

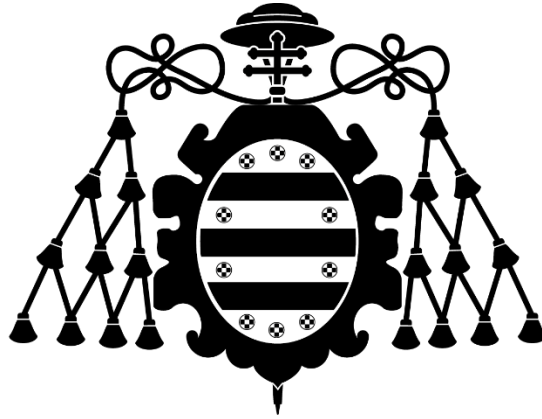


# Universidad de Oviedo

Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica, de Computadores y Sistemas

Tesis Doctoral

**Propuesta, desarrollo y verificación de modelos  
productivos para la optimización del control en  
explotaciones ganaderas de vacuno de leche**



# Universidad de Oviedo

Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica, de Computadores y Sistemas

Tesis Doctoral

**Propuesta, desarrollo y verificación de modelos  
productivos para la optimización del control en  
explotaciones ganaderas de vacuno de leche**

Directores:

**Miguel Ángel Pérez Martínez**

**Carlos Enrique Carleos Artime**

Autor: **José Ramón Arias García**

22 de octubre de 2014

## Índice

### Capítulo 1 Introducción y objetivos

1.1	Introducción	1-1
1.2	Objetivos del trabajo	1-5

### Capítulo 2 Estado de la técnica

2.1	Factores económicos del rendimiento de una granja	2-1
2.1.1	Parámetros que afectan el rendimiento económico en un tiempo breve	2-1
2.1.2	La mastitis como factor económico de primer orden	2-3
2.1.2.1	Métodos de recuento de células somáticas	2-5
2.1.2.2	Las transformaciones matemáticas del SCC	2-13
2.1.2.3	El valor del Somatic Cell Score (SCS)	2-14
2.1.3	Modelos de relación del recuento de células somáticas	2-15
2.1.3.1	El recuento de células somáticas y la mastitis	2-15
2.1.4	El recuento de células somáticas y la microbiología	2-18
2.2	El SCC y la producción	2-24
2.2.1	El recuento de células somáticas y la composición de la leche	2-26
2.2.2	El recuento de células somáticas y la máquina de ordeño	2-27
2.2.3	El recuento de células somáticas y los días en leche (DEL) y la lactación	2-30
2.3	Los modelos de producción	2-32

### Capítulo 3 Materiales y métodos

3.1	Origen de los datos	3-1
3.2	Contenido y estructura de los datos	3-3
3.3	Validación de datos y depuración de la información	3-7
3.4	Aspectos técnicos	3-9

### Capítulo 4 Modelo del perfil celular

4.1	Bases de partida del modelo	4-2
4.2	Metodología	4-7
4.3	Caso 1: modelo global	4-9
4.3.1	Validación del modelo global	4-15
4.3.2	Errores relativos	4-17
4.3.3	Validación con controles lecheros	4-44
4.4	Caso 2: modelo basado en controles lecheros	4-52
4.4.1	Validación del modelo basado en controles lecheros	4-53
4.4.2	Resumen de resultados de validación	4-54

<b>Capítulo 5 Modelo de producción</b>	
5.1 Consideraciones previas sobre el modelo	5-1
5.2 Primera aproximación al modelo	5-2
5.3 Segunda aproximación al modelo	5-6
5.4 Tercera aproximación al modelo	5-10
5.5 Comprobación del efecto de SCC sobre la producción	5-29
5.6 Comprobación del efecto de SCC sobre la producción a través de la lactación DEL5 patrón	5-35
5.7 Discusión sobre la relación entre la producción y el SCC	5-48

## **Capítulo 6 Modelado de las lactaciones largas**

6.1 Estudio de las lactaciones largas	6-1
6.2 Lactaciones largas. Origen	6-3
6.3 El coste económico de las lactaciones	6-6
6.4 Cálculo del modelo de lactaciones largas	6-10
6.5 Análisis económicos basados en los modelos	6-18
6.5.1 Lactación perpetua	6-18
6.5.2 El coste de la pérdida de un celo	6-21

## **Capítulo 7 Aportaciones y futuros trabajos**

7.1 Aportaciones	7-1
7.2 Trabajos futuros	7-6

## **Capítulo 8 Conclusiones**

### **Bibliografía**

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

La industria ganadera es una de las más importantes a nivel mundial por volumen de facturación y una de las principales fuentes económicas de la región asturiana. En el caso de Asturias, en la actualidad, hay 17021 explotaciones bovinas con un total de casi 388 mil cabezas (Sadei, Sociedad Asturiana de Estudios Económicos e Industriales, 2014) de las cuales están dedicadas a la producción de leche poco más de 117 mil reses repartidas en unas 2200 explotaciones de diverso tamaño con una cuota láctea asignada de 611301 Tm. Si observamos la evolución de la cuota láctea en función del número de titulares de explotaciones a lo largo de los últimos años (Figura 1.1) podemos comprobar que las explotaciones se están haciendo más grandes, lo que significa que los métodos de producción han pasado de estar basados en una economía de pequeña escala y familiar a un entorno más profesionalizado e industrializado en el que todas las herramientas que mejoren los resultados de la explotación facilitarán la pervivencia del negocio.

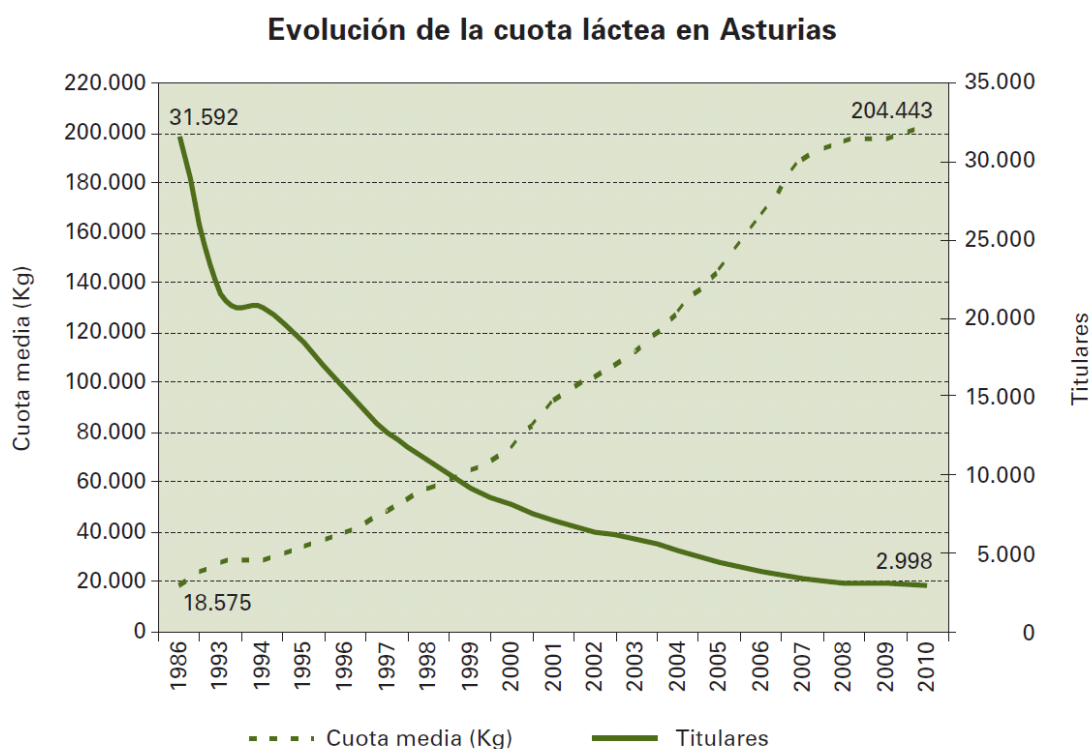


Figura 1.1.- Evolución del tamaño de las explotaciones lecheras asturianas a lo largo de los años

Esto se ha hecho mucho más patente en la actualidad debido al estrechamiento de los márgenes económicos para el productor, ocasionados por la volatilidad en los precios de los alimentos (con una marcada tendencia a la subida) y el mantenimiento de los precios que las centrales pagan por cada litro de leche producida.

En el contexto general de la ganadería bovina de leche, la parte más importante de los ingresos de las explotaciones viene de la producción de leche, considerándose totalmente marginal la venta de la carne de terneros (machos) y siendo anecdótica la venta de genética, es

decir, que son contadas las explotaciones que tienen un porcentaje significativo de los ingresos proveniente de la venta de embriones con elevadas calificaciones genéticas.

Así, teniendo en cuenta que los ingresos de las explotaciones lácteas se obtienen fundamentalmente de la venta de la producción lechera, son dos las principales acciones que se deben realizar para la mejora de los resultados económicos de cualquier explotación:

- Incremento del volumen de producción
- Incremento del precio de venta unitario.

El primero de los factores no es sencillo de manejar, puesto que una subida neta del volumen de producción puede no significar nada ya que el factor importante es la producción por cada animal y aun este deberá ser manejado con sumo cuidado para tener en cuenta el coste que supone producir cada litro, en lo que hay que tener en cuenta la eficiencia transformadora del animal entre otros términos.

Sin embargo, hay un parámetro que se viene manejando como básico y fundamental en la estimación de la producción: el recuento celular de la leche o recuento de células somáticas RCS o SCC (*Somatic Cell Count*) que determina la cantidad de células del sistema inmunitario y de escamación de la ubre que están presentes en la leche. Este parámetro se viene manejando como el principal indicador de salubridad del animal ( (Bramley & Dodd, 1984) (Hortet & Seegers, 1998)) y la mayor parte de la bibliografía consultada le otorga un papel decisivo en el volumen de la producción ( (Miller, Paape, Fulton, & Schutz, 1993) (Ng-Kwai-Hang, Hayes, Moxley, & Monardes, 1984) (Pedraza, 1991) (Philpot, 1967)).

El segundo de los factores (precio de venta unitario) actúa como factor multiplicativo para la explotación y, habida cuenta de la estrechez del margen económico de la producción que antes se comentó, resulta determinante a la hora de evaluar la viabilidad de una determinada explotación lechera. Un cambio en el precio unitario de un par de céntimos puede suponer la entrada en pérdidas y, de no corregirse rápidamente, abocar al cierre de la explotación con las consiguientes consecuencias socio-económicas.

Por lo tanto, cualquier factor que redunde en una mejora del precio de venta, repercutirá por fuerza en una mejora de los resultados de explotación y puede ser garante de su viabilidad presente y futura.

El precio de la leche para el productor se fija por contrato con la correspondiente central y, aunque no hay un modelo estandarizado y puede estar influenciado hasta por la posición geográfica de la explotación, lo cierto es que hay unas direcciones generales que redundan en valorar la leche en función de sus parámetros de calidad, que están dominados por los siguientes aspectos: RCS, contenido de proteína y contenido de grasa, considerándose como positivos los recuentos celulares bajos y los valores elevados de los otros dos factores. También existen otros factores que pueden afectar y que van ligados a muchas importantes cuyo fin es erradicar malas prácticas ganaderas, tales como la presencia de inhibidores, fruto del uso de antibióticos en el tratamiento veterinario de las reses sin esperar el correspondiente periodo de supresión.

En cualquier caso, aunque cuantitativamente hay variaciones importantes entre las diversas explotaciones, centrales lecheras, regiones y países, se puede decir de forma cualitativa que el precio de venta de la leche se fija valorando unos contenidos mínimos de grasa y proteínas, y

que está sujeto a un esquema bonus-malus en cuanto al contenido de células somáticas por litro de leche producida.

El contenido de proteínas y grasa total en la leche son parámetros fácilmente predecibles y poco influenciados por el entorno; se puede decir que una determinada explotación con un determinado rebaño mantiene más o menos estables dichos valores, salvo que efectúe cambios profundos en la composición de la ración de alimentación. Además, resulta relativamente sencillo mover el valor de la grasa al alza, sin más que modificar el rebaño para incorporar razas que efectúen un mayor aporte (como la danesa) o seleccionar dentro de la Holstein-Freisian aquellos animales con un mejor comportamiento en este sentido. También se está trabajando (Villar Bonet, 2008) en la mejora del perfil graso de la leche, valorando positivamente la presencia de grasas no saturadas y de ácido oleico aunque, a fecha de hoy, aún no se ha puesto de manifiesto en el precio para el productor. No obstante, se supone que en el futuro el término acuñado como "perfil de ácidos grasos saludables" actúe como un factor más en la situación contractual productor-central.

La proteína es un parámetro que sufre pequeñas variaciones y que es dependiente fundamentalmente de la alimentación y de la capacidad del animal de una transformación eficaz, parámetro este último que queda de manifiesto mediante el análisis de la urea y que determina la metabolización del exceso de proteína por parte del animal que habría sido incapaz de convertir una ración rica en aportes proteínicos en una leche rica en proteína.

Así las cosas, el contenido de células somáticas se convierte en el principal factor que el ganadero debe tener en cuenta, un asunto que trae de cabeza a la práctica totalidad de los productores de leche de los países industrializados. El problema fundamental es que el RCS sufre variaciones importantes como consecuencia del estado de salud del rebaño y como consecuencia de la dificultad instrumental de su determinación. En la actualidad, la evaluación de este parámetro se realiza mediante un recuento por medio de un organismo independiente que actúa como árbitro y que suministra el valor de SCC (*Somatic Cell Count*) para cada cabeza de ganado y para el global de producción de la granja. La estructura del organismo es diferente en función de los países, pero en toda la Unión Europea suele estar de alguna manera ligado o supervisado por las correspondientes administraciones y en él intervienen o tienen alguna representación los agentes implicados en el proceso: productores, centrales y administraciones responsables.

Los umbrales que fijan los diferentes tramos económicos son muy variables en función de los acuerdos contractuales pero mantienen una cierta uniformidad dentro de las áreas importantes de producción a nivel mundial: en el conjunto USA-Canadá el esquema que se mantiene es un poco más laxo que en la Unión Europea y, en líneas generales, permite la comercialización de leche con un RCS por debajo de 700.000 cél/ml, establece multas muy severas por encima de este valor y fija diversos tramos de precio para el resto. En la UE existe una directiva que impide la comercialización de leche con un recuento celular por encima de 400000 cel/ml, mucho más estricto que el norteamericano, aunque en la práctica se aplica a lotes enteros y no a la salida de una explotación concreta. Por lo general, se recoge toda la leche y el parámetro de medida no se toma a nivel puntual, en un momento concreto, sino que se considera un promedio de la explotación a lo largo de un determinado periodo de tiempo. La forma de hacer el promedio y el periodo de tiempo son también objeto de la relación contractual productor-central. De todas formas, a modo de ejemplo, la situación más establecida en nuestra región tiene el siguiente esquema de precios: cuando una explotación tiene un valor de



SCC inferior a las 200000 cél/ml durante una serie de meses obtiene una mejora en el precio por litro de su producción de unos pocos céntimos (3 a 5). Se suele usar el término "obtener la doble A" para la situación de la granja. Por el contrario, cuando una explotación supera la marca de las 400000 cél/ml el precio de venta del litro de leche sufre una rebaja importante (unos 5 céntimos) que influirá muy negativamente en los resultados de explotación. En la situación intermedia, el productor "ha perdido la doble A", pero no está penalizado, por lo que la leche que produce su explotación se paga al precio estándar.

Ni que decir tiene que con márgenes de beneficio antes de impuestos situados en el entorno de 2 a 4 céntimos por litro, pasar de la mejor situación a la peor supone un cambio que va desde mejorar los beneficios en hasta un 250% a tener pérdidas críticas.

De acuerdo con este esquema de precios de la leche, el control del recuento celular es un factor muy importante para la economía de cualquier explotación ganadera por lo que es fundamental contar con las herramientas necesarias para llevar a cabo ese control.

## 1.2 Objetivos del trabajo

Realizar un análisis de la situación actual de la tecnología en todo lo referente a los parámetros de calidad y de producción de leche en explotaciones bovinas así como sus implicaciones económicas.

El segundo objetivo es estudiar y establecer modelos de enfermedad para la mastitis tanto clínica, como subclínica, válidos para el ganadero y utilizando el mínimo número posible de parámetros o indicadores.

El tercer objetivo consistirá en establecer un modelo productivo que responda a las variables independientes directamente implicadas.

Directamente relacionado con el objetivo anterior, estudiar de manera específica la relación entre el recuento de células somáticas y la producción.

Para conseguir los objetivos segundo, tercero y cuarto se dispone de la base de datos de la Cooperativa Asturiana de Control Lechero (ASCOL). Forma parte de este trabajo, como objetivo inicial, el análisis y filtrado de la información de esta base de datos para limpiar, corregir y eliminar aquellos datos erróneos o artefactos.

# Capítulo **2**

## Estado de la técnica

## 2.1 Factores económicos del rendimiento de una granja

Una granja productora de leche es una industria alimentaria en la que es fundamental conseguir beneficios económicos para poder mantener la actividad. Como toda industria, los beneficios se obtendrán si el balance final entre ingresos y gastos resulta positivo. Para mejorar ese balance será necesario analizar todos los factores que influyen en los ingresos, estudiar cómo podemos influir en ellos para maximizarlos y proponer las acciones necesarias. En el caso de los gastos, el análisis a realizar tiene que buscar el modo de minimizarlos para que el balance final sea lo más favorable posible hacia los beneficios.

Entre los factores que influyen en los costes de producción (Heinrichs et al., 2013) de una granja lechera podemos destacar los siguientes:

- Ración alimenticia
- Mantenimiento, limpieza y amortización de las instalaciones
- Gastos veterinarios
- Gastos farmacéuticos
- Gastos de personal
- Gastos de reposición

Por otro lado, los factores que contribuyen a los ingresos de una explotación lechera son los siguientes:

- Ingresos por la venta de la leche
- Venta de la carne de las vacas que son retiradas de la producción
- Venta de material genético de calidad

### 2.1.1 Parámetros que afectan el rendimiento económico en un tiempo breve

Para mejorar los resultados económicos de la explotación tendremos que actuar sobre los factores descritos anteriormente aunque alguno de ellos son factores estructurales de la propia explotación que son difíciles de alterar o modificar en un período breve de tiempo sin que dé lugar a inversiones costosas en la explotación. Actuar sobre los parámetros estructurales requiere una decisión económica, por lo que nos centraremos en los factores susceptibles de ser modificados a corto plazo.

Entre los factores modificables en un período de tiempo corto podemos indicar:

- Ración.- La ración, sus diferentes componentes, inciden sobre el valor nutricional de la leche (Chalupa, Galligan, & Cornell, 1990; Chilliard, Ferlay, & Doreau, 2001; Oba & Allen, 1999; Palmquist, Beaulieu, & Barbano, 1993). Para monitorizar este factor y permitir su alteración buscando los mejores resultados posibles el control lechero oficial suele incluir entre sus datos el contenido de urea en leche que representa, de alguna manera, el total de proteína ingerida y metabolizada, es decir, no aprovechada para la mejora de la calidad de la leche.
- Gastos farmacéuticos.- Estos gastos no son un valor sobre el que se pueda incidir directamente ya que no es opcional dejar al ganado sin tratamiento para las posibles enfermedades que padezca, pero sí es un factor sobre el que se puede incidir de

manera indirecta al reducir la incidencia de las patologías sobre el ganado vacuno. En este sentido, la patología que está reconocida como la causante de las mayores pérdidas económicas de las explotaciones lácteas es la mastitis (Blosser, 1979; Bramley & Dodd, 1984; Dobbins, 1977; "Economics of mastitis and mastitis control," 1993; Gill, Howard, Leslie, & Lissemore, 1990; Halasa, Huijps, Osteras, & Hogeveen, 2007; Halasa et al., 2009a; Hortet & Seegers, 1998b; Houben, Dijkhuizen, Van Arendonk, & Huirne, 1993; Huijps, Lam, & Hogeveen, 2008; Janzen, 1970; G. Y. Miller, Bartlett, Lance, Anderson, & Heider, 1993; Schakenraad & Dijkhuizen, 1990; J. A. Schepers & Dijkhuizen, 1991).

- Reposición.- Los gastos de reposición están referidos al coste de incorporar nuevas cabezas de ganado a la explotación para compensar, por un lado las retiradas de producción y posterior sacrificio de vacas viejas y por otro, los posibles descensos de la producción ocasionados por vacas enfermas.
- Producción.- Uno de los factores más importantes en el rendimiento económico de una explotación ganadera de leche es la producción final de leche. Está claro que a priori, a mayor producción mayores beneficios económicos. Cualquier factor que permita controlar variaciones en la producción estimada de una granja será un factor fundamental a tener en cuenta. Sobre la producción actúan muchos factores, de modo que su análisis resulta un asunto extraordinariamente complejo. La salud del animal, su perfil genético, el confort, las rutinas de manejo, la edad, el número de partos, los días en leche, la alimentación y otros factores difíciles de controlar como los ambientales afectan o pueden afectar a la producción. Calidad.- La calidad de la leche es, junto con la producción, el factor más importante para controlar el rendimiento económico de una explotación ganadera. Está claro que los beneficios son mayores cuando se produce más leche, pero también son mayores cuando la leche producida es de mejor calidad. La mayor parte de los países tienen incorporado un sistema de precios en el que se paga más el litro de leche con índices de calidad mejores, de tal manera que puede ser tan rentable producir mejor leche como producir más leche. La calidad es un concepto muy general cuya cuantificación no tiene una única solución como ocurre con la producción. Al contrario, el concepto de calidad depende del destino que vaya a tener la leche; por ejemplo, una leche destinada a la industria quesera deberá tener un bajo contenido en células somáticas (células del sistema inmunitario del animal y epiteliales procedentes de la descamación de las paredes de la glándula mamaria) y un alto contenido en grasa, mientras que si la leche está destinada al consumo directo, el contenido en grasa podría no ser un aspecto saludable. De este modo, la calidad es un factor que tiene un marcado carácter subjetivo y que se ve reflejado en primas y penalizaciones en las cláusulas contractuales que rigen la relación entre el productor y la industria transformadora. Por tanto, podría no existir un criterio claro que defina la calidad. Sin embargo, sí que hay una idea general que se matiza en cada caso. Se consideran como criterios de calidad de carácter genérico el bajo recuento de células somáticas, el contenido de proteínas y el total de grasa. Algunos de estos criterios, como el recuento de células somáticas emana de determinadas regulaciones a nivel de cada país ("Real Decreto 1679/1994 de 22 julio por el que se establece las condiciones sanitarias aplicables a la producción y comercialización de leche cruda, leche tratada térmicamente y productos lácteos," 1994) o, en el caso de la UE, a nivel de toda la unión.

En definitiva, se puede plantear el resultado económico de la explotación como una función en la que hay una serie de gastos e ingresos:

$$R = (c + p - m) \cdot P - GF - GV$$

donde *c* es el coste por litro de leche en condiciones contractuales, *p* es la suma de las primas por calidad, *m* la suma de las penalizaciones por pérdida de calidad, *P* es la producción, *GF* los gastos fijos (estructurales, no modificables a corto plazo) y *GV*, los gastos variables, según se indicó antes.

Obviamente, es misión del productor maximizar la anterior función para garantizar la supervivencia de la explotación y obtener los mejores resultados que sea posible.

### **2.1.2 La mastitis como factor económico de primer orden**

Uno de los parámetros más influyentes en los resultados económicos de una granja es el estado de salud de su ganadería: parece claro que una vaca sana no sólo puede producir más leche, si no que ésta será de mejor calidad. Dentro de este contexto, la enfermedad que tiene una mayor incidencia es la mastitis (Blosser, 1979; Dobbins, 1977; "Economics of mastitis and mastitis contro," 1993). La mastitis es una infección de la ubre de la vaca producida por un agente patógeno que se ha instalado por algún mecanismo en la glándula mamaria (Harmon, 1994; G.M. Jones & Bailey, 2009; Myllys & Rautala, 1995).

Para analizar su influencia en la producción, la mastitis se suele dividir en dos campos de estudio. Por un lado está la mastitis clínica que es la forma más evidente de la enfermedad. En esta situación, los efectos de la infección son claramente visibles por medio de una sintomatología evidente que incluye enrojecimiento, temperatura elevada y efectos visibles en la leche ordeñada como grumos o coágulos sanguinolentos ("Capítulo 4. Enfermedades de los bovinos - Mastitis bovina," ; DairyCo). El tratamiento de la enfermedad requiere del uso de antibióticos específicos o de amplio espectro, lo que tiene varios efectos económicos: en primer lugar, supone un incremento del gasto farmacéutico, en segundo lugar, la leche del animal enfermo debe ser retirada de la producción para evitar la detección de la presencia de inhibidores y las consiguientes (y duras) penalizaciones lo que reduce la producción total y, en tercero, se alarga la rutina de ordeño y se complica el manejo lo que implica un coste adicional de personal. El efecto puede ser aún peor, si la mastitis clínica da lugar al sacrificio del animal, situación que se puede dar cuando el animal es irrecuperable o no responde en ninguna medida al tratamiento. En otro estado de cosas está la mastitis subclínica, que es la presencia de una infección latente pero que no presenta síntomas visibles. Se supone que la mastitis subclínica es la causante de pérdidas millonarias en la industria de la leche por cuanto sus efectos pasarían desapercibidos para el ganadero (deGraaf & Dwinger, 1996; Giannechini, Concha, Rivero, Delucci, & Lopez, 2002; Halasa et al., 2009b; Mungube et al., 2005; Ott, 1999; Philpot, 1967; P. Ruegg).

La otra cara de la mastitis, tanto la clínica como la subclínica es el efecto que produce sobre la leche en forma de presencia de células somáticas. El proceso, en líneas generales, es el siguiente: la presencia de una infección producida por un agente patógeno suele dar lugar a la reacción del sistema inmunitario del animal que incrementa la presencia de células capaces de luchar contra ese agente patógeno; no es objetivo de este capítulo analizar en detalle el conjunto, tipo y cantidad, de células implicadas en este proceso, pero en esencia, se incrementa la presencia de diversos agentes del sistema inmune en la sangre del animal. Durante el proceso de ordeño, parte de esas células pasan a la leche de tal modo que, a

medida que haya más células del sistema inmunitario en la sangre, más habrá en la leche. A estas hay que añadir las células que se arrancan de los tejidos epiteliales del interior de la glándula mamaria, producidas a veces por la propia infección (favorece la descamación) y otras por la edad del animal o por un incorrecto ajuste de la máquina de ordeño y, más en concreto, por el ajuste del flujo mínimo.

En definitiva, la presencia de células somáticas, sea cual sea su origen es un indicativo claro de la enfermedad o de que algo no funciona correctamente. Por ello, de forma general, uno de los indicadores de calidad de la leche más utilizados en el mundo es el recuento de células somáticas, RCS o, por sus siglas en inglés, SCC (*Somatic Cell Count*).

Se admite en la mayoría de las fuentes consultadas que con recuentos bajos, la vaca está libre de infecciones (Barkema, Schukken, Lam, Beiboer, Benedictus, et al., 1998; Deluyker, Gay, & Weave, 1993; Erskine, Eberhart, Hutchinson, Spencer, & Campbell, 1988; Peeler, Green, Fitzpatrick, Morgan, & Green, 2000) mientras que los recuentos celulares altos suelen estar asociados con la presencia de algún agente patógeno y por tanto, con la enfermedad. Es por esto que la normativa europea ("Real Decreto 1679/1994 de 22 julio por el que se establece las condiciones sanitarias aplicables a la producción y comercialización de leche cruda, leche tratada térmicamente y productos lácteos," 1994) exige a la leche comercializada en crudo unos valores de células somáticas por unidad de volumen de leche inferiores a un cierto umbral. Amparándose en esa exigencia las empresas lácteas suelen ofrecer contratos a sus productores que mejoran el precio de la leche que contenga valores bajos de células somáticas. Por esta razón, cualquier factor que tenga en cuenta el SCC es un factor importante para la mejora de los rendimientos económicos de una explotación ganadera. Sin embargo esto no es un problema sencillo puesto que el proceso de medida entraña las limitaciones propias de cualquier sistema instrumental que se traduce en una incertidumbre acotada por el correspondiente error a fondo de escala.

Otros factores a tener en cuenta en el recuento celular son los dependientes de la periodicidad de las medidas, los objetivos que se persigan y el tipo de medida. En este sentido cabe destacar que el problema de la mastitis se debe abordar desde dos puntos de vista diferentes: si su efecto económico parece evidente, podemos fijarnos en las causas o en los efectos. Entre las primeras, está la enfermedad, las mastitis, un concepto que alcanza exclusivamente a los animales y cuya detección puede actuar como un factor básico en la mejora de la salud del rebaño. Los recuentos celulares individuales (SCC) de cada animal son una herramienta que se considera eficaz en todo este proceso. La otra vertiente del problema es la consecuencia de un determinado estado de salud del rebaño y que se manifiesta en el recuento celular en el tanque (BTSCC, *Bulk Tank SCC*), un parámetro agregado (*screening*) que actúa como etiqueta económica de la explotación. El productor cobra un precio por litro de leche que, en una buena medida, suele depender de este parámetro.

Obviamente, un rebaño en buen estado, en la que la inmensa mayoría de los animales esté en condiciones de salud aceptables producirá recuentos bajos en cada animal y, al sumar todos ellos, el recuento final del tanque será, asimismo bajo:

$$BTSCC = \frac{\sum P_i \cdot SCC_i}{\sum P_i}$$

dónde  $P_i$  y  $SCC_i$  son, respectivamente, la producción y el recuento de células somáticas del  $i$ -ésimo animal.

La gran variación de recuentos celulares en los animales en producción (pueden variar desde 10.000 cel/ml en un animal joven y muy sano hasta varios millones por ml en animales enfermos, hace que el valor del BTSCC sea muy sensible a la presencia de reses con problemas de mastitis y que unos pocos animales muy enfermos podrían dar al traste con los objetivos de BTSCC.

Por ello, es práctica frecuente retirar la leche de los animales que estén pasando por un episodio de mastitis, esté o no en tratamiento ya que el ganadero suele preferir una pequeña pérdida de producción por el efecto de la retirada que afrontar la pérdida de la bonificación o, incluso, incurrir en penalización en el precio final, algo que se aplicaría al total de la leche del tanque.

