

Principios técnicos del funcionamiento del simulador de explotaciones lecheras

Sergio Calsamiglia¹, Lorena Castillejos¹, Susana Astiz², Joaquim Baucells³

¹Universitat Autònoma de Barcelona

²Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias

³Centre Veterinari Tona

e-mail: sergio.calsamiglia@uab.cat

Enero, 2017

EL MODELO DE SIMULACION

a. Conceptos generales

Las granjas lecheras están enfrentadas a cambios constantes en los escenarios económicos y técnicos que desafían su rentabilidad. La necesidad de mejorar la competitividad requiere decisiones estratégicas que son difíciles de evaluar, ya que dependen de numerosos factores técnicos y económicos como los precios, los costes laborales, el tamaño de la granja, el rendimiento técnico actual y sus interacciones. Hay preguntas cuyas respuestas no siempre son obvias.

Por ejemplo, el impacto de la intensidad de una ración (entendida como la proporción de concentrado en la dieta) depende de la estructura demográfica de la población, de la presencia o no de lotes de producción y de la relación entre el nivel de alimentación y la variabilidad interna de la producción entre animales. Estos factores, a su vez, dependen de otras decisiones de manejo o de estrategias de producción que pueden modificar la tasa de reposición, los criterios de secado de los animales, o el buen funcionamiento de las tareas reproductivas. Además, el retorno económico depende de factores externos como los precios de los alimentos y la leche.

La complejidad de estas interacciones requiere la integración de todos estos conceptos en modelos matemáticos (Mayer y col., 1998). Estos modelos simulan las consecuencias de los cambios que ocurren en un sistema bajo diferentes escenarios propuestos por el usuario. Con frecuencia, estos modelos se utilizan para: a) Tomar decisiones en situaciones complejas donde muchas variables interactúan de forma dinámica en el tiempo; b) Analizar el efecto de las circunstancias

futuras sobre el rendimiento y la rentabilidad de la granja; c) Evaluar los riesgos y las incertidumbres mediante análisis de sensibilidad, esenciales en el proceso de toma de decisiones; y d) Tomar decisiones sobre áreas en las que se dispone de poca información.

La integración de todos los factores implicados en la determinación de la rentabilidad de una granja es muy compleja y sólo se pueden aproximar desde la modelización matemática (Mayer y col., 1998). La simulación matemática de un sistema consiste en la agregación de submodelos diseñados para representar cada una de las partes de dicho sistema (Bethard, 1997, Shalloo y col., 2004, Skidmore, 1990).

La modelización se ha utilizado intensamente en áreas como la meteorología, aviación, ingeniería y economía. Su aplicación al sector agropecuario ha sido mayor en la parte agraria (riego, producción vegetal,...) que en la parte animal. Esta ausencia de aplicación no se debe únicamente a la falta de modelos que integren el sistema, sino a la poca consciencia de la complejidad del sistema en sí mismo, y de las múltiples interacciones que pueden incidir en los resultados. Recientemente, la posible aplicación de estos modelos en el proceso de decisión a nivel de granja ha cobrado interés dentro de lo que se ha venido a llamar "*precision farming*" (Bewley, 2010). La simulación trata de describir con precisión la evolución del sistema condicionada al valor de las variables que son modificables por el usuario, y permite explorar interrelaciones y condiciones que no se podrían analizar de ninguna otra manera, y examinar un rango de condiciones mucho mayor que las posibles en un contexto real.

Existen muchas áreas diferentes del sistema de producción lechera que ya han sido modeladas, como las enfermedades (Ostergaard y col., 2005; Bruijins y col., 2010); Estrategias reproductivas (Giordano y col., 2012ab; Shahinfar y col., 2015; Shahinfar y col., 2012;

Cabrera y col., 2010); Y las interacciones entre genotipo y medio ambiente (Kaniyamattan y col., 2016, Bryant y col., 2005), entre otras. Sin embargo, la mayoría de estos modelos no son fácilmente accesibles por consultores y productores para resolver sus problemas específicos en la granja, o se presentan para resolver una pregunta específica. El sector ha demostrado una gran capacidad para adoptar nuevas tecnologías y es lo suficientemente maduro como para adoptar el uso de herramientas de modelización para resolver sus problemas en el campo. Una evaluación técnica y económica antes de cualquier decisión es una parte esencial de la gestión del rebaño lechero.

El equipo de investigación del Servicio de Nutrición y Bienestar Animal de la Universidad Autónoma de Barcelona ha desarrollado una herramienta de modelización que permite explorar las consecuencias técnicas y económicas de los cambios en las condiciones de una granja. Esta herramienta se presenta en una interfaz fácil de usar para facilitar su aplicación a nivel de campo.

b. Desarrollo de modelos matemáticos en la producción lechera

Los modelos matemáticos se han utilizado de forma regular en la producción de leche, pero casi de forma exclusiva en la planificación de la alimentación (NRC, 2001; INRA, 2007; CNCPS, 1992). Estos modelos tienen como objetivo la optimización económica del aporte de nutrientes en un contexto de restricciones determinado. Sin embargo, los sistemas más complejos de modelización no se utilizan de forma regular a pesar de la existencia de éstos para aspectos tan diversos como el comportamiento epidemiológico de enfermedades como la mastitis o los problemas podales (Ostergaard y col., 2005;

Bruijns y col., 2010); las estrategias reproductivas (Plaizier y col., 1998); la política de reposición (Yates y Rehman, 1998); las interacciones entre genotipo y su medio (Bryant y col., 2005); o la evaluación de los rendimientos económicos (Shallo y col., 2004; Schills y col., 2007), entre otros. La mayor parte de estos modelos resuelven problemas concretos del sistema y son pocos los que abordan el sistema animal-granja de forma integral (Shallo y col., 2004; Schills y col., 2007).

De forma genérica, existen dos tipos de modelos matemáticos: los deterministas y los probabilísticos (o estocásticos). Los modelos deterministas utilizan valores concretos de variables y el resultado es único. Por el contrario, en los modelos estocásticos (o probabilísticos) las variables no son valores constantes, sino que están sometidos al azar y el resultado de la simulación es una distribución normal con una media y el grado de dispersión esperado. Los modelos estocásticos permiten no solo valorar el tipo de respuesta y su magnitud, sino también el grado de riesgo. En términos generales, los modelos estocásticos, aunque más difíciles de generar y, ocasionalmente de interpretar, son más cercanos a la realidad y aportan información que los deterministas no pueden aportar, como el grado de riesgo y/o incertidumbre alrededor de la respuesta. El modelo utilizado para las simulaciones aquí presentadas es de tipo estocástico.

