta. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 35: 1122-1128.

**Nardone A, Zervas G y Ronchi B (2004).** Sustainability of small ruminant organic systems of production. *Livestock Production Science*. 90(1): 27-39.

**NASDAP (2012).** Estadística Oficial del Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco.  
<http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net>.

**Nowers C, Coetzer W y Morgenthal J (1994).** Effect of melatonin implants, flushing and teasing on the reproductive performance of spring-mated Dohne Merino ewes. *South African Journal of Animal Science*. 21(1): 22-26.

**Nsahlai I y Apaloo J (2007).** On the suitability of Illius and Gordon's model for simulating the intake and digestibility of roughage diets by ruminants. *South African Journal of Animal Science*. 37(4): 275-289.

**Oltenu PA, Milligan RA, Rounsaville TR y Foote RH (1980).** Modelling reproduction in a herd of dairy cattle. *Agricultural Systems*. 5(3): 193-205.

**Oregui L (1992).** Estudio del manejo de la alimentación en los rebaños ovinos de raza Latxa y su influencia sobre los resultados reproductivos y de producción de leche. Thesis. Univ.Complutense de Madrid. 318 pp.

- Oregui L, Garro J, Vicente M y Bravo M (1997).** Estudio del sistema de alimentación en las razas ovinas Latxa y Carranzana: Utilización de los pastos comunales y suplementación en pesebre. ITEA, Producción Animal A. 93: 173-182.
- Oregui LM, Bravo MV y Gabiña D (2001a).** Evolución anual del estado de carnes en ovino lechero explotado en régimen de trashumancia valle-monte, factores que lo afectan. ITEA. 97(1): 29-46.
- Oregui LM, Bravo MV y Gabiña D (2004).** Relationships between body condition score and reproductive or productive parameters in Latxa ewes. Archivos de Zootecnia. 53: 47-58.
- Oregui LM, Ruiz R y Pérez de Arenaza A (2001b).** Modelización de la respuesta lechera de los rebaños ovinos a distintas dietas. ITEA. Extra 22 (2): 427-429.
- Oriade CA y Dillon CR (1997).** Developments in biophysical and bioeconomic simulation of agricultural systems: a review. Agricultural Economics. 17(1): 45-58.
- Paramio MT y Folch J (1985).** Puntuación de la condición corporal en la oveja Rasa Aragonesa y su relación con las reservas energéticas y los parámetros reproductivos. ITEA. 16(58): 29-44.
- Parsons D (1998).** Optimising silage harvesting plans in a grass and grazing simulation using the revised simplex method and a genetic algorithm. Agricultural Systems. 56(1): 29-44.
- Pell A y Schofield P (1993).** Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion in vitro. Journal of Dairy Science. 76(4): 1063-1073.
- Petitti D (2000).** Meta-analysis, decision analysis, and cost-effectiveness analysis: methods for quantitative synthesis in medicine. Oxford University Press, USA.
- Piras M, Ligios S, Sitzia M y Fois N (2007).** Out of season sheep milk production in Sardinia. Italian Journal of Animal Science. 6(Suppl. 1): 588-590.
- Pittroff W y Kothmann MM (2001a).** Quantitative prediction of feed intake in ruminants I. Conceptual and mathematical analysis of models for sheep. Livestock Production Science. 71(2-3): 131-150.
- Pittroff W y Kothmann MM (2001b).** Quantitative prediction of feed intake in ruminants III. Comparative example calculations and discussion. Livestock Production Science. 71(2-3): 171-181.

- Pleasants AB** (1997). Use of a stochastic model of a calving distribution for beef cows for formulating optimal natural mating strategies. *Animal Science*. 64: 413-421.
- Poppi DP, Gill M y France J** (1994). Integration of theories of intake regulation in growing ruminants. *Journal of Theoretical Biology*. 167(2): 129-145.
- Puillet L, Martin O, Sauvant D y Tichit M** (2010). An individual-based model simulating goat response variability and long-term herd performance. *Animal*. 4(12): 2084-2098.
- Pulina G, Bettati T, Serra F y Cannas A** (1996). Razi-O: costruzione e validazione di un software per l'alimentazione degli ovini da latte. Proc of the 12th Nat. Congr. SIPAOC. Varese, Italy.
- Ratray P, Jagusch K, Smith J, Winn G y Maclean K** (1980). Flushing responses from heavy and light ewes. Proc of the Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production.
- Regadas Filho JGL, Pereira ES, Villarroel ABS, Pimentel PG, Fontenele RM, Costa MRGF, Maia ISG y Sombra WA** (2011). Efficiency of metabolizable energy utilization for maintenance and gain and evaluation of Small Ruminant Nutrition System model in Santa Ines sheep. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 40(11): 2558-2564.
- Revilla R** (2002). Sustainable livestock production. ITEA, Producción Vegetal. Extra(23): 133-146.
- Rigby D y Cáceres D** (2001). Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*. 68(1): 21-40.
- Ripoll-Bosch R, Díez-Unquera B, Ruiz R, Villalba D, Molina E, Joy M, Olaizola A y Bernués A** (2012). An integrated sustainability assessment of mediterranean sheep farms with different degrees of intensification. *Agricultural Systems*. 105(1): 46-56.
- Robinson JJ** (2002). Review of nutritional standards for sheep. Report for the British Society of Animal Science. 16pp.
- Romera AJ, Morris ST, Hodgson J, Stirling WD y Woodward SJR** (2004). A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture*. 42(2): 67-86.
- Ronchi B y Nardone A** (2003). Contribution of organic farming to increase sustainability of Mediterranean small ruminants livestock systems. *Livestock Production Science*. 80(1-2): 17-31.

- Ruiz R** (2000). Análisis de los factores de explotación que afectan a la producción lechera en los rebaños de raza latxa de la CAPV. Thesis. Universidad de Zaragoza. 328 pp.
- Ruiz R, Bernués A, García-Martínez A, Oregui L y Olaizola A** (2008). Estrategias de manejo de recursos en agro-ecosistemas de montaña del Norte de España. En: Oportunidades y Retos para los Sistemas Campesinos de Rumiantes en Latinoamérica: Manejo de Recursos, Seguridad Alimentaria, Calidad y Acceso a Mercados (p. 77-103). Toluca, México.
- Ruiz R, Díez-Unquera B, I BdH, Mandaluniz N, Arranz J y Ugarte E** (2009). The challenge of sustainability for local breeds and traditional systems: dairy sheep in the Basque Country. Proc of the 60th Annual Meeting of the EAAP, TN WAP. Barcelona.
- Ruiz R, Mandaluniz N, Albizu I y Oregui L** (1998). The environmental role of traditional farming systems in the Basque Country. Proc of the 3rd European Workshop of the LSIRD Network, Livestock Systems in Integrated Rural Development. Arles, France.
- Ruiz R, Oregi L, Bravo MV y Urarte E** (1997). A dairy ewe sustainable livestock system in the basque country. Characteristic and constraints. Proc of the 7th European Workshop of the LSIRD Network, Livestock Systems in Integrated Rural Development. Nafplio, Greece.
- Russel A, Doney J y Gunn R** (1969). Subjective assessment of body fat in live sheep. Journal of Agricultural Science, Cambridge. 72(45): 1-454.
- Sabatier R, Doyen L y Tichit M** (2010). Modelling trade-offs between livestock grazing and wader conservation in a grassland agroecosystem. Ecological Modelling. 221(9): 1292-1300.
- Sabatier R, Doyen L y Tichit M** (2012). Management flexibility as a new dimension of the trade-offs occurring in grassland agroecosystems. Proc of the 63th Annual Meeting of the EAAP, TN WAP. Bratislava.
- Santos G, Silva K, Casimiro T, Costa M, Mori R, Mizubuti I, Moreira F y Seneda M** (2009). Reproductive performance of ewes mated in the spring when given nutritional supplements to enhance energy levels. Animal Reproduction. 6(2): 422-427.
- SAS** (2009). Base SAS® 9.2 Procedures Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Shafer WR, Bourdon RM y Enns RM** (2007). Simulation of cow-calf production with and without realistic levels of variability. Journal of Animal Science. 85: 332-340.