El problema de la retirada de la leche es saber cuándo se debe hacer y eso exige conocer, no sólo el SCC de cada animal sino el del resto del rebaño y el BTSCC para tomar una decisión sobre la leche. Se podría dar el caso de tener un tanque con un recuento muy por debajo de los límites exigibles para la bonificación, en cuyo caso no habría problema por verter a él la leche de una vaca con recuento muy elevado ya que aun así no llegaría a sobrepasar el límite permitido. Sin embargo, en un rebaño menos saludable que dé lugar a un BTSCC cercano al límite, verter la leche de un animal con un elevado SCC podría sobrepasar ese límite e incurrir en una posible penalización. ¿Cómo saber qué hacer en cada caso? Este es un problema de compleja solución puesto que cualquier decisión exige un conocimiento no sólo del recuento celular de un animal concreto (el sujeto a decisión) sino conocer la situación del resto, puesto que el conjunto será el que determine el resultado final en el tanque.

El SCC de cada animal es un parámetro difícil de conocer. En general hay varios métodos para ello, pero la mayoría requieren un proceso más o menos largo, el concurso de un laboratorio especializado y suponen un coste difícil de asumir para el productor puesto que suele ser mayor que el beneficio que se derivaría.

### 2.1.2.1 Métodos de recuento de células somáticas

Existen diversos métodos utilizados para realizar el recuento de células somáticas. Entre ellos tenemos:

#### ***Microscopia Óptica directa (DM-SCC)***

La microscopía óptica directa es el método más preciso para realizar el recuento de células somáticas y es el método que en el protocolo 148A especifica la *International Dairy Federation* (FIL-IDF) como método de referencia para los demás. ). Los pasos que comporta este método pueden observarse en la Figura 2.1 y que consisten, básicamente, en la extensión de una cantidad de leche determinada (10 microlitros) sobre un portaobjetos para ocupar una extensión de  $100 \text{ mm}^2$ , su tinción con azul de metileno y el recuento manual de un número suficiente de campos microscópicos.



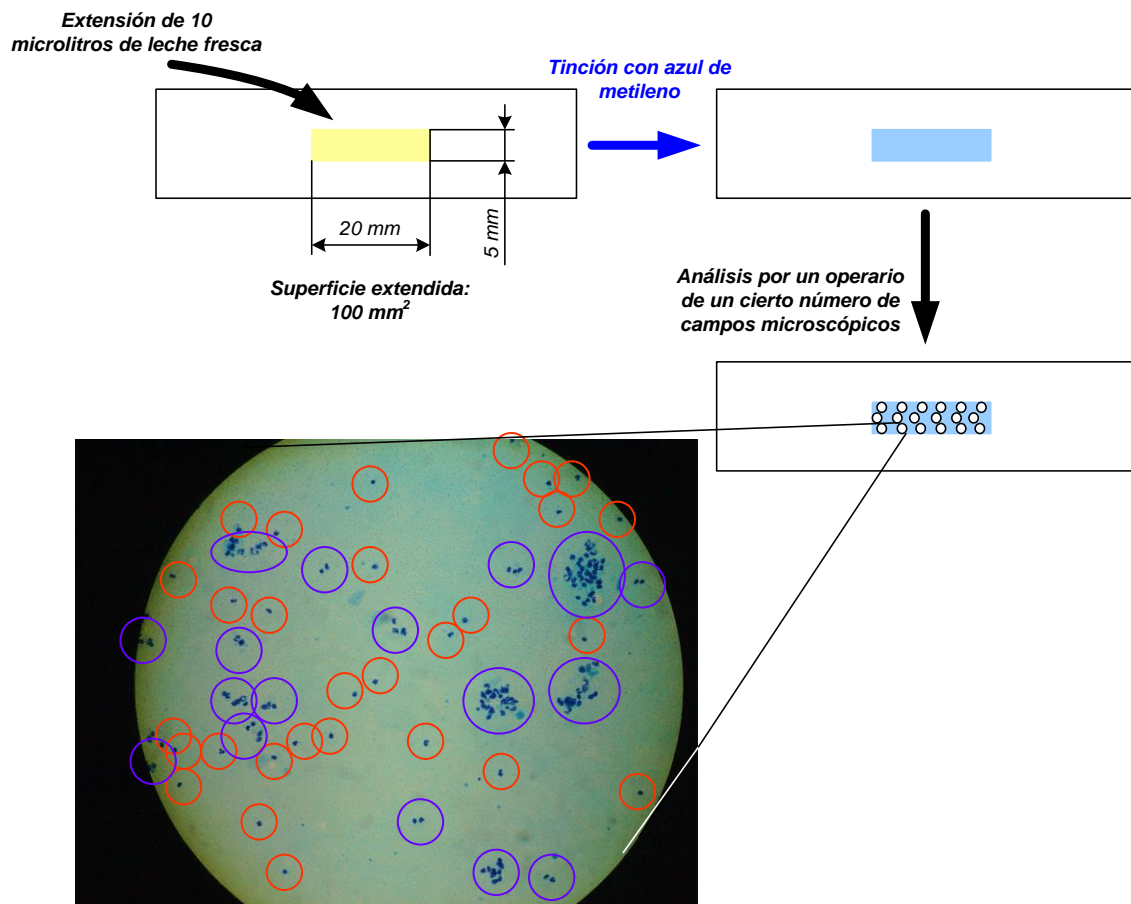


Figura 2.1 Ejecución del método de microscopía directa de la FIL-IDF DMSCC o protocolo 148 A. En el último paso el operador debe contar una a una las células presentes, incluyendo las de los agrupamientos.

### *Video microscopia (VM-SCC)*

La precisión en el recuento celular que ofrece el método de referencia de microscopía óptica directa propuesto por la FIL-IDF en el protocolo 148A resulta difícil de alcanzar por otros sistemas, pero supone la realización de una serie de tareas manuales que reducen su aplicabilidad a la hora de un procesamiento sistemático de muestras dentro de esquemas de control de lechero o de aseguramiento de la calidad de leche. Este método presenta un serio inconveniente a la hora de realizar el recuento final de las células somáticas en una preparación microscópica, recuento que se hace manualmente, mediante un operador entrenado, por identificación de las células individuales en un número concreto de campos microscópicos. Este proceso resulta lento y no está exento de problemas, como los derivados del cansancio del operador, las diferencias entre resultados de operadores diferentes – poca reproducibilidad – y la nula trazabilidad del análisis.

Este sistema puede mejorarse, manteniendo el sistema de realización de extensiones de leche, pero sustituyendo el operador humano entrenado por un sistema de análisis de imagen que sea capaz de identificar las células somáticas a través de determinados parámetros geométricos. En la figura 2.2, se muestra un ejemplo de un sistema de recuento celular mediante videomicroscopía automática (VM-SCC), aunque se trata sólo de un ejemplo ya que puede ser implementado con prácticamente cualquier microscopio y con cualquier cámara digital ya que siempre existen soluciones de acoplamiento (Baro, Roldan, Carleos, Grillo, & Perez, 2005; Grillo, Anton, Ferrero, Perez, & Ieee, 2001).

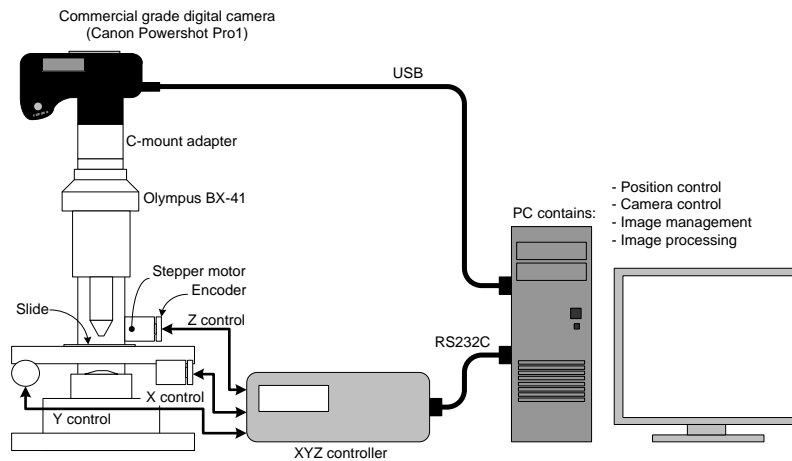


Figura 2.2 Sistema de recuento celular mediante videomicroscopía automática

### *Métodos directos de conteo por epifluorescencia*

Los métodos directos, basados en el recuento de células suelen emplear algún tipo de agente que se adhiere al ADN celular y que lo pone de manifiesto; en general, se prefiere acudir a sustancias que causan fluorescencia como el bromuro de etidio o el bromuro de propidio. El recuento se realiza por excitación con una determinada longitud de onda para provocar una respuesta luminiscente del núcleo de cada célula somática presente en la leche. La identificación del número total de células en una determinada muestra de leche se puede realizar por citometría de flujo, es decir, haciendo que la leche circule por un estrecho capilar – tan estrecho como el diámetro celular – y se vayan contando los pulsos de luz que producen sus núcleos (véase figura 2.3), solución adoptada por la firma Foss en sus equipos de laboratorio y en equipos portátiles que usan sistemáticamente en la mayoría de los laboratorios y que presentan una gran capacidad de procesamiento de muestras de leche.

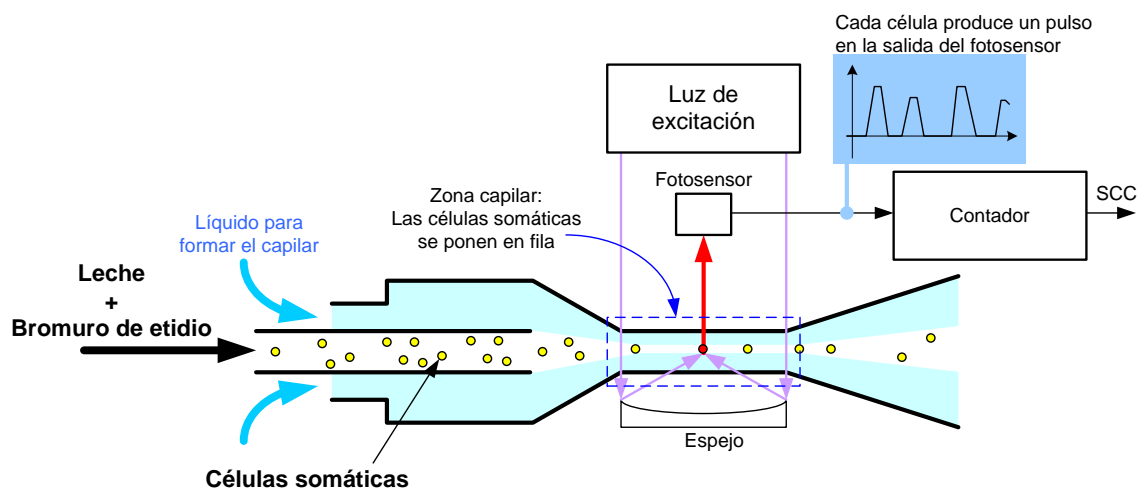
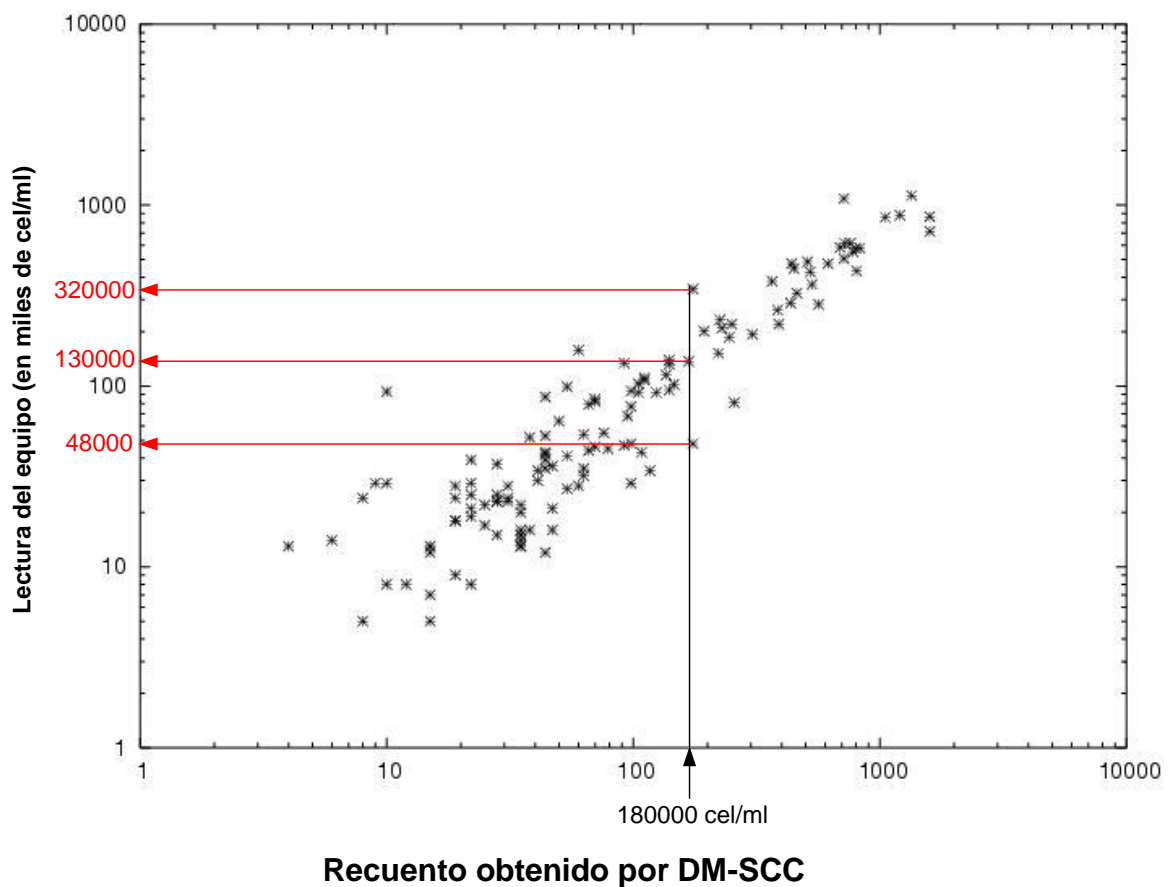


Figura 2.3 Funcionamiento de un sistema de citometría de flujo por epifluorescencia: la muestra de leche se mezcla con una cierta cantidad de bromuro de etidio que se adhiere al ADN nuclear. La mezcla se inyecta en una celda de flujo junto con un líquido que la rodea formando un finísimo capilar, de tal forma que las células – durante un corto espacio – se ponen en fila. Al pasar por esa zona son excitadas con una luz de longitud de onda apropiada y responden de forma fluorescente. Esta luz se recoge con un fotosensor que produce un pulso eléctrico por cada célula. Sólo queda contar los pulsos de luz y se obtiene el recuento celular de la muestra.

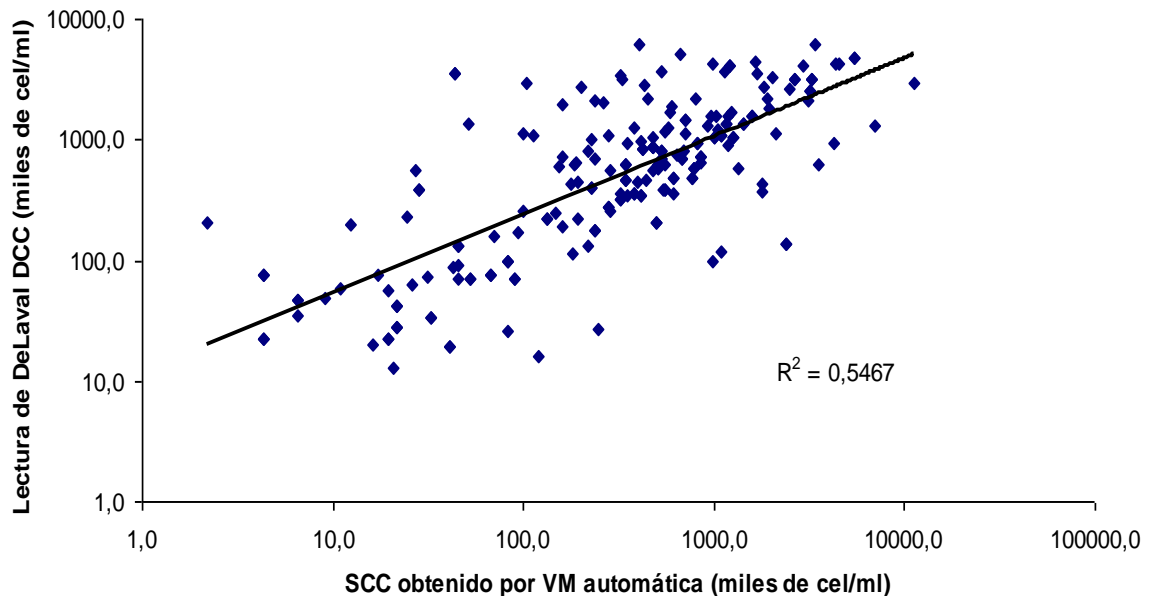
El resultado de la comparación entre los valores obtenidos de los sistemas de citometría de flujo de Foss y el método de referencia se muestran en la gráfica de la figura 2.4, pudiendo comprobar que, si bien existe relación entre ambos, la precisión de los sistemas de citometría de flujo es escasa, y esto tiene mayor importancia cuando se trata de valores cercanos a los que se consideran como críticos en las instalaciones, es decir, por debajo de 400.000 células por mililitro.

Otra alternativa es la empleada por la firma DeLaval en su DSCC, en la que mide el total de luz emitido por todos los núcleos después de mezclar la muestra de leche con el reactivo fluorescente en un pequeño cartucho de plástico de un solo uso y cuyo coste se ha convertido en un importante inconveniente a la hora de la implantación de este sistema, habiendo alcanzado, hasta la fecha, una escasa penetración en el mercado.



**Figura 2.4 Comparación de los resultados obtenidos por epifluorescencia y microscopía: comparación entre un sistema de epifluorescencia y citometría de flujo de la firma Foss y el recuento obtenido por el método de referencia de la IDF-FIL**

Los resultados de la comparación entre los métodos de epifluorescencia y el método de referencia de la IDF-FIL – el DM-SCC – aparecen en la figura 2.5, ofreciendo pocas dudas en cuanto a su interpretación.



**Figura 2.5 Comparación de los resultados obtenidos por epifluorescencia y microscopía: comparación entre el método que implementa el equipo de recuento celular de DeLaval (DSCC) y el que proporciona un método de microscopía. En ambos casos se encuentra una cierta relación entre los valores obtenidos por epifluorescencia y los de referencia, aunque arroja elevados niveles de incertidumbre que proporcionan una escasa precisión en la medida.**

La correlación existe entre los resultados proporcionados por los sistemas de epifluorescencia y los que se pueden considerar como referencia, pero el error que proporcionan los primeros es excesivo para la mayoría de los casos. Como aspecto adicional, el uso de sustancias que se adhieren al ADN de las células y lo convierten en fluorescente, resultan potencialmente peligrosas por cuanto tienen afinidad intrínseca por el ADN, sea de las células somáticas de una muestra de leche o de las células de cualquier otro ser vivo.

### ***California Mastitis Test (CMT)***

Supone el empleo de una sustancia con acción detergente como el laurilsulfato capaz de destruir las membranas celulares y liberar el ADN contenido en el núcleo de las células, provocando un incremento de la viscosidad de la muestra que debe ser evaluada de forma más o menos subjetiva: un elevado número de células somáticas implica la liberación de gran cantidad de ADN – moléculas de gran tamaño – y, en consecuencia, una mayor viscosidad (véase figura 2.6); por el contrario, cuando el SCC es bajo, la cantidad de ADN liberada es baja y la viscosidad resulta menor. La relación entre los valores de SCC y los del CMT es poco precisa debido al alto grado de variabilidad del SCC para cada valor del CMT, como se puede apreciar en la tabla 2.1.

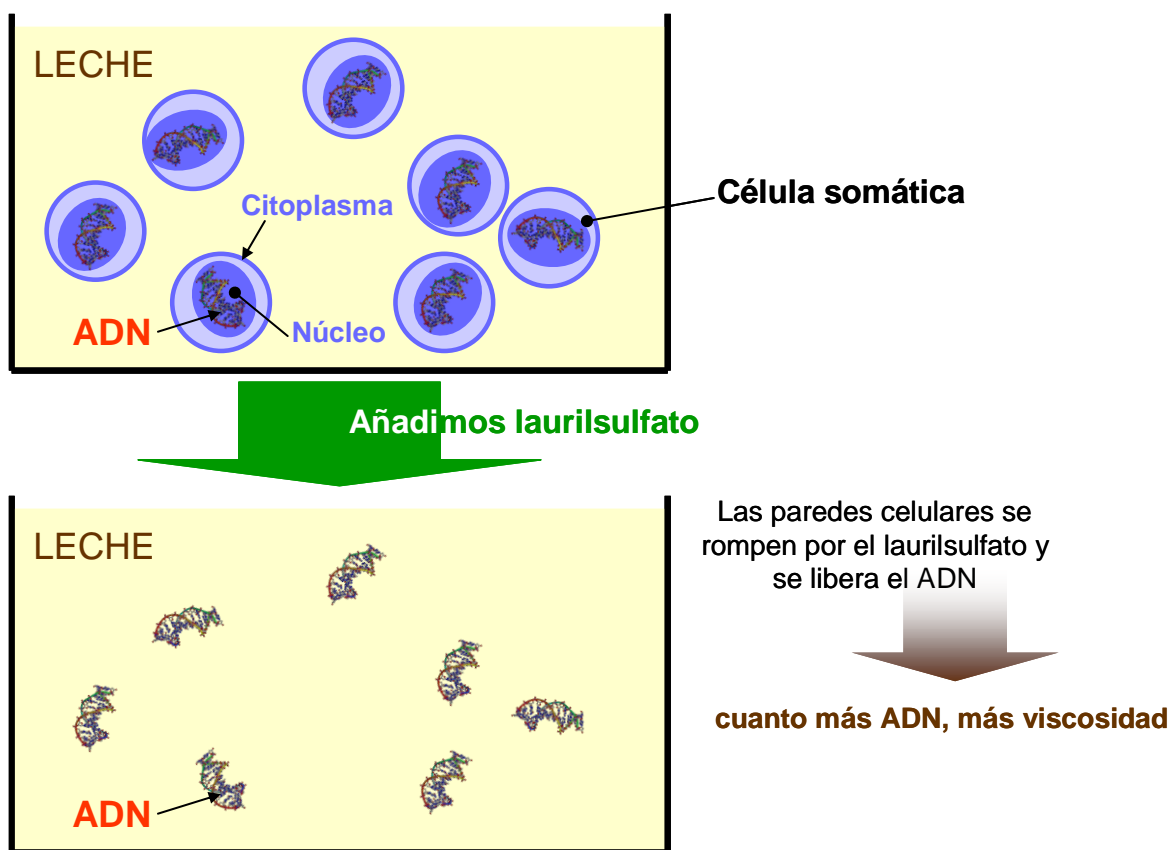


Figura 2.6 Descripción del CMT: sobre una muestra de leche se añade un agente detergente como el laurilsulfato. La destrucción de las paredes celulares libera el ADN contenido en el núcleo, moléculas muy largas que incrementan la viscosidad. El operador interpreta el nivel de viscosidad obtenido para decidir de forma cualitativa la situación del animal en cuanto a recuento de células somáticas.

Tabla 2.1 Interpretación de valores del CMT y su correspondencia aproximada con el SCC

Puntuación CMT	Reacción Visible	Rango SCC	SCS	SCC medio (aproximado)
<b>Negativo</b>	La mezcla permanece líquida. No hay evidencias de precipitados	0 – 200000	0	12500
			1	25000
			2	50000
			3	100000
			4	200000
<b>Trazas</b>	Ligeros precipitados. Desaparecen con movimiento continuo	150000 – 500000	5	400000
<b>1</b>	Distintos precipitados pero sin tendencia a la formación de gel	400000 – 1500000	6	800000
<b>2</b>	La mezcla se espesa inmediatamente, se mueve hacia el centro	800000 – 5000000	7	1600000
			8	3200000
<b>3</b>	Se forma gel y la superficie se hace convexa	>5000000	9	6400000

### ***Wisconsin Mastitis Test (WMT)***

El test de Wisconsin para la mastitis es similar al CMT pero a diferencia de utilizar la experiencia del operador para evaluar el nivel de células somáticas presentes en la muestra, utiliza un método cuantitativo basado en un viscosímetro. La prueba consiste en dejar fluir durante 10 segundos una muestra de leche tratada con el test de California y medir la distancia que ha alcanzado el líquido durante ese tiempo. Los milímetros recorridos se relacionan con una escala de valores de SCC de acuerdo a lo reflejado en la tabla 2.2.

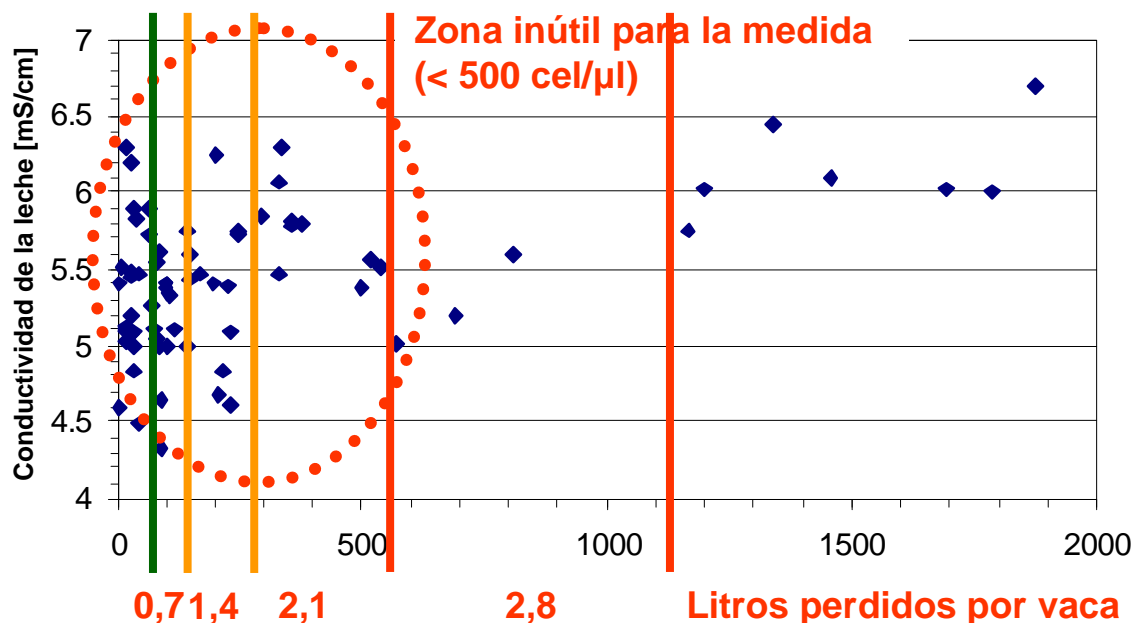
**Tabla 2.2 Interpretación datos del Test de Wisconsin para la Mastitis**

<b>Wisconsin (mm)</b>	<b>SCC</b>
<b>3</b>	140000
<b>4</b>	165000
.....	
<b>10</b>	380000
<b>11</b>	420000
.....	
<b>18</b>	790000
<b>19</b>	855000
.....	
<b>34</b>	2180000
<b>35</b>	2280000

### ***Conductividad***

El método de conductividad es el más simple de los métodos indirectos por cuanto no requiere ningún producto, es instantáneo, por lo que puede ser implementado de forma on-line, y tiene un coste muy bajo. De hecho, algunos fabricantes de equipos de ordeño ofertan este tipo de sistemas dentro de las posibles configuraciones y es que todas estas bondades harían de él el método más apropiado de no ser por su escasa precisión, sobre todo en recuentos de SCC por debajo de 600.000 cel/ml, valores más que habituales en nuestras explotaciones.

La relación de la conductividad con el SCC se obtiene por el incremento de iones alcalinos en la leche cuando hay algún tipo de infección. Sin embargo, otros factores como la alimentación o el propio animal pueden introducir perturbaciones similares, por lo que su fiabilidad puede considerarse escasa. En el gráfico de la Figura 2.7 se muestra la relación de la conductividad de la leche medida con un equipo de alta precisión frente a los recuentos celulares obtenidos por DM-SCC. El resultado es más que desalentador.



**Figura 2.7 Conductividad vs. SCC obtenido por el método de referencia de la IDF-FIL, indicando con líneas verticales las pérdidas supuestas en la producción por los niveles de SCC. El valor de la conductividad se ha obtenido con un puente de medida de impedancias HP. Como se puede observar la relación es más que dudosa por debajo de un millón de células por mililitro lo que invalida este método para la mayoría de las aplicaciones. No obstante, realizando ajustes para cada animal de cada instalación se puede mejorar algo el resultado, como en los equipos que incorporan firmas como DeLaval o Afikin.**

A modo de resumen, en las tablas 2.3 y 2.4 se muestran los resultados generales de todos los métodos disponibles para el recuento celular.

En la primera se presentan las características instrumentales de cada método, es decir, la capacidad de producir valores fidedignos y las condiciones en que los produce y la aplicación que puede tener. Por otro lado, en la segunda, se presentan las posibilidades de uso, algunos de los problemas y las limitaciones que presentan los diferentes métodos.

**Tabla 2.2 Características instrumentales y aplicaciones de los métodos de recuento celular**

Método	Veracidad <sup>1</sup>	Resolución <sup>1</sup>	Tipo	Aplicación(es)
CMT <sup>2</sup>	Media	Muy baja	<i>In-situ</i>	Detección de mastitis
WMT <sup>3</sup>	Media	Baja	<i>In-situ</i>	Detección de mastitis y estimación de SCC
DSCC <sup>4</sup>	Media	Media	Laboratorio	Estimación de SCC
Conductividad	Baja	Media	<i>On-line</i>	Detección de mastitis
Citom. flujo <sup>5</sup>	Media	Alta	Laboratorio	Estimación de SCC
DMSCC	Alta	Alta	Laboratorio	Calibración (Referencia IDF 148A)
VMSCC	Alta	Alta	Laboratorio	Calibración

<sup>1</sup>En relación con el valor de SCC obtenido por métodos de referencia.