Quizás la limitación más importante de los actuales modelos de simulación sea la integración de todos ellos en un solo modelo que sea amplio en concepción, que considere las interacciones entre las diferentes áreas, y que esté disponible para su uso regular por parte de los profesionales del sector. En este sentido, el modelo desarrollado por la Universidad Autónoma de Barcelona, y sus modificaciones, aportan soluciones a estos problemas

El desarrollo de un modelo requiere un marco teórico, su traducción a un lenguaje matemático y la estimación de los parámetros de las variables incluidas en dicho modelo. En la actualidad, la mayor parte de las granjas de tamaño medio y grande (superior a 60 animales) tienen sistemas informáticos para el control y gestión de la granja (DairyPlan, DairyFlex, DairyComp305, ...). El uso de estos programas ha demostrado ser útil en la gestión, la productividad y rentabilidad de la ganadería (Tomaszewski, 1997; Hayes y col., 1998). Pero estos programas de gestión tan solo evalúan los índices técnicos en el momento del análisis (aportan información económica limitada) sin modelizar el resultado de decisiones de gestión a futuro.

En consecuencia, es necesario desarrollar modelos matemáticos de simulación que permitan integrar todos estos conocimientos, modelizando desde el individuo, representando las variables del sistema y presentándolas de forma fácil para el usuario.

El equipo de investigación de la Universidad Autónoma de Barcelona (Servicio de Nutrición y Bienestar Animal, SNI BA), ha estado trabajando en los últimos 6 años en el desarrollo de herramientas de modelización para su utilización en los procesos de decisiones estratégicas en granjas ganaderas (proyecto financiado por el MINNECO, AGL2012-39888-C02-01). Este proyecto permitió la generación de una herramienta genérica que ha sido verificada en su funcionamiento. Pero su aplicación a condiciones específicas requiere su continua actualización y expansión. El desarrollo del modelo tiene una motivación fundamentalmente científica, ya que utiliza la evidencia científica para predecir la respuesta animal a los condicionantes del entorno utilizando variables individuales y colectivas. Pero por otra parte, el proyecto nació con la vocación de desarrollar una aplicación informática que permitiese acercar al técnico-productor las herramientas de modelización que le permitan

tomar decisiones complejas. En este sentido, el proyecto buscaba el equilibrio entre la rigurosidad de la simulación biológica y el desarrollo de una aplicación informática.

d. Materiales y Métodos

Estructura del modelo y de la generación de la granja

La estructura general del modelo se representa en la Figura B.2.1. A las vacas se les asigna un potencial genético para la producción.

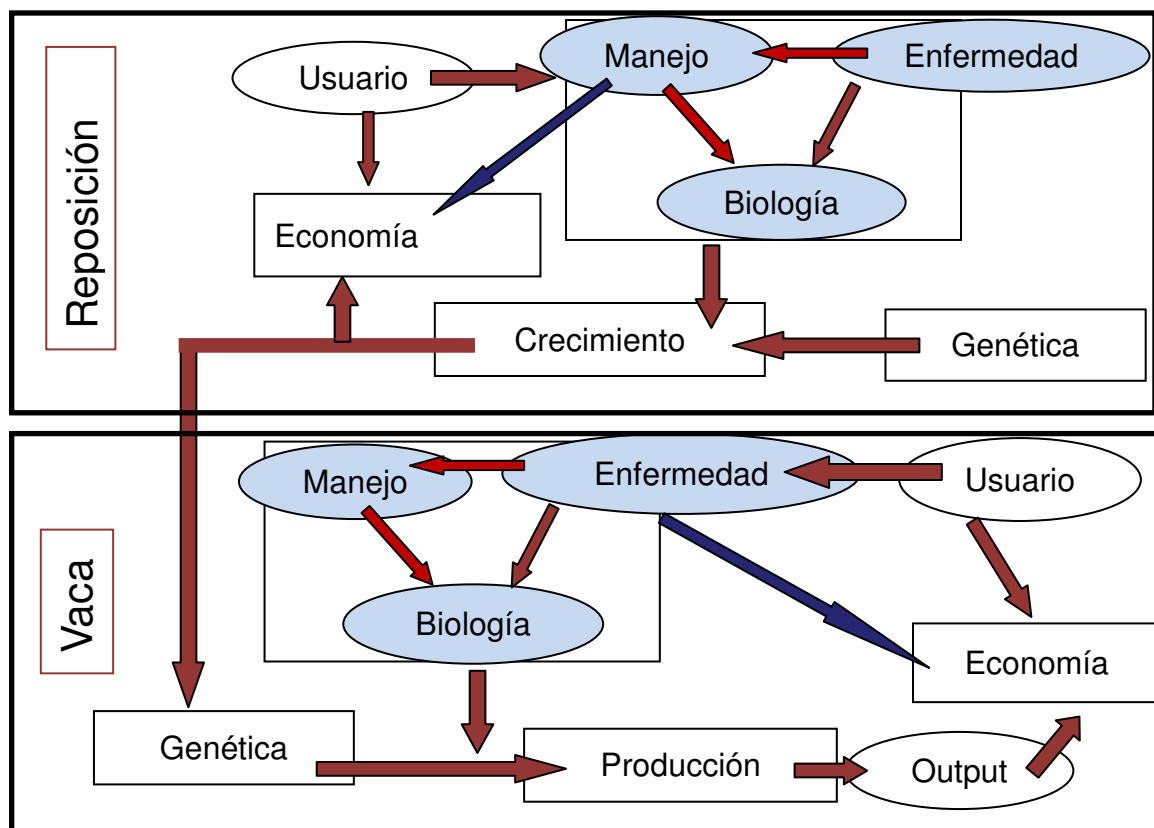


Figura B.2.1. Estructura general del modelo

Los factores biológicos (curvas de lactancia, crecimiento, necesidades y suministros de nutrientes, reproducción, ...) se describen y se ven

afectados por factores ambientales y de manejo (es decir, estrés térmico, tres ordeños, estrategias de agrupamiento, ...) y enfermedades (mastitis, cetosis, BVD, ...).