- Silveira V** (2000). Pampa Corte-Um modelo de simulação para o crescimento e engorda de gado de corte: simulações. XXXVII Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia.
- Sniffen CJ, Oconnor JD, Vansoest PJ, Fox DG y Russell JB** (1992). A Net Carbohydrate and Protein System for Evaluating Cattle Diets .2. Carbohydrate and Protein Availability. *Journal of Animal Science*. 70(11): 3562-3577.
- Tedeschi LO** (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*. 89(2-3): 225-247.
- Tedeschi LO, Cannas A y Fox DG** (2010). A nutrition mathematical model to account for dietary supply and requirements of energy and other nutrients for domesticated small ruminants: The development and evaluation of the Small Ruminant Nutrition System. *Small Ruminant Research*. 89(2-3): 174-184.
- Theodorou MK, Williams BA, Dhanoa MS, McAllan AB y France J** (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*. 48(3-4): 185-197.
- Theriez M** (1984). Influence de l'alimentation sur les performances de reproduction des ovins. *Journées Rech. Ovine et Caprine* (9e): 294-326.
- Thimonier J, Cognie Y, Lassoued N y Khaldi G** (2000). L'effet mâle chez les ovins: une technique actuelle de maîtrise de la reproduction. *INRA Prod Anim*. 13: 223-231.
- Thomson EF y Bahhady FA** (1988). A Note on the Effect of Live Weight at Mating on Fertility of Awassi Ewes in Semi-Arid Northwest Syria. *Animal Production*. 47: 505-508.
- Thornton PK** (2009). Principios y elementos de los modelos. Curso avanzado sobre Análisis y evaluación prospectiva de sistemas de producción de rumiantes, FAO-CIHEAM. 23-27 Febrero, Zaragoza.
- Tilley J y Terry R** (1963). A two stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*. 18(2): 104-111.
- Torre C, Casals R, Caja G, Paramio MT y Ferrer A** (1991). The effects of body condition score and flushing on the reproductive performances of Ripollesa breed ewes mated in spring. *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*. 13: 85-90.

- Ugarte E, Ruiz R, Gabina D y Beltrán de Heredia I (2001).** Impact of high-yielding foreign breeds on the Spanish dairy sheep industry. *Livestock Production Science*. 71(1): 3-10.
- Urarte E (1988).** La Raza latxa: sistemas de producción y características reproductivas. Thesis. Universidad de Zaragoza. 212 pp.
- Urarte E, Arranz J, Ugarte E, Arrese F, Oregi L, Bravo MV y Ruiz R (1999).** Organization of development structures in dairy Latxa (breed) sheep in the Autonomous Community of the Spanish Basque Country. *Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*. 38: 255-262.
- Urarte E, Gabiña, D., Mateor., P. (1983).** Resultados de sincronización de celos en razas Latxa y Carranzana. *ITEA*. 52: 48-55.
- Van Dyne GM y Abramsky Z (1975).** Agricultural systems models and modelling: An overview. *Study of Agricultural Systems*. 23-106.
- Van Soest P (1994).** Nutritional ecology of the ruminant. Cornell Univ Pr.
- Venter JL y Greyling JPC (1994).** Effect of Different Periods of Flushing and Synchronized Mating on Body-Weight, Blood-Glucose and Reproductive-Performance in Spring-Mated Ewes. *Small Ruminant Research*. 13(3): 257-261.
- Villalba D (2000).** Construcción y utilización de un modelo estocástico para la simulación de estrategias de manejo invernal en rebaños de vacas nodrizas. Thesis. Universitat de Lleida. 154 pp.
- Villalba D, Ripoll G, Ruiz R y Bernues A (2010).** Long-term stochastic simulation of mountain beef cattle herds under diverse management strategies. *Agricultural Systems*. 103(4): 210-220.
- Von Bertalanffy L (1950).** An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science*. 1(2): 134-165.
- Waldo D (1986).** Effect of forage quality on intake and forage-concentrate interactions. *Journal of Dairy Science*. 69(2): 617-631.
- Wallach D, Charpentreau JL y Elsen JM (1986).** Weight-Gain in Grazing Sheep - a Detailed Comparison between Models. *Agricultural Systems*. 19(3): 211-248.
- Wang Q (1991).** The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*. 27(9): 2467-2471.

**Woodward SJR, Romera AJ, Beskow WB y Lovatt SJ** (2008). Better simulation modelling to support farming systems innovation: review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 51(3): 235-252.

**Young V** (1970). The role of skeletal and cardiac muscle in the regulation of protein metabolism. *Mammalian protein metabolism*. 4: 585-674.

ANEXOS



## ANEXOS

**ANEXO I. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE RUMEN*****Variables del modelo****Variables relativas a las características del alimento*

<i>PCD</i>	Fracción de Pared celular degradable
<i>CCel</i>	Fracción de Contenido celular
<i>PB</i>	Contenido en Proteína bruta ( <i>PB</i> ) (g/kg MS)
<i>PB_sol</i>	Fracción de <i>PB</i> soluble o rápidamente degradable
<i>PB_deg</i>	Fracción de <i>PB</i> lentamente degradable
<i>PB_NoDeg</i>	Fracción de <i>PB</i> no degradable
<i>FND</i>	Contenido en <i>FND</i> (g/kg MS)
<i>K2</i>	Tasa de paso de la <i>PCD</i>
<i>Tipo de Forraje</i>	1 si es un forraje limitado, 2 si es un forraje ad libitum

*Variables relativas a las características del animal*

<i>PV</i>	Peso vivo de la oveja adulta (kg)
<i>DiaGest</i>	Día de gestación
<i>DiaLact</i>	Día de lactación
<i>PicoLact</i>	Producción lechera en el pico de lactación (l/d)
<i>PesoCor</i>	Peso del cordero (kg)
<i>Milk_fat</i>	Contenido en grasa de la leche (g/kg)
<i>Estado</i>	Estado fisiológico de la oveja (Seca, lactante o gestante)
<i>Actividad</i>	Estabulada, pastoreo en zona llana (1km), pastoreo en zonas de monte (5km)

*Variables de manejo*

<i>Limite_forrage</i>	Cantidad de forraje limitado ofertado (kg MS/d)
-----------------------	---