<sup>2</sup>Californian Mastitis Test

<sup>3</sup>Wisconsin Mastitis Test

<sup>4</sup>DeLaval SCC

<sup>5</sup>Epifluorescencia + Citometría de flujo

**Tabla 2.3 Limitaciones del uso de los métodos de medida de SCC**

Método	Operarios	Frecuencia	Residuos	Equipo de medida	Volumen de producción	Tiempo de respuesta	Coste
CMT	Ganadero	Semanal	Sí	Simple	Medio	Segundos	Bajo
WMT	Técnico	Semanal	Sí	Simple	Bajo	Minutos	Bajo
DSCC	Técnico	Semanal	Tóxicos <sup>1</sup>	Medio	Medio	Minutos	Muy alto
Conductividad	Automático	<i>On-line</i>	No	Medio	Muy alto	Instantáneo	Muy bajo
Citom. flujo	Muestreador + Técnico	Mensual	Tóxicos <sup>1</sup>	Muy complejo	Alto	2 días	Medio
DMSCC	Muestreador + Técnico	-	Sí	Medio	Muy bajo	2 días	Muy alto
VMSCC	Muestreador	-	Sí	Complejo	Alto	2 días	Alto

<sup>1</sup>Estos métodos emplean bromuro de etidio o de propidio: el bromuro de etidio es una sustancia mutagénica, ya sea de forma directa (Brown, 2002) o por sus metabolitos, y el bromuro de propidio es también una sustancia mutagénica (Biosure, 2014).

Pero más allá de la posibilidad de disponer de una información válida en la que fundamentar la decisión acerca de qué hacer con la leche de un animal potencialmente enfermo, el problema requiere un conocimiento adicional sobre la explotación y sobre sus parámetros macroscópicos (producción y BTSCC). Desde este punto de vista, un modelo que permita ayudar a tomar las decisiones en este sentido se convierte en una necesidad imperiosa para el productor. El problema se puede plantear en estos términos:

Dado un determinado rebaño, con una producción total conocida y un BTSCC conocido, hay que determinar qué hacer con la leche de los animales enfermos. Para ello, es importante determinar cuántos hay y que recuentos celulares podrían tener.

### 2.1.2.2 Las transformaciones matemáticas del SCC

Los valores de recuento de células somáticas que puede presentar la leche extraída de un animal pueden tener un rango de valores muy grande. Pueden ir desde 0 a unas pocas decenas de miles de células por mililitro de leche en una vaca sana, a varios millones de células por mililitro de leche obtenida de una vaca que esté sufriendo un proceso de infección intramamaria con alta producción de leucocitos. En un rebaño, es habitual encontrar animales que presentan valores de recuento de células somáticas que van desde las 50000 células por mililitro hasta 1,5 millones de células por mililitro.

Este enorme rango de valores de SCC hace que la distribución de frecuencias de la concentración de células somáticas tenga una marcada asimetría estadística positiva esto es, la media es mayor que la mediana, dificultando el uso de los valores de SCC sin transformar en los análisis de modelos y tendencias estadísticas ya que, por una parte no se verifican los criterios estadísticos necesarios para aplicar procedimientos como el análisis de la varianza (Box & Tidwell, 1962; Foulley, Gianola, Cristobal, & Im, 1990) y por otro lado, la diferencia tan grande entre los valores de SCC (de uno o dos órdenes de magnitud) hace que cualquier modelo que use los datos en crudo tenga una sensibilidad extrema en los rangos de SCC más altos pero sea muy poco reactivo en la zona de bajo SCC.

En varios trabajos (A. K. A. Ali & Shook, 1978; T. E. Ali & Schaeffer, 1987; Robert-Granie, Foulley, Maza, & Rupp, 2004; Rodriguez-Zas, Gianola, & Shook, 2000a, 2000b) se analizan las distintas transformaciones que se pueden aplicar a los valores de SCC y los distintos modelos que se pueden crear a partir de esas transformaciones. En (A. K. A. Ali & Shook, 1978) se presenta una de las transformaciones más populares y utilizadas ya que elimina



parte de los problemas mencionados anteriormente y es la que corresponde con el logaritmo, bien natural o en base 2, del valor obtenido de recuento de células somáticas ( $\log_2 SCC$  o bien  $\log_e SCC$ ). Esta transformación permite aplicar a la variable obtenida las técnicas necesarias para obtener modelos lineales. En (Bartlett, Miller, Anderson, & Kirk, 1990) se propone una transformación derivada que consiste en restarle a la variable transformada su valor medio.

### 2.1.2.3 El valor del Somatic Cell Score (SCS)

El valor real del recuento de células somáticas, así como cualquier transformación matemática tal como el logaritmo, apta para la creación de modelos matemáticos, no facilita, sin embargo, las cosas para que el ganadero comprenda el estado de salud de su granja o de cada una de las vacas que componen el rebaño. Es por esto que en 1983 (Saeman, 1983; G. Shook, 1982, 2014) se crea en la conferencia anual del *National Mastitis Council* el índice *Somatic Cell Score* o **SCS** con objeto de encontrar una referencia de valoración que fuera común a todas las ganaderías y que fuese sencilla de interpretar por parte de los ganaderos. El índice varía entre 0 y 9 y permite al ganadero comprobar el estado en el que se encuentra su explotación.

La fórmula del SCS se encuentra definida en (G. E. Shook, 1993) y es la siguiente:

$$SCC = \log_2 \left( \frac{SCC}{100} \right) + 3$$

siendo SCC el número de células somáticas medido en miles de células por ml.

La fórmula se basa en el logaritmo en base 2 para que el conjunto de valores se distribuya entre 0 y 9. Durante el desarrollo del índice se propuso que la constante fuera 4 en vez de 3 para aumentar la precisión a valores bajos de SCC. La diferencia entre una constante u otra se puede apreciar en la tabla 2.5.

**Tabla 2.4 Diferencias del valor SCC entre el valor adoptado y el propuesto**

<b>Somatic Cell Score</b>	<b>SCC medio propuesto (constante = 4)</b>	<b>SCC medio adoptado (constante = 3)</b>	<b>SCC (1000's/ml) Campo de SCC</b>
<b>0</b>	6,25	12,5	0 – 17
<b>1</b>	12,5	25	18 – 34
<b>2</b>	25	50	35 – 70
<b>3</b>	50	100	71 – 140
<b>4</b>	100	200	141 – 282
<b>5</b>	200	400	283 – 565
<b>6</b>	400	800	566 – 1130
<b>7</b>	800	1600	1131 – 2262
<b>8</b>	1600	3200	2263 – 4525
<b>9</b>	3200	6400	4526 –
<b>10</b>	6400	12800	4526 –

Inicialmente, el SCS fue denominado *Linear Score* para el SCC para mostrar la hipotética relación lineal entre este índice y la pérdida de leche asociada al incremento del SCC. Posteriormente algunos usuarios adoptaron el término SCS y, en la actualidad, se usan ambos términos para referirse a la misma cosa.

### 2.1.3 Modelos de relación del recuento de células somáticas

En la literatura científica se ha utilizado la presencia de células somáticas en la leche para modelar y parametrizar varios de los factores que rodean la vida productiva de una instalación lechera. Algunos de esos modelos presentan relaciones claras y definidas y otros no tanto, siendo sólo modelos cualitativos en los que no se llega a cuantificar tales relaciones de forma explícita. Veamos algunos de los parámetros que se relacionan de manera cuantitativa con el recuento de células somáticas.

#### 2.1.3.1 El recuento de células somáticas y la mastitis

Sin duda, esta constituye la relación más aceptada por la comunidad científica y, en líneas generales se acepta que la presencia de la enfermedad lleva asociado un incremento en el número de células somáticas presentes en la leche. La mastitis como enfermedad con muchos posibles agentes como origen se suele clasificar habitualmente según los síntomas que desencadena en clínica y subclínica:

- a) La mastitis clínica es sintomática y se caracteriza por anomalías claras en la leche tales como presencia de grumos, coágulos de sangre y apariencia aguada y problemas asociados a la ubre tales como calor, dolor, hinchazón enrojecimiento y sensibilidad al tacto. Cuando una vaca está afectada por una mastitis severa puede tener síntomas adicionales que trascienden a la zona y se manifiestan en todo el organismo, tales como fiebre, deshidratación y falta de apetito. Una vaca afectada de mastitis clínica produce menos leche y la misma es de peor calidad.
- b) La mastitis subclínica resulta asintomática y no produce efectos visibles ni en la leche ni en la ubre.

Es evidente que el número de células somáticas presentes en la leche se tiene que incrementar cuando la vaca sufre algún proceso de infección. La presencia del agente invasor hace que la producción de células del sistema inmunitario se incremente en la sangre del animal y que si este proceso infeccioso tiene lugar en la ubre, sea allí donde acudan en gran número para atacar al agente patógeno. En consecuencia, el recuento de células somáticas en la leche se incrementará de manera apreciable ante la presencia del patógeno. Esto es recogido por los criterios establecidos por la IDF/FIL (*International Dairy Federation / Fédération Internationale de la Laiterie*) para diagnosticar la presencia de mastitis (*A monograph on bovine mastitis*, 1971) se fijan en el recuento de células somáticas en sangre como se puede ver en la tabla 2.6.

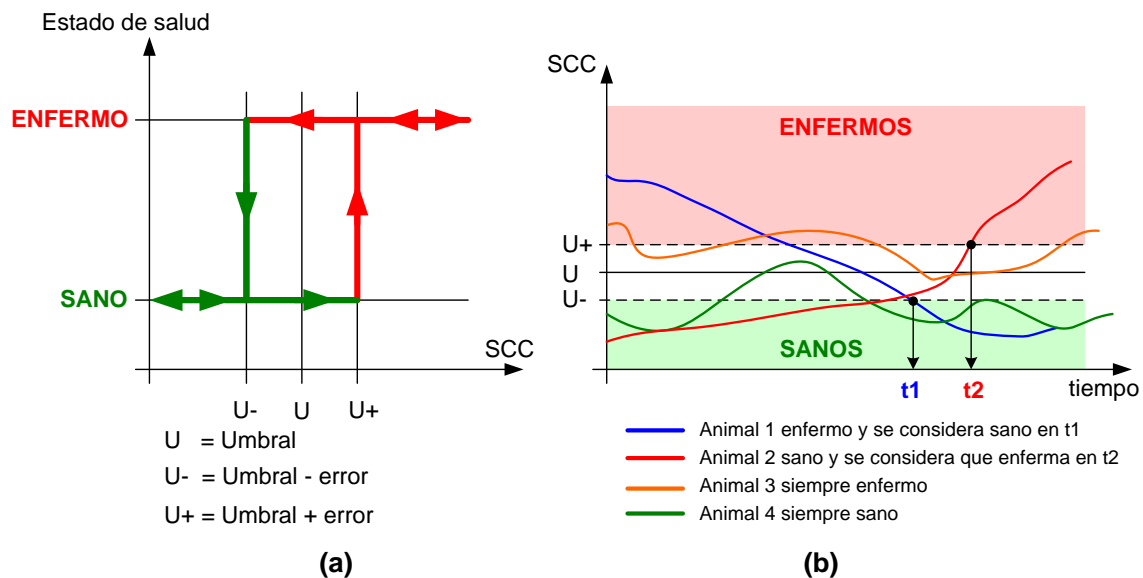
**Tabla 2.5 Criterios para el diagnóstico de mastitis basado en la muestra de leche de un cuarterón**

Resultado de la muestra de leche		Diagnóstico
Crecimiento Bacteriano	Inflamación (SCC sobre 200000 cél/ml)	
Si	No	Infección latente
No	Si	Mastitis no específica
Si	Si	Mastitis

Está generalmente aceptado en la literatura científica (Harmon, 2001; Sharif & Muhammad, 2008) que la presencia de un SCC elevado en la leche está ocasionada por la existencia de inflamación en la ubre o la presencia de alguna infección. El umbral de SCC presente más ampliamente aceptado para decidir que un cuarterón está afectado por una infección

intramamaria estaría en el entorno de 200000 cél/ml (I. R. Dohoo & Leslie, 1991; I. R. Dohoo, Meek, & Martin, 1984; McDermott, Erb, & Natzke, 1982; P. L. Ruegg & Reinemann, 2002; Timms & Schultz, 1987). En cualquier caso, como en cualquier variable de diagnóstico clínico, no existe un nivel fijo y definido de SCC que garantice sin lugar a dudas que las vacas que lo sobrepasan están afectadas de mastitis o un nivel por debajo del cual el animal esté libre de la presencia de alguna infección.

Para soslayar el problema de encontrar un valor fijo que determine cuando una res está enferma o sana en (Perez, Ortega, Muniz, & Coya, 2008) se propone una metodología basada en el concepto físico de la histéresis de tal manera que se puedan incluir en el diagnóstico los errores en la medida del SCC y la evolución del animal. Con esta metodología, que se muestra en la figura 2.8, un animal se considerará enfermo solamente cuando exceda el umbral de SCC definido como límite de la enfermedad por un valor  $+U$  que incluya el error intrínseco en la medida. De la misma manera, un animal no se considerará recuperado de una posible dolencia infecciosa si no presenta un valor de recuento de células somáticas en la leche inferior al definido como límite de la enfermedad menos un valor  $-U$ . Como se aprecia en la figura 2.8b, los animales que no sobrepasan en uno u otro sentido el valor de referencia  $\pm$  el valor de histéresis definido, no se consideran que han cambiado de situación sanitaria.



**Figura 2.8** Definición de animal enfermo utilizando el recuento de células somáticas y un valor de histéresis

En (A. J. Schepers, Lam, Schukken, Wilmlink, & Hanekamp, 1997) se realiza un estudio exhaustivo de todos los posibles factores que se pueden utilizar como umbral que señale la presencia de infección intramamaria. Para cada uno de los posibles criterios utilizados se calculó la especificidad, sensibilidad y valor predictivo del umbral sin llegar a conclusiones definitivas ya que aumentos o disminuciones en el valor de SCC utilizado como límite favorecen en unos casos el aumento de la especificidad, disminuyendo la sensibilidad y en otros casos, el efecto conseguido es el inverso. Para afinar aún más en la determinación de la presencia de infecciones intramamarias (I. Dohoo, 2001) define unos coeficientes de probabilidad de presencia de infecciones basados en la prevalencia de la enfermedad en el rebaño, de tal manera que los umbrales de recuento de células somáticas se vean afectados por estos coeficientes modificando la sensibilidad y especificidad del umbral seleccionado.

Si ya es complicado evaluar el umbral de SCC que permite afirmar la presencia de mastitis cuando se tiene en cuenta que la mastitis puede ser clínica o subclínica, la indeterminación se hace aún mayor, habida cuenta de la ausencia de síntomas claros del caso subclínico. Por ello, se suele recurrir al SCC para determinar el umbral de existencia de enfermedad en estado subclínico, lo que implica, en sí mismo, una cierta perversión del proceso de diagnóstico, puesto que se da un fenómeno de inversión causal en donde el efecto pasa a preceder a la causa. La detección de la mastitis subclínica a partir de los valores de SCC se basa en probabilidades y reglas imprecisas. Así por ejemplo, la empresa QCONZ (*Quality Consultants New Zealand Ltd*) proporciona recomendaciones basadas en probabilidades como las que se muestran en las tablas 2.7 y 2.8.

**Tabla 2.6 Recuento celular como indicador de mastitis subclínica.**

Valores de recuento celular	Probabilidad de mastitis subclínica
0 – 149000	Muy baja
150000 – 249000	Baja
250000 – 499000	Alta
500000+	Muy alta

**Tabla 2.7 Valores de mastitis presentes en el tanque como indicadores de la presencia de mastitis subclínica en el rebaño**

Valores de recuento celular del tanque	Probabilidad de mastitis subclínica en el rebaño
0 – 249000	Muy baja
250000 – 499000	Baja
500000 – 749000	Alta
750000+	Muy alta

Otros mecanismos de identificación de mastitis subclínica basados en el SCC pueden tener en cuenta parámetros del rebaño como ocurre en (P. L. Ruegg & Reinemann, 2002) en el que el criterio para definir que una instalación mantiene la mastitis subclínica controlada es doble:

- Debe de existir un 85% de las vacas con un recuento de células somáticas inferior o igual a 200000 cél/ml (prevalencia de la instalación)
- Deben de tener menos del 5% de las vacas desarrollando nuevas infecciones de mastitis subclínica al mes (incidencia de la enfermedad en la instalación)

En su conjunto, la bibliografía consultada de la cual se han citado las referencias más significativas viene a indicar que sí que existe un consenso en torno a los aspectos cualitativos que rodean la relación entre mastitis y SCC, pero ese consenso se esfuma en cuanto se pretende materializar en umbrales y se aleja mucho más cuando se quiere enfocar más la relación con la distinción entre las situaciones clínica y subclínica.

Es importante destacar un factor adicional de confusión que aparece al usar el umbral de 200.000 cél/ml no sólo como el más aceptado para el diagnóstico de la enfermedad sino como barrera para el pago por calidad en el contexto de la UE. Esta coincidencia no casual ha propiciado o contribuido a aceptar ese umbral como "válido para todo" por el simple hecho de que afecta directamente a los ingresos de la explotación.

## 2.1.4 El recuento de células somáticas y la microbiología

A pesar de que los estudios microbiológicos permiten detectar la presencia de patógenos en la leche y, por tanto, son potencialmente perfectos para el diagnóstico de la mastitis, concurren una serie de circunstancias que modulan esta eficacia en diversos sentidos. Así, aunque la aparición de crecimiento de colonias en las muestras para microbiología signifique que el patógeno ha sido detectado en la leche, puede ocurrir que:

- a) El patógeno aún no se haya instalado en el sistema glandular por lo que es posible que la infección aún no exista o incluso, que nunca vaya a existir porque finalmente no se implante. Es habitual falsos positivos debidos al crecimiento de especies bacterianas en los cultivos que aunque sí que están presentes no son las causantes de la mastitis.

Las bacterias *Staphylococcus coagulasa* negativo (SCN), son los colonizadores con mayor permanencia en la piel de los bovinos (Gorik Braem et al., 2012; G. Braem et al., 2013; De Vliegher et al., 2003; Woodward, Besser, Ward, & Corbeil, 1987). Un cultivo donde estén presentes estas bacterias no siempre será indicativo de mastitis. De hecho la presencia de SCN no sólo puede no ser la causa de mastitis sino que interviene en la inhibición del crecimiento de otros patógenos culpables de mastitis como de *S. aureus*, *S. agalactiae*, *S. dysgalactiae*, *S. uberis* y *E. coli* (De Vliegher et al., 2003).

La presencia por lo tanto de SCN en un cultivo no indicaría presencia de mastitis sino contaminación de la muestra por presencia de microbiota propia de la especie bovina.

Además de SCN, los estudios llevados a cabo muestran que dentro de la flora habitual del pezón se encuentran predominantemente *staphylococcus* así como *streptococcus* (Woodward, Ward, Fox, & Corbeil, 1988). En el caso de *Streptococcus agalactiae* puede sobrevivir por un periodo corto de tiempo en la piel y quizás no penetrar en la ubre ((DHIA), 2011). Esto daría un falso positivo en el cultivo ya que el microorganismo existe.

En el caso de la bacteria *Streptococcus uberis* es una bacteria perteneciente a la flora natural de la piel pudiendo estar presente en las ubres siendo posibles reservorios de infecciones. Es frecuente que se encuentre en la superficie del pezón pudiendo llegar a penetrar en la glándula mamaria y dar lugar a mastitis (Buddle, Tagg, & Ralston, 1988).

- b) Las posibilidades de contaminación de muestras son altas, sobre todo durante el proceso de toma de muestras. Cuando se vayan a utilizar cultivos bacterianos como medida de identificación de una mastitis, las muestras deben de ser tomadas cuidadosamente ya que si no es así, puede haber una contaminación de las muestras así como una gran confusión sobre la identificación del organismo aislado (Buswell, 1995; Watts, 1990).
- c) Existen patógenos intracelulares (como el *S. aureus*) que sí que pueden estar implantados y ser causantes de enfermedad, pero que sólo ocasionalmente se excretan, con lo que no es sencillo que crezcan en los cultivos y que indicaría la necesidad de realizar consecutivos muestreos (Graber et al., 2009; Sears, Smith, English, Herer, & Gonzalez, 1990; ten Napel et al., 2009).
- d) Otro factor a tener en cuenta es el umbral de detección del patógeno (10-100 unidades formadoras de colonias/ml) limitado por la cantidad de leche utilizada para cada cultivo lo cual daría lugar a un cultivo negativo. Esto podría ocurrir en el

caso de *Staphylococcus aureus*, coliformes y *Mycoplasma spp* ((DHIA), 2011; Makovec & Ruegg, 2003).

- e) Habitualmente en los procedimientos de cultivo iniciales se utilizan medios no selectivos (los medios selectivos facilitan mediante sustancias nutritivas el crecimiento de unas especies frente a otras) lo cual permite el crecimiento de diversos microorganismos lo que dificulta la identificación del causante específico de la mastitis.
- f) Por otro lado los microorganismos causantes de la mastitis pueden no crecer en cultivos rutinarios (necesidad de nutrientes especiales, etc) como en el caso de *Mycoplasma spp* con requerimientos de nutrientes especiales (Boonyayatra, Fox, Gay, Sawant, & Besser, 2012) donde además se requiere de un técnico cualificado para diferenciar las colonias de esta bacteria frente a otras que por contaminación hayan podido crecer en el medio de cultivo de *Mycoplasma spp*. a pesar de llevar un inhibidor del crecimiento para otros patógenos (Britten, Britten, Hanson, Andre, & Cerar, 2009). La baja sensibilidad de un solo cultivo para identificar vacas positivas también debe de ser tenidos en cuenta (Buelow & Nordlund, 1999)]
- g) Igualmente el momento del muestreo influye en la sensibilidad del método de cultivo. Estudios comparativos hechos con muestras de leche pre-ordeño versus pos-ordeño, mostraron un recuento alto para *S aureus* (91% versus 81%), para *Staphilococcus coagulasa-negativo* (CNS; 91% versus 45%) y para *Streptococcus medioambientales* (97% versus 58%) (Sears et al., 1990).]De la misma manera aparecen un mayor número de muestras contaminadas (>1 microorganismo aislado) en muestra de leche pre-ordeño (Sears, Wilson, Gonzalez, & Hancock, 1991).
- h) Aunque existe un protocolo bien definido para este tipo de actuaciones, es posible que aparezcan patógenos que realmente no están implantados y que sí den lugar a crecimiento en los cultivos.

En este sentido hay que tener en cuenta la posible contaminación por el medio aéreo (Quinn, Markey, Carter, & Carter, 2004), fundamentalmente en salas de ordeño mal ventiladas. Este fenómenos se ha demostrado positivamente en (R., Baro, Pérez, & Ortega, 2006) donde medios de cultivos expuestos a 10 y 5 segundos a la atmósfera de una sala de ordeño resultaron con crecimientos de hongos, SCN y *S. aureus*. Medios similares, expuestos a la atmósfera de las zonas abiertas de la explotación durante periodos de tiempos similares dieron resultado negativo.

Hay otros factores influyentes en los en los resultados de los cultivo celulares como son el tipo de muestra (cuarterón, vaca, tanque), las condiciones de la muestra (fresca, congelada (Schukken, Smit, Grommers, Vandegeer, & Brand, 1989)) , momento de toma de muestra con respecto a la duración de la infección, el patrón de crecimiento del organismo, el medio de cultivo (Kelton & Godkin, 2000), el volumen de muestra o la frecuencia de muestreo.

En contra del alto grado de variabilidad de los cultivos positivos para *S. aureus* hay otros patógenos para los que el método de cultivo tiene una gran sensibilidad. Es el caso de *Streptococcus agalactiae* donde se han encontrado rangos entre 95% y 100% (Dinsmore, English, Gonzalez, Sears, & Schulte, 1991).]

Por todo esto, aun siendo la microbiología un formidable método de diagnóstico de mastitis, sus resultados siempre deben ser analizados con precaución siendo conscientes del microorganismo buscado y la sensibilidad del medio de análisis utilizado. Diagnosticar a través de cultivos debe de ser realizado con múltiples muestras y no con una sola muestra para acotar los posibles errores (NMC, 1999).

La combinación de recuento celular y cultivo posterior sería una manera idónea de análisis (Cornell, 2014) que permitiría acotar los errores propios de los métodos de análisis.

#### **2.1.4.1 Especies de microorganismos aislados**

Se han aislado unos 130 microorganismos presentes en muestras de leche bovina como bacterias, hongos, levaduras, micoplasmas, etc, sin embargo son las bacterias los agentes patógenos más frecuentemente los causantes de la mastitis. Unas especies causan mastitis denominada contagiosa o por contagio mientras que otras son causantes de mastitis por su presencia en el entorno ambiental de la vaca (Kaliwal, Sadashiv, Kurjogi, & Sanakal, 2011). Los microorganismos aislados más frecuentes dependerán de los distintos estudios aunque *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* o *Streptococcus dysgalactiae*, *Streptococcus uberis* y *coliformes* en orden decreciente son los más habituales dentro de las bacterias.

Las especies más habituales son *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* o *Streptococcus dysgalactiae*, *Corynebacterium sp.* y *Mycoplasma* como causantes de mastitis por contagio directo (Schroeder, 2012). Este se produce principalmente a través de las manos del encargado del ordeño, del trapo de lavado, del equipo de ordeño posiblemente contaminado o un mal funcionamiento de éste.

*Staphylococcus aureus* es el patógeno responsable de la mayor parte de las mastitis contagiosas que se producen en las explotaciones lecheras dando lugar a una importante pérdida de leche y por lo tanto de ingresos. Esta bacteria puede no responder a un tratamiento antibiótico y por lo tanto causa un daño permanente de los tejidos pudiendo llegar a disminuir su producción en un 45% por cuarterón. Puede mostrar valores elevados de SCC aunque no siempre es así ((DHIA), 2011).

En el caso de *Mycoplasma spp.* no sólo se puede encontrar en las ubres sino también en el tracto respiratorio o el aparato urogenital de animales aparentemente sanos. Muchas de las mastitis producidas son subclínicas presentando un bajo recuento celular. Puesto que no responden a antibióticos, deben de ser separadas del rebaño en estado de mastitis clínica.

La presencia de la bacteria *Streptococcus agalactiae*, muestra un alto SCC que no será medido en muchos casos ya que sólo un 10% de las vacas infectadas muestran signos de ello por lo que pueden estar contagiando al resto del rebaño.

*Corynebacterium sp.* da lugar a un incremento de SCC aunque normalmente el propio sistema inmune del organismo ataja la infección recuperando el nivel de SCC en condiciones sanas de la vaca.

En el caso de mastitis por contaminación ambiental es debida principalmente a *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* y *Enterobacter aerogenes* así como Streptococos ambientales como *Streptococcus uberis* y *S. bovis* y otras especies como *Enterococcus faecium* y *E. faecalis*. La bacteria *Streptococcus dysgalactiae* puede comportarse tanto como un patógeno ambiental como contagioso. A estos hay que añadirles los *Staphylococcus coagulasa-*

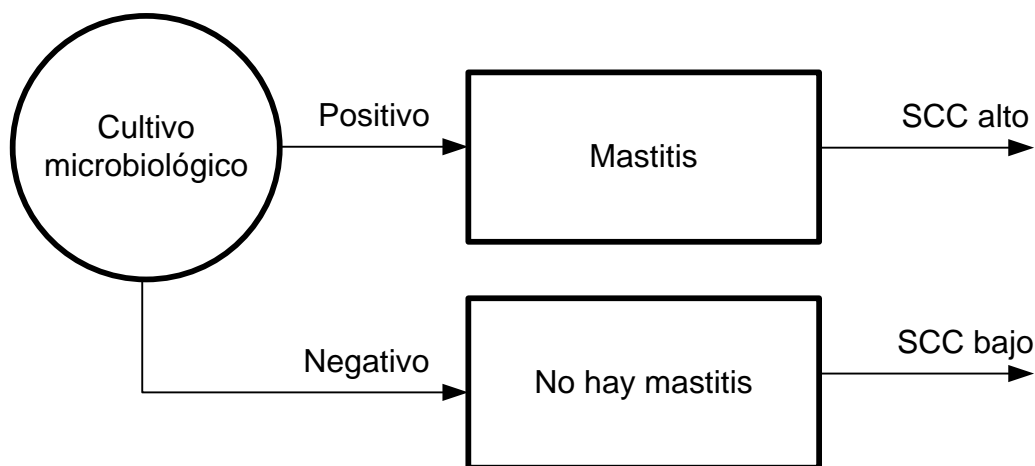
negativos (SCN) que son considerados generalmente patógenos ambientales y unos de los principales causantes de la mastitis ambiental.

Los factores del entorno del ganado como la humedad, camas contaminadas o escapes de aire en la máquina de ordeño son las principales causas de la mastitis ambiental.

Los individuos afectados de mastitis pueden presentar características externas que indiquen infección o por el contrario pasar desapercibido. La infección por *E. coli* es sin lugar a duda el porcentaje mayor de mastitis ambiental. Es usual que el recuento somático sea alto aunque sea habitual que el propio sistema inmune lo normalice cuando la infección haya pasado, como en el caso de *E. coli*. Sin embargo hay bacterias como *Klebsiella sp.* donde se produce una de las mastitis más severas siendo generalmente necesario la eliminación del individuo (Barkema, Schukken, Lam, Beiboer, Wilmink, et al., 1998).

Las infecciones por bacterias oportunistas del grupo SCN suelen ser subclínicas pero persistentes, incrementado significativamente el valor de SCC y disminuyendo por lo tanto la calidad de la leche (Pyorala & Taponen, 2009). Algunas especies muestran un incremento SCC similar al producido por *S. aureus* (*S. chromogenes*, *S. simulans*, y *S. xylosus*) (Supre et al., 2011). Pero dependiendo de las distintas especies de SCN el incremento en el valor de SCC varía, dando lugar a una gran variabilidad considerando el conjunto de las bacterias SCN (Fry et al., 2014). Sin embargo la infección por SCN tiene una respuesta aceptable al ser tratada con antibióticos cosa difícil en el caso de *S. aureus* (Apparao, Oliveira, & Ruegg, 2009; Taponen & Pyorala, 2009).

Lo que ya resulta mucho más difícil de evaluar es la relación entre los resultados de los cultivos microbiológicos y los recuentos celulares. Está claro que la relación entre la presencia de patógenos y la enfermedad y entre ésta y el recuento celular debería dar como consecuencia una relación entre el crecimiento de patógenos en los cultivos y el correspondiente incremento del recuento celular (Figura 2.9).