Los efectos resultantes de estos factores externos interactúan con el potencial genético para determinar la producción real. En este proceso se contabilizan los costes fijos y variables (alimentación, mano de obra, servicios públicos, depreciación de instalaciones y equipos, salud, ...) e ingresos (ventas de leche, terneros, vacas sacrificadas ...). Este proceso se repite diariamente para cada animal (novillas y vacas) durante el período de simulación.

Factores biológicos

Producción de leche. La producción de leche se determina en base a las ecuaciones de la curva de lactación de Wood (Woods, 1967, $Y = A * tb * e^{-ct}$, donde A = potencial genético t = tiempo de lactancia y bc son constantes que cambian con el número de lactancia). Para realizar la simulación, es necesario generar una granja con características similares. Para ello, la granja se genera automáticamente. A cada animal se le asigna un potencial genético de producción utilizando la media anual de la granja \pm 2000 litros como referencia de la variabilidad entre animales.

Los terneros heredan el potencial genético de su madre más el 0.75% (vea la sección de la reproducción para la justificación). La producción real se determina en base a la producción teórica y los efectos de la nutrición, las condiciones ambientales, los factores de gestión y la incidencia de la enfermedad.

Reproducción. Los valores por defecto para las variables de reproducción en el programa se muestran en la Tabla B.2.1 y

representan la media nacional española. Después del parto, las vacas retornan a la ciclicidad entre 35 ± 4 días en leche (DEL) al azar, y después, el ciclo de celo se repite cada 21 días. La inseminación se produce después del período de espera voluntario establecido por el usuario, y dependiendo del índice de detección de celo. La gestación tiene una duración de 280 ± 5 días. Aunque las pérdidas embrionarias no están programadas por defecto, pueden ser programadas si se considera necesario para una simulación específica.

El tiempo de inicio del ciclo estral después del parto, la detección de celo y la fertilidad pueden verse afectados por las condiciones ambientales, los factores de manejo y la incidencia de la enfermedad. La sincronización de la ovulación puede ser implementada como una inseminación artificial a tiempo fijo, establecida por defecto en 77 días en leche, una fertilidad del 45 y 70% para vacas y novillas, respectivamente, y un coste de tratamiento de 15 €.

El uso de semen tiene un coste específico y un impacto en el potencial genético de la descendencia. Por defecto, se le asigna una mejora del 0,75% por encima del potencial de su madre. Este valor se ha calculado a partir del aumento promedio del 1,5% en la producción de leche por año en los EEUU en los últimos 20 años (USDA, 2016), suponiendo que la mitad de la mejora se ha asociado a factores no genéticos. Sin embargo, el usuario puede asignar un valor diferente dependiendo de la genética utilizada en la granja.

Tabla B.2.1: Variables que describen el manejo reproductivo del simulador

Vacas		Novillas	
Tiempo espera voluntaria PP ¹ , d	50	Mortalidad al parto, %	2
Tiempo espera voluntaria MP ² , d	50	Administración de calostro	Sí-No
Detección celo, %	50	Edad mínima a la IA ³ -terneras, d	400
Sincronización celos	On-	Peso mínimo a la IA ³ -Terneras, kg	380
Días en lactación a IA ³ , d	Off	Altura mínima IA ³ -Terneras, cm	127
Fertilidad esperada, %	77	Detección celo Terneras, %	50
Coste, €	45	Fertilidad terneras, %	60
Fertilidad antes de 100 DEL,%	15.00	Sincronización (Terneras)	On-Off
Fertilidad antes de 100 DEL, %	35	Días de vida a la IA ³ , d	420
Días secado PP ¹ , d	35	Fertilidad, %	65
Días secado MP ² , d	60	Coste, €	15.00
	60	Mejora genética	1.0
		Probabilidad hembra, %	50
		Programa de crecimiento (para cada grupo)	
		De edad x a edad y, d	90-180
		Energía metabolizable, Mcal/kgMS	2.35
		Proteína Bruta, %	17.5
		Coste, €/kg Materia seca	0.24
Semen sexado+	On-	Transeferencia embriones	On-Off
Fertilidad	Off	Fertilidad, %	40
Hembra, %	0.85	Hembras,%	50
Aplicado a % mejores terneras	95	Aplicado a % peores terneras	3
Aplicado a % mejoes vacas	15	Aplicado a % peores vacas	0
Coste, €	5	Potencial genetico embrio, L/año	14,000
Mejora genética,	50	Coste, €	400
Intentos, n	1.075	Meses de Transferencia	6-9
	2	Intentos, n	1

¹ Primiparas ² Multiparas, ³ Inseminación Artificial

La proporción de hembras se fija en el 50%. Sin embargo, para acomodar el uso del semen sexado, esta relación puede ser modificada. En este caso, es necesario definir la fertilidad y la estrategia de utilización del semen sexado que incluye especificar el número de novillas y/o vacas adultas que se inseminan con semen sexado, el nivel de producción de los animales seleccionados, la

fertilidad, el número de intentos y los meses del año en que se aplica el uso de semen sexado.

Como ejemplo, en las condiciones por defecto del programa, el semen sexado se aplica al 15 y 5% de las novillas y vacas, respectivamente, con mejor potencial genético. El semen sexado sólo se utiliza entre los meses de octubre y mayo con una fecundidad que es de 0,85 de la fertilidad media de la granja y con un coste de 50 € por dosis, un 95% de posibilidad de ser hembra y una mejora genética que es la misma que la inseminación normal (0,75% de mejora respecto a la genética de la madre). El uso de semen sexado se aplica sólo en los 2 primeros intentos, después de lo cual la vaca accede a un protocolo de inseminación normal.

La transferencia de embriones también puede programarse en condiciones similares, y es necesario definir el tipo de animales seleccionados para la transferencia (receptoras), la fertilidad esperada, el potencial esperado de producción de leche de la descendencia, los meses del año de uso, el coste y el número máximo de intentos.