*Ingestion\_Concentrado* Cantidad de suplemento concentrado ofertado (kg MS/d)

*Variables de salida*

*Ingestion\_Forraje* Cantidad de forraje total ingerida (kg MS/d)  
*Ingestion\_AdLibitum* Cantidad de forraje ad libitum ingerida (kg MS/d)  
*Ingestion\_Total* Cantidad de MS ingerida (kg MS/d)  
*EM* MJ energía metabolizable/día  
*PM* Gramos de proteína metabolizable/día

*Variables inicializadoras*

*EM* 15  
*PM* 160  
*qm* 0,65

*Constantes*

*k1* 0,30  
*k9forraje* 0,11  
*k9concentrado* 0,12  
*k10* 0,06  
*k14* 0,03  
*K\_PB\_sol* 0,80  
*GE* 18,4 MJ/ kg MS

***Algoritmo de funcionamiento del bucle hora:***

*Cálculo de las necesidades de EM (MJ):*

Los MJ/día necesarios para el mantenimiento y producción se calculan a partir de las ecuaciones propuestas por el AFRC (Alderman y Cottrill, 1993), para lo cual se tiene en cuenta el peso, el estado fisiológico, la producción lechera potencial y la actividad física de la oveja. Para el cálculo de las eficiencias (k) de utilización de la energía para las distintas funciones (mantenimiento, gestación y lactación), se utiliza un valor inicial de

metabolicidad de la dieta ( $q_m$ ) de 0,65 en la primera iteración, mientras que en las sucesivas iteraciones se utiliza la  $q_m$  calculada el día anterior.

Cálculo del nivel de alimentación potencial ( $NA_{pot}$ ):

El nivel de alimentación potencial se utiliza para calcular el factor de corrección de las tasas de paso, las cuales aumentan cuando el animal tiene necesidades energéticas (NecesidadesEM) superiores a las de mantenimiento (EMm) (descontada la energía necesaria para la actividad física (EMactividad)), y se calcula con la siguiente ecuación:

$$NA_{pot} = \frac{NecesidadesEM}{EMm - EMactividad} \quad [14]$$

Cálculo del factor de corrección de las tasas de paso por nivel de alimentación (factorNA)

Esta regulación metabólica propuesta por (Herrero, 1997) se aplica a las tasas de paso y digestión de las fracciones de alimento.

$$factorNA = 0,25(NA_{pot} - 1) \quad [15]$$

Cálculo de la señal Quimiostática de reducción del tamaño ruminal ( $S_q$ )

Esta regulación metabólica es una adaptación de la regulación propuesta por (Hackmann y Spain, 2009), y supone que el tamaño efectivo del rumen se reduce cuando la energía consumida (aportesEN) es superior a las necesidades (necesidadesEN) expresadas en energía neta.

$$S_q = \frac{necesidadesEN}{aportesEN} \quad [16]$$

Cálculo del tamaño máximo del Rumen (RUMENMAX)

Esta variable refleja el volumen máximo del rumen a través de los kg de MS que puede albergar, aunque generalmente se suele denominar "tamaño de rumen". Se calcula inicialmente a partir del PV del animal [17] y posteriormente se puede ajustar en

función de la temperatura ( $T^a$ ) [18], las restricciones impuestas por el estado fisiológico (día de gestación [19] y lactación [20]), la restricción por el valor de metabolibilidad (si  $qm$  es mayor de 0,59 [21]), y por último una reducción si el valor de  $Sq$  es menor de 1 [22].

$$RUMENMAX = 0,01PV^{1,15} \quad [17]$$

$$RUMENMAX = RUMENMAX(0,02T^{a2} - 0,0031T^a + 1,083) \quad [18]$$

$$RUMENMAX = RUMENMAX(-0,0017DiaGest + 1,15) \quad [19]$$

$$RUMENMAX = RUMENMAX(0,01DiaLact + 0,9) \quad [20]$$

$$RUMENMAX = RUMENMAX(24,567qm^2 - 34,694qm + 12,918) \quad [21]$$

$$RUMENMAX = RUMENMAX * Sq \quad [22]$$

Excepto la última, las ecuaciones son las mismas que utiliza el modelo de (Silveira, 2000), si bien para poder ajustarlo a las condiciones del ovino se ha optado por incluir una modificación en la ecuación inicial, que calcula el tamaño de rumen en función del PV del animal, para ello se ha substituido la ecuación original de (Illius y Gordon, 1991), por una ecuación actualizada (Gordon y Illius, 1994) que propone un tamaño de rumen ligeramente menor.

Para la modificación por  $qm$  no se utiliza el valor del día anterior sino el correspondiente a la hora anterior a partir de la EM acumulada y de la ingesta diaria extrapolada para 24 horas. De esta manera, el valor de  $qm$  aumenta a medida que pasan las horas, y si en un momento se calcula una  $qm$  alta, el rumen se reduce únicamente durante esa hora, en lugar de reducirse durante el día entero.

### Cálculo de la ingesta

En este módulo se estima únicamente la ingestión de forraje ya que el concentrado se consume en la cantidad que determine el usuario del modelo y a las horas indicadas<sup>3</sup>. Además, asume que el proceso de ingestión se activa cuando  $MS\_RUMEN$  se

---

<sup>3</sup> En el software final existe un parámetro configurable para limitar la cantidad de concentrado máxima diaria ofrecida al animal.

encuentra por debajo del 90% de RUMENMAX. El primer día de simulación se utiliza un valor de MS\_RUMEN de 0,2 kg y en las siguientes iteraciones se utiliza la MS\_RUMEN resultante en la iteración o día anterior. Si se dan las condiciones, la ingesta será el resultado de la ecuación [23].

$$Ingesta = RUMENMAX - MS\_RUMEN \quad [23]$$

Si el forraje ofertado en ese momento es el forraje limitado y la ingesta calculada sumada al total acumulado de forraje limitado es mayor que el límite, la ingesta estimada será igual al límite menos el total acumulado de forraje. A Una vez consumido todo el forraje limitado, comienza a entrar en la ración el forraje a libre disposición.

#### Cálculo del tiempo medio de retención y de las tasas de paso

Para el cálculo del tiempo medio de retención (TMR) en lugar de tomar la ecuación del modelo de partida se ha incluido una versión actualizada (Gordon y Illius, 1994):

$$TMR = 14,1PV^{0,27} \quad [24]$$

Cálculo de las tasas de paso y digestión que no son constantes:

$$K0 = -0,0487 + 0,176CC + 0,145PCD + 0,0000231PV + (-0,0487 + 0,176CC + 0,145PCD + 0,0000231PV)factorNA \quad [25]$$

$$K3 = \frac{1}{0,75TMR} + \left( \frac{1}{0,75TMR} \right) factorNA \quad [26]$$

$$K5 = 0,2K3 + 0,2K3 factorNA \quad [27]$$

$$K8 = \frac{1}{0,2TMR} \quad [28]$$

$$K11 = K3 + K5 \quad [29]$$

#### Cálculo de los kg de MS que hay en cada compartimento

La cantidad de MS ingerida cada hora se multiplica por las proporciones de CCel, PCD, PCND, PB\_sol, PB\_deg y PB\_NoDeg, para calcular las cantidades que se incorporan a

CC1, PCD1, PCND1, PB\_sol, PB\_deg y PB\_NoDeg (Figura 5). Además, las tasas de paso y digestión que se actualizan cada hora, se aplican al resto de fracciones carbonadas y proteicas que hay en cada compartimento (rumen, intestino delgado y grueso).