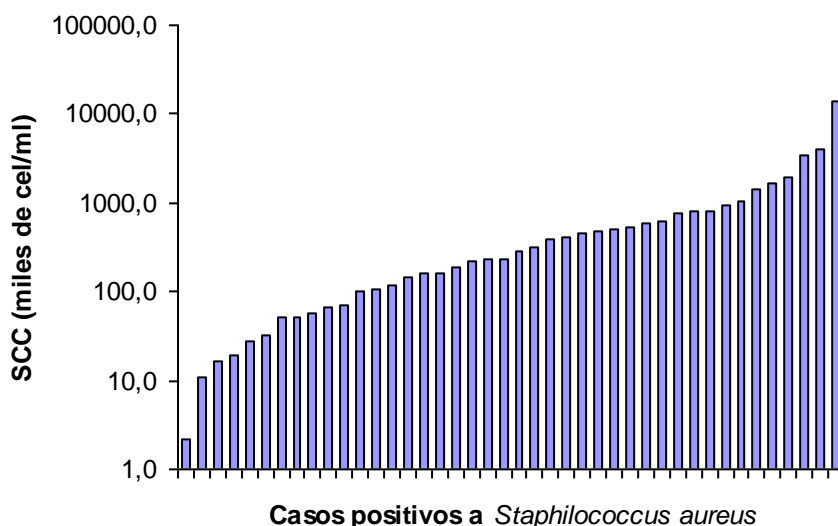
**Figura 2.8 Relación entre la presencia de patógenos y el recuento celular**

Sin embargo, la presencia de excepciones en la relación con el diagnóstico de mastitis y la dependencia del recuento celular (en caso de infección) del patógeno, debilita la posibilidad de encontrar una relación entre el recuento celular y el resultado de los ensayos microbiológicos.

Sin embargo, en algunos casos sí que hay una relación más clara, como en el caso de la infecciones por *E. coli*, muy abundantes en las explotaciones con deficiencias de limpieza y



manejo. En otros, como en el caso de las infecciones por *S. aureus*, la relación es prácticamente inexistente como se demuestra en las pruebas realizadas sobre varias muestras de leche en las que se ha realizado el recuento celular por microscopía y se ha procedido al cultivo siguiendo los protocolos habituales. En la figura 2.10 se muestra, a modo de ejemplo, los recuentos celulares obtenidos para cultivos positivos a *S. aureus*.



**Figura 2.9 Valores de SCC frente a casos positivos de *S. aureus* (R. et al., 2006)**

Como se puede observar, si se fija el umbral de 200.000 cél/ml (200 cél/ $\mu$ l en la figura mencionada), aproximadamente la mitad de los cultivos positivos a *S. aureus* están por encima y la otra mitad, por debajo. Eso significa que si se usa ese umbral –el más aceptado a nivel internacional como se ha dicho anteriormente– como umbral de enfermedad, resultaría que el cultivo microbiológico proporcionaría un diagnóstico compatible con el que proporcionaría el recuento celular en el 50% de los casos, mientras que discreparía en el otro 50%, resultado similar al que se obtendría lanzando una moneda al aire.

El tiempo transcurrido entre la infección por *S aureus* y el aumento en el valor de SCC debe de ser tenido en cuenta así como para los resultados de los cultivos. Cultivos y análisis de SCC seriados a lo largo de unos días sería la manera idónea de evaluar en continuidad la infección debida a esta especie (Hoblet, Bailey, & Pritchard, 1988)

Algunos estudios mostraron que en algunos casos sólo un 60% de infecciones mostraban SCC mayores de 200.00 cel/ml (G. M. Jones, Pearson, Clabaugh, & Heald, 1984)

En las figuras 2.11 y 2.12 se muestran resultados similares, obtenidos de cultivos microbiológicos positivos a otros patógenos.

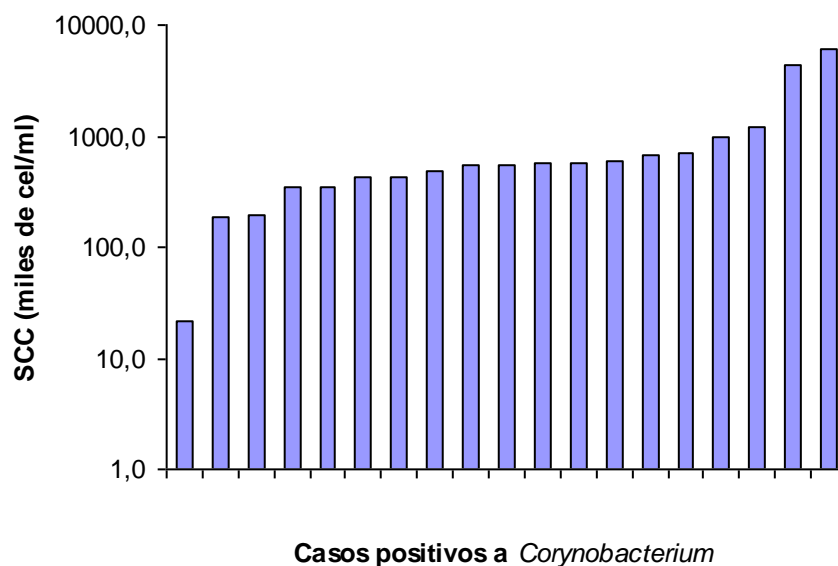


Figura 2.10 Valores de SCC frente a casos positivos de *Corynebacterium* (R. et al., 2006)

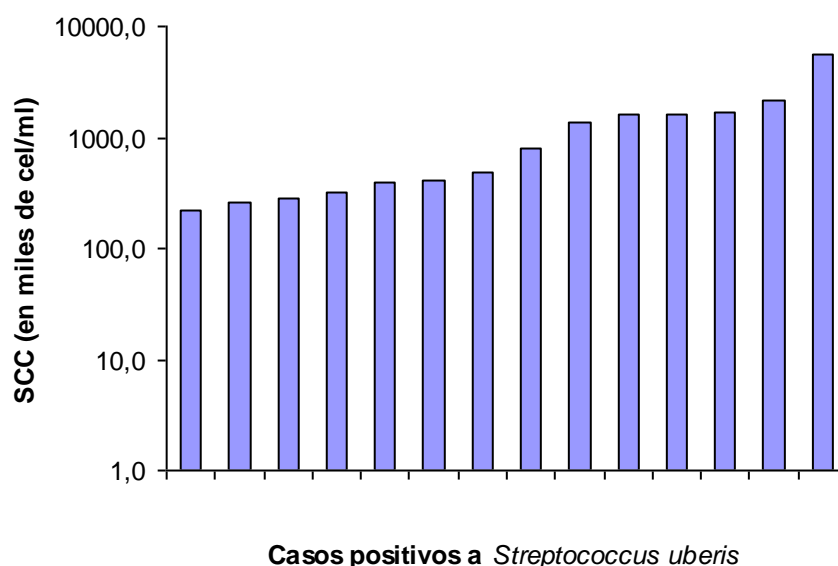


Figura 2.11 Valores de SCC frente a casos positivos de *Streptococcus uberis* (R. et al., 2006)

Como se puede observar en estas figuras, si bien los resultados no son tan terribles como en el caso del *S. aureus*, sí que es posible encontrar discrepancias entre el diagnóstico de mastitis por microbiología y por SCC (25% de discrepancia en el caso del *S. uberis* y 20% en el caso de *Corynebacterium*).

Estos resultados, que pueden parecer un poco sorprendentes se han obtenido mediante la toma masiva de muestras sin cribar sobre una explotación de referencia compuesta por 45 animales en explotación de alta producción (promedio superior a 30 litros por animal y día), es decir, sin tener en cuenta la presencia de síntomas o el resultado del CMT; por tanto, se han cultivado muestras de animales negativos y positivos al CMT, indistintamente, y se han realizado los recuentos celulares correspondientes.

## 2.2 El SCC y la producción

El descenso de la producción de leche con la presencia de alguna enfermedad en el animal y la relación que se establece entre la presencia de infección intramamaria y el recuento de células somáticas hace que la comunidad científica haya buscado establecer una relación entre el mayor o menor nivel de presencia de células somáticas y la producción de leche de la granja. De todos modos, existe una gran confusión entre los efectos que produce la mastitis sobre la producción de leche y los efectos de un recuento alto de células somáticas ya que en muchas ocasiones se establece la relación directa entre la presencia de la enfermedad y el valor alto de SCC.

En realidad, la realidad causal establece que la enfermedad produce, entre otros, dos efectos que tienen relevancia en el contexto de este trabajo: primero, el incremento del recuento celular como consecuencia de la respuesta del sistema inmunitario a la agresión de un patógeno y segundo, una cierta caída de la producción como consecuencia de la situación general del animal que cabe calificar como anómala. Lo que presenta más dudas a nivel de modelado cuantitativo es la relación entre el SCC y la producción (Figura 2.13).

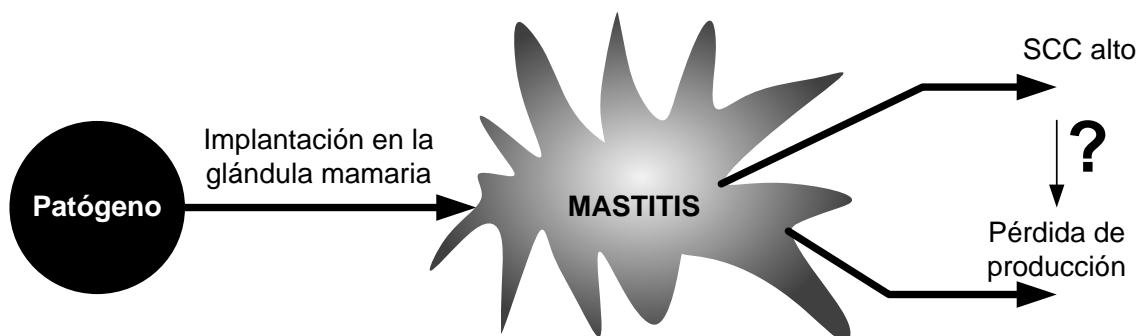


Figura 2.12 Posible relación entre valores altos de SCC y la producción de leche

Uno de los principales problemas con que se enfrentan los estudios que analizan la variación de la producción con cualquier factor tal como la mastitis o los valores elevados de células somáticas consiste en establecer un baremo o unidad de comparación. ¿Cuál es el valor “normal” de producción de un animal y cuál es el valor “alterado”? ¿Cómo se establece la referencia a partir de la cual se identifica una variación de la producción? Y también hay que establecer, aunque es un factor menos problemático, la unidad de medida, no ya en litros o kilogramos de leche producidos si no el tiempo en el que se han producido.

Uno de los mecanismos más habituales (Bartlett et al., 1991; Hoblet et al., 1991; Houben et al., 1993; Lescourret & Coulon, 1994a; Pedraza, 1991; Wood & Booth, 1983) para establecer un nivel de referencia de producción es utilizar animales con características similares (partos en la misma época, mismo número de parto, genética y manejo similar) al que presenta el factor de estudio y establecer un “par” o “pareja” de estudio, uno con la incidencia bajo estudio y el otro sin ella. De esta manera, el animal del par que no presenta el problema establece la referencia de producción sobre la que se analizarán las variaciones que pueda sufrir la otra vaca del par. Otro mecanismo consiste en comparar la producción de una vaca con ella misma antes de mostrar el efecto bajo estudio (Lucey, Rowlands, & Russell, 1986; Luquet, Calavas, & Bugnard, 1992) aunque en este caso hay que tener en cuenta los posibles efectos que sobre la producción pueden tener los días en leche del animal así como la

lactación en la que se encuentra, como se pone de manifiesto en la sección “2.2.3 El recuento de células somáticas y los días en leche (DEL)”. Tanto en un caso como en el otro, la comparación con la producción de la vaca no afectada por el factor de estudio se puede hacer usando la comparación directa, ajustando curvas de regresión (Hoblet et al., 1991; Houben et al., 1993) o utilizando modelos de producción (Bartlett et al., 1991; Lescourret & Coulon, 1994b; Lucey & Rowlands, 1984; Lucey et al., 1986; Pedraza, 1991; Wood & Booth, 1983).

En cuanto a las unidades de medida utilizadas para cuantificar las pérdidas de producción las más habituales son los kilos o litros por día (Hortet, Beaudeau, Seegers, & Fourichon, 1999; Hortet & Seegers, 1998b) o a nivel de lactación (Pedraza, 1991; Raubertas & Shook, 1982), considerando un periodo estándar de duración de la lactación que, como habitual se usa el valor a 305 días

En (Seegers, Fourichon, & Beaudeau, 2003) se hace una revisión del efecto del elevado recuento de células somáticas en la producción. La mayoría de los estudios establecen una pérdida de producción con el aumento de células somáticas ya que ello indica la presencia de mastitis clínica o subclínica. Para determinar una pérdida es necesario determinar un nivel de normalidad o un estado de no-infección para poder comparar la producción en este estado con la producción a altos valores de SCC. El nivel puede ser puesto en un valor menor o igual a 50000 cél/ml teniendo en cuenta los estudios de (Laevens et al., 1997) y (A. J. Schepers et al., 1997) en vacas y rebaños con baja prevalencia. En (Hortet & Seegers, 1998a) las pérdidas diarias en los valores de 400000 cél/ml y 8000000 cél/ml varían entre 0,8 y 3,1 kg de leche y entre 1,1 y 4,2 kg de leche respectivamente para las vacas de primer parto. A pesar de las discrepancias mostradas entre los estudios se puede encontrar una media de 0,4 kg de producción de leche por cada vez que se duplica el valor del SCC.

En el caso de las vacas con más de un parto, en los mismos valores de 400000 cél/ml y 800000 cél/ml, las pérdidas estimadas varían entre 1 y 3 kg de leche y entre 1,2 y 4 kg de leche respectivamente. El valor central para las pérdidas diarias en estas vacas se establece en 0,6 kg de leche por cada vez que se duplica el valor de SCC.

Cuando las pérdidas se evalúan a nivel de lactación en la mayoría de las referencias (Dentine & McDaniel, 1983; I. R. Dohoo et al., 1984; Raubertas & Shook, 1982; Youl & Nicholls, 1987) se constata que son mayores en vacas de lactaciones distintas de la primera que en la primera excepto en (Gill et al., 1990) dónde no encuentra diferencias significativas. Los valores de pérdidas de producción para vacas primíparas para 400000 cél/ml y 800000 cél/ml varían entre los 153 y 343 kg y los 204 y 457 kg de leche respectivamente. Para las vacas múltiparas, las variaciones entre los estudios fueron amplias y varían entre los 166 y los 823 kg para 400000 cél/ml y los 22 y 1098 kg de leche para las 800000 cél/ml. La tendencia central de las pérdidas a nivel de lactación es de alrededor de 120 kg por cada duplicación del valor de SCC para vacas con lactación superior a 1 y de 80 kg de leche cada vez que se duplica el SCC para las vacas de primer parto.

Estos resultados son coherentes con los que se obtuvieron en (Hortet et al., 1999) donde el estudio se realizó con vacas Holstein francés cuyos valores de SCC llegaron hasta los 600000 cél/ml pero que no presentaran incidencia de mastitis clínica. En este estudio se eliminaron todos los registros de animales que presentaran alguna enfermedad que afecte a la producción de leche tales como la mastitis, la cojera (Green, Hedges, Schukken, Blowey, & Packington, 2002; Kossaibati & Esslemont, 1997; Warnick, Janssen, Guard, & Grohn, 2001) o la hipocalcemia o fiebre láctea (Bayer & Ceballos; Rajala-Schultz, Grohn, & McCulloch, 1999).

Para garantizar además que la relación de la producción fuese únicamente con el SCC se eliminaron todos los registros de aquellas vacas posteriores a cualquier proceso de mastitis clínica ya que el efecto de la mastitis sobre la producción permanece durante algún tiempo, 5 semanas o más según (Lescourret & Coulon, 1994b). Para evaluar la pérdida de producción se utilizó como referencia de producción normal aquella que se obtiene con un valor de células somáticas de 50000 cél/ml. En vacas primíparas la reducción de producción diaria se calculó en 0,30 kg para un SCC de 100000 cél/ml, 0,61kg para un SCC de 200000 cél/ml y 1,09 kg para un SCC de 600000 cél/ml. Por tanto, podemos observar un descenso de la producción de 0,3 kg por cada vez que se duplica el SCC, siendo estos resultados independientes de los días en leche en que se encuentre la vaca. Sin embargo, en los animales múltiparos, la relación entre el descenso de la producción y el número de células somáticas está también condicionada por los días en leche del animal. Así, si el SCC se duplica, la pérdida de producción en kg se ve multiplicada por 1,07 y 1,0 para días en leche igual a 50 y por 2,95 y 3,03 para días en leche igual a 250 para vacas que se encuentran, respectivamente, en  $L > 2$ . En las vacas con  $L = 2$ , sin embargo, se encontró que la pérdida de producción era mayor en los primeros 15 días después del parto que en los posteriores.

### **2.2.1 El recuento de células somáticas y la composición de la leche**

La relación entre el aumento de células somáticas y la variación en la composición de la leche no está demasiado clara en la bibliografía disponible hasta la fecha. Los estudios se centran básicamente en buscar variaciones en la composición en grasa y proteínas de la leche como factores muy destacados que pueden actuar como modulares destacados del precio de la leche. Si aceptamos por válida la relación entre la presencia de mastitis y el incremento de células somáticas, podemos tomar en consideración (Hortet & Seegers, 1998b) en el que todos los trabajos revisados (Houben et al., 1993; Macmillan, Duirs, & Duganzich, 1983; Myllys & Rautala, 1995; Wood & Booth, 1983) mostraban un descenso de producción de grasa y proteínas que varía entre los 3 y los 22 kg para el caso de la grasa y entre 0 y 15 kg para el caso de la proteína, en todos los casos para animales que presentaban síntomas de mastitis clínica. Sin embargo, a pesar de encontrar estos descensos de producción total de grasa, no se ha podido determinar de manera sistemática si el descenso es mayor o menor del que se puede achacar a la propia pérdida de producción de leche, ya que en algunos casos se produjeron descensos porcentualmente mayores de producción de grasa que los esperados simplemente por la pérdida de producción de leche (Houben et al., 1993; Macmillan et al., 1983) y en otros casos los descensos porcentuales de producción de grasa han sido inferiores a los correspondientes a la pérdida de producción de leche (Myllys & Rautala, 1995; Wood & Booth, 1983).

En cuanto a trabajos que relacionen de manera directa la alteración de la composición de la leche únicamente con valores altos de células somáticas y no con la presencia de enfermedades que alteren esos valores, no se dispone en la literatura científica de gran variedad. Así, para el caso de la proteína, en (Gill et al., 1990) se encontró que para variaciones de la variable transformada del SCC  $\log_2(SCC \times 10^{-3})$  de 0 a 4, el contenido en proteína en leche aumentó de 33,2 g/kg a 34,0 g/kg de leche. En cambio, en (Ng-Kwai-Hang, Hayes, Moxley, & Monardes, 1984) el contenido total de proteínas se incrementó únicamente para niveles muy altos de SCC (valores superiores a 1000000 cél/ml) con una media de aproximadamente 0,15 g/kg para cada vez que se duplica el SCC.

Estos incrementos del contenido total de proteína en la leche, a pesar de que parezcan favorables para mejorar el precio de venta, parecen producidos por una reducción en la síntesis de la caseína (Dobbins, 1977; Harmon, 1994) y por tanto, una reducción de la concentración de caseína en la leche, reduciendo la calidad de la misma e introduciendo problemas en el procesado de la misma.

En relación con la variación del contenido de grasa en función de los niveles de células somáticas, en los estudios (Gill et al., 1990; G. M. Jones et al., 1984; Ng-Kwai-Hang et al., 1984) se realizaron análisis a nivel diario. Los cambios producidos en el contenido de grasa oscilaron entre el 0% y el -12% para niveles de SCC con una variación entre las 50000 cél/ml y el 1600000 cél/ml. Las variaciones en algunos casos resultaron positivas aunque la media fue un descenso de 0,25 g/kg de leche para cada vez que se duplicaba el SCC. En el caso de las medidas tomadas a nivel de lactación se registraron pérdidas de entre 4 y 9 kg de grasa para cada vez que se duplica el valor de SCC (Dentine & McDaniel, 1983; Youl & Nicholls, 1987). La tendencia central es a un decremento en la producción de grasa de 0,2 g/kg para cada incremento que duplique el valor del SCC.

La variación en el contenido de grasa no es muy significativa teniendo en cuenta los estudios realizados, aunque ha mostrado una tendencia al descenso de la producción total de grasa con el incremento de células somáticas.

## **2.2.2 El recuento de células somáticas y la máquina de ordeño**

Son muchas las variables que forman parte de una explotación ganadera que afectan o pueden afectar a los parámetros económicos de esa explotación. En líneas generales, como quedó establecido en los primeros apartados de este capítulo, la producción y el recuento celular tienen un gran número de variables de las que dependen. En el caso de la máquina de ordeño, su parametrización afecta fuertemente al estado de salud del rebaño y eso tiene efecto sobre la producción y el recuento celular.

En el caso concreto de la máquina de ordeño hay una serie de parámetros de cuyos valores dependerá la salud de la ubre. Partiendo de un correcto funcionamiento del sistema y de su correcto mantenimiento, la máquina de ordeño se puede parametrizar mediante la asignación de valores a los siguientes parámetros:

- Vacío nominal, que corresponde al nivel de vacío de la línea que alimenta al conjunto del sistema de pulsación y que depende de la configuración de la instalación.
- Vacío de colector, un valor más bajo que el anterior y que corresponde a la situación de vacío en el interior del colector de cada punto de ordeño.
- Fuerza de colapso que, en realidad, es una diferencia de presión que se tiene que aplicar en la cámara de vacío para conseguir que la pezonera toque en un punto sus paredes interiores.
- Vacío residual de masaje, que corresponde a la diferencia entre el vacío de colector y la fuerza de colapso y corresponde al exceso de vacío que se emplea para masajear el pezón.
- Sobrepresión,
- Frecuencia de pulsación, que corresponde al número de ciclos por minuto de apertura y cierre de la pezonera.

- Ciclo de trabajo que es el tiempo que la pezonerera se mantiene abierta respecto al tiempo en que se mantiene cerrada.

Algunos de estos valores son más o menos estándar y no se realizan cambios sobre ellos, con lo que el efecto sobre cualquier parámetro de producción o calidad está poco o nada documentado; este es el caso de la frecuencia de pulsación y del ciclo de trabajo. La fuerza de colapso depende del tipo y material de la pezonerera y es algo que no se suele modificar dentro de una explotación; en general; hay pezonereras con valores elevados (más de 12 kPa), mayoritariamente de silicona y pezonereras de menos de 9 kPa (en general, de caucho). Los estudios realizados (Ortega, Perez, Muniz, & Fernandez, 2008) presentan resultados contradictorios y han sido objeto de una dilatada discusión durante la reunión del Milking Machine Committee en la EPI de Gijón (mayo de 2009), sin llegar a conclusiones claras. De todas formas, los trabajos desarrollados hasta la fecha (Bade, Reinemann, Zucali, Ruegg, & Thompson, 2009; Capuco et al., 1994; Hamann & Mein, 1988; Hamann, Mein, & Wetzell, 1993; Hamann, Nipp, & Mein, 1988; Mein, 2012; Reinemann, Bade, Zucali, Spanu, & Ruegg, 2008; Reinemann, Rasmussen, & Mein, 2001; Williams & Mein, 1985; Williams, Mein, & Brown, 1981) sí que inciden en el efecto de la máquina de ordeño sobre el estado de salud de los pezones, sobre todo de la punta del pezón, donde valores inadecuados pueden producir efectos muy negativos, como la aparición de hiperqueratosis, un síndrome que implica la acumulación de queratina en el esfínter lo que impide su cierre y, en consecuencia, permite dejar abierta una vía que los patógenos pueden aprovechar para su implantación en la glándula mamaria. Hay varias formas de evaluar la hiperqueratosis, pero sin entrar en detalles que resultan un poco ajenos a este trabajo, lo cierto es que la presencia de hiperqueratosis es una de las principales causas de mastitis por facilitar una vía de acceso a los patógenos hasta el interior de la ubre.

De todas formas, esta entrada está modulada por la rutina de ordeño y por el estado del resto de la explotación; así, aun existiendo el canal de entrada por la presencia de hiperqueratosis debida al mal ajuste de la máquina de ordeño, una rutina de ordeño que incluya selladores (post-dipping) y una buena limpieza de la explotación (sobre todo de las camas) podría minimizar ese efecto y hacer que la mastitis no dependa tanto de la máquina de ordeño. Finalmente, la presencia de mastitis producirá o tenderá a producir recuentos celulares más elevados (figura 2.14Figura 2.13 Relación entre la máquina de ordeño y los niveles de SCC).

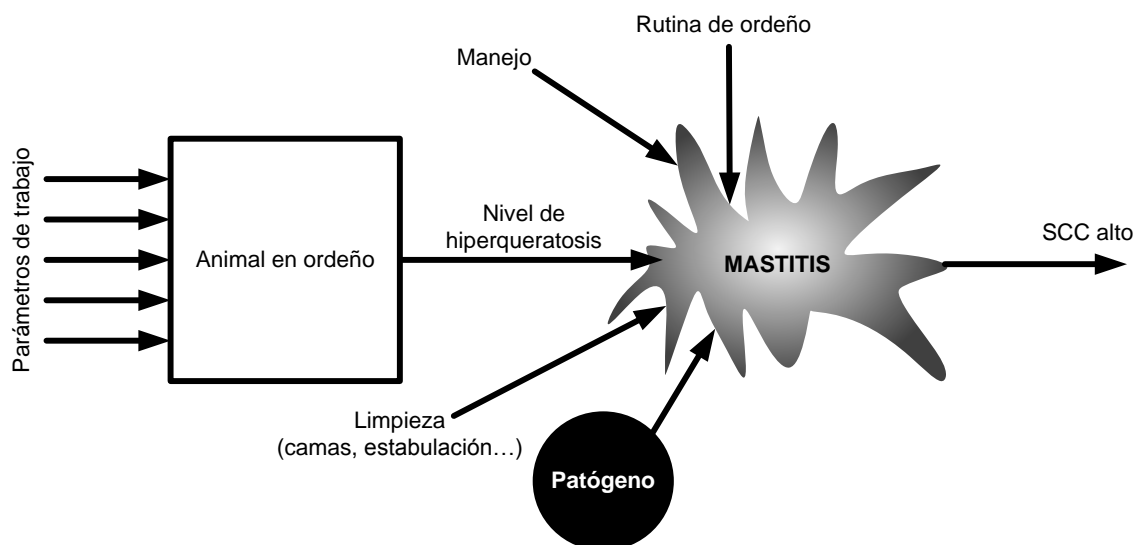


Figura 2.13 Relación entre la máquina de ordeño y los niveles de SCC

Como se puede observar, la presencia de muchos parámetros moduladores, ajenos a la propia máquina de ordeño hace que la relación entre la máquina de ordeño y el SCC incluya un comportamiento un tanto caótico, en buena parte por la dificultad de medida y estandarización de todos esos aspectos moduladores.

En líneas generales, cabe decir que el ajuste de la máquina de ordeño es uno de los factores que puede afectar al resultado de SCC de los animales de una explotación, pero resulta casi imposible cuantificar tal efecto y, de hecho, no existen referencias bibliográficas sobre este tema a fecha de hoy.

Si bien el estudio de este aspecto puede resultar interesante, los resultados a los que se han llegado hasta la fecha (Ortega et al., 2008) que establecen la conveniencia de fijar el vacío residual de masaje en el entorno de 27 kPa para minimizar la hiperqueratosis parece suficiente para desactivar la máquina de ordeño como factor multiplicador de la mastitis.

Así, se puede establecer que la máquina de ordeño no influye negativamente ni en el incremento de la prevalencia de mastitis ni en el recuento celular siempre que esté correctamente ajustada. No obstante, esto no es un asunto tan sencillo puesto que la progresiva degradación de las pezoneras con el uso va reduciendo su fuerza de colapso y, con ello (Davis, Reinemann, & Mein, 2000; Gleeson & O'Callaghan, 1998), modificando el valor del vacío residual de masaje. Se requiere una revisión periódica de todos los parámetros de la máquina de ordeño y, eventualmente, el ajuste del vacío nominal para conseguir mantener el vacío residual de masaje en su entorno correcto.

Otro de los parámetros que afecta a la explotación y que está relacionado con la máquina de ordeño es el flujo mínimo, es decir, el momento en el que el flujo de leche que se extrae del animal es tan pequeño que se decide que la vaca ha sido ordeñada completamente y el punto debe ser retirado.

Un flujo mínimo muy elevado significa que el ordeño no es intenso, que la vaca puede quedar mal ordeñada y que, en consecuencia, puede quedar una cantidad de leche en el interior de la ubre (leche cisternal) que puede ser un caldo de cultivo para la proliferación de microorganismos en el caso de que hayan podido acceder al interior de la glándula con lo que se contribuye a facilitar la aparición de mastitis. Por el otro lado, un flujo mínimo muy bajo, evita esa contingencia pero fuerza mucho la extracción de leche y favorece la descamación de las paredes interiores de la ubre lo que contribuye directamente al incremento del recuento celular (Grindal & Hillerton, 1991; R. H. Miller, Pearson, Weinland, & Fulton, 1976; Tancin et al., 2002) del mismo modo, el sobre ordeño presenta un efecto negativo sobre la condición del pezón lo que es otro factor agravante en la aparición de mastitis (Edwards, O'Brien, Lopez-Villalobos, & Jago, 2013; Rasmussen, 2004).

En estas condiciones, la mejor solución es determinar un flujo mínimo correcto para reducir ambos efectos y garantizar la salud del animal; sin embargo, esto no es sencillo puesto que los cuatro cuartos de la ubre no son idénticos y los traseros suelen producir más leche que los delanteros (Forsback et al., 2010); así, con cualquier flujo mínimo y en el caso de utilizar un ordeño en sala o en plaza (el punto tiene cuatro pezoneras que se retiran a la vez), siempre habrá problemas puesto que si se decide a usar un flujo mínimo acorde con los cuartos delanteros, los traseros quedarán mal ordeñados. Por el contrario, si se decide fijar el flujo mínimo de acuerdo con los cuartos traseros, serán los delanteros los que se sobreordeñen



causando descamación. Finalmente, si se opta por una solución intermedia, se producirán ambos efectos simultáneamente, aunque en menor medida. Sistemas de ordeño con retirada independiente de cada pezonera, como el caso de los robots de ordeño permiten acomodar los flujos mínimos a cada cuarto y con ello, reducir ambos efectos negativos.