El período seco. Las vacas se secan cuando se alcanza la duración esperada del período seco. Sin embargo, si la producción es inferior a un valor mínimo, el animal también se seca (15 l / d por defecto). La duración real del período seco varía en función de la fecha real de parto, considerando que la gestación tiene una duración de 280 ± 5 días. Los secados largos o cortos tiene efectos sobre la productividad de la siguiente lactación según los datos de Pinedo y col. (2011), Steeneveld y col. (2014), Lefebvre y Santschi (2012) y Timms (2004). Si el período seco es superior a 70 días, el potencial de producción en la siguiente lactación se reduce en un 10%. Si la

duración del período seco de las vacas multíparas disminuye por debajo de 30 días, se produce una reducción del 0,7% en la producción por cada día por debajo de 30 días en el potencial genético que se aplica a la siguiente lactancia, resultando en una pérdida productiva del 21% si no se produce el secado. Para las vacas primíparas, la producción potencial de leche de la siguiente lactación comienza a disminuir cuando el período seco es inferior a 45 días, con una reducción del 0.6% por día, resultando en una reducción del 27% en la producción para la siguiente lactación si no hay período seco.

Terneros y Novillas. Los valores por defecto para las variables más relevantes relacionadas con terneros y novillas se muestran en la Tabla B.2.1. Después del parto, todos los machos se venden. Las hembras nacen con 40 kg de peso corporal y 75 cm de altura. Cuando no se proporciona calostro, la incidencia de enfermedades respiratorias y diarrea en terneros se multiplica por 3 durante los primeros 90 días de vida. El crecimiento en peso y altura se calcula usando una adaptación de las ecuaciones NRC (2001) (ver necesidades y aportes de nutrientes en la siguiente sección).

La pubertad se define con un peso corporal de 325 kg. Las condiciones para las inseminaciones son determinadas por el usuario, y fijadas por defecto a un mínimo de 420 días de vida, 380 kg de peso corporal y 127 cm de altura. Después del parto, las vacas primíparas continúan creciendo a una tasa fija de 0.350 kg/d durante los siguientes 305 días. El peso corporal es relevante porque se utiliza en los cálculos para la ingestión de materia seca y las necesidades de energía y proteína para el mantenimiento. Si la granja no produce su propia recria, el usuario puede configurar la capacidad de la recria a 0.

Necesidades y aportes de nutrientes. Las necesidades y aportes de nutrientes están simplificadas en términos de energía (Energía neta de lactación (NEL) para vacas o energía metabolizable (EM) para novillas) y proteína bruta, y se basan en la ecuación del NRC (2001).

Para los terneros y las novillas, la ingestión de materia seca y las necesidades de energía y proteína se calculan con los supuestos utilizados para desarrollar las Tablas 10-1, 10-2, 10-4, y 11 del NRC (2001). Las necesidades dependen de la edad, la velocidad de crecimiento, la composición de ese crecimiento (dependiente de la edad y estado reproductivo) y el estatus reproductivo, y pueden verse afectadas por las condiciones ambientales, los factores de manejo y la incidencia de enfermedades. El usuario puede definir diferentes grupos de alimentación de novillas, y cada uno de ellos necesita la descripción de las características del grupo en términos de días de vida y/o peso vivo para cada grupo, la energía (ME / kg de materia seca (MS)) y la proteína (%) de la dieta, y el coste (€/Kg), para calcular el crecimiento y el coste de la cría de novillas.

Para las vacas adultas, se utiliza la ecuación [1-2] del NRC (2001), basada en peso vivo, la producción de leche corregida y la semana de lactancia, para calcular la ingestión de materia seca. La energía para el mantenimiento es $0.08 \text{ Mcal EnergíaNetaLactación (NEL)/ kg PesoVivo}^{0.75}$, y las necesidades energéticas para la producción de leche se basan en las ecuaciones [2-16] del NRC (2001) que considera el contenido en grasa y proteína de la leche. Las necesidades de proteína para el mantenimiento son relativamente constantes (425 g/d) para pesos entre 600 y 750 kg. Las necesidades de proteína para producción de leche se calculan en base a la eficiencia media del uso de la proteína (26%, Huhtanen y Hristov, 2009).

El aporte de nutrientes se calcula multiplicando la ingestión de materia seca real y su contenido de energía y proteína, y se compara con las necesidades, siendo el número más bajo la producción real. Sin embargo, se aportan 5 Mcal NEL/d durante los primeros 60 días posparto a las vacas adultas, y 3 Mcal NEL/d a las vacas primíparas, para justificar la movilización de la grasa corporal. Al mismo tiempo, las necesidades aumentan 1,2 y 2,0 Mcal NEL/d durante los días 150 a 300 en lactación para vacas primíparas y múltiparas, respectivamente, para contabilizar la recuperación de las reservas de grasa corporal, siendo el balance final de la lactancia igual a cero.

Otros impactos de la movilización de la grasa corporal sobre la reproducción no están modelizados actualmente, pero pueden aplicarse a través del incremento de la incidencia de cetosis que, a su vez, puede afectar a la fertilidad y la incidencia de otras enfermedades posparto.

Enfermedades. El sub-modelo de patologías se ha diseñado con mucha flexibilidad para permitir añadir cualquier enfermedad o modificar la incidencia o efectos de las incluidas por defecto. Para ello, se ha desarrollado una matriz de efectos potenciales para cualquier enfermedad y se proporcionan valores por defecto para las enfermedades más comunes (algunos ejemplos en la Tabla B.2.2). Sin embargo, debido a que la incidencia de la enfermedad y sus consecuencias son muy variables en la literatura, el usuario puede modificar estos valores para reflejar mejor las condiciones en su granja. Además de todos estos efectos, las interacciones con otras enfermedades también pueden programarse.

Tabla B.2.2. Ejemplo de la descripción de diferentes enfermedades con valores por defecto para prevalencias y efectos.