Cuando hay ingestión de concentrado, los compartimentos de la figura se duplican para simular el forraje de manera paralela. La digestión del concentrado se hace de la misma manera que la del forraje. Al final del día el aporte de nutrientes del concentrado se suma al acumulado con el forraje para calcular la EM y la PM aportadas.

#### Cálculo de los aportes de Energía y Proteína

Los aportes que se calculan a partir de los alimentos digeridos son EM y PM.

Cálculo de EM (MJ):

Para calcular EM [30] se tienen en cuenta el 80% (Herrero, 1997) de los HC digeridos en el rumen, y el total de los digeridos en el intestino delgado y el intestino grueso, que entre todos conforman los HC digeridos (HC\_dig de la fórmula 30). Estos se multiplican por el valor medio de energía bruta (18,4 MJ/kg MS) que contienen los HC y por 0,81, que es la relación media de EM/ED de los alimentos o raciones (Alderman y Cottrill, 1993).

$$EM (MJ / kgMS) = HC\_dig * 0,81 * 18,4 \quad [30]$$

Cálculo de PM (g):

Para calcular la PM\_aporteada se suman la PVDR y el N\_Dig\_IG. La PVDR se calcula a partir de la P\_Micro y de la PB\_dig\_ru, de manera que la fracción que sea mayor de las dos es la que se convierte en PVDR multiplicándola por 0,6375 [31] (Alderman y Cottrill, 1993).

$$PM (g) = 0,6375 * PVDR \quad [31]$$

#### Valores calculados totales:

Como salidas finales, cada día se obtiene la EM consumida, la PM, la cantidad de forraje total ingerida (diferenciando entre el forraje ofertado de manera limitada y el forraje *ad libitum*), la ingestión total y la metabolicidad de la dieta.

***Obtención de las variables relativas a la calidad del alimento: Análisis mediante la técnica de producción de gas***

El módulo de rumen requiere la caracterización del alimento con relación a la composición nutricional del mismo, la cinética de degradación y la digestibilidad.

Para ello se realizó un muestreo de alimentos representativos (praderas de pastoreo en valle, pastos de monte, heno de hierba y de alfalfa, silo de hierba, pienso concentrado y mezcla unifeed,) del sistema ovino lechero en las tres provincias de la CAPV (Tabla 40). Cada muestra se seco en una estufa a 60°C y posteriormente se picó a un tamaño de 1mm.

Tabla 40. Número de alimentos caracterizados procedentes de explotaciones de ovino lechero de la CAPV.

ALIMENTO	ARABA/ALAVA	BIZKAIA	GIPUZKOA	TOTAL
Heno de Alfalfa	2	1	1	4
Heno de Hierba	1	1	1	3
Mezcla Unifeed			3	3
Pasto de Monte		4		4
Pasto de Valle	2	7	18	27
Pienso Concentrado	2	2		4
Silo de Hierba	8		2	10
Silo de Maíz	2			2
Silo de Veza-Avena	1			1
TOTAL	18	15	25	58

Una parte de la muestra se utilizó para determinar el contenido en FND, FAD, PB, MS y Cenizas por vía húmeda AOAC (2004), mientras que el parámetro relacionado con la cinética de degradación se obtuvo a partir del análisis mediante la técnica de producción de gas in vitro (Tilley y Terry, 1963) y la digestibilidad se obtuvo posteriormente mediante la técnica de (Pell y Schofield, 1993).

**Descripción de la TPG y Digestibilidad in Vitro**

Los ensayos de producción de gas se realizaron utilizando como donantes de inóculo ruminal cuatro ovejas de raza Latxa fistuladas en rumen. La ración de estos animales consistió en heno de alfalfa y cebada en grano (70:30, MS), repartida en dos

raciones iguales de mañana y tarde, diseñada con el objetivo de satisfacer 1,2 veces las necesidades de mantenimiento.

La recolección del contenido ruminal se realizó antes de la distribución de la ración de la mañana. El contenido obtenido, una vez filtrado a través de una triple capa de gasa, se recogió en termos previamente calentados. El líquido ruminal resultante se transportó al laboratorio en recipientes termostatizados, donde bajo flujo permanente de CO<sub>2</sub>, se procedió de nuevo a su filtrado a través de 3 gasas, mezclando los contenidos ruminales de las distintas ovejas, conformando así el inóculo de la incubación.

La víspera del inicio del ensayo, se pesaron de cada muestra  $500 \pm 5$  mg MS en botellas de suero de 125 ml, añadiéndose 40 ml de medio de cultivo (McDougall, 1948). Las botellas se cerraron con tapón de butilo, sellándose herméticamente a continuación. Paralelamente, en cada una de las series se incubaron botellas con inóculo y tampón pero sin sustrato a modo de “blancos”. Finalmente se colocaron en un baño de agua a temperatura constante ( $39,0 \pm 0,1$  °C).

El inicio del ensayo se estableció con la inoculación en cada digester de 10 ml del inóculo anteriormente descrito, y el establecimiento de la presión ambiental en su espacio de cabeza.

La producción de gas se evaluó mediante un transductor de presión (Vega Bar 14), aplicando la técnica propuesta por (Theodorou et al., 1994), considerando las modificaciones sugeridas por (Mauricio et al., 1999). La lectura de presión acumulada en la cabeza de botella, previa agitación, se realizó a las 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 24, 27, 30, 33, 36, 48, 54, 72, 78 y 96 horas tras la inoculación, liberando posteriormente el gas acumulado. Cada muestra se incubó por triplicado en dos series independientes realizadas en semanas diferentes.

Los valores de presión se usaron para estimar el volumen de gas acumulado utilizando la fórmula propuesta por (Frutos et al., 2002), considerando esta ecuación como adecuada debido a la similitud de las condiciones de altitud entre la localidad donde se desarrolló (León) y Vitoria- Gasteiz. Posteriormente, el gas así estimado se corrigió por el volumen de gas procedente del “blanco”, así como por la cantidad de materia seca incubada (MS).

Los resultados de producción de gas total (ml/g MS) se ajustaron a la ecuación descrita por (Krisnamoorthy et al., 1991) [32] mediante el PROC NLIN de SAS.

$$Gt = A\{1 - \exp(-c(t - lag))\} \quad [32]$$

En esta ecuación Gt equivale al Gas total, "A" se corresponde con la producción potencial de gas, "c" indica la cinética de producción de gas, "t" es equivalente al tiempo en horas y "lag" representa la duración de la fase de latencia. El parámetro "c" es la variable K2 del alimento.