### 2.2.3 El recuento de células somáticas y los días en leche (DEL) y la lactación

Encontrar en la literatura científica artículos que relacionen la variación de las células somáticas directamente con los días en leche o el estado de la lactación de la vaca no es tarea sencilla ya que ni uno ni otro son factores objetivo de la gestión de una explotación ganadera. Es posible encontrar relaciones indirectas cuando los estudios buscan analizar la evolución de la producción a lo largo de la lactación y se establecen así mismo relaciones con el recuento de células somáticas para determinar cuándo un animal sufre mastitis clínica o subclínica. Así por ejemplo, en (Hagnestam-Nielsen, Emanuelson, Berglund, & Strandberg, 2009) se aprecia (figura 2.15) que la evolución del valor medio de SCC para las vacas consideradas sanas ( $SCC < 50000$  cél/ml) apenas varía a lo largo de la lactación excepto para las primeras semanas después del parto, en las que el recuento de células somáticas es muy elevado durante el período del calostro, independientemente de que la vaca esté sana o enferma (I. R. Dohoo & Meek, 1982). De la misma manera, para las vacas que considera afectadas de mastitis subclínica ( $SCC < 200000$  cél/ml), la variación de la media de SCC se mantiene constante con ligeros incrementos al final de la lactación, y mostrando un pico mucho más acusado de presencia de células somáticas en las primeras semanas de la lactación.

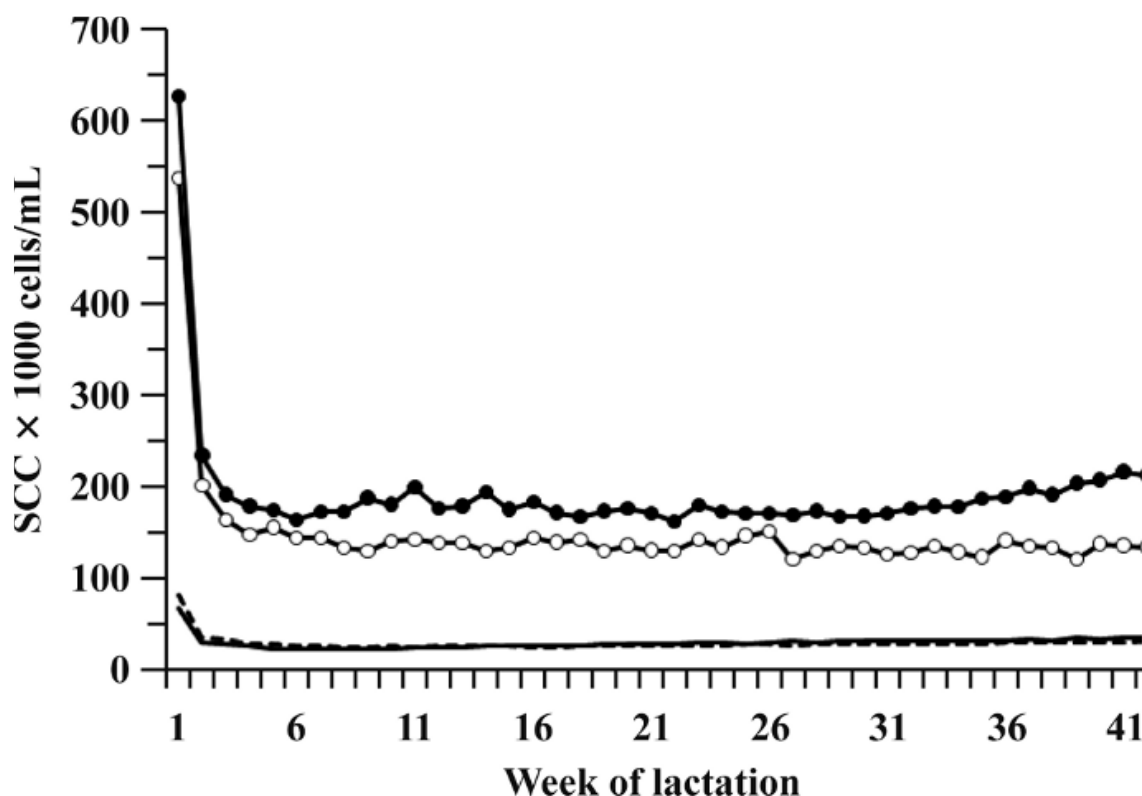
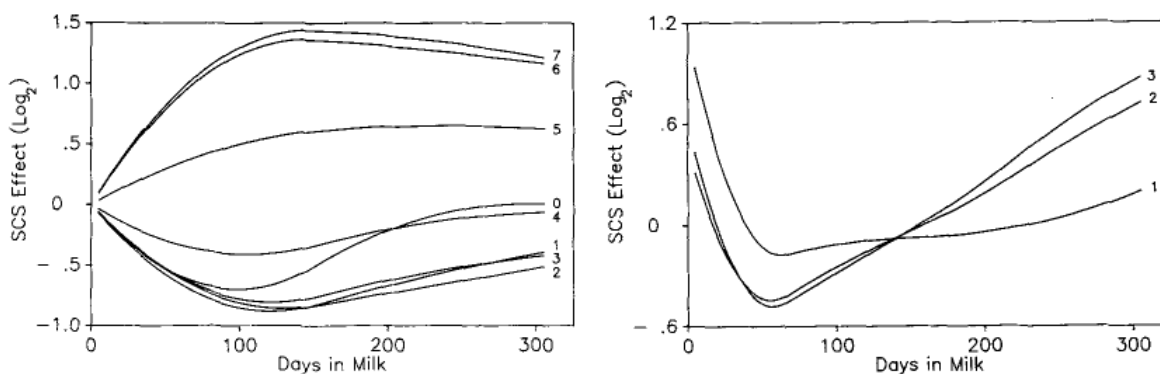


Figura 2.14 Evolución del recuento de células somáticas con los días en leche (Hagnestam-Nielsen et al., 2009)

En (A. J. Schepers et al., 1997) se traza la relación de la transformación del logaritmo del recuento de células somáticas con el estado de la lactación y con la lactación, encontrándose que después del parto el recuento es muy elevado cayendo a un mínimo entre los días 40 y 80 de la lactación, coincidiendo con el máximo de producción, para ir incrementándose constantemente hasta el final de la lactación. En (Barkema, Deluyker, Schukken, & Lam, 1999) se cuantifica esa variación en las primeras seis semanas después del parto y se ve que el descenso es más acusado (de 306000 cél/ml a 42000 cél/ml) en las vacas que no presentan ningún tipo de infección intramamaria que en aquellas que presentan alguna infección severa (de 3229000 cél/ml a 1257000 cél/ml).

Una relación similar se puede encontrar en (Wiggans & Shook, 1987) en la que analiza la evolución del recuento de células somáticas en las distintas lactaciones a través de la transformación del SCC en el SCS. Para realizar el análisis redondea todos los valores posibles de SCC al entero más próximo de SCS y calcula la variación a lo largo de las lactaciones encontrando patrones similares a los vistos en los trabajos anteriores. En la gráfica izquierda de la figura 2.16 podemos ver la representación de la evolución del SCS a lo largo de la lactación, agrupando los datos para valores enteros de SCS. Se comprueba que para valores bajos de SCS ( $SCS \leq 4$ ) las curvas de comportamiento del SCS con el estado de la lactación coinciden con lo visto en el resto de trabajos: un inicio con valor alto, al que sigue un rápido descenso coincidiendo con los días en los que se alcanza el máximo de producción para a continuación crecer gradualmente. En cambio, para los valores más altos de SCS ( $SCS \geq 5$ ), las curvas muestran un comportamiento claramente diferente sufriendo un incremento en el SCS desde el parto. Los autores justifican este comportamiento anómalo en el hecho de que los valores altos de SCS implican valores muy altos de SCC y que probablemente la respuesta observada sea consecuencia de una reacción a una infección intramamaria.

En la gráfica de la derecha de la figura 2.16 se muestra la evolución del SCS a lo largo de la lactación agrupando los datos por lactaciones. Como ya se ha visto en otros trabajos, se muestra que en la primera lactación los cambios del SCS son menos acusados que en el resto de lactaciones y que, éstas últimas, son muy similares en su aspecto y valores.



**Figura 2.15 Efecto de los días en leche en la variación del SCS para distintos valores de SCS (Wiggans & Shook, 1987)**

## 2.3 Los modelos de producción

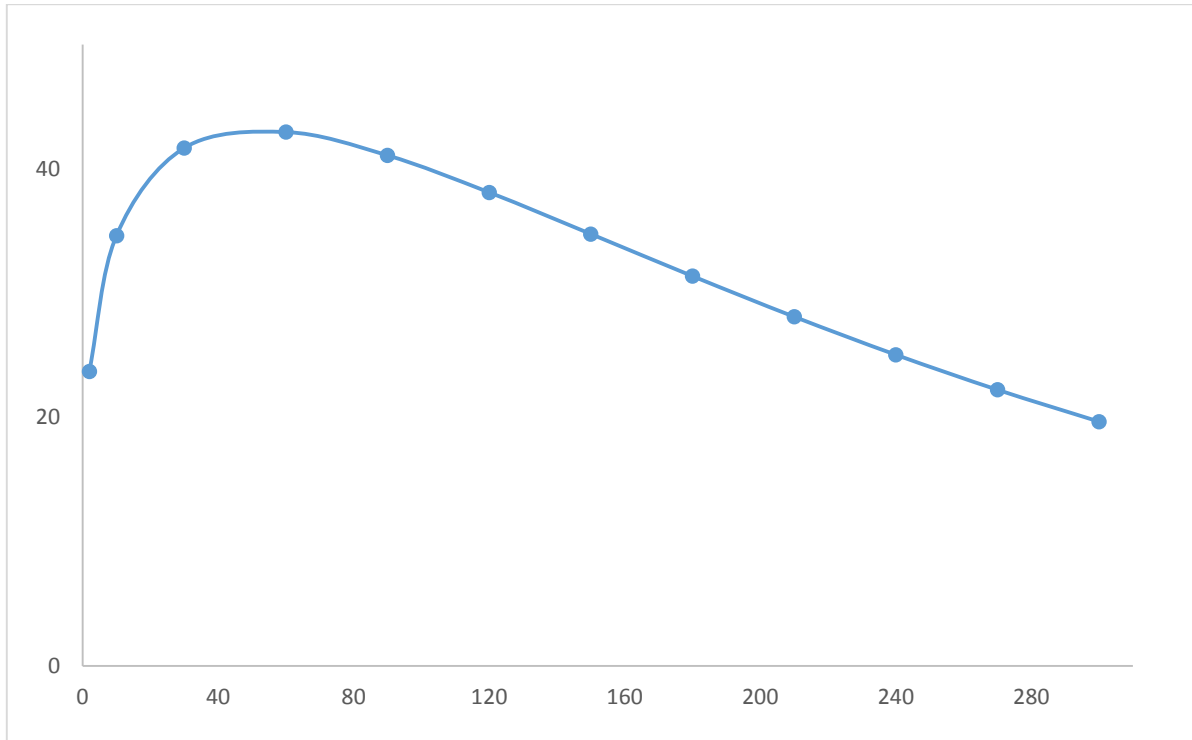
Encontrar un modelo matemático que relacione valores de las variables del estado de una instalación con los resultados tanto de la producción de leche así como de la composición de esa leche, es de gran interés para el propietario ya que ello le permitiría controlar el funcionamiento económico de su explotación a partir parámetros objetivos. Esta es una de las razones por las que gran cantidad de trabajos científicos se centran en encontrar modelos de comportamiento tanto de una vaca en concreto como de una granja en su conjunto a partir de variables propias de la instalación o del animal. Así, es posible encontrar modelos que relacionen la proporción de distintos constituyentes en la ración diaria de los animales con la composición de la leche que producen (Krizsan, Sairanen, Hojer, & Huhtanen, 2014), la eficiencia de la alimentación (Ingvarsen, 1994; Manafiazar et al., 2013) o la producción de residuos y contaminación ambiental (Kebreab, France, Beever, & Castillo, 2001; Nousiainen, Shingfield, & Huhtanen, 2004; Tamminga, 1992).

Uno de los modelos más utilizados para la toma de decisiones de gestión dentro de una granja es el modelo que relaciona los días en leche dentro de una lactación con la producción de una vaca. Este modelo, denominado curva de lactación, al no depender más que de una variable independiente fácilmente controlable como es el tiempo, es un recurso muy cómodo de utilizar para el granjero sin más que ajustar los parámetros adecuados.

Los modelos intentan encontrar una fórmula matemática para el proceso fisiológico que se produce en el animal después del parto y que es común para la mayoría de los mamíferos (Landete-Castillejos & Gallego, 2000). La curva de lactación en los mamíferos se incrementa con el aumento de las exigencias de las crías hasta un pico en el cual la madre ya no puede completar las exigencias de nutrientes de sus crías. A partir de este momento, las crías van sustituyendo progresivamente la leche materna por comida sólida hasta el destete. Ese proceso de sustitución lleva a la madre a un descenso progresivo de la producción de leche. La curva de lactación tiene el aspecto que se muestra en la figura 2.17. Este mismo proceso de

incremento de la producción hasta un máximo a partir del cual se va reduciendo progresivamente la producción de leche ocurre de la misma manera en las granjas de producción lechera aunque en este caso no está provocado por las exigencias de las crías si no por la extracción por medios mecánicos de la leche.

Podemos encontrar desde muy antiguo trabajos en la literatura científica para determinar la curva de lactación (Brody, Turner, & Ragsdale, 1924) que inicialmente eran transformaciones logarítmicas de funciones lineales como la exponencial o la polinómica. Con la llegada de los computadores se han podido realizar trabajos con modelos no lineales más complejos (Grossman & Koops, 1988). Habitualmente se clasifican los modelos matemáticos de procesos biológicos en dos grandes grupos: los modelos empíricos, basados en el manejo de datos estadísticos que aportan curvas de salida a partir de datos objetivos sin atender a los procesos biológicos involucrados y los modelos mecanicistas, que se caracterizan por una atención más profunda a los procesos biológicos que se pretenden modelar y se basan en modelos de funcionamiento de los procesos de lactación. Como ejemplo de modelos de lactación mecanicista podemos mencionar a (Dijkstra et al., 1997) y (Pollott, 2000). Estos modelos son mucho más complejos de ajustar debido al alto número de parámetros que utilizan y sus resultados no son tan diferentes de los obtenidos a partir de los modelos empíricos (Nasri et al., 2008) a parte de una mejor explicación de los procesos biológicos involucrados.



**Figura 2.16 Forma típica de la curva de lactación**

En referencia a los modelos empíricos, el más usado es el modelo de la función gamma incompleta de Wood (Wood, 1967) cuya fórmula es la siguiente:

$$Y_t = at^b e^{ct}$$

donde  $y_t$  es la producción esperada en el día  $t$  y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son parámetros que se pueden relacionar directamente con propiedades de la curva de lactación:  $a$  tiene un significado de escala relacionado con el nivel de producción,  $b$  controla la tasa de incremento hasta el pico de producción y  $c$  expresa el ratio de decaimiento de la producción después del pico de producción. Las limitaciones de este modelo se han puesto de manifiesto en varios trabajos (Congleton & Everett, 1980; Dematawewa, Pearson, & VanRaden, 2007; Dijkstra et al., 2010; Sherchand, McNew, Kellogg, & Johnson, 1995), en concreto una sobreestimación de la producción de leche en la primera parte de la curva y una infravaloración alrededor y después del pico de producción, aunque en algunos casos es el que mejor resultados proporciona (Cankaya, Unalan, & Soydan, 2011; Golebiewski, Brzozowski, & Golebiewski, 2011). También en (T. Jones, 1997; Perz, Sobek, & Fl'ak, 2008) se indica la necesidad de que las muestras tengan unas propiedades temporales para que no produzcan unas deficiencias elevadas en el modelo, así se indica que la primera muestra después del parto no debería ser más allá del día 15 y después deberían ser tomadas cada 30 días. Aquellos registros con muestras más allá del día 42 después del parto o con un intervalo superior a los 64 días deberían ser rechazados.

El modelo de Wilmink (Wilmink, 1987) es una combinación entre un modelo lineal y uno exponencial que fue utilizado para describir la forma de la curva de lactación en el programa oficial de evaluación genética de Canadá (Schaeffer, Jamrozik, Kistemaker, & Van Doormaal, 2000). El modelo consiste de tres términos que se combinan de manera aditiva mejorando la

flexibilidad (Nicolo P. P. Macciotta, Dimauro, Rassu, Steri, & Pulina, 2011) y cuya formulación es la siguiente:

$$Y_t = a + be^{-kt} + ct$$

donde los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  se asocian con el nivel de producción, el incremento de producción antes del pico y con el posterior descenso, respectivamente. El parámetro  $k$  se relaciona con el tiempo de pico de la lactación y es habitualmente un valor fijo derivado de un análisis previo de la producción media (Brotherstone, White, & Meyer, 2000). Esto significa que el modelo tiene únicamente tres parámetros que deben ser estimados. Por el contrario, el modelo de (T. E. Ali & Schaeffer, 1987) es una regresión polinomial que tiene un mayor número de coeficientes como se ve en la siguiente expresión:

$$Y_t = a + aby_t + cy_t^2 + dW_t + eW_t^2$$

donde  $\gamma_t = t/305$  y  $W_t = \ln(305/t)$ ,  $a$  es un parámetro asociado con la producción en el pico,  $d$  y  $e$  son parámetros asociados con la pendiente de ascenso, y  $b$  y  $c$  están asociados con la pendiente de descenso. Tanto el modelo de Wilmink como el de Ali y Schaeffer se han usado para modelar curvas individuales (N. P. P. Macciotta, Vicario, & Capplo-Borlino, 2005; Olori, Brotherstone, Hill, & McGuirk, 1999; Silvestre, Petim-Batista, & Colaco, 2006) u otros rasgos como la ingesta de materia seca o agua (Kramer, Stamer, Spilke, Thaller, & Krieter, 2009). Aunque generalmente ambas ecuaciones dan mejores resultados que el modelo de Wood no están exentas de presentar problemas matemáticos tales como producción negativa o valores muy altos de producción al principio y al final de la lactación (Druet, Jaffrezic, Boichard, & Ducrocq, 2003; N. P. P. Macciotta et al., 2005; Silvestre et al., 2006).

Todos los modelos analizados hasta el momento tratan la lactación como un único proceso pero Grossman y Koops (Grossman & Koops, 1988) plantean un modelo de lactación como la suma de diferentes fases superpuestas cada una con sus correspondientes valores para los parámetros de los modelos. El aspecto de la ecuación de la curva de lactación sería el siguiente:

$$Y_t = \sum_{i=1}^n [a_i b_i [1 - \tanh^2 (b_i (t - c_i))]]$$

El modelo difásico que asume una curva de lactación con dos fases superpuestas descritas con dos curvas lineales y dos curvas cuadráticas logísticas está indicado como el más preciso para describir las curvas de lactación media para la producción de leche cuando se comparan con la función gamma incompleta de Wood, el modelo polinomial inverso o un modelo monofásico (Scott, Yandell, Zepeda, Shaver, & Smith, 1996). Las fases superpuestas son de aproximadamente 200 y 410 días. En general, los modelos multifásicos se caracterizan por un gran número de parámetros (tres por cada fase) y, por lo tanto, requieren una gran cantidad de pruebas para ser correctamente ajustados, como en el caso de curvas de tendencias o lactaciones extendidas (Dematawewa et al., 2007; Vargas, Koops, Herrero, & van Arendonk, 2000).

La necesidad de ajustar las curvas para desviaciones individuales de la media, además de la posibilidad de realizar los cálculos utilizando computadores, llevó al uso de modelos matemáticos más flexibles que permiten ajustar el paso del modelo por puntos concretos de la curva de lactación, denominados nudos. Así, entre estos modelos de ajustes basados en puntos

concretos, podemos encontrar los polinomios ortogonales de Legendre (Kirkpatrick, Lofsvold, & Bulmer, 1990), de la forma

$$Y_t = \sum_{i=0}^n \alpha_i \Phi_i(\omega)$$

donde  $\omega$  es una unidad estandarizada de tiempo con valores entre -1 y 1,

$$w = 2 \left( \frac{t - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \right) - 1$$

y  $t_{min}$  (5 días) es el valor más temprano de días en leche y  $t_{max}$  (302 días) es el último valor para los días en leche (Schaeffer, 2004). Con

$$\Phi_n(\omega) = \sqrt{\frac{2n+1}{2}} P_n(\omega),$$

donde  $P_n(\omega)$  es un polinomio de grado  $n$  y  $\Phi_n(\omega)$  es el polinomio normalizado. De acuerdo con Spiegel (Spiegel, 1971), los primeros cinco polinomios de Legendre de unidades estandarizadas de tiempo serían:

$$P_0(\omega) = 1$$

$$P_1(\omega) = \omega$$

$$P_2(\omega) = \frac{1}{2}(3\omega^2 - 1)$$

$$P_3(\omega) = \frac{1}{2}(5\omega^3 - 3\omega)$$

$$P_4(\omega) = \frac{1}{8}(35\omega^4 - 30\omega^2 + 3)$$

Otro modelo de curva de lactación que ajusta la curva por puntos o nudos son las curvas spline cúbicas (Silvestre, Petim-Batista, & Colaco, 2005; White, Thompson, & Brotherstone, 1999). El modelo de curva *spline* cúbica es semiparamétrico y necesita al menos tres observaciones para recrear la lactación. En este modelo, la lactación se divide en períodos separados con valores específicos de la variable días en leche marcando los puntos de separación entre los períodos y configurando los nudos sobre los que se construirá la curva. El spline es una función cúbica que se limita de tal manera que la función y sus dos primeras derivadas son continuas en los nodos entre segmentos (White et al., 1999). Cumpliéndose estas condiciones, la ecuación para cada período quedaría así:

$$Y_t = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3 \text{ para } t_i \leq t \leq t_{i+1}$$

Tanto los polinomios de Legendre como las curvas *spline* tienen una mayor capacidad para ajustar las curvas de lactación como es previsible por la gran cantidad de parámetros utilizados, pero esa misma razón hace que presenten distorsiones matemáticas en los extremos presentando producciones negativas al inicio de la lactación o producciones excesivas al final de la lactación (Nicolo P. P. Macciotta et al., 2011; N. P. P. Macciotta et al., 2005; Silvestre et al., 2006). Comparados con los modelos de tres parámetros como el de Wood también tienen problemas para determinar el aspecto general de la curva de lactación y, aunque presentan mejores ajustes desde el punto de vista matemático, no son capaces de presentar la forma

general de la curva modelada a no ser que el número de muestreos en los primeros días de la lactación sea elevado (Nicolo P. P. Macciotta et al., 2011).

Las curvas *spline* cúbicas tiene la capacidad de modelar variaciones bruscas de la variable, tales como la presencia de un caso de mastitis clínica cuando se modela el recuento de células somáticas, siempre y cuando se cuente con un número suficiente de nudos alrededor del proceso. Este factor, el número de muestras para construir el modelo, es uno de los más importantes para conseguir, con cualquier fórmula matemática, un ajuste preciso (Golebiewski et al., 2011; Nicolo P. P. Macciotta et al., 2011; N. P. P. Macciotta et al., 2005; Nasri et al., 2008; Olori et al., 1999; Silvestre, Martins, Santos, Ginja, & Colaco, 2009).

# Capítulo 3

## Materiales y métodos



Para la realización del presente trabajo se partirá de los datos obtenidos por la cooperativa ASCOL (Asturiana de Control Lechero Sociedad Cooperativa Limitada) a lo largo de un periodo de 10 años, entre 1992 y 2012. Esta cooperativa, que agrupa a más de 1000 socios, se encarga de realizar y administrar los datos de control de lechero oficial ("Real Decreto 1679/1994 de 22 julio por el que se establece las condiciones sanitarias aplicables a la producción y comercialización de leche cruda, leche tratada térmicamente y productos lácteos," 1994) de las explotaciones asociadas.

### 3.1 Origen de los datos

La mecánica de recolección de los datos consiste en una visita mensual de un técnico de la cooperativa a cada una de las explotaciones socias de la misma, en la que se toman muestras de leche de cada animal en la explotación, junto con una anotación de los partos e inseminaciones realizadas. En un año se realizan 11 visitas lo que nos daría un total de 11 muestras por cabeza de ganado, explotación asociada y año natural. Los controles realizados por los técnicos tienen un aspecto similar al mostrado en la Figura 3.1 y en ellos se refleja, para cada vaca, los datos relevantes de su producción y de la composición de la leche producida, así como el valor del recuento de células somáticas y otros datos de interés sanitario como el contenido de urea.

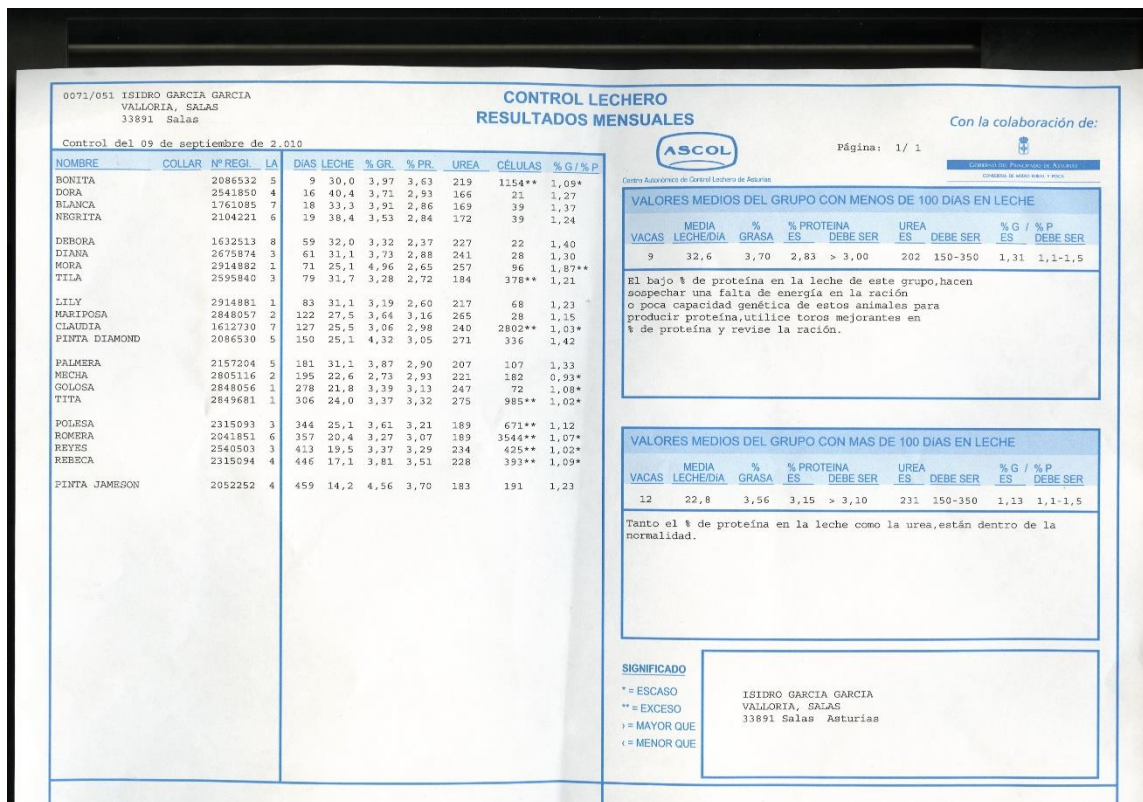


Figura 3.1 Datos del control lechero realizado por ASCOL

La fiabilidad de los valores obtenidos está garantizada dado que las medidas analíticas se obtienen mediante el procesamiento de las muestras en el LILA (Laboratorio Interprofesional Lechero y Agroalimentario de Asturias). Está acreditado por la entidad nacional de acreditación, E.N.A.C., bajo la norma UNE EN-ISO/IEC 17025 para la realización de ensayos de leche y productos alimenticios, según expediente número 246/LE 476.

Cada uno de estos controles es posteriormente introducido por los técnicos de ASCOL en una base de datos para su procesado y almacenamiento. Esta es la base de datos a la que se ha podido acceder y que forma el sustento cuantitativo del trabajo realizado.

Para garantizar el anonimato de las explotaciones y evitar la identificación de los animales cuyos datos forman parte de este estudio, los campos correspondientes al nombre de las explotaciones ganaderas y al nombre del animal han sido sustituidos por códigos numéricos y alfanuméricos, de modo que, si bien tanto unos como otros identifican unívocamente cada ganadería y cada vaca, no se corresponden a nombres reales. Por ello, tanto en este trabajo como en las publicaciones derivadas se optará por este modelo de diferenciación entre explotaciones y reses; así, cualquier parecido de un código de los aquí empleados con un nombre real es pura coincidencia.

## 3.2 Contenido y estructura de los datos

La base de datos relacional está compuesta por tres tablas que contienen toda la información sobre el estado de las explotaciones de los socios de ASCOL. A continuación se muestra la descripción de las tablas y su contenido.

Empezando por la tabla **Explotaciones** (Tabla 3.1), contiene información general de las explotaciones ganaderas asociadas a la cooperativa y que se utiliza como referencia para el acceso a otras tablas.

**Tabla 3.1.- Tabla Explotaciones**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Ganadería	Código único identificativo de la explotación ganadera
Fecha de alta	Fecha en la que la ganadería se dio de alta en el sistema de la cooperativa
Censo de Vacas	Número de cabezas de ganado que posee la explotación en ese momento

El aspecto que presenta el contenido de esta tabla es similar al que se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.- Contenido de la tabla Explotaciones**

<b>Explotaciones</b>		
<b>EXCGAN</b>	<b>Fecha alta</b>	<b>CensoVacasActual</b>
GAN3032	2005	80
GAN3029	2005	71
GAN3020	2005	62
GAN3034	2005	71
GAN3012	2004	313
GAN3008	2004	74
GAN1669	2004	83
GAN1701	2004	118
GAN2958	2003	77

La siguiente tabla de interés es la tabla **Producciones** (Tabla 3.3) que contiene los datos de los análisis de los controles lecheros realizados mensualmente a cada una de las vacas que pertenecen a las granjas de los asociados a la cooperativa. Los campos de la tabla se corresponden con la información presente en las hojas de control ganadero obtenidas en cada granja.