Nombre	Metritis	Mastitis	Hipo-Ca	Cetosis
Prevalencia, %				
Coste tratamiento, €/caso	16	22	50	30
Recidivas	25	30	-	0
Tipo animal	-	1.25	1.00	1.00
Incidencia primiparas, %	Vaca	Vaca	Vaca	Vaca
Duración, d	0.70	0.8	0.5	1.0
DEL de afectadas, d	10	30	50	40
Efecto estacional	2-30	0-400	0-25	0-50
Meses				
Prevalencia	-	-	-	-
Desecho de leche, d	-	-	-	-
Efecto en producción	5	5	0	0
Efecto permanente	0.90	0.85	1.00	0.93
Efecto en ingestón	1.00	1.00	1.00	1.00
Efecto en fertilidad	0.95	1.0	0.95	0.93
Retardo ciclicidad, d	0.90	1.0	1.00	0.70
Efecto en %Grasa	30	0	0	0
Efecto en %proteína	1.0	1.0	1.0	1.00
Efecto en detección de celo	1.0	1.0	1.0	1.00
Mortalidad, %	1.0	1.0	1.0	1.00
Aborto,	5	30	10	5
Incidencia, %				
Días de gestación, d	5	0	1.0	0
Interacciones	0-150	-	-	-
Enfermedad				
Probabilidad	-	-	Metritis	-
	-	-	X3	-

Por ejemplo, Chapinal y col. (2012) observaron que la hipocalcemia incrementaba el riesgo de padecer una retención de placenta en un 240%. Se pueden definir nuevas enfermedades o diferentes tipos de enfermedades al nivel de desagregación deseado por el usuario, siempre que se definan la incidencia y los efectos. Por ejemplo, la mastitis se define como una entidad única por defecto, pero los usuarios pueden crear diferentes tipos de mastitis (es decir, medioambientales y contagiosas, o *Staphylococcus aureus* y

Escherichia coli). Como los animales de mayor producción son más susceptibles a patologías, los animales con un potencial genético en el 20% superior del ranking dentro de la granja tienen una probabilidad de adquirir una enfermedad un 30% mayor.

Para las enfermedades infecciosas, existe la posibilidad de simular escenarios endémicos o en brotes. Para la incidencia endémica, puede programarse para tener incidencia diferente en diferentes estaciones del año (por ejemplo, una mayor incidencia de problemas respiratorios en invierno) o en periodos específicos del ciclo productivo (por ejemplo, la incidencia de mastitis puede ser mayor en el primer mes de lactancia) asignando diferentes valores de incidencia a cada periodo. En el modo de brote, se asume que la enfermedad entra en la granja a través de un único animal infectado y requiere la definición del número de días infecciosos y la tasa de transmisión de la enfermedad (nuevos animales infectados al día). Un animal infectado sufrirá las consecuencias descritas para la enfermedad.

Las vacunas se pueden programar para todas las enfermedades infecciosas y se definen en términos de grado de protección, reducción de los efectos si se infectan durante la vacunación, duración de la protección, frecuencia de vacunación y coste de la vacunación. Esta estructura de entrada de datos también puede aplicarse a otras medidas preventivas como la aplicación de bolos de calcio para prevenir la hipocalcemia o el propilenglicol para prevenir la cetosis, siempre que el tratamiento se aplique sistemáticamente a todas las vacas y se proporcione información sobre los efectos de tales tratamientos.

Factores de Manejo y Gestión. Hay muchas decisiones de manejo que pueden incorporarse en el programa siguiendo la misma estructura descrita para las enfermedades. Sin embargo, algunas condiciones de manejo han sido preprogramadas por defecto porque son comunes en las granjas lecheras y para ilustrar cómo utilizar esta función para incorporar estrategias adicionales que se utilizarán en el modelo.

Lotes de alimentación: El usuario puede crear lotes de alimentación diferentes definiendo el contenido energético y proteico de la dieta, el coste del kilogramo de dieta y los criterios de agrupación, que pueden incluir los días en lactación, el número de lactancia, el estado reproductivo y/o la producción de leche. Todas las vacas secas se asignan al grupo de secado. Por defecto, cuando un animal cambia de lote se produce una reducción de la producción del 5% durante 5 días para reflejar las pérdidas asociadas al estrés por el cambio de lote (Cabrera y Kalantari, 2015), pero el usuario puede modificar estos parámetros para adecuarse a sus condiciones. Si las vacas primíparas se agrupan por separado, la producción lechera de las vacas primíparas se incrementa un 8% (Grant y Albright, 1997).

Estrés por calor: El estrés por calor también se considera por defecto en los dos meses de verano. La severidad de los efectos se describe en leve o severa basándose en el valor mínimo del Índice de Temperatura y Humedad (THI) aplicado por mes y tiene consecuencias diferentes en la producción y composición de la leche, en la reproducción y en la incidencia de las enfermedades (West, 1994; Jordan, 2003) (Tabla B.2.3).

Por defecto, el estrés por calor severo resulta en una modificación (multiplicador) de la ingestión de materia seca (0,85), de la producción (0,90), del contenido en grasa y proteína de leche (0,92),

del índice de detección de celo (0,5) y de la fertilidad (0,5). Sin embargo, la duración, intensidad y los efectos del estrés por calor pueden ser modificados por el usuario para hacerlo más adecuado a su contexto.

Tres ordeños: Los efectos de la aplicación del tercer ordeño pueden modelarse definiendo sus efectos sobre la producción de leche, los cambios en el componente de la leche, el recuento de células somáticas y cualquier otra interacción potencial. Los valores por defecto se han definido basándose en las revisiones de Erdman y Varner (1995) y Smith y col. (2002, Tabla B.2.3). La producción de leche, el contenido de grasa y proteína de la leche, y el recuento de células somáticas se verán afectados por un factor de 1,09, 0,94, 0,99 y 0,85, respectivamente. La ingesta de alimento aumentará automáticamente debido a una mayor producción. El aumento de los costes de mano de obra o de ordeño debe asignarse en sus respectivas áreas.

Superpoblación: El usuario define la capacidad del establo en términos de espacio de comedero y camas. En el caso del espacio de comedero, se ha programado una reducción de la ingestión de materia seca del 0,40% y 0,25% para cada porcentaje superior a 125% y 140% de la capacidad para las vacas primíparas y multíparas, respectivamente, en base de los estudios de Grant (Instituto Miner, NY, EEUU) (Figura B.2.2). No hay suficientes datos en la literatura para proponer efectos negativos de la sobrepoblación en camas, por lo que no se han establecido efectos negativos por defecto.