Transcurridas las 96 horas de digestión in vitro, las botellas se introdujeron en el congelador durante al menos 30 minutos para detener la fermentación. Una vez descongeladas, se dosificaron 45ml de solución neutrodetergente y se mantuvieron durante 1 hora en estufa a 105°C. El contenido de las botellas se filtró utilizando un equipo de digestión de fibra Tecator, y se recogió en crisoles filtrantes de poro 2mm debidamente identificados. El contenido de los crisoles se lavó con acetona y etanol y los crisoles se secaron en estufa a 100 °C durante una noche y una vez secos, se introdujeron en un desecador y se registró su peso. La diferencia entre el peso original y el peso final nos indicó la Digestibilidad in Vitro de la Materia Seca (DIVMS) mediante la siguiente ecuación,

$$DIVMS = \frac{(grMSinicial - grMSfinal)}{grMSinicial} \quad [33]$$

Las proporciones de PCD [35] y CCel [34] de cada alimento analizado se obtuvieron a partir de la DIVMS y la proporción de FND.

$$CC = 1 - FND \quad [34]$$

$$PCD = DIVMS - CC \quad [35]$$

Con relación a las fracciones de PB soluble, degradable y no degradable, se tomaron los valores indicados en la tabla de composición de alimentos de AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) para alimentos similares.

## ANEXO II. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL META-ANÁLISIS

Se realiza un meta-análisis de la diferencia de riesgos utilizando el software EPIDAT (2008).

En el caso de la fertilidad el riesgo es la probabilidad de parir, y en el de la prolificidad la probabilidad de presentar parto múltiple. La diferencia de riesgos [36] de cada estudio seleccionado se mide como la diferencia entre la probabilidad del grupo que presenta  $CC \geq 2,5$  o ha recibido *flushing* y la del grupo que presenta  $CC < 2,5$  o no ha recibido *flushing*, para el estudio del efecto de la CC o del *flushing* respectivamente.

$$\theta_i = (p_1 - p_2) \quad [36]$$

Para calcular la diferencia de riesgos global o efecto global [38] de todos los estudios seleccionados en cada meta-análisis, la diferencia de riesgo del estudio  $i$  se pondera por la inversa de la varianza ( $w_i$ ) o inversa de [37],

$$Var(\theta_i) = (p_1(1 - p_1)/(n_1 - 1)) + (p_2(1 - p_2)/(n_2 - 1)) \quad [37]$$

Donde  $n$  es igual al número de observaciones en cada grupo.

De esta manera el efecto global calculado mediante el modelo de efectos fijos (Egger et al., 1997), es un promedio ponderado de los efectos individuales de cada estudio [38]

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \theta_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad [38]$$

Asumiendo una distribución normal, el IC al 95% se expresa de la siguiente forma  $\theta \pm 1,96 \times \sqrt{Var(\theta)}$  [39], donde la varianza de ( $\theta$ ) se calcula como,

$$Var(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad [40]$$

Para estudiar la homogeneidad entre estudios se realizó el test de DerSimonian y Laird (1986) calculando el estadístico Q [41]. Este es equivalente a una distribución chi-cuadrado con k-1 grados de libertad, donde k es el número de estudios incluidos en el meta-análisis. La hipótesis nula asume que todos los efectos individuales son iguales, y la hipótesis alternativa asume que por lo menos uno es diferente. Cuando el valor Q excede los límites de la distribución chi, la hipótesis nula se rechaza.

$$Q = \sum_{i=1}^k w_i (\theta_i - \theta)^2 \quad [41]$$

Si existe heterogeneidad entre estudios, se utiliza un modelo de efectos aleatorios, para combinar las diferencias de riesgo. Con este modelo la ponderación de cada estudio de la ecuación [38] incluye la varianza entre estudios [42]:

$$w_i^* = \frac{1}{\text{Var}(\theta_i) + \tau^2} \quad [42]$$

Donde  $\tau^2$  se calcula usando las siguientes expresiones:

$$\bar{w} = \frac{\sum w_i}{k} \quad [43]; \quad s_w^2 = \frac{1}{k-1} \left( \sum w_i^2 - k\bar{w} \right) \quad [44]; \quad U = (k-1) \left[ \bar{w} - \frac{s_w^2}{k\bar{w}} \right] \quad [45]$$

$$\tau^2 = \frac{Q - (k-1)}{U} \quad [46]$$

Asumiendo una distribución normal, el IC al 95% se calcula igual que con el modelo de efectos fijos pero utilizando la siguiente varianza

$$\text{Var}(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*} \quad [47]$$

### ***ANEXO III. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN***

#### ***PASTOR***

PASTOR (Programa para el Asesoramiento Técnico en producción Ovina y gestión de Recursos) es un software de simulación y optimización de sistemas ganaderos de ovino.

El software PASTOR permite:

- Generar un rebaño con unas características medias (peso, CC y producción potencial), incluyendo variabilidad entre sus individuos, de manera estocástica.
- Configurar el manejo de alimentación y reproducción deseado para el rebaño generado.
- Establecer la carga ganadera ó el número de ha disponibles.
- Simular el rebaño por un periodo de 1 día a 10 años.
- Observar la evolución temporal del rebaño en relación a: evolución de los lotes, distribución de los partos, evolución de la CC y el peso, producción de leche y resultados reproductivos.
- Observar la evolución temporal de cada oveja del rebaño en relación a: peso, CC, ingestión de cada tipo de alimento y producción lechera estimada y potencial.
- Obtener el Margen Económico (MEc) de un periodo de tiempo simulado. El MEc supone la diferencia entre los ingresos por leche y corderos y los gastos en forraje, concentrado e inseminaciones.
- Por último, el software permite optimizar todas o parte de las variables de manejo alimenticio y reproductivo del rebaño creado.

En la Figura 39 se muestra la pestaña principal del programa. Los proyectos se guardan y cargan en el menú superior "File". Además de ésta, hay 4 pestañas más con las que generar y configurar el rebaño o proyecto. El balance de cada simulación, junto con los resultados técnicos se muestran en la pestaña principal.

### ***Pestaña Simulador (principal)***

En la parte superior izquierda de esta pestaña se configura la duración de la simulación. La ejecución se activa con el botón “RUN”. El espacio inferior de la pantalla se dedica a la expresión de las salidas de la simulación, el tipo de salida gráfica que se desee mostrar se selecciona en la lista desplegable que se muestra a la izquierda. Al final del anexo se muestran las gráficas correspondientes a la simulación del rebaño que se describe en el apartado 4.4.1. (Figuras 43-48). El botón “refresh” actualiza los resultados que se quieren mostrar en las salidas gráficas. Cada vez que se ejecuta una nueva simulación de un proyecto, las salidas obtenidas son ligeramente diferentes debido a la inclusión de parámetros estocásticos dentro del modelo.