**Tabla 3.3.- Tabla Producciones**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Identificación Vaca	Código único que identifica a cada vaca de manera unívoca
Lactación	Número de lactación en el que se encuentra la res
Número de Control	Identifica el número de orden que ocupa el control dentro de la lactación en curso de la vaca. Los números de control se reinician después del período de secado de la res
Fecha de Control	Fecha en la que se ha realizado la toma de muestras para el control ganadero
Fecha de Análisis	Fecha en la que se ha realizado el análisis efectivo de la muestra tomada para el control
Días	Días en leche (DEL) que lleva la vaca en el momento de realizarse el muestreo
Leche diaria x10	Producción diaria de leche de la vaca, en kg, normalizada a 10 días de producción. Densidad de la leche cruda: 1,032 g/ml.
% Grasa	Porcentaje de grasa en la composición de la leche producida, multiplicada por 100 para evitar la presencia de decimales.
% Proteína	Porcentaje de proteínas en la composición de la leche producida, multiplicada por 100 para evitar la presencia de decimales.
Células	Recuento celular de la leche producida. Es el valor del SCC en miles de células por mililitro o células por microlitro
Urea	Contenido de urea en la composición de la leche producida, en gramos/ml
Ganadería	Código único identificativo de la explotación ganadera

Una muestra del contenido de la tabla se puede ver en Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.- Muestra del contenido de la tabla producciones**

<b>Producciones</b>											
<b>IdVaca</b>	<b>PR LACT</b>	<b>Num Control</b>	<b>Fecha Control</b>	<b>Fecha Análisis</b>	<b>Días</b>	<b>Leche Diaria x10</b>	<b>Pct Grasa x100</b>	<b>Pct Proteína x100</b>	<b>Células</b>	<b>Urea</b>	<b>Ganadería</b>
33054203	3	1	17/12/2005	20/12/2005	335	94	468	388	137	302	GAN3034
33054203	3	2	16/01/2006	17/01/2006	30	57	469	398	163	164	GAN3034
20208851	8	1	27/06/2005	28/06/2005	23	137	522	281	52	353	GAN2746
20208851	8	2	27/07/2005	29/07/2005	30	142	398	276	64	358	GAN2746
20208851	8	4	22/09/2005	27/09/2005	57	118	461	304	196	341	GAN2746
20208851	8	5	25/10/2005		33	151	466	304	196	341	GAN2746
20208851	8	6	24/11/2005	25/11/2005	30	109	516	317	370	376	GAN2746
20208851	8	7	22/12/2005	27/12/2005	28	80	451	323	281	458	GAN2746
20208851	8	8	22/01/2006	24/01/2006	31	66	427	318	273	321	GAN2746
34774792	1	1	10/02/2010	11/02/2010	22	105	259	336	107	99	GAN2925
34774792	1	2	10/03/2010	12/03/2010	28	162	346	277	117	253	GAN2925
34774792	1	3	09/04/2010	12/04/2010	30	141	324	296	78	293	GAN2925
34774792	1	4	11/05/2010	13/05/2010	32	127	345	315	93	239	GAN2925
34774792	1	5	09/06/2010	10/06/2010	29	135	292	318	45	258	GAN2925
34774792	1	6	09/07/2010	13/07/2010	30	118	348	328	70	259	GAN2925

La última tabla disponible es la tabla **Lactaciones** (Tabla 3.5). Esta tabla contiene información resumen de la producción de cada cabeza de ganado en cada una de sus lactaciones. Los campos de la tabla son los siguientes:

**Tabla 3.5.- Tabla Lactaciones**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Identificación Vaca	Código único que identifica a cada vaca de manera unívoca
Lactación	Número de lactación para el que se refieren los datos
Fecha de Parto	Fecha en la que se produjo el parto y la vaca entró en producción
Fecha de Secado	Fecha en la que la res salió de producción y entró en el período de secado, fecundación y gestación
Días	Días en leche (DEL). Número de días que la vaca ha estado en producción
Kg leche	Total de kg de leche producidos por la vaca en esa lactación, en días naturales
Kg grasa	Total de kg de grasa producidos por la vaca en esa lactación, en días naturales.
Kg proteína	Total de kg de proteínas producidos por la vaca en esa lactación, en días naturales.
Leche 305	Total de kg de leche producidos por la vaca normalizados a una lactación de 305 días
Grasa 305	Total de kg de grasa producidos por la vaca normalizados a una lactación de 305 días
Proteína 305	Total de kg de proteína producidos por la vaca normalizados a una lactación de 305 días
Ganadería	Código único identificativo de la explotación ganadera

En la Tabla 3.6 se puede ver una muestra del contenido de la tabla Lactaciones.

**Tabla 3.6.- Muestra del contenido de la tabla lactaciones**

<b>Lactaciones</b>											
<b>IdVaca</b>	<b>Lact</b>	<b>Fecha Parto</b>	<b>Fecha Secado</b>	<b>DIAS</b>	<b>KG LECHE</b>	<b>KG GRASA</b>	<b>KG PROT</b>	<b>LE 305</b>	<b>GR 305</b>	<b>PRT 305</b>	<b>CÓDIGO Gan</b>
982371	10	14/04/1991	05/03/1992	326	10697	413	317	10392	395	302	GAN0479
1045499	10	15/07/1993	04/07/1994	354	9858	363	311	8878	326	280	GAN0112
1272245	9	17/04/1991	05/03/1992	323	5842	250	205	5701	241	197	GAN0479
1272245	10	06/05/1995	04/04/1996	334	8421	283	253	7842	262	234	GAN0479
1377402	8	09/08/1993	28/05/1994	292	5819	218	174	5819	218	174	GAN1449
1379248	4	17/03/1993	25/12/1993	283	8083	270	264	8083	270	264	GAN0969
1396031	10	18/01/1994	22/11/1994	308	7467	252	219	7430	251	218	GAN0315
1396031	9	23/11/1992	21/09/1993	302	7572	312	241	7572	312	241	GAN0315
1399021	10	04/06/1995	01/03/1996	271	3365	127	96	3365	127	96	GAN0722
1399021	9	17/08/1993	04/10/1994	413	5588	224	176	4724	184	145	GAN0722
1426763	11	15/02/1994	24/01/1995	346	7478	303	237	6863	277	216	GAN0339
1426763	10	15/02/1993	26/11/1993	284	6908	269	221	6908	269	221	GAN0339
1454843	12	22/05/1996	05/06/1997	379	10539	357	339	8706	295	278	GAN2066

En el momento de recibir la información de la cooperativa ASCOL, el contenido general de las tablas era el que se muestra en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7.- Valores iniciales de la base de datos de ASCOL**

<b>Tabla</b>	<b>Número de registros</b>	<b>Fecha registro más antiguo</b>	<b>Fecha último registro</b>
Explotaciones	209	1988	2005
Producciones	1654488	02/01/1992	11/06/2012
Lactaciones	159920	01/11/1991	01/07/2012

### 3.3 Validación de datos y depuración de la información

Después de un análisis inicial de los datos se han encontrado una serie de problemas que es necesario controlar:

- Los campos `Fecha Control` y `Fecha Análisis` están estrechamente relacionados ya que uno especifica el momento en el que se tomaron las muestras en la explotación y el otro la fecha en la que el análisis de la muestra ha tenido lugar y sus datos incluidos en la base de datos. Pero en algunos casos, el análisis de una muestra no se pudo realizar bien porque en el momento de la toma de muestras en la explotación el animal no estaba disponible o bien porque la muestra tomada sufrió algún percance que invalidara su información. En estos casos, el campo `Fecha Análisis` aparece en blanco en el interior de la base de datos, pero la información correspondiente a esa muestra (producción, contenido en grasas, proteína, urea, etc) no está en blanco, sino que replica el contenido de los últimos análisis presentes en la base de datos. Esta información es obviamente no contrastable y los datos de este animal deben ser eliminados de cualquier estudio a realizar. Se ha optado por retirar los datos de la lactación completa del animal. Esta acción no tiene un efecto importante sobre el número total de registros ya que sólo afecta a 46947 registros, un 2,83% de los registros disponibles. En cambio, al eliminar los datos completos de la lactación de ese animal, el efecto sobre el total de vacas disponibles es más apreciable ya que afecta a 28386 vacas de un total disponible de 60060, lo cual es un 47,26% de los animales. Sin embargo, mantener esa información no válida generaría importantes distorsiones, tanto a la hora de modelar como en el momento de verificar los modelos.
- Relacionado también con los valores del campo `Fecha Análisis`, se ha comprobado que la base de datos no incorpora valores en ese campo para ninguna fecha de control anterior a junio de 1995. Esto es debido a que la primera versión de la base de datos (1992) únicamente incluía el campo `Fecha Control` y posteriormente se ha añadido el campo `Fecha Análisis` (en 1995). Debido a los problemas comentados en el punto anterior de muestras incorrectas en algunas cabezas de ganado y a la imposibilidad de discernir cuándo un control contiene datos correctos o incorrectos, es necesario eliminar del conjunto de los datos todos los muestreos realizados durante los años 1992 a 1995. Esta decisión ha eliminado de la base de datos una cantidad aproximada de 43500 registros, es decir, un 2,63% de los registros totales lo que mantiene un volumen suficiente para el propósito de los estudios.
- De todas las explotaciones ganaderas pertenecientes a la cooperativa ASCOL, se han solicitado únicamente los datos de aquellas que tuvieran un tamaño suficiente para que los modelos y análisis permitieran establecer conclusiones extensivas a otras explotaciones similares. Inicialmente, el número de ganaderías que cumplen los requisitos básicos para el estudio asciende a 93.

Las características de las explotaciones ganaderas de vacuno de leche pueden resultar muy diferentes. En líneas generales, aunque la inmensa mayoría de las estabulaciones en Asturias sean de carácter intensivo, hay dos tipos de explotaciones: las que producen el ordeño en plaza y las que optan por un ordeño más mecanizado, básicamente, mediante sala de ordeño en un gran porcentaje y, en menos casos,

mediante robots de ordeño. Aunque muchas de las conclusiones que se pretenden alcanzar puedan tener un ámbito general, lo cierto es que el tipo de explotación y las consecuencias de él derivadas en el manejo y en las rutinas podrían introducir factores distorsionadores y perturbaciones incontroladas que le restasen validez o que introduzcan incertidumbre. Por ello, sería interesante restringir el estudio a las explotaciones menos manuales puesto que esta es la tendencia general de evolución, no sólo en el entorno de este estudio, sino en el contexto mundial.

Como quiera que la base de datos no incorpora información acerca de las características de cada ganadería, y como no se dispone de opciones para corroborarlo sobre el terreno, dado el anonimato que se pretende mantener en el manejo de la información, la propuesta con la que se va a trabajar es la de realizar la discriminación en función del número de animales en producción; esto se debe a que no se dan casos de explotaciones grandes con medios manuales y son muy escasos los de explotaciones pequeñas con medios avanzados. Se estima que un número de animales entre 50 y 60 es una frontera conservadora que garantiza que todos los datos correspondan a estabulaciones similares.

Inicialmente, el número de cabezas que deber tener una explotación para ser considerada relevante para este estudio es de 60 reses en producción, lo cual implica que los muestreos mensuales realizados en esa explotación deberían de contener datos de, al menos, 60 vacas. Un estudio de los datos mostró que en realidad no ocurría eso sino que algunas explotaciones que nominalmente figuraban en la cooperativa con un número de reses elevado, presentaban muestreos mensuales con números de vacas muy inferiores. Esto puede estar ocasionado por la larga duración de las toma de muestras que presentan los datos con los que se están trabajando (más de 10 años) lo que ocasiona que las explotaciones han sufrido un proceso lógico de evolución y han ido creciendo a lo largo del tiempo. Por esta razón se realizó un filtrado de los datos para que en los casos en los que sea necesario tratar datos por explotaciones, considerar únicamente aquellos muestreos que contengan, de manera efectiva, datos de, al menos, 50 vacas distintas.

- Por otra parte, durante los análisis realizados en este trabajo, se ha comprobado que una explotación en particular presentaba valores completamente fuera de la media de las demás explotaciones. Al no poder comprobar la razón de estos datos completamente fuera de los rangos habituales, ya que se desconoce la explotación real que los ocasiona (recordemos que los datos con los que trabajamos son anónimos), se ha optado por eliminar de nuestros análisis a la explotación cuyo código de identificación era GAN1694. De esta forma, de las 93 explotaciones iniciales, se ha trabajado únicamente con 92.



### **3.4 Aspectos técnicos**

Desde el punto de vista de las herramientas utilizadas para tratar los datos hay que considerar que la base de datos originalmente se ha recibido de la cooperativa ASCOL codificada en formato Microsoft Access 2007. Ha sido necesario realizar una conversión sin errores o pérdidas de la base de datos a un formato más actualizado apto para poder trabajar con el programa Microsoft Access 2013.

Para extraer los datos de la base de datos y proceder a su análisis se han utilizado programas escritos en lenguaje C# compilado y ejecutado con la herramienta Microsoft Visual Studio 2013. Los accesos a la base de datos se han realizado utilizando la tecnología OleDb desde C#.

El análisis estadístico se ha realizado utilizando el programa de análisis y visualización estadística R (Ihaka & Gentleman, 1996) a través de programas realizados en C#. La conexión entre el lenguaje C# y el programa R se ha realizado utilizando la librería de interconexión RDotNet (jperraud & hmansell, 2010).

# Capítulo **4**

## **Modelo del perfil celular**

En el capítulo de análisis del estado del arte se ha visto como una gran cantidad de autores establecen o intentan establecer relaciones entre el nivel del recuento de células somáticas en la leche producida por una vaca y su estado de salud, o la cantidad de leche que esa vaca producirá o dejará de producir en un futuro. El SCC es un valor muy atractivo para ser utilizado como herramienta de gestión ya que se obtiene de forma habitual, es un valor objetivo y es numérico lo que se presta a transformaciones y cálculos.

Aunque dentro de estos usos del SCC, destacan los estudios que pretenden relacionar la variación del valor del SCC con la variación de la producción de una vaca, en este capítulo trataremos sólo de los aspectos que lo relacionan directamente con la enfermedad –la mastitis– ya que estos no sólo tienen importancia económica en sí mismos sino que están ampliamente refrendados por la amplia mayoría de los estudios realizados. Una información que puede resultar de gran interés es el conocimiento del número de cabezas de ganado que se encuentran por encima o por debajo de un determinado umbral de recuento celular, puesto que el SCC está relacionado con la presencia de mastitis. Con esta información, el ganadero puede analizar la evolución del estado de salud de su explotación y tomar las medidas preventivas o correctoras oportunas. El problema es que conocer el estado de salud de sus explotaciones, determinando cuántos animales están o pueden considerarse enfermos en cada momento es un proceso complejo que obligaría a un análisis costoso: un estudio individual y diario de cada animal, lo que supondría analizar una muestra de leche de cada vaca o el uso de sensores *on-line* de células somáticas.

Sin embargo, nos podemos preguntar si es posible saber el estado de salud de un determinado rebaño utilizando algún parámetro fácilmente accesible y que no resulte gravoso para el ganadero. Uno de los posibles candidatos para esto es el valor del recuento celular del tanque, BTSCC, un parámetro que se obtiene con frecuencia (cada uno o dos días) puesto que se usa extensivamente para establecer los criterios de pago por calidad. Otra opción es el empleo de un sensor de células somáticas en el tanque que proporcionaría el dato de forma *on-line*. Sea cual sea la solución, lo cierto es que se puede considerar que el ganadero dispone del BTSCC a diario.

¿Es posible determinar el estado de salud de la explotación a partir de ese dato de carácter globalizador? En este capítulo se tratará de dar una respuesta a esta cuestión mediante el desarrollo de modelos de enfermedad.

Obviamente, un modelo así no identificaría qué animales están en una u otra situación, pero si permitiría conocer el perfil celular de la granja, es decir, sobre un conjunto de franjas de recuento celular, el modelo debería decirnos cuántos animales habría en cada una de ellas.

El perfil celular resultaría muy útil a la hora de atajar problemas, evaluar soluciones, conocer la evolución de un proceso infeccioso, determinar la presencia de hechos anómalos; y no sólo sería útil para el ganadero, sino que también lo sería para los técnicos y veterinarios encargados de controlar el correcto funcionamiento de la explotación, puesto que dispondrían de una herramienta adicional de análisis.

## 4.1 Bases de partida del modelo

El modelo planteado parte de la hipótesis de que existe una relación entre el número de vacas que se encuentran en cada franja de valores de recuento de células somáticas y el valor del recuento de células somáticas en el tanque, además de algún factor que sirva para definir el nivel de la calidad de las instalaciones, junto con otros factores como puede ser el número de cabezas de ganado de la explotación.

El principio de diseño del modelo parte de la base de que, a partir de una única medida del número de células somáticas presentes en el tanque de la granja, se obtiene un valor que indica, en una escala fácilmente comprensible, la calidad de dicha explotación respecto de la mastitis.

Es fundamental que ese valor de calidad sea lo suficientemente preciso para captar los detalles de la instalación y, a la vez, con el suficiente margen dinámico como para que englobe a la mayor cantidad de ganaderías posible. Dentro de estos requerimientos, la primera opción para definir un valor de calidad es el SCS o *Somatic Cell Score*. Sin embargo, uno de los mayores problemas asociados con el SCS radica en que está fuertemente sesgado hacia valores altos de SCC. El valor adoptado es muy poco sensible en valores bajos de SCC o, lo que es lo mismo, en explotaciones con un alto nivel de calidad, pero es mucho más fiable para valores altos de SCC o explotaciones de inferior calidad.

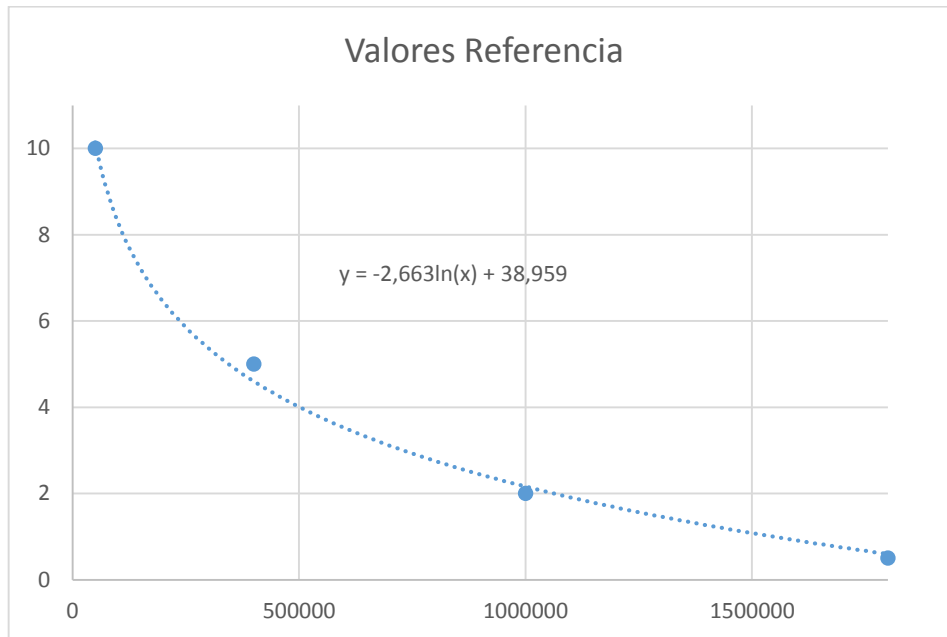
La elección de los valores del SCS tenía mucho sentido en la época en que se definió que se caracterizaba por niveles generalmente altos del SCC, poca atención a este tipo de criterios, manejos aún rudimentarios y un concepto de una explotación ganadera ajeno a lo que es en realidad, el primer paso de una importante cadena de producción alimentaria. Es lógico, sin embargo, que con el actual desarrollo en medicina preventiva y el mejor conocimiento técnico de las explotaciones, la mayoría de ellas no se moverán en valores de SCS tan elevados, por lo que la validez del índice SCS para abarcar un amplio espectro de ganaderías se puede ver comprometida.

Para mejorar los valores en todos los rangos del SCC se define en este trabajo un nuevo valor representativo de la granja relacionado con el número de células total en el tanque. Este valor, denominado *Valor de Calidad* o *QF (Quality Figure)*, está pensado para que se produzcan dos efectos:

1. Que menores valores de células somáticas en el tanque muestren un valor de calidad de la granja mayor, de tal manera que el valor de puntuación de la granja sea mayor cuanto mejores sean sus políticas de manejo y gestión. Este efecto persigue hacer más natural la asimilación del coeficiente ya que intuitivamente, mayor puntuación implica una mejor calidad.
2. Ampliar la capacidad de discriminación del indicador para los valores de BTSCC más habituales eliminando el efecto fuertemente logarítmico del Linear Score para valores bajos del SCC. Del mismo modo, los valores excesivamente altos del BTSCC, que no son habituales, el Valor de Calidad no los tiene en cuenta ampliando también de esa manera el rango de discriminación.

Además de los dos efectos anteriores, para definir y ajustar la ecuación del Valor de Calidad se ha buscado que valores representativos del BTSCC se vean reflejados con valores característicos del Valor de Calidad. Así, para un BTSCC de 400000 cél/ml, valor a partir del cual se prohíbe la comercialización de la leche, se ha considerado que la ecuación del valor de

Calidad debería devolver un valor en torno a 5. De esta manera se delimita de manera natural las granjas con mejor calidad, las granjas “aprobadas”, que son aquellas con  $QF \geq 5$  de las granjas con peor calidad, las granjas “suspensas”, que tendrían un  $QF < 5$ . De la misma manera, se añadió en valor de  $QF=10$  para un BTSCC de 50000 como otro valor de referencia para el cálculo ya que se puede considerar un valor excelente para el nivel de células somáticas del tanque. Añadiendo algún valor más para garantizar la continuidad se ha construido la Figura 4.1 en la que se ha calculado la curva de tendencia logarítmica que ajusta los valores de referencia.



**Figura 4.1.- Valores de referencia y curva de tendencia para calcular el QF**

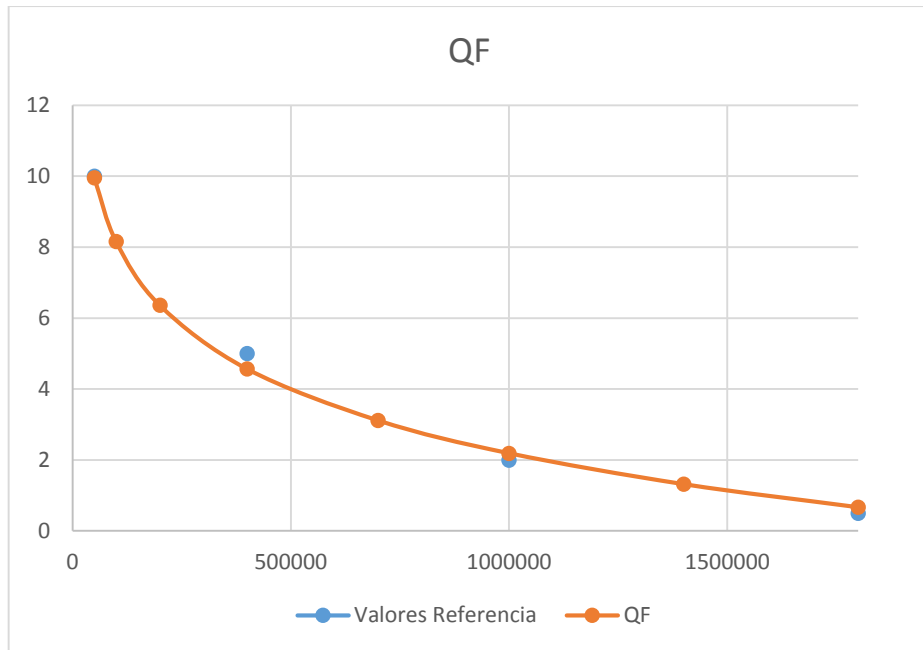
A partir de esa curva de tendencia ajustamos una expresión que nos suministra el Valor de Calidad en función del BTSCC expresado en células por mililitro, que resulta ser la siguiente:

$$QF = -5.968 \cdot \log (BTSCC) + 38$$

Si el BTSCC se expresa en células por microlitro, la expresión anterior se transforma numéricamente en:

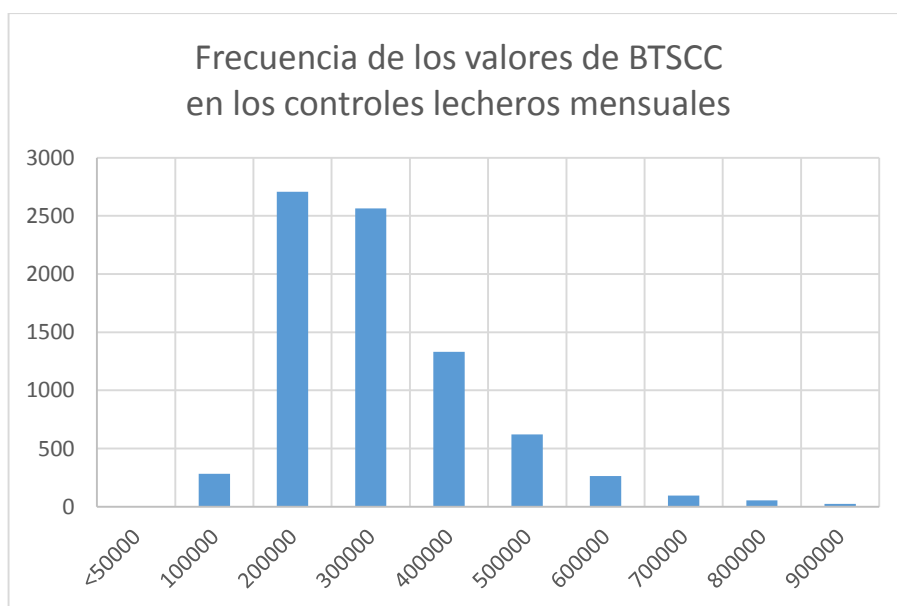
$$QF = -5.968 \cdot \log (BTSCC) + 20,096$$

Con estas fórmulas podemos comprobar en la Figura 4.2 que el ajuste del cálculo del QF propuesto ajusta mucho a los valores de referencia propuestos. Las pequeñas divergencias tienen poca importancia y ningún efecto puesto que lo que se propone es una tendencia hacia un comportamiento concreto más que exigir que pase exactamente por los puntos que habíamos definido.



**Figura 4.2.- Ajuste de la fórmula calculada del QF con los valores de referencia propuestos**

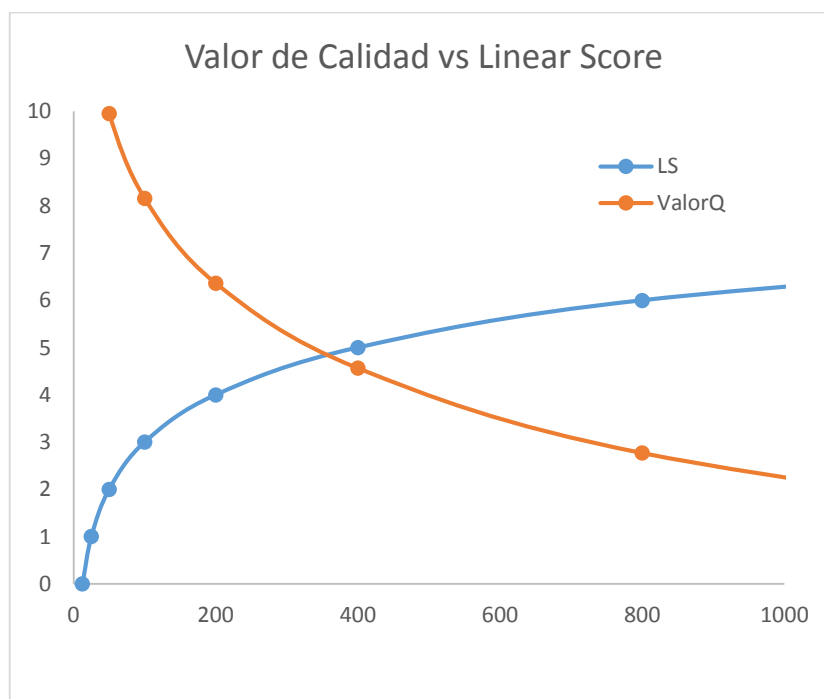
Con esta definición del valor de calidad podemos construir la Tabla 4.1 4.1 en el que se muestran los valores del Linear Score frente a los nuevos valores del valor de calidad. En la Figura 4.4 podemos ver la evolución de ambos índices en la que se aprecian las diversas propiedades del Valor de Calidad frente al Linear Score. La principal propiedad es la extensión del margen hacia valores más actuales. En la Figura 4.3 se puede ver la frecuencia de los distintos valores del BTSCC en los controles lecheros mensuales. En este sentido cabe decir que la inmensa mayoría de las explotaciones tienen recuentos celulares de tanque comprendidos entre 50000 y 1600000 cél/ml lo que llevaría a que el valor del LS quedaría restringido al margen que va desde 2 hasta 6, mientras que el nuevo índice variaría desde prácticamente 10 hasta 0 como se puede apreciar en la Tabla 4.1.



**Figura 4.3.- Frecuencia de los valores de BTSCC a lo largo de los controles lecheros mensuales.**

**Tabla 4.1.- Comparación entre el Linear Score y el Valor de Calidad**

SCC medio [cél/μl]	Linear Score	Valor Calidad
12,5	0	13,55
25	1	11,75
50	2	9,95
100	3	8,16
200	4	6,36
400	5	4,57
800	6	2,77
1600	7	0,97
3200	8	-0,82
6400	9	-2,62
12800	10	-4,41



**Figura 4.4.- Comparación gráfica entre el Linear Score y el Valor QF**

Una vez definido el valor de calidad, el modelo que se pretende obtener, el que indica el número de vacas por encima o por debajo de un determinado nivel de recuento celular, tendría una expresión matemática conceptual como la que sigue:

$$N_i = f(BTSCC, QF, NT, \dots)$$

Donde  $N_i$  es el número de vacas con valores de SCC mayor de  $i$ , BTSCC es el recuento de células somáticas del tanque de almacenamiento de la explotación, QF es el factor de calidad asignado a la explotación y NT el número de vacas de la misma. En principio, ya que QF es una función explícita de BTSCC, podríamos trabajar con uno solo de los dos parámetros. Sin embargo, el índice de calidad como tal es un parámetro que pretende recoger el nivel de manejo y de gestión de la explotación, por lo que su expresión podría incluir otras variables, además del BTSCC. Una opción podría ser, por ejemplo, incorporar un factor de minoración o mayoración del valor obtenido del BTSCC en función de una calificación experta dada por un especialista, técnico o veterinario.

Otra consideración que se ha de tener en cuenta es que para el estudio que se va a llevar a cabo, el valor BTSCC no se tomará como una variable independiente sino que se obtendrá a partir de los recuentos individuales de cada vaca mediante promedio ponderado por su producción, esto es:

$$BTSCC = \frac{\sum_{i=1}^N Pi * SCCi}{\sum_{i=1}^N Pi}$$

Donde Pi es la producción de la vaca i y SCCi es el recuento de células somáticas de dicha vaca.