Tabla B.2.3: Ejemplo de implantación de estrategias de manejo

Grupos de alimentación		Tres Ordeños	
Energía, Mcal/kg Materia Seca	1.67	Efecto producción	1.10
Proteína, %	17.3	Efecto %Grasa	0.94
Coste/kg Materia seca, €	0.25	Efecto %Proteína	0.94
Días en leche (min-max), d	-	Efecto Células somáticas	0.85
Estado reproductivo	-	Costes laborales	1.2
Producción (min-max), kg/d	>35	Costes máquina ordeño	240
Estrés Calor			
Periodo, meses	5-8		
Efecto sobre ingestión	0.85		
Efecto sobre producción	0.90		
Efecto %Grasa	0.92		
Efecto %Proteína	0.92		
Efecto detección celo	0.50		
Efecto fertilidad	0.50		

Las causas de eliminación de vacas del rebaño. Las vacas pueden salir de la granja debido a muerte accidental, enfermedad (donde el riesgo de sacrificio se define dentro de cada enfermedad) o una combinación de baja producción y baja fertilidad. Por defecto, el modelo decide sacrificar una vaca si no está gestante a los 300 días en leche (Giordano y col., 2012). Sin embargo, en algunas granjas se emplea una estrategia de toma de decisiones más compleja teniendo en cuenta el número de lactancia (primíparas vs. múltiparas), los días en leche, el estado reproductivo, la producción real de leche y el potencial genético. Por lo tanto, la tasa de sacrificio general y la vida productiva de una vaca no está predeterminada, y es el resultado de estas interacciones (Tabla B.2.4).

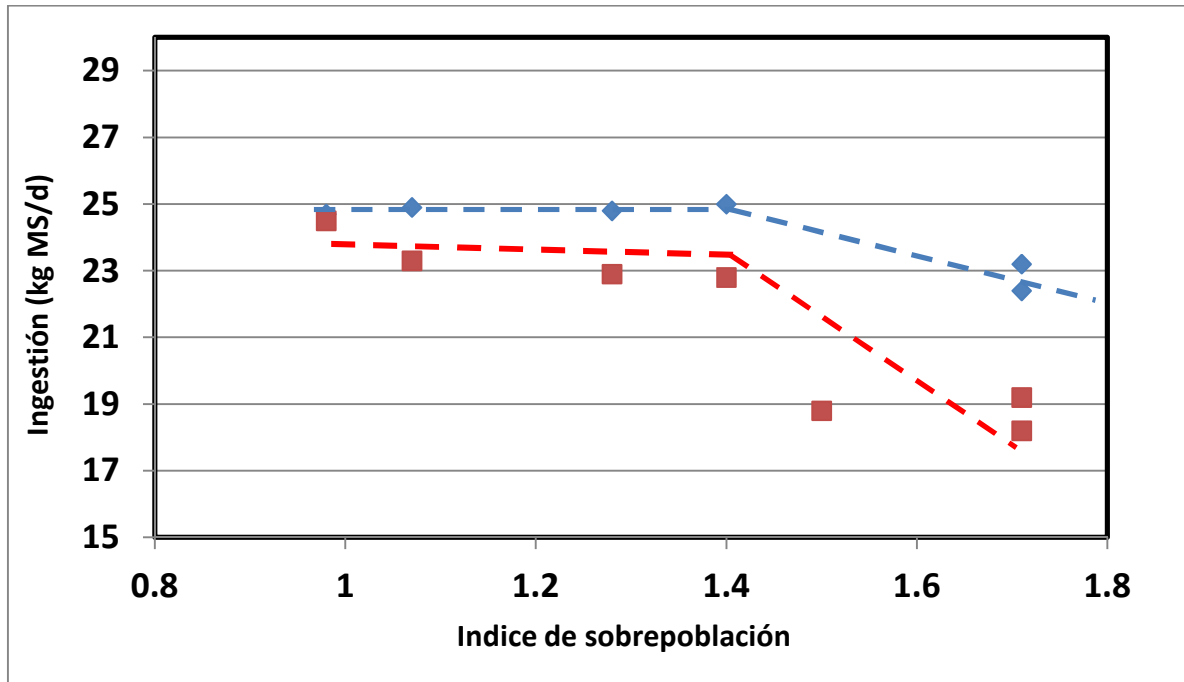


Figura B.2.2: Efecto de la sobrepoblación sobre la ingestión de MS
(Adaptado de Grant, 2011)

Economía, Trabajo, Instalaciones y Equipos. El programa requiere la entrada de los precios de los diferentes ingresos (leche, penalizaciones por calidad, precios de terneros y novillas, precios de vacas sacrificadas, ...), los costes laborales de cada empleado, los servicios (agua, electricidad, teléfono, ...), y las inversiones (instalaciones, equipamiento, ...), entre otros. Cuando se genera una granja, los valores por defecto para todos estos costes se generan a partir del coste promedio por vaca publicados por la encuesta del *Observatori de la llet* (2016) multiplicado por el número de vacas en el rebaño, pero el usuario puede modificarlos. El trabajo se define por defecto para un promedio de 50 vacas por persona, pero también se puede cambiar (Tabla B.2.5).

Tabla B.2.4: Criterios de eliminación en función del estatus reproductivo, Días en Lactación (DEL) y potencial genético

Producción, L/d	Días en Leche	Leche 305d	Acción ¹
>25			OK
15-25	<100		OK
15-25	101-200	<7000	A Eliminar
15-25	201-300	<8000	A Eliminar
15-25	>300	<9000	A Eliminar
<15			Matadero
>25			OK
15-25	<100		OK
15-25	101-200	<9000	A Eliminar
15-25	201-300	<10000	A Eliminar
15-25	>300	<11000	A Eliminar
<15			Matadero

1 A eliminar implica que se mantiene en el rebaño hasta alcanzar el nivel de producción que no justifica su permanencia en el rebaño; Matadero indica en nivel de producción al cual se envía al matadero.

Simulación y Archivos de Salida. Se recomienda que la simulación se realice entre 1 y 5 años. La naturaleza estocástica del programa requiere que se repitan las simulaciones. Las repeticiones dependerán del tamaño del rebaño y de los años simulados.