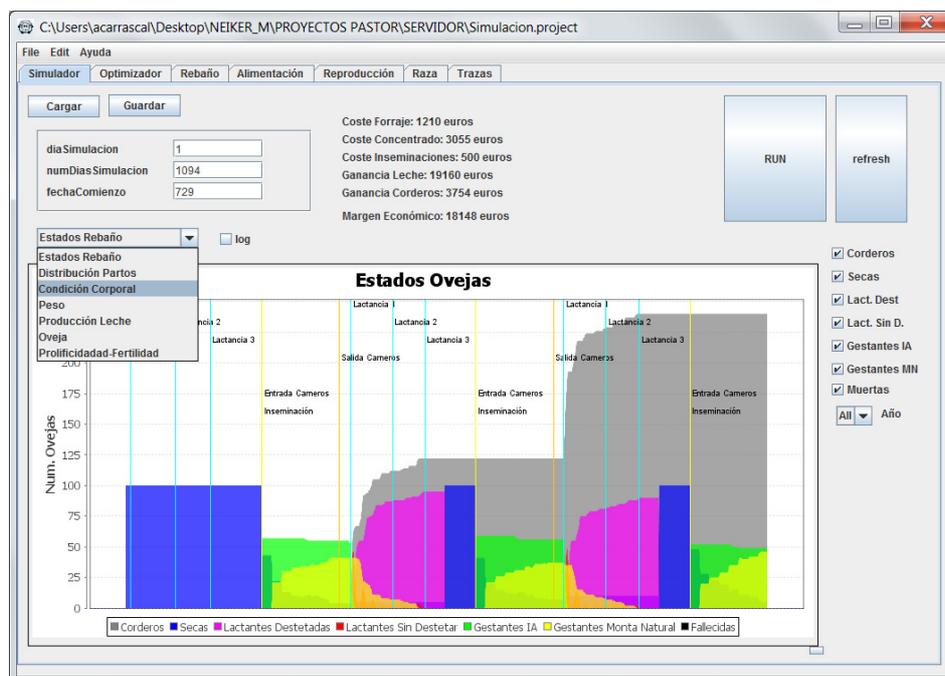


Figura 39.- Pestaña principal del programa PASTOR

La duración de la simulación viene marcada por la variable “numDiasSimulacion”, si bien el MEc corresponde a los días que van desde el día que exprese la variable “fechaComienzo” hasta “numDiasSimulación”. El objetivo de estas dos fechas es observar las ganancias, costes y balance de un periodo final de la simulación, que por ejemplo puede ser el último año de una simulación de tres años. De esta manera se evita incluir el primero o primeros años durante los cuales el rebaño se está adaptando a las condiciones

de la simulación. Esto es especialmente útil en la optimización, ya que el balance tenido en cuenta para calcular el fitness sólo incluirá los gastos e ingresos que sucedan entre esas dos fechas.

### ***Pestaña Rebaño***

En la parte derecha de la pestaña se encuentra el “Generador de rebaños”. Para crear un nuevo rebaño es necesario escribir un nombre y dar el valor medio y la SD de la edad, peso, producción potencial y CC de las ovejas de ese rebaño. Debajo de estas variables, se encuentran los tipos de animales del rebaño con los que comienza la simulación u optimización, el número total de animales será la suma de los cuatro lotes que aparecen. Una vez diseñado el rebaño este se genera automáticamente con el comando “Generar” que se encuentra en la parte inferior. En la parte izquierda se observan las características de la oveja seleccionada en la lista desplegable, cada oveja se identifica por su número “id”.

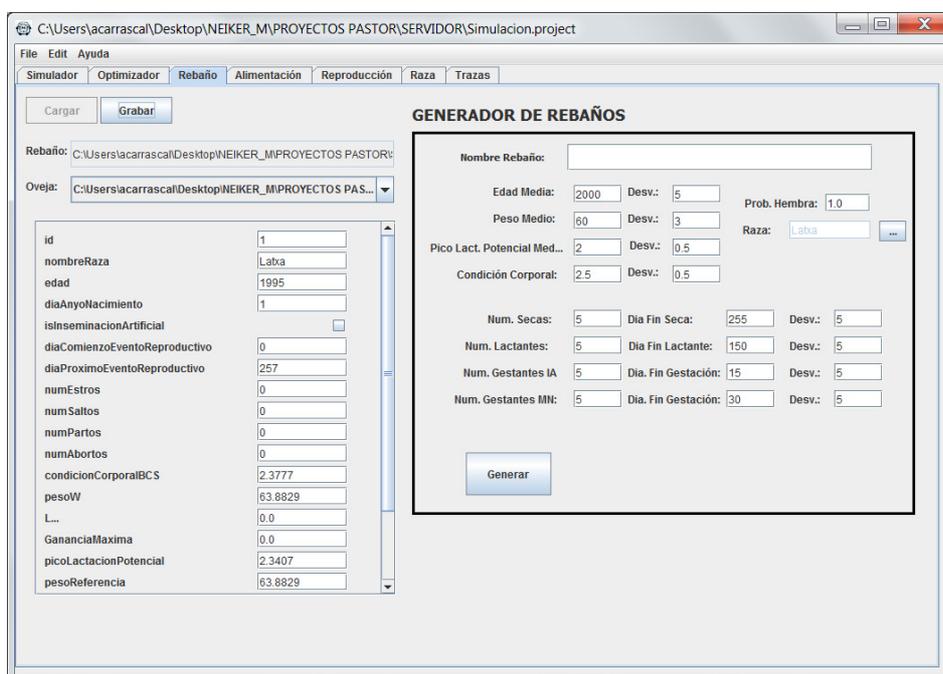


Figura 40.- Pestaña de generación del rebaño

### ***Pestañas Alimentación y Reproducción***

Estas pestañas permiten dar entrada a las variables que se muestran en la Tabla 21. Tienen relación con la cantidad de alimento (forraje y concentrado) que recibe cada lote de animales, el manejo reproductivo que se realiza y otras variables como el reparto de los 3 periodos de lactancia o la carga ganadera, entre otros. Estas decisiones de manejo se aplican a todo el periodo de tiempo que se simule. En la Figura 41 se muestra la pestaña alimentación.

En la versión actual de PASTOR (1.2) no se dispone de una pestaña en la que se puedan modificar los escenarios de precios de los insumos y de los productos así como el tipo de alimento disponible (forraje limitado, concentrado, y silo) y la calidad y productividad mensual de las praderas. Estas variables se modifican en ficheros de configuración internos.

Figura 41.- Pestaña de configuración de las variables relacionadas con el manejo de alimentación

### ***Pestaña Optimización***

En la esquina superior izquierda se configuran las variables del AG. El significado de estas variables se explica en los apartados 4.3.3.3 y 4.3.3.4 del capítulo 4 de la presente tesis. En el centro de la pantalla se configuran los valores de ponderación de las variables del fitness que están explicadas en el apartado 4.3.3.2 del capítulo 4.