Esta forma de calcular el BTSCC proporciona un valor mucho más preciso que el que implica una medida directa en el tanque o a partir de una única muestra. Sobre una de esas medidas habría la incertidumbre propia del sistema de análisis, mientras que al usar una medida promediada, esta incertidumbre será mucho menor. En términos de intervalos de confianza, si todos los animales produjeran la misma cantidad de leche y si el equipo de medida empleado fuese el mismo, el intervalo de confianza del valor obtenido con la expresión anterior sería  $\sqrt{n}$  veces menor que el que se conseguiría con una medida real de tanque.

Finalmente, tenemos que tener en cuenta que el modelo que se pretende desarrollar es estático, es decir, capaz de reproducir una fotografía general de la granja, determinada por su perfil celular, obtenido a partir del dato de recuento celular de tanque caracterizado por el valor de calidad. Por tanto, no se considerará ningún tipo de aspecto evolutivo o temporal. Bajo estas consideraciones se considerarán totalmente independientes las sucesivas muestras de una misma granja, con lo que bien podría suponerse que pertenecen a granjas distintas. En este caso, cada uno de los correspondientes valores de calidad generará un perfil celular específico que corresponde a la situación concreta en un momento determinado de una explotación. De esta manera, las 11 muestras anuales de una granja serán consideradas 11 granjas distintas muestreadas una sola vez. Por lo tanto, si los datos originales pertenecieran a 200 granjas analizadas 11 veces al año durante 6 años, se tratarían como si fueran 13200 granjas muestreadas una sola vez.



## 4.2 Metodología

Para construir el modelo se parte de los datos de control lechero según se indicó en el capítulo 2.

Una vez tomada la decisión de independizar cada uno de los muestreos de cada granja, para construir el modelo, para cada muestreo mensual de cada granja se calcula:

- El número de vacas ( $N_i$ ) que se encuentran por encima o por debajo de un determinado umbral de recuento de células somáticas
- El número total de cabezas de ganado de la explotación( (NT)
- El número de litros de leche (LT) que contiene el tanque de almacenamiento de la granja.
- El valor de recuento de células somáticas del tanque BTSCC calculado como la suma de la aportación al tanque de cada una de las vacas de la explotación para la que se tienen datos.
- El valor del índice de calidad (QF) que corresponde a dicho valor de SCC aplicando la definición del índice de calidad.

Por tanto, se genera un archivo de datos para cada explotación que incluye los siguientes valores:

Ganadería	NT	LT	BTSCC	$N_i$	QF
-----------	----	----	-------	-------	----

Una vez procesados y obtenidos los datos para cada una de las explotaciones disponibles, se procede al cálculo del modelo correspondiente. Para ello se dispone de dos opciones básicas:

- Considerar todos los muestreos de una determinada explotación como si formaran parte de una única explotación compuesta por la suma de todos los animales que han aportado datos en alguno de los muestreos. Este camino tiene el inconveniente de que se deja de trabajar con explotaciones de tamaño real (entre 60 y 200 cabezas, para el caso de los datos de que se dispone) y se trabaja con explotaciones de varios miles de animales, que es la suma acumulada de todos los muestreos realizados a lo largo de varios años. Por este camino se pasa de disponer de unos 11000 muestreos a lo largo del tiempo a trabajar únicamente con 92 granjas y un único muestreo para cada granja. En este caso, se utilizarán únicamente 92 valores para el cálculo del modelo.
- Otra posibilidad es considerar cada uno de los muestreos como una explotación independiente y utilizar cada uno de ellos como un valor válido para el cálculo del modelo de comportamiento de las células somáticas. En este caso, el modelo se calcula con los aproximadamente 11000 muestreos, siendo cada uno de ellos una entrada diferente a considerar en el modelo.

Para calcular la expresión exacta del modelo, se utiliza el programa de tratamiento estadístico R al que se le pasan los datos desde un programa escrito en C#.Net a través de la librería de comunicación RDotNet y que se suministra en el CD adjunto. En el programa R se utiliza la función `lm`, que ajusta un modelo lineal de la variable respuesta en función de los términos independientes utilizando el método de los mínimos cuadrados, a la que se le suministra los parámetros que se quieren relacionar y la fórmula a aplicar y que devuelve los coeficientes de cada parámetro así como los distintos valores que nos permiten cuantificar de manera inicial la bondad del ajuste.

Una vez obtenidos los coeficientes de ajuste del modelo se procede a un proceso de validación cruzada que consiste en calcular los parámetros del modelo para todos los casos disponibles excepto para uno de ellos. Una vez calculado el modelo sobre todos los casos menos uno se le aplica al ignorado en el cálculo para calcular el error cometido por la estimación del modelo respecto del valor real. Este proceso de validación cruzada se realizará con todos los casos disponibles por lo que, si se dispone de N valores para calcular el modelo, se realizará N veces, calculándose el modelo con N-1 valores y aplicándose al valor restante, obteniéndose de esta manera N valores de error.

El cálculo de los errores permite evaluar el comportamiento de un determinado modelo y, en el caso de disponer de varios posibles modelos, nos servirá como criterio objetivo de discriminación entre ellos.

Desde el punto de vista de la implementación, la validación cruzada se realiza invocando desde un programa en C#.Net la función `lm` del programa estadístico R pasándole como variables independientes los N-1 valores con los que se construirá el modelo. Con el cálculo de los coeficientes realizado por R, desde el mismo programa se invoca la función de R `predict`, pasándole como entradas el modelo calculado anteriormente y los valores de la granja N que se está validando. La función `predict` devuelve el valor predicho por el modelo para los valores de la granja suministrada. Con ese valor se calculan los errores absolutos y relativos cometidos que se archivan para su posterior análisis.

Como última consideración, se debe tener en cuenta que los valores de recuentos celulares manejados se están considerando como exactos, algo que es intrínsecamente falso. Los valores de SCC están obtenidos con un equipo de alta calidad, en un laboratorio certificado convenientemente, pero no están exentos de un error propio de cualquier sistema de medida. Esto es particularmente destacable en el caso de los recuentos más bajos, en donde los errores de medida son más elevados en valor absoluto e, inevitablemente, afectarán al funcionamiento del modelado que aquí se plantea.

## 4.3 Caso 1: modelo global

En el modelo global se van a considerar todos los muestreos a lo largo de la vida productiva de una granja como si formaran parte de una única explotación con la suma de todos los animales que han participado alguna vez en los controles. Este agrupamiento reduce el número de puntos con los que se construye el modelo a 92, que es el número de granjas para las que se disponen datos.

Cada una de esas granjas dispone de varios centenares o miles de cabezas de ganado, ya que es el acumulado de todas las vacas que alguna vez han pertenecido a la granja. La media de vacas por granja después de la acumulación es de 6703, con un valor máximo de 26738 y un valor mínimo de 798, con una desviación estándar de 4536 que, como se puede comprobar, es casi de la misma magnitud que la media.

Para poder calcular el modelo, los datos de control lechero aportados por ASCOL se han procesado y agrupado por granjas. Para cada control lechero mensual de una granja se ha calculado la suma total de la producción como la suma de la producción de cada vaca con la fórmula:

$$PC_j = \sum_{i=1}^{n_j} p_i$$

Donde  $PC_j$  es la producción del control lechero  $j$ ,  $p_i$  es la producción de la vaca  $i$  y  $n_j$  es el número de vacas del control lechero  $j$ .

El valor del recuento de células somáticas en el tanque,  $BTSCC$ , para cada control se calcula con el aporte de cada una de las vacas de dicho control usando la fórmula:

$$BTSCC_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} p_i * SCC_i}{\sum_{i=1}^{n_j} p_i}$$

Una vez se han totalizado los valores de cada control lechero de una granja, se agrupan para dar el valor representativo de esa granja con las siguientes expresiones:

$$PG_k = \sum_{j=1}^{m=92} PC_j$$
$$BTSCC_k = \sum_{j=1}^{m=92} BTSCC_j$$
$$NTG_k = \sum_{j=1}^{m=92} n_j$$

Donde  $PG_k$ ,  $BTSCC_k$  y  $NTG_k$  son el acumulado de producción, el acumulado de  $BTSCC$  y el número total de vacas acumulado de todos los controles lecheros de la granja  $k$ . Una vez se ha obtenido el acumulado de  $BTSCC$  para cada granja se puede calcular el Valor de Calidad que le corresponde a esa granja sin más que aplicar la expresión que la define. Los valores de

calidad obtenidos oscilan entre un valor mínimo de 3,975 y un valor máximo de 7,921, con una media de 5,79 y una desviación estándar de 0,791.

Una vez realizado el proceso de preparación de los datos se disponen de 92 puntos (uno por cada granja) utilizables para realizar el cálculo del modelo con la función `lm` del programa estadístico R. Dicha función devuelve el valor de los coeficientes a aplicar a las variables independientes que le pasemos como entrada. Una vez realizado el cálculo de los modelos, para proceder a su validación se utilizará así mismo la función de R `predict` que mostrará el valor predicho por el modelo para una entrada concreta y que nos permitirá calcular los errores absolutos y relativos cometidos.

Una vez agrupados todos los datos de todas las granjas, se han evaluado los siguientes posibles modelos:

1.  $N = A * NT + B * QF + C$
2.  $N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D$
3.  $N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D * QF^3 + E$
4.  $N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$
5.  $N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D * QF^2 + E$
6.  $\log(N) = A * NT + B * QF + C$
7.  $\log(N) = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$
8.  $\log(N) = A * \log(NT) + B * QF + C$

Donde N es el número de vacas dentro del umbral de recuento de células somáticas determinado, NT es el número total de vacas de la explotación y QF es el valor del índice de calidad. Como se puede observar, se ha optado por dos tipos de modelos: los polinómicos sencillos (modelos 1 al 5) incluyendo uno totalmente lineal (modelo M1), y los modelos logarítmicos. Los primeros han sido elegidos por su relativa simplicidad y su ámbito general, mientras que los segundos se han seleccionado debido a que subyace un cierto comportamiento logarítmico en la cuantificación de la mastitis y del recuento celular.

Se ha realizado un cálculo de los distintos modelos usando varios valores de umbral del recuento de células somáticas característicos. En concreto se ha calculado cada modelo para valores de SCC superiores a 100000, 200000, 400000 y 800000 cél/ml lo que implica conocer el tanto el número de animales que está por encima como por debajo de un determinado valor y los que se encuentran en la franja comprendida entre dos de ellos. Los valores de 100000 y 800000 suponen unos límites inferior y superior de enfermedad razonables: por debajo de 100000 cél/ml consideramos el recuento como normal (animal sano) y, por encima de 800000 cél/ml suponemos que el animal está enfermo. Finalmente, los cortes intermedios se han fijado de tal modo que cada uno de ellos duplica el anterior. Obviamente, estos valores sólo son un ejemplo que permiten evaluar el modelo y, en un contexto genérico, se podría usar cualquier otro valor de corte en función de las necesidades.

Al realizar los cálculos usando la función `lm` del programa R se han obtenido los valores que se muestran en la Tabla 4.2 para el valor del coeficiente de determinación,  $R^2$ , del ajuste, devuelto por dicha función, de cada modelo para cada valor de umbral del recuento.

**Tabla 4.2.- Valores de R<sup>2</sup> para los modelos evaluados y para los distintos valores de recuento de células somáticas en [cél/μl].**

<b>Modelo</b>	<b>SCC &gt; 100</b>	<b>SCC &gt; 200</b>	<b>SCC &gt; 400</b>	<b>SCC &gt; 800</b>
$N = A * NT + B * QF + C$	0,964	0,933	0,909	0,890
$N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D$	0,965	0,937	0,921	0,916
$N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D * QF^3 + E$	0,966	0,937	0,921	0,916
$N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$	0,964	0,933	0,912	0,895
$N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D * QF^2 + E$	0,965	0,937	0,925	0,922
$Log(N) = A * NT + B * QF + C$	0,821	0,827	0,835	0,851
$Log(N) = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$	0,942	0,942	0,945	0,951
$Log(N) = A * log(NT) + B * QF + C$	0,982	0,982	0,988	0,989

A la vista de los resultados, podemos concluir que, aunque la correlación es alta en todos los modelos, podemos apreciar diferencias entre ellos. Inicialmente, el modelo M6 es el que peores resultados da en sus valores de R<sup>2</sup> para todos los niveles de recuento de células somáticas, por lo que es un claro candidato a no continuar con su estudio. De la misma manera, el modelo M8 es el mejor modelo para todos los niveles de recuentos de células somáticas, por lo que parece necesario seguir trabajando con él.

Otro efecto que se puede observar en todos los modelos es el empeoramiento creciente según se establece un umbral de recuento de células somáticas más elevado. Así por ejemplo, el modelo M1 presenta un valor de R<sup>2</sup> de 0,964 cuando el valor de umbral se considera por encima de 100000 cél/ml que decae a un valor de 0,890 cuando el umbral es de más de 800000 cél/ml. Este efecto puede ser debido al mayor número de cabezas de ganado que presentan un valor de recuento de células somáticas mayor de 100000 cél/ml en cada granja que de 800000 cél/ml, por lo que el número de muestras utilizadas para calcular los coeficientes de uno y otro modelo son sustancialmente diferentes. En concreto, en el ejemplo que nos ocupa, el total de vacas con SCC mayor de 100000 cél/ml es de 282561 (con una media de 3070 por granja) frente al total de vacas con más de 800000 cél/ml que es de 42310 (con una media de 460 por granja), apenas el 15% de las vacas disponibles en el primer caso. Este efecto de empeoramiento para valores de SCC altos no se produce en el modelo M7 que, a pesar de no dar unos grandes resultados para valores de SCC bajos (de hecho es el segundo peor) mantiene sus valores muy estables mejorando ostensiblemente para valores de SCC superiores a 400000 cél/ml siendo el segundo que mejor se comporta con valores de recuento celular de 400000 y 800000 cél/ml.

Comparando los resultados ofrecidos por los distintos modelos se puede construir la Figura 4.5 en la que se muestran los resultados ofrecidos por cada modelo para un valor de umbral de más 100000 cél/ml en una granja con 10000 cabezas de ganado. En la figura podemos comprobar que la mayor parte de los modelos tienen problemas de saturación cuando el valor de calidad es muy bajo o está próximo a cero suministrando un número de vacas que presentan un recuento de células somáticas superior al umbral de referencia (100000 cél/ml) superior al número de vacas existentes en la explotación, lo cual es del todo imposible. El modelo que presenta peor comportamiento respecto a esta característica es el número 7 que satura en el valor de calidad 6, haciéndolo inusable para este valor umbral. Si se tiene en

cuenta que los valores más habituales de calidad presentes en las explotaciones bajo estudio oscila entre 3 y 8, eso invalida cualquier modelo que no se comporte apropiadamente con valores de calidad en este margen.

El resto de modelos presenta un rango de utilización amplio, con lo que la mayoría son usables, sin presentar saturación a niveles bajos del valor de calidad, hasta el valor de calidad 3 e incluso los modelos M1, M4 y M5 son usables hasta el teórico valor de calidad 0.

De la misma manera que casi todos los modelos presentan saturación a niveles bajos de calidad, el modelo M3 presenta también saturación para niveles altos de calidad y ofrece, para  $QF=10$  un número de vacas negativo que sobrepasa el umbral de referencia, hecho también imposible.

En la Figura 4.6 se muestra los resultados ofrecidos por los distintos modelos pero en este caso para un umbral de SCC superior a 200000 cél/ml y, como en el caso anterior, para una granja con 10000 vacas en el rebaño. Vemos que se sigue produciendo saturación para valores de calidad próximos a cero aunque se aprecia una mejora general de todos los modelos, aumentando su rango de utilización, antes de la saturación, en un punto de calidad.

Del mismo modo, en las Figuras 4.7 y 4.8 se muestran las salidas de los modelos para umbrales de recuento de células somáticas superiores a 400000 y 800000 cél/ml.

En las figuras se pueden apreciar los mismos efectos comentados en las gráficas anteriores: saturación a valores de calidad bajos, especialmente acusado, como era de esperar, en los modelos logarítmicos M6 y M7. También se aprecia el efecto de reducción de la saturación cuando el umbral es mayor y así, para un umbral de recuento de células somáticas de 800000 cél/ml todos los modelos son usables en un rango del valor de calidad entre 3 y 8, incluso el modelo M7 que presenta malos comportamientos para umbrales de SCC más bajos.

La devolución de valores negativos para el número de vacas que superan el umbral de SCC con valores de calidad alta se puede apreciar ahora en los modelos M1 y M4 descartando su posible uso para el valor de calidad 10 y umbrales de SCC superiores a 400000 cél/ml.

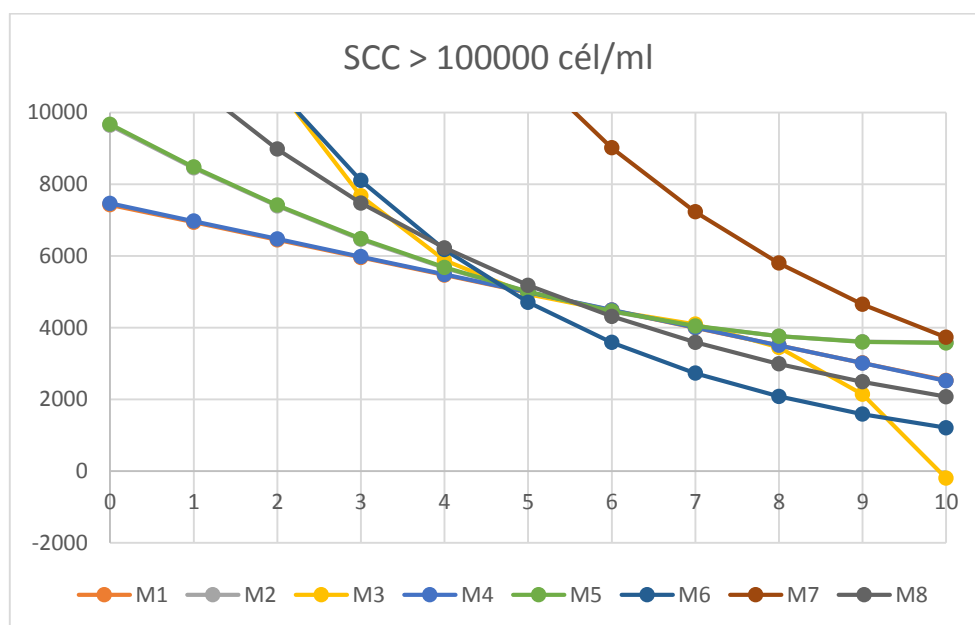


Figura 4.5.- Comparación de la salida de los distintos modelos para un valor umbral de recuento de células somáticas superior a 100000 cél/ml y un número de vacas en la granja de 10000.

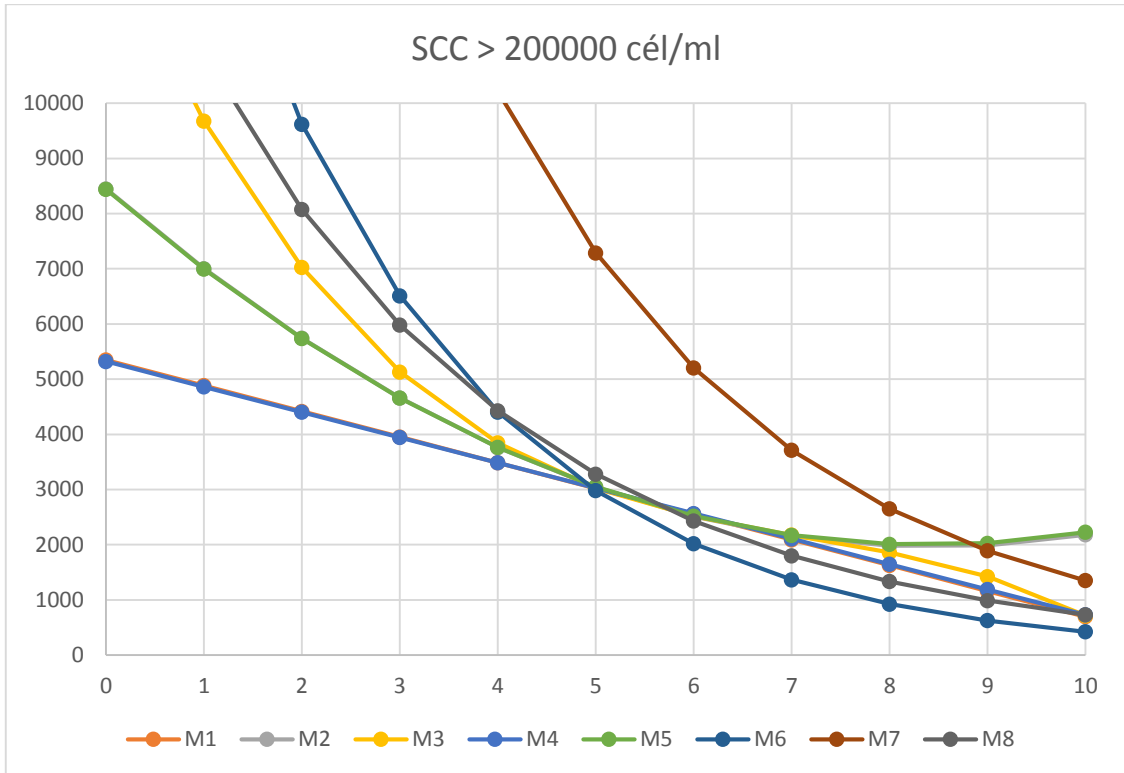


Figura 4.6.- Comparación de la salida de los distintos modelos para un valor de umbral de recuento de células somáticas superior a 200000 cél/ml y un número de vacas en la granja de 10000.

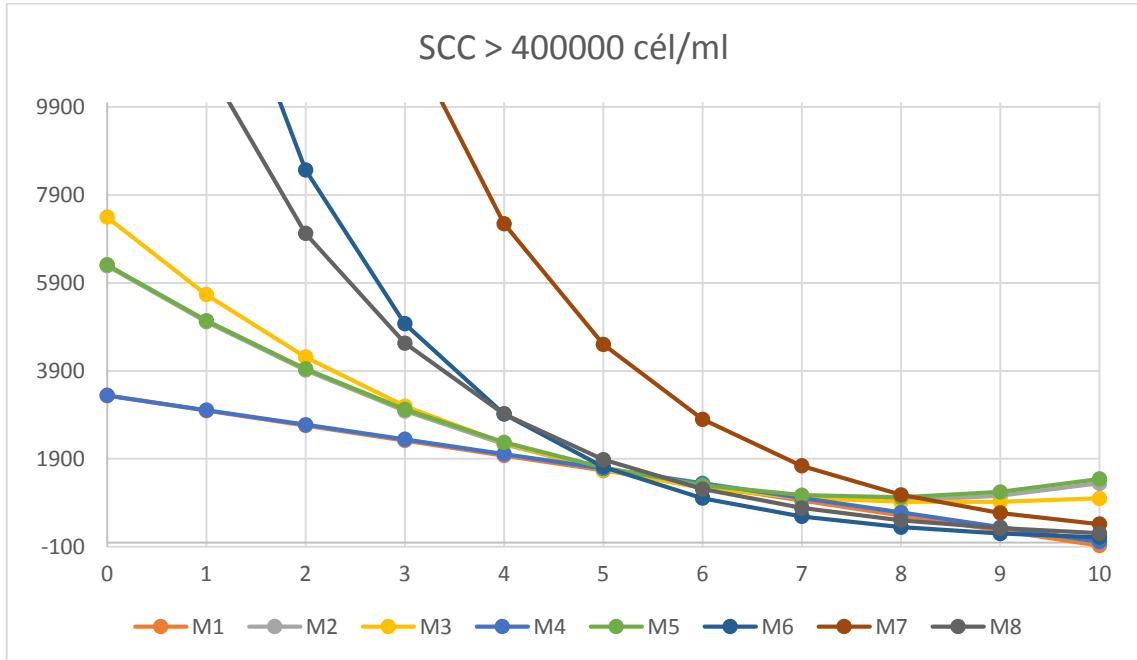


Figura 4.7.- Comparación de la salida de los distintos modelos para un valor de umbral de recuento de células somáticas superior a 400000 cél/ml y un número de vacas en la granja de 10000

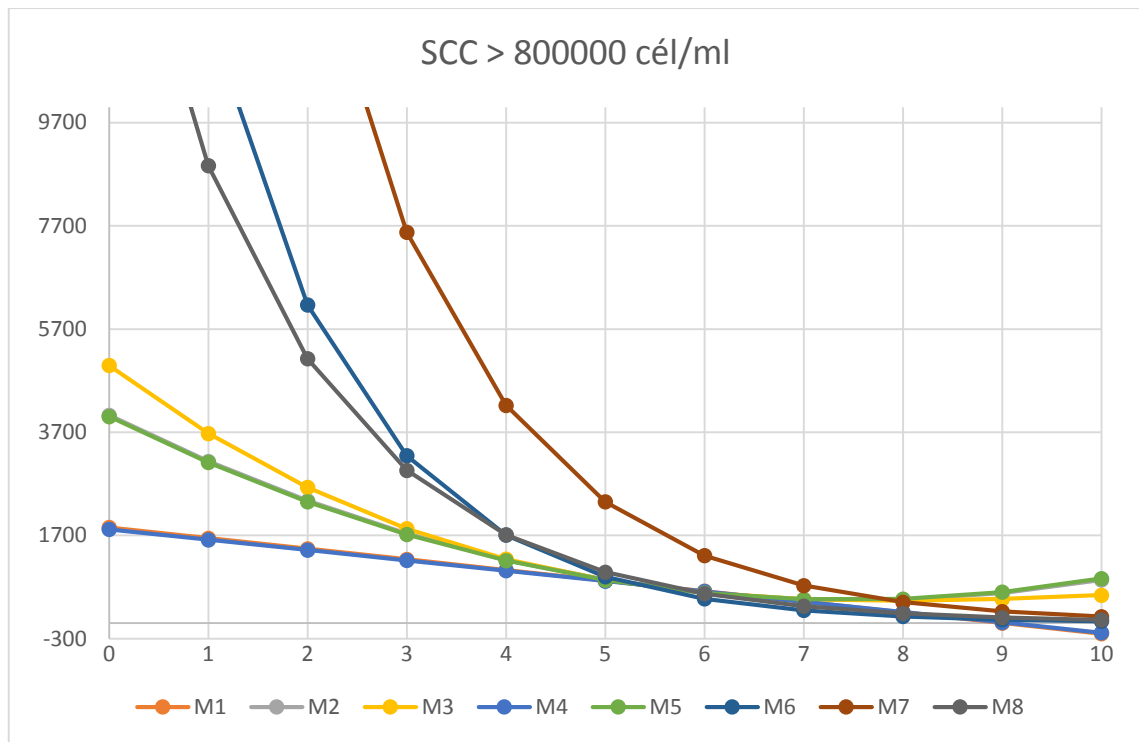


Figura 4.8.- Comparación de la salida de los distintos modelos para un valor de umbral de recuento de células somáticas superior a 800000 cél/ml y un número de vacas en la granja de 10000

Una alternativa que se puede realizar es considerar en cada modelo el número de vacas que se encuentran en cada lactación en vez de utilizar el número de vacas totales de la explotación.

Los controles lecheros mensuales contienen la información de la lactación en la que se encuentra cada animal y esa información también está disponible en la base de datos, por lo que es posible calcular para cada una de las explotaciones el número total de vacas que se encuentran en cada lactación. Para incorporar esta información a los modelos se han calculado, para cada granja, el número de vacas que se encuentran en la primera, segunda, tercera y cuarta lactación. Las vacas que se encuentran en la lactación número cinco o superiores se han agrupado en una única categoría. Con esta modificación, los modelos quedarán de la siguiente manera:

1.  $N = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * QF + G$
2.  $N = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * QF + G * QF^2 + H$
3.  $N = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * QF + G * QF^2 + H * QF^3 + I$
4.  $N = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * NL1^2 + G * NL2^2 + H * NL3^2 + I * NL4^2 + J * NL5mas^2 + K * QF + L$
5.  $N = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * NL1^2 + G * NL2^2 + H * NL3^2 + I * NL4^2 + J * NL5mas^2 + K * QF + L * QF^2 + M$
6.  $\log(N) = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * QF + G$
7.  $\log(N) = A * NL1 + B * NL2 + C * NL3 + D * NL4 + E * NL5mas + F * NL1^2 + G * NL2^2 + H * NL3^2 + I * NL4^2 + J * NL5mas^2 + K * QF + L$
8.  $\log(N) = A * \log(NT) + B * QF + C$



Al calcular los valores del coeficiente de determinación  $R^2$  para cada modelo se obtienen los datos de la Tabla 4.3.

**Tabla 4 2.- Valores de  $R^2$  para los modelos incluyendo la información del número de cabezas en cada lactación con SCC en cél/ $\mu$ l.**

Modelo	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
M1	0,9726	0,9458	0,9150	0,8912
M2	0,9735	0,9503	0,9279	0,9169
M3	0,9750	0,9514	0,9281	0,9172
M4	0,97485	0,9532	0,9270	0,9054
M5	0,97593	0,9581	0,9394	0,9300
M6	0,82897	0,8334	0,8420	0,8604
M7	0,94503	0,9460	0,9490	0,9545
M8	0,97262	0,9747	0,9834	0,9871

Podemos observar que se produce una ligera mejoría en los valores de ajuste lineal de cada modelo al usar el número de vacas en cada lactación frente al número total de vacas. También podemos comprobar que la relación entre los modelos se mantiene constante, siendo el modelo M6 el que peor se comporta y el modelo M8 el que mejor lo hace. De igual manera, el modelo M7 mantiene su comportamiento de mejora para valores de recuento celular alto.

### 4.3.1 Validación del modelo global

Para conocer la efectividad de los modelos presentados se va a utilizar la metodología de la validación cruzada ya mencionada anteriormente, y que consiste en calcular los parámetros del modelo utilizando todas las granjas disponibles, excepto con los valores de una de ellas; luego, con los valores del modelo calculado, se estimará el valor que debería presentar la granja. A partir de los valores calculados por el modelo y los valores reales, se calculan los errores que comete el modelo, tanto en valores absolutos como en valores relativos.

Se ha procedido a realizar un proceso de validación cruzada para cada una de las granjas y con cada uno de los modelos propuestos. A partir de los datos obtenidos se han realizado las tablas y figuras que se muestran y comentan a continuación.

En la Tabla 4.4 se pueden ver valores característicos del error absoluto cometido por cada modelo cuando realiza el cálculo de número de vacas con recuento celular somático superior a 100000 cél/ml.

**Tabla 4.4.- Valores del error absoluto cometido por los distintos modelos para valores de número de vacas con un recuento de SCC > 100000 cél/ml**

Modelo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Mediana	Moda
M1	1827	5	302	18	179
M2	2031	3	305	6	-134
M3	2228	0	312	-1	235
M4	1883	4	314	-20	-194
M5	2048	2	317	2	69
M6	33513	1	1002	180	323
M7	6166	4	428	38	419
M8	2273	1	228	7	222

El valor máximo, mínimo y la media del error absoluto están calculados utilizando valores absolutos sin tomar en consideración si el error es por exceso o por defecto en la predicción. En la Tabla 4.4 se puede comprobar que los modelos logarítmicos (M6, M7 y M8) tiene los peores valores de error máximo debido a su mal comportamiento en los extremos del campo de medida. En cambio, el modelo M8 es el que presenta un valor medio más bajo lo cual indica, a falta de posteriores análisis, que es el modelo que presenta un comportamiento más regular en todo el campo de trabajo.

En las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran las características de los errores absolutos cometidos por cada modelo para una granja de 10000 vacas y para el número de vacas con recuentos superiores a 200000, 400000 y 800000 células por mililitro, respectivamente. En las tres tablas se pueden apreciar los mismos efectos que aparecían en la Tabla 4.4, con valores máximos del error muy elevados para los modelos logarítmicos comparados con los modelos polinómicos. También es posible apreciar una mejora progresiva de los errores para todos los modelos cuando se incrementa el umbral de recuento de células somáticas a considerar, pudiéndose apreciar una mejora sustancial del modelo M8 para valores de SCC superiores a 800000 cél/ml.

**Tabla 4.5.- Valores del error absoluto cometido por los distintos modelos para valores de número de vacas con un recuento de SCC > 200000 cél/ml**

<b>Modelo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor medio</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>
M1	1302	3	248	-57,5	88
M2	1277	1	241	-35	-67
M3	1515	2	249	-28	-45
M4	1092	8	205	-69	-89
M5	1383	2	247	-31	-135
M6	19483	2	591	151	211
M7	3361	0	258	19	6
M8	682	1	144	-5	254

**Tabla 4.6.- Valores del error absoluto cometido por los distintos modelos para valores de número de vacas con un recuento de SCC > 400000 cél/ml**

<b>Modelo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor medio</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>
M1	897	3	154	-52	-109
M2	727	2	144	-11	-47
M3	830	2	150	-13	-57
M4	871	2	158	-63	-66
M5	766	0	147	-28	228
M6	10364	1	317	67	106
M7	1715	5	142	24	34
M8	459	0	61	-1	-7

**Tabla 4.7.- Valores del error absoluto cometido por los distintos modelos para valores de número de vacas con un recuento de SCC > 800000 cél/ml**

Modelo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio	Mediana	Moda
M1	545	1	82	-24	7
M2	406	0	73	0,5	-3
M3	424	0	76	1	1
M4	528	0	82	-32	-74
M5	387	0	73	-7	-12
M6	4657	1	151	43	51
M7	878	0	76	10	37
M8	219	0	25	0	10

### 4.3.2 Errores relativos

#### *Modelo M1*

En las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 se puede ver una representación del error relativo cometido por el modelo M1 para el cálculo de vacas que tienen un recuento de células somáticas superior a 100000, 200000, 400000 y 800000 cél/ml respectivamente.

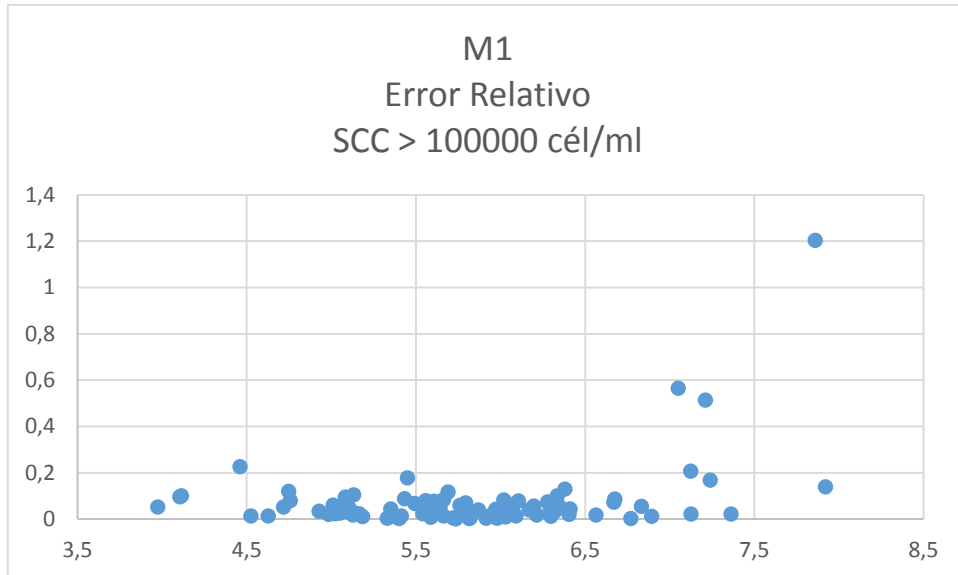
**Tabla 4.8.- Porcentaje de predicciones del modelo M1 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$ l.**

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	59,78	71,74	81,52	85,87
< 10%	84,78	89,13	90,22	95,65
< 15%	92,4	92,4	94,56	96,74
< 30%	96,74	96,74	97,82	98,91
> 50%	3,3	2,2	1,1	0

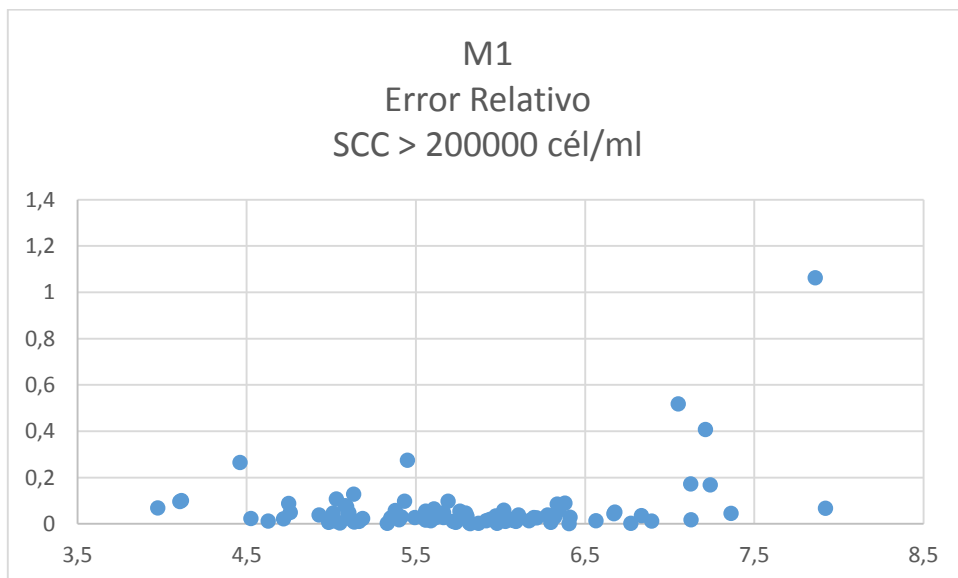
Podemos apreciar en todas ellas que la mayor parte de los valores se encuentran muy próximos a cero, en concreto, como se muestra en la Tabla 4.8 para el valor de SCC mayor de 100000 cél/ml, que es el que peores valores presenta, el 59% de las predicciones se encuentran por debajo del 5% de error relativo y el 92% por debajo del 15% de error relativo. En la misma tabla se puede apreciar que el error relativo de las predicciones mejora con el incremento de recuento de células somáticas de tal manera que para valores superiores a 800000 cél/ml, prácticamente el 86% de las predicciones que realiza el modelo M1 tienen un error relativo inferior al 5%.

Tanto en la tabla como en las figuras se puede apreciar que existe un número de predicciones con un error relativo superior al 50% y en algunos casos concretos, superando el 100% ampliamente. El peor resultado lo suministra, para todos los niveles de SCC, una granja concreta, la denominada GAN0333. Analizando sus características se puede comprobar que es una ganadería relativamente pequeña, ya que el acumulado de sus muestreos da un número de cabezas de ganado de 852 vacas y es una explotación con un alto nivel de calidad, en concreto 7,861. Con estas condiciones, el modelo se comporta francamente mal dando una predicción equivocada con un error relativo superior al 100% en casi todos los niveles de SCC y con incrementos del error según aumentan los valores de SCC.

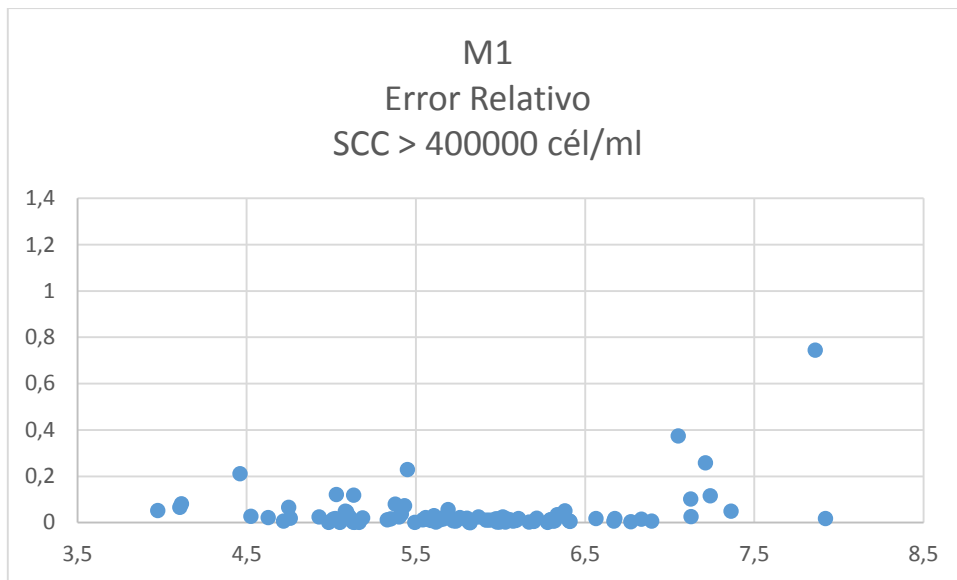
En las Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 también se puede constatar el hecho de que los peores resultados que presenta el modelo M1 se producen para valores de calidad altos, hasta tal punto que solo dos muestras con valor de calidad superior a 7 presentan un error relativo menor del 10% para un valor de SCC mayor de 100000 cél/ml (con valores similares para los demás valores de recuento celular) y todas las muestras con error relativo inferior al 5% tienen un valor de calidad inferior a 7, excepto las dos consideradas e independientemente del recuento celular considerado.



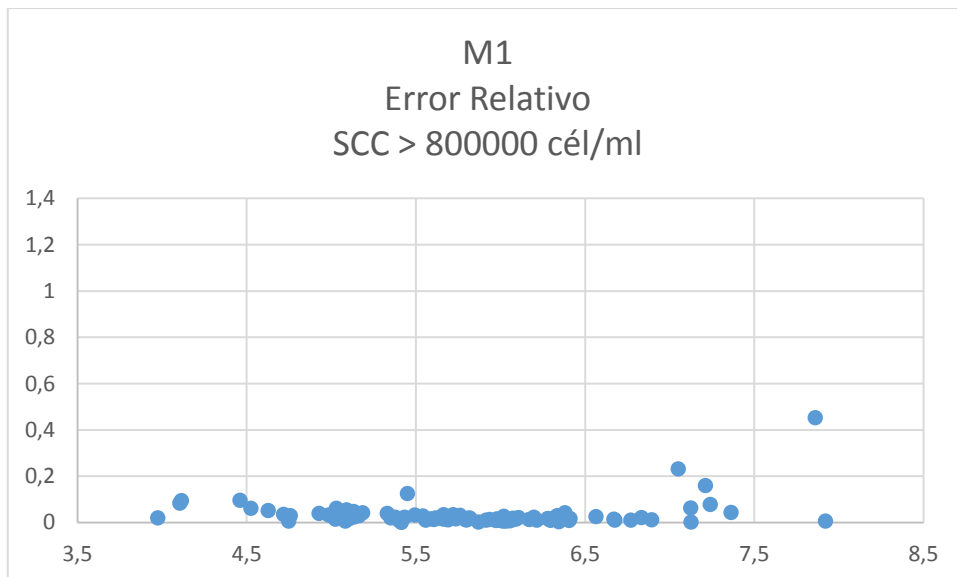
**Figura 4.9.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M1 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**



**Figura 4.10.- Valor del error relativo en función del valor de calidad para el modelo M1 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 200000 cél/ml**



**Figura 4.11.- Valor del error relativo en función del valor de calidad para el modelo M1 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 400000 cél/ml**



**Figura 4.12.- Valor del error relativo en función del valor de calidad para el modelo M1 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 800000 cél/ml**

En las Figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se presenta el valor real de cada granja frente al valor predicho por el modelo para esa granja. Además, en cada figura se ha incluido una curva de tendencia lineal con su fórmula de ajuste. Si el modelo fuese perfecto, el valor real y el valor predicho tendrían que ajustarse con una recta de pendiente 1 y que pasase por el origen. Observando las figuras se puede apreciar que, aunque el ajuste es relativamente aceptable para la salida del modelo para valores de SCC mayores de 100000 cél/ml, este va empeorando progresivamente para valores de SCC mayores. El peor ajuste se produce para la salida del modelo con valores de SCC superiores a 800000 cél/ml donde se puede apreciar que la curva empieza a adquirir una forma no lineal que parece indicar la presencia de términos o ajustes logarítmicos.

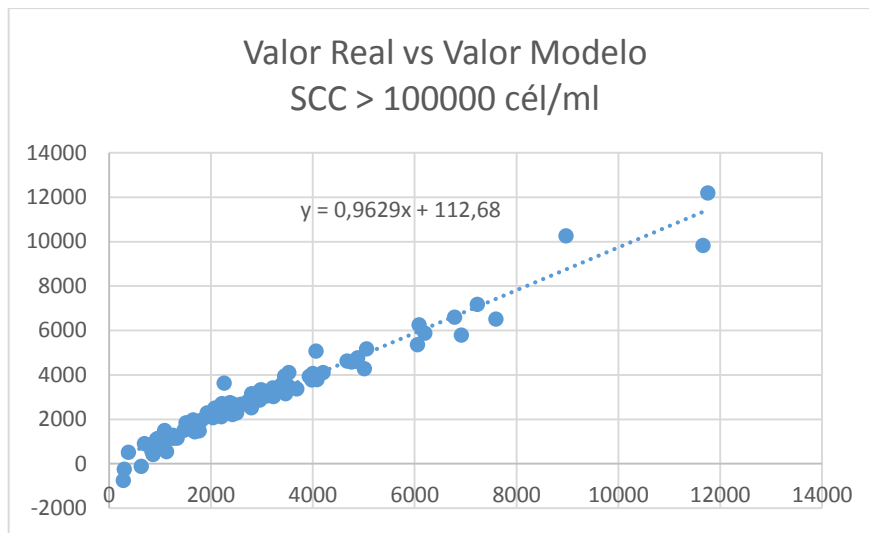


Figura 4.13.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M1 para valores de SCC > 100000 cél/ml

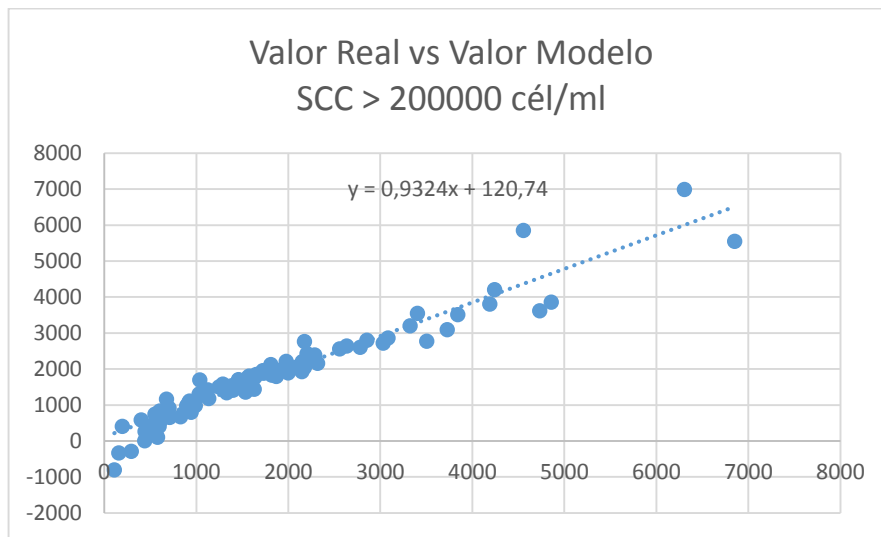


Figura 4.14.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M1 para valores de SCC > 200000 cél/ml

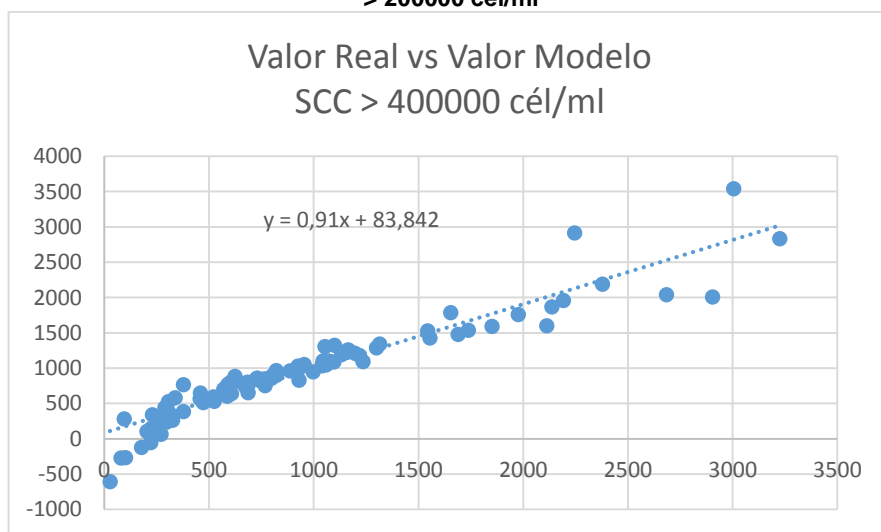


Figura 4.15.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M1 para valores de SCC > 400000 cél/ml

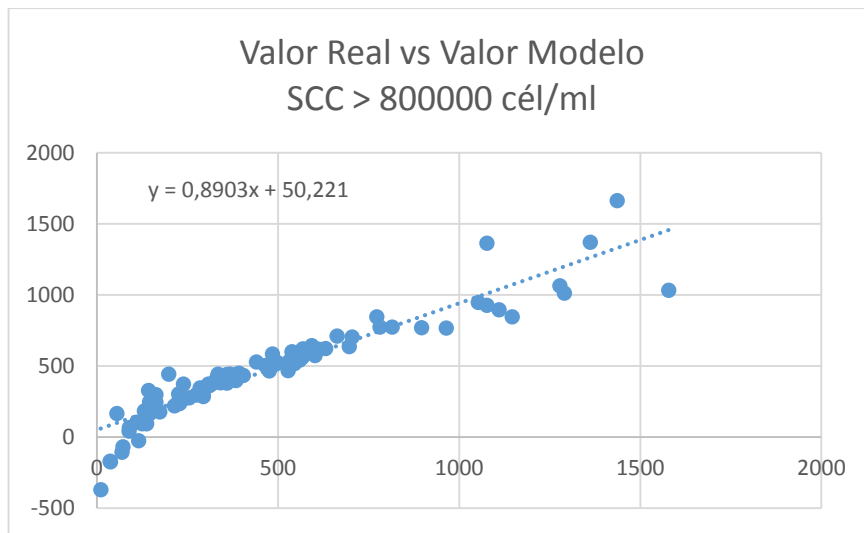


Figura 4.16.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M1 para valores de SCC > 800000 cél/ml

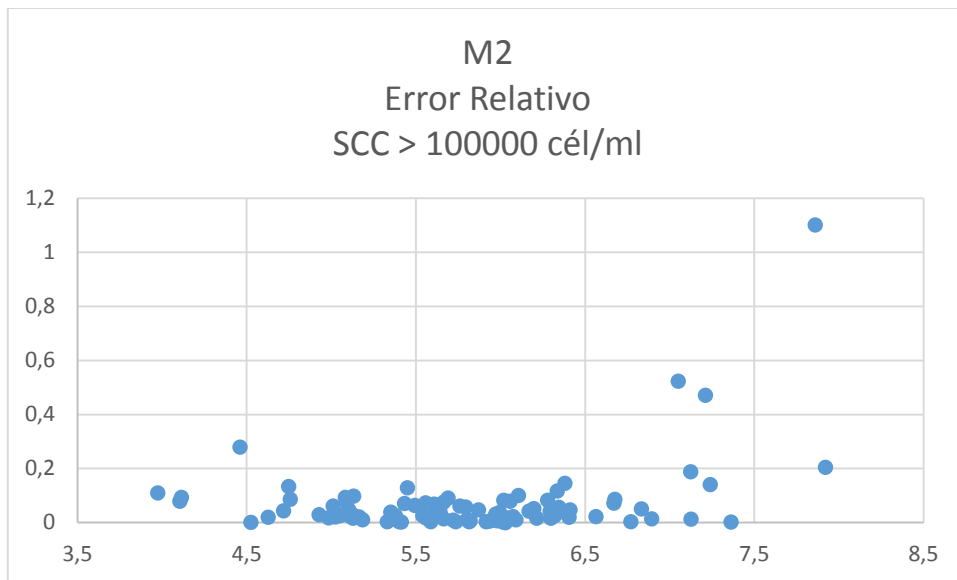
### Modelo M2

En la Tabla 4.9 se puede ver un resumen en porcentajes de los errores cometidos por las predicciones del modelo M2 para valores de SCC superiores a 100000, 200000, 400000 y 800000 células por mililitro. Los valores son similares a los aportados por el modelo M1 y, como en el caso anterior, para el valor de SCC mayor de 100000 cél/ml, que es el que peores valores presenta, el 61% de las predicciones se encuentran por debajo del 5% de error relativo y el 86% por debajo del 10% de error relativo. De la misma manera, para el modelo M2 se puede apreciar que el error relativo de las predicciones mejora con el incremento de recuento de células somáticas de tal manera que para valores superiores a 800000 cél/ml, prácticamente el 87% de las predicciones que realiza el modelo M2 tienen un error relativo inferior al 5%.

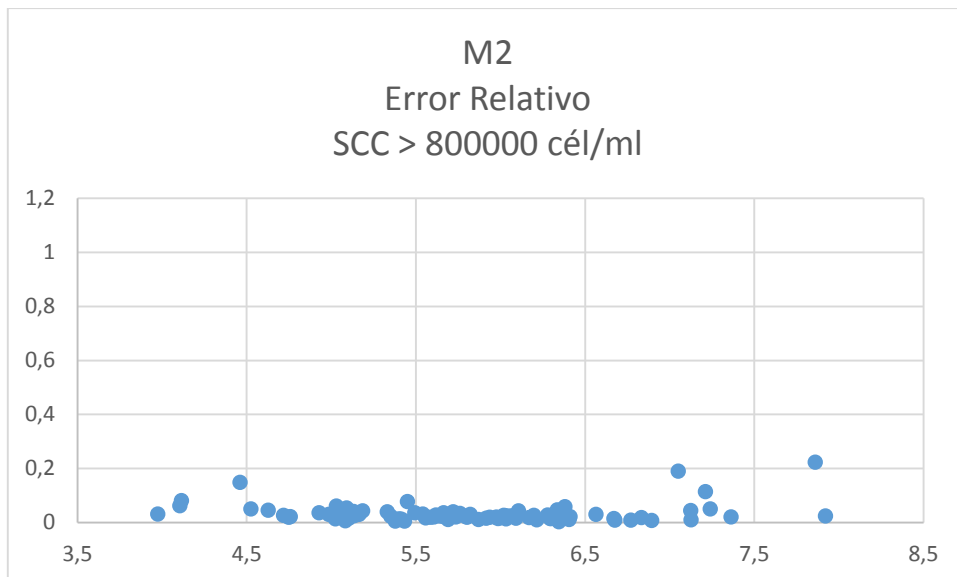
Tabla 4.9.- Porcentaje de predicciones del modelo M2 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por µl.

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	60,87	69,56	81,52	86,95
< 10%	85,87	84,78	91,3	95,65
< 15%	93,48	93,48	94,56	97,82
< 30%	96,74	95,65	97,82	100
> 50%	2,2	1,1	0	0

Como en el caso del modelo M1, en el modelo M2 se puede apreciar que las predicciones con errores relativos superiores al 50% se concentran en las granjas con valor de calidad superior a 7 por lo que se puede concluir que el modelo M2 no es adecuado para predecir los valores de granjas con alto valor de calidad. En las Figuras 4.17 y 4.18 se puede apreciar la evolución del error relativo para predicciones del modelo desde SCC bajos (SCC mayor que 100000 cél/ml en la Figura 4.17) a SCC altos (SCC mayor que 800000 cél/ml en la Figura 4.18) en las que se puede apreciar la mejora de los errores relativos cometidos, incluso para los valores con índice de calidad alto.



**Figura 4.17.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M2 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**



**Figura 4.18.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M2 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 800000 cél/ml**

Desde la Figura 4.19 a la Figura 4.22 se muestra la relación entre el valor real de cada granja y el calculado por el modelo M2. Se puede apreciar que la linealidad conseguida para el valor de SCC mayor de 100000 cél/ml a base de gran cantidad de muestras, se va perdiendo poco a poco según se aumenta el valor de recuento de células somáticas para el que se realiza el cálculo y, por consiguiente, se va reduciendo el número de muestras disponibles. Es apreciable que el factor  $QF^2$  del modelo M2 absorbe ligeramente mejor la concavidad de la curva para valores de recuento alto que en el caso del modelo M1, aumentando ligeramente la relación lineal entre el valor real y el calculado.



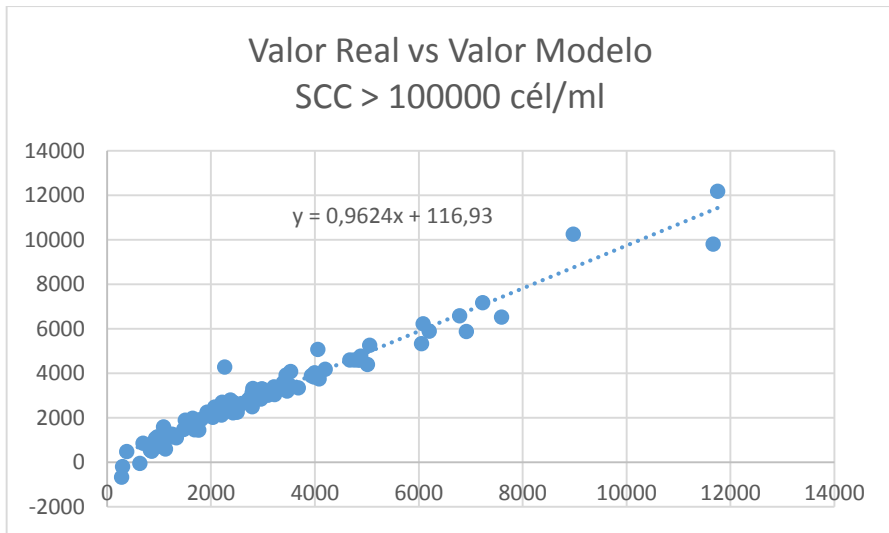


Figura 4.19.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M2 para valores de SCC > 100000 cél/ml

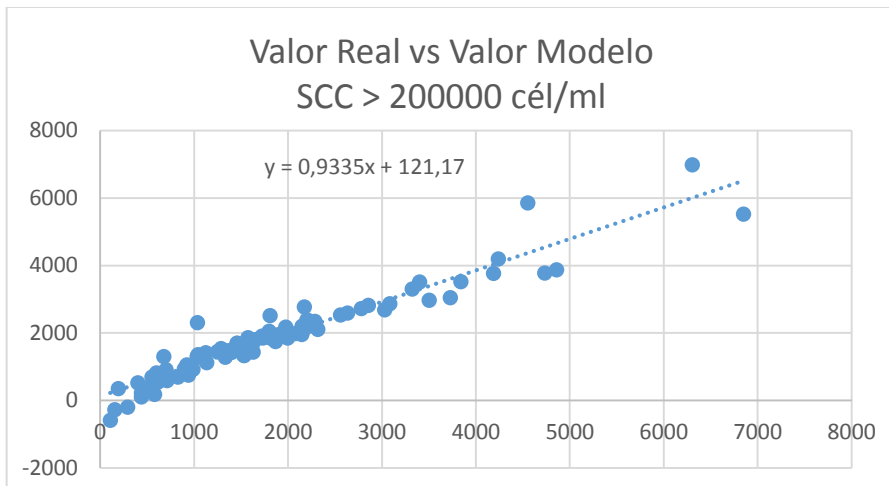


Figura 4.20.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M2 para valores de SCC > 200000 cél/ml

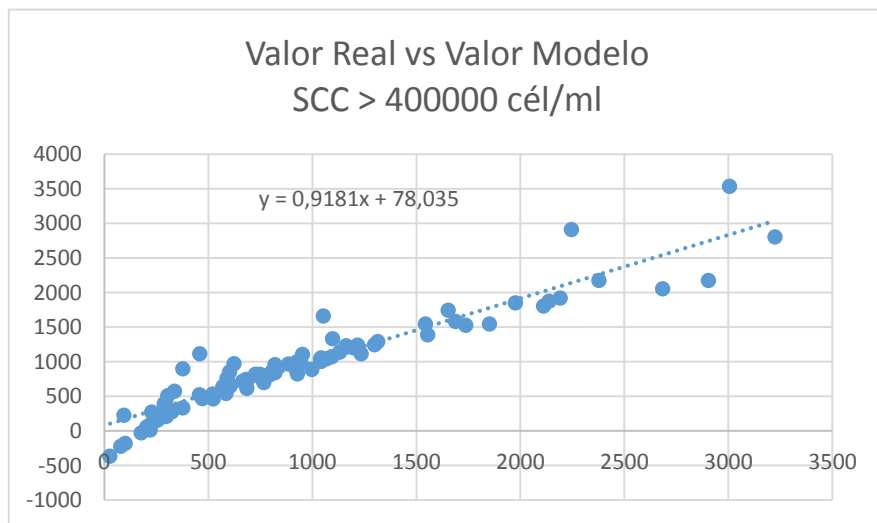


Figura 4.21.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M2 para valores de SCC > 400000 cél/ml