Los resultados se proporcionan agrupados por diferentes períodos de tiempo (meses, trimestre, semestre o año) en formato gráfico y tabla (Tabla B.2.6 como ejemplo). Esta información numérica está organizada en áreas: Resumen, Demografía, Producción, Reproducción, Novillas, Enfermedades y Economía.

Tabla B.2.5: Variables económicas del modelo

Variable	Valor	Variable	Valor
Ternero macho, €	80.00	Impuestos, €	300.00
Vaca a matadero €/kg peso	1.10	Alquileres, €	300.00
Ternera parto, €	1,800	Otros costes, €	300.00
Otros ingresos ¹ , €/año	25,000	Coste de inseminación, €	20.00
Precio base leche, €/1,000 kg	350.00	Coste agua, €	300.00
Grasa referencia, %	3,70	Coste energía, €	300.00
Bono/penaliz 0,1%grasa, €	2.00	Coste teléfono, €	300.00
Proteína referencia, %	3,20	Jabon-desinfectante, €	300.00
Bono/penaliz 0,1% protein, €	4.00	Coste cama, €	300.00
RCS ¹ referencia, (x1000)	250	Mantenimiento, €	300.00
Bono, €/50.000SCC ¹ /mL	30	Empleados	
Penaliz, €/50.000 SCC ¹ /mL		Nombre	John
		Salario, €	22,000
		Dedicación, %	100
		Equipo/inversiones	
		Nombre	Tractor
		Coste, €	45,000
		Amortización, años	10
		Intereses, %	7

¹ Recuento Células Somáticas

Se ha realizado una prueba de verificación de la fiabilidad de los resultados utilizando granjas de 50 a 1000 vacas, durante 1 a 5 años de simulación, con 5 a 1000 repeticiones. El criterio de estabilidad de los resultados se ha considerando adecuado cuando el el coeficiente de variación del margen bruto es inferior al 1%.

Tabla B.2.6: Ejemplo de las variables del modelo (Salidas)

Demografía	Ternereras
Vacas totales, n	Terneros nacidos, n
Ocupación, %	Detección celo, %
Vacas secas, n	Edad 1ª IA, d
Primíparas, %	Fertilidad, %
Lactaciones medias, n	Tasa gestación, %
Terneros nacidos, n	Edad primer parto, meses
Ternereras reposición, n	Terneros vendidos, n
Vacas eliminadas, n	Mortalidad, %
Potencial vacas elimin., L/a	
Eliminación involuntaria, n	Enfermedades (para cada una)
Eliminación voluntaria, n	n casos/n eliminadas
Tasa reposición, %	Mortalidad
Producción	Economía
Producción diaria, L/d	Ingresos
Pérdidas x enfermedad, L/d	Precio leche, €/1.000 L
Pérdidas x alimentación, L/d	Leche, €
Produccion vaca lact., L/d	Venta vacas, €
Produccion vaca pres., L/d	Venta terneros, €
Grasa, %	Otros ingresos, €
Proteína, %	Gastos
Cálulas somáticas, x1.000/mL	Alimentación vacas-terneras, €
Días secado, d	Costes médicos, €
	Costes de vacunación, €
Reproducción-vacas	Costes de analítica, €
Días abiertos, d	Costes fijos (energía, agua), €
Vacas >150 DEL ¹ vacias, %	Amortización, €
DEL ¹ , d	Costes laborales, €
Vacas gestantes, %	Compra de recría, €
Detección de celo, %	Otros costes, €
Fertilidad, %	Cambio de inventario animal, €
Tasa preñez, %	Margen bruto (Ingresos-gastos), €

¹ Días en leche

e. Discusión del modelo

Las granjas lecheras constituyen un sistema complejo con muchos factores que afectan su sostenibilidad e interactúan para dar lugar a efectos múltiples y coexistentes.

Hay muchos ejemplos donde un simple cálculo se utiliza con frecuencia para tomar una decisión estratégica, pero los efectos a largo plazo y las interacciones potenciales se ignoran. Por ejemplo, algunos ganaderos han considerado no inseminar en los meses calurosos de verano. Si bien el simple cálculo de los ahorros de semen versus el valor de las pocas gestaciones resultantes es fácil de hacer, ignora el hecho de que los animales no inseminados en Julio-Agosto serán inseminados en Octubre-Noviembre y parirán en verano, donde la producción de leche está en su pico máximo, aumentando las pérdidas de leche y probablemente la incidencia de las enfermedades posparto derivadas del estrés por calor. Estos factores deben tenerse en cuenta no sólo en la decisión de inseminar o no en verano, sino también en la evaluación de la inversión de cualquier estrategia para mejorar las gestaciones en verano. Otros ejemplos están directamente relacionados al presente trabajo, como puede ser la valoración de los efectos de la reducción de la ingestión de concentrado, o los diferentes esquemas de pago de leche que se han propuesto recientemente.

Aunque hay muchos ejemplos de modelos desarrollados para abordar áreas específicas de la producción lechera (Bruijins y col, 2010; Giordano y col., 2012; Kaniyamattam y col., 2016), la mayor parte son parciales en su diseño y no son fácilmente accesibles o flexibles para el usuario.

Con el simulador se ha conseguido desarrollar una herramienta que permite a los usuarios describir las condiciones técnicas y económicas de una granja y valorar las consecuencias de uno o más cambios técnicos o económicos en toda la granja. La transversalidad (genética, nutrición, reproducción, enfermedades, medio ambiente, gestión, economía, y cualquier interacción potencial) y la naturaleza dinámica y flexible del modelo, junto con su presentación en una interficie intuitiva es un enfoque innovador e interdisciplinario adecuado para evaluar una gran variedad de escenarios. El simulador se ha construido sobre 5 principios: 1) Es mecanístico, dinámico y estocástico; 2) Las simulaciones se ejecutan día a día y vaca por vaca. 3) Los algoritmos y los valores por defecto de las variables están avalados por evidencia científica; 4) La interficie de presentación es flexible, intuitiva y de uso fácil; 5) Está programado para permitir futuras mejoras y adiciones.