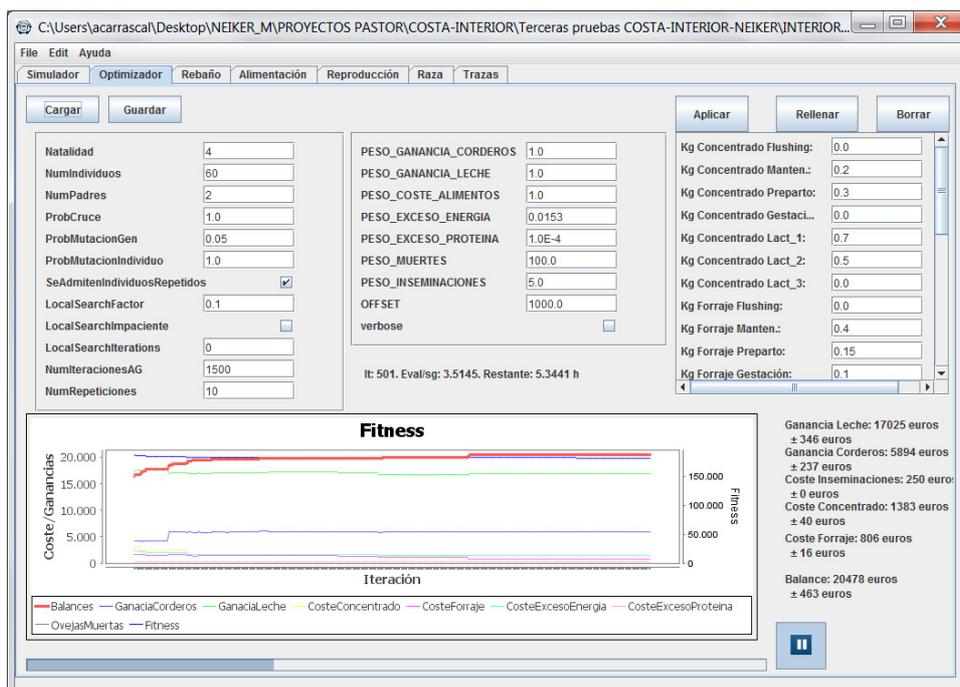


Figura 42.- Pestaña de configuración de la optimización

Las variables que son potencialmente optimizables se encuentran en la lista de la esquina superior derecha. El botón “Rellenar” da a cada variable el valor que esté guardado en los fichero de configuración del proyecto y el botón “Aplicar” graba en dichos ficheros aquellas variables que hayan sido optimizadas. Se optimizarán las variables cuyo valor aparezca en blanco en la lista. La grafica inferior muestra la evolución de la optimización y en la parte inferior derecha se observa el balance de la solución óptima.

### ***Pestaña Raza***

Existe una pestaña donde se pueden modificar las variables propias de la raza relacionadas con las variables de configuración necesarias para el módulo de simulación del comportamiento reproductivo.

### ***Salidas Gráficas***

En la pestaña “Simulador” se pueden seleccionar las salidas gráficas de una simulación. En todas las gráficas es posible seleccionar uno de los años de la simulación o

todos. (las gráficas de ejemplo corresponden a la simulación del apartado 4.5 del capítulo 3).

- Gráfica de estados del rebaño (Figura 39): se muestra el número de animales en cada lote (gestantes de IA, gestantes de MN, lactantes con cordero, lactantes sin cordero, secas, fallecidas y corderos nacidos).
- Gráfica de distribución de partos (Figura 43): muestra el número de ovejas que paren cada semana del año seleccionado.
- Gráficas de evolución de la CC, el peso y la producción lechera (Figura 44, Figura 45 y Figura 46): cada línea corresponde a un animal del rebaño, por lo que puede observarse la variabilidad con la que se han generado los animales de la simulación, con valores de CC entre 1,9 y 3, y de peso de entre 60 kg y 67,5 kg. Además se indican con barras verticales los tres periodos de dieta de lactación y la entrada y salida de los moruecos.
- Gráfica de resultados reproductivos (Figura 47): se muestran cada año la fertilidad y prolificidad total, tanto de monta natural como de IA.
- Gráfica Oveja (Figura 48): Datos de CC, peso, producción real y potencial e ingestión de la oveja que sea seleccionada en la lista desplegable.

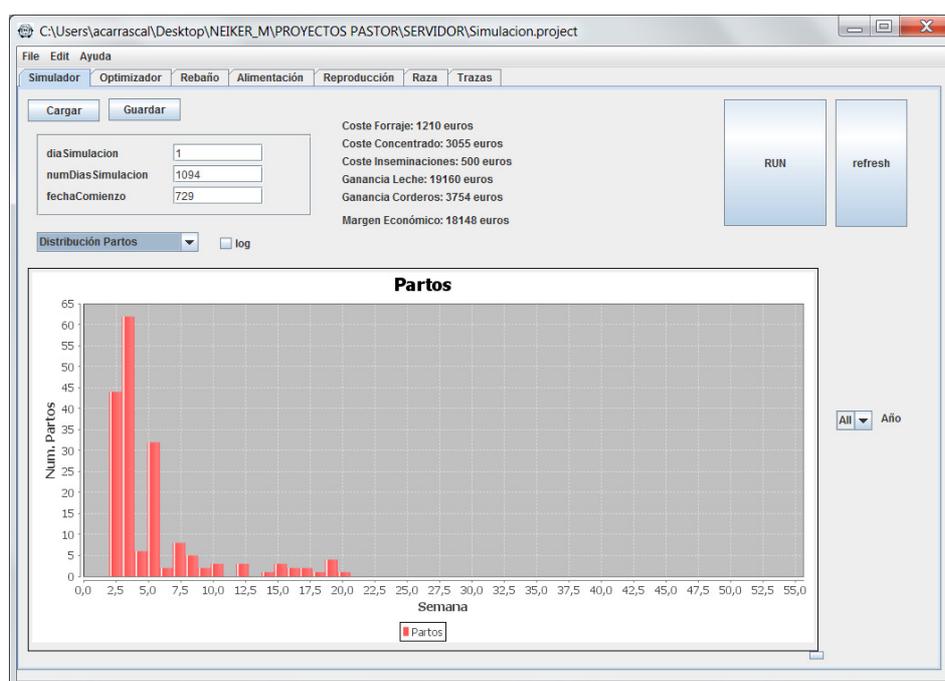


Figura 43.- Gráfica de distribución de partos

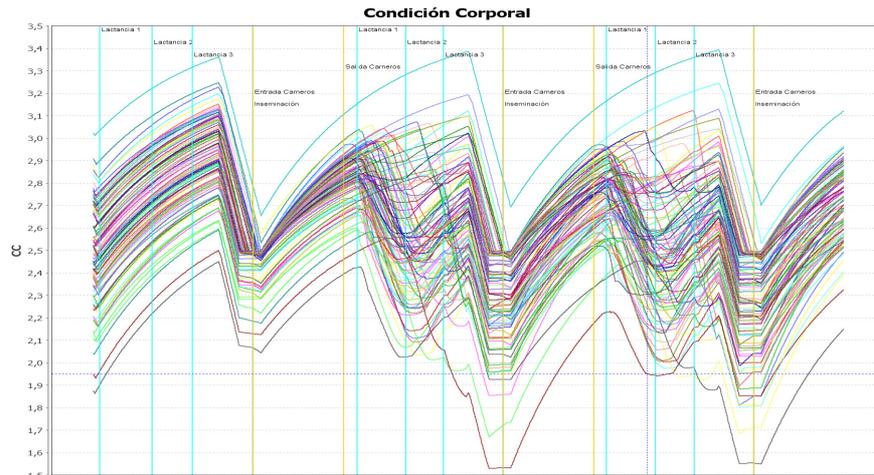


Figura 44.- Gráfica de evolución de la CC durante 3 años

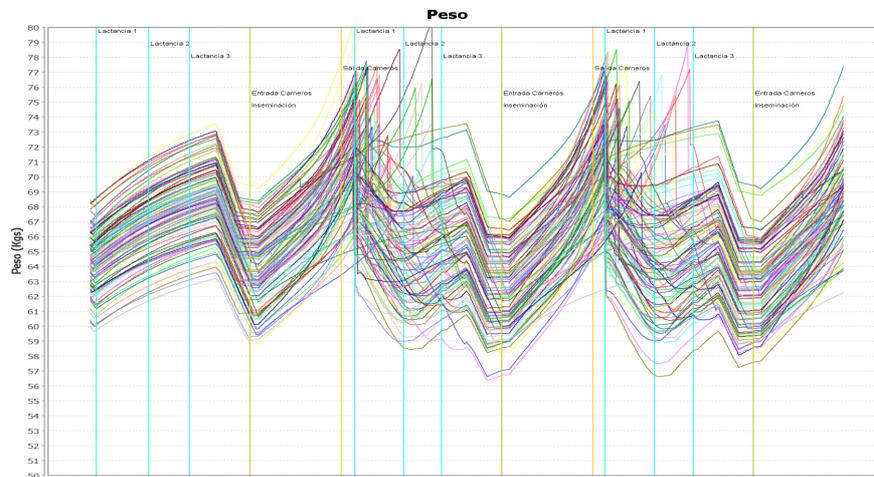


Figura 45.- Gráfica de evolución del Peso durante 3 años

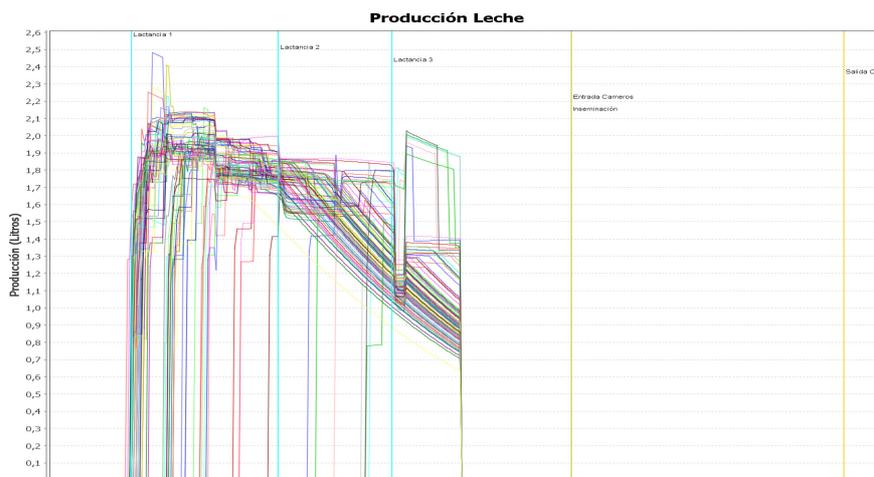


Figura 46.- Gráfica de Producción Lechera de un año simulado

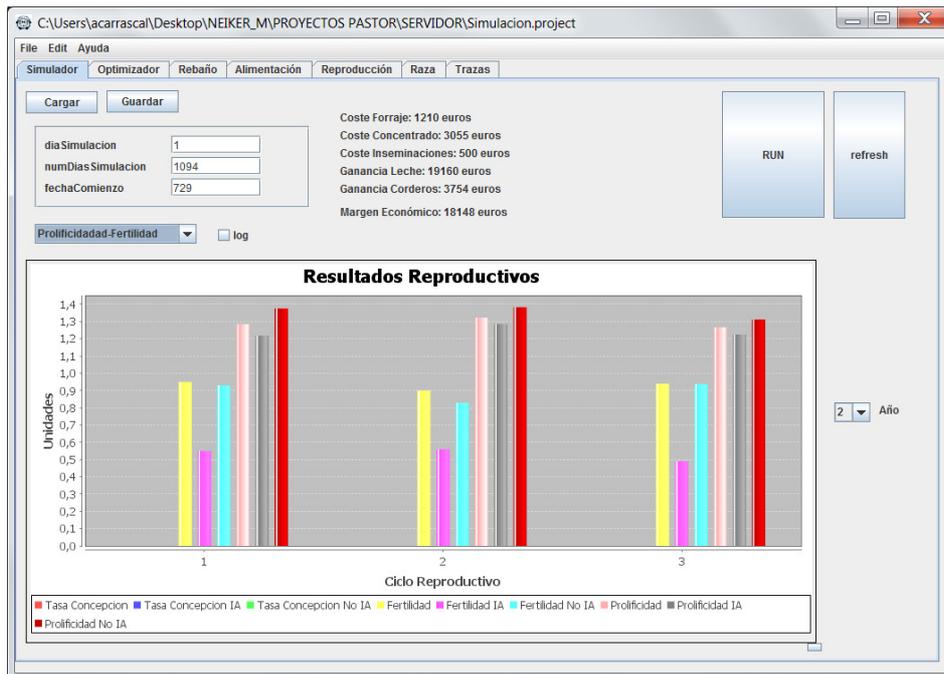


Figura 47.- Gráfica de resultados reproductivos

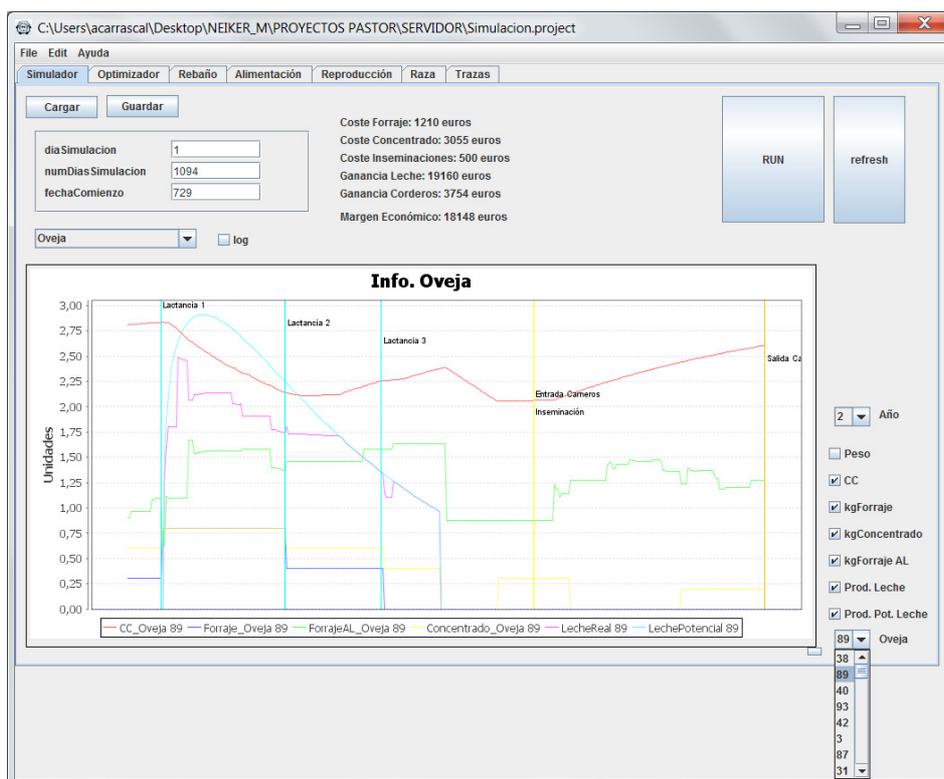


Figura 48.- Gráfica de información de la oveja