Algunos algoritmos en el modelo actual han sido simplificados en un intento de optimizar la necesidad de entrada de datos o la potencia computacional (tiempo de simulación). Por ejemplo, los efectos de la nutrición se han simplificado para considerar sólo la energía y la proteína, ya que es probablemente suficiente para la mayoría de las necesidades de simulación. Por lo tanto, el modelo busca el equilibrio entre la validez científica y la utilidad práctica de la aplicación informática.

No se ha realizado una verdadera validación desde el punto de vista estadístico por las dificultades para su ejecución. De hecho, debido a la naturaleza estocástica del modelo, la validación ortodoxa no es posible, porque el resultado es el promedio de un gran número de repeticiones. La verificación de los resultados a través de la simulación de efectos en diferentes escenarios (20 granjas diferentes

en España) y la comprobación de todas las principales áreas de intervención permitieron identificar errores, afinar algoritmos y verificar que la respuesta global y la sensibilidad del modelo son coherentes en el tipo y la magnitud de los efectos resultantes observados en la práctica.

Por último, es importante resaltar que la naturaleza estocástica de la simulación requiere la repetición de la simulación para evitar que los efectos del azar resulten en respuestas variables. El número de simulaciones requeridas para obtener resultados estables depende de la sensibilidad del índice a la variabilidad. En el modelo desarrollado aquí se ha utilizado el margen bruto por vaca y año como criterio de valoración de la variabilidad, considerándose adecuado cuando el coeficiente de variación fuera inferior al 1%. La Figura B.2.3 representa el coeficiente de variación (CV) de las réplicas, donde el eje x representa el número de repeticiones (= vacas adultas * años de simulación * réplicas) y el eje de las y representa el coeficiente de variación, y sugiere que se requieren 40.000 a 50.000 vacas * años de simulación * para proporcionar un valor CV inferior al 1%. Es decir, una granja de 300 vacas lecheras simulada a lo largo de 5 años requerirá 30 repeticiones ($300 * 5 * 30 = 45.000$) para obtener resultados donde el coeficiente de variación de los resultados sea inferior al 1%.

Estos datos deben ayudar en el proceso de decisión y presentar interacciones potenciales que deberían ser consideradas por el usuario durante el proceso de toma de decisiones. En todos los casos, los usuarios deben tener cuidado en la provisión de datos fiables para la simulación y se les recomienda encarecidamente que interpreten los resultados con la máxima responsabilidad

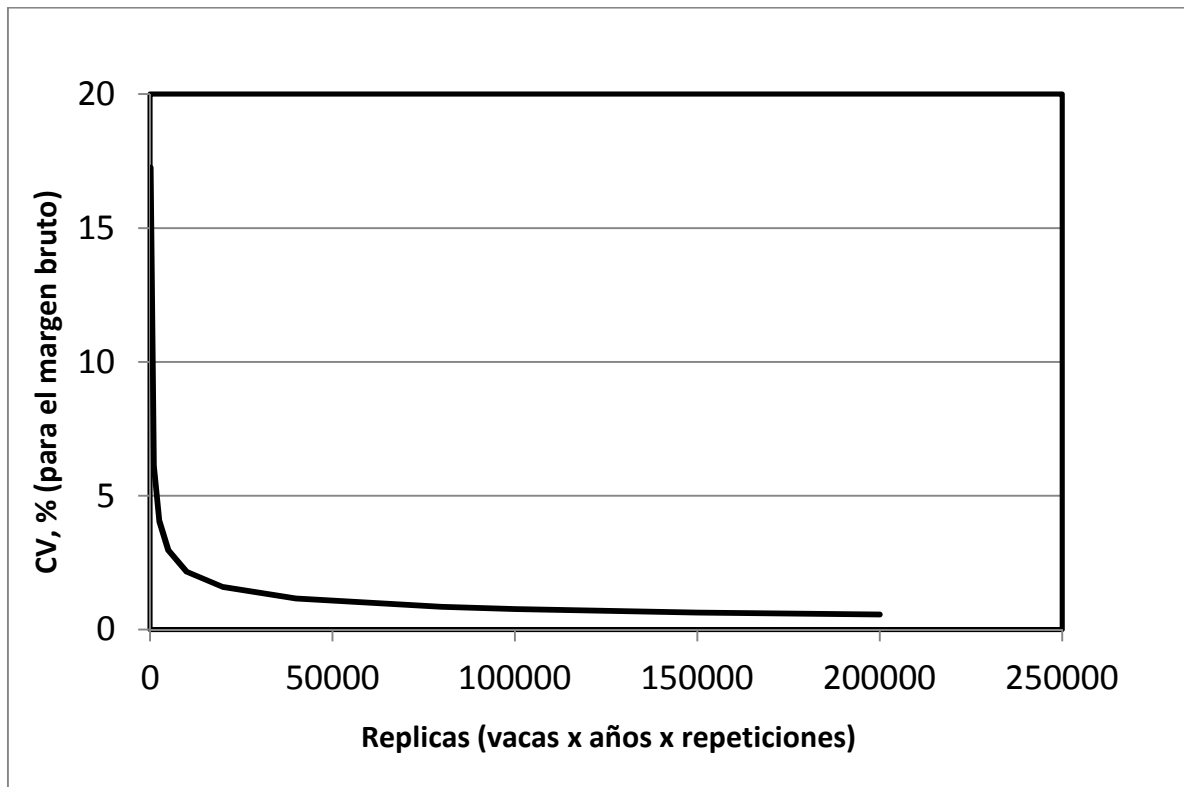


Figura B.2.3. Evolució del coeficient de variació en funció del número de rèpliques totals (vacas*anys*replicas)

f. Conclusiones

Se ha desarrollado un marco general para un modelo de granja lechera mecánico, estocástico, dinámico y flexible. La verificación de los resultados en diferentes granjas, la valoración de los efectos de cambios en las condiciones de simulación y el análisis de sensibilidad demuestran que el comportamiento del simulador se aproxima notablemente a la realidad. De esta manera, el simulador se convierte en una herramienta útil para señalar el tipo de cambio y la magnitud de las respuestas esperadas en unas condiciones predeterminadas. En este sentido, el modelo proporciona una herramienta potente y útil para explorar las consecuencias a medio

y largo plazo de las decisiones técnicas y económicas sobre la sostenibilidad económica de las granjas lecheras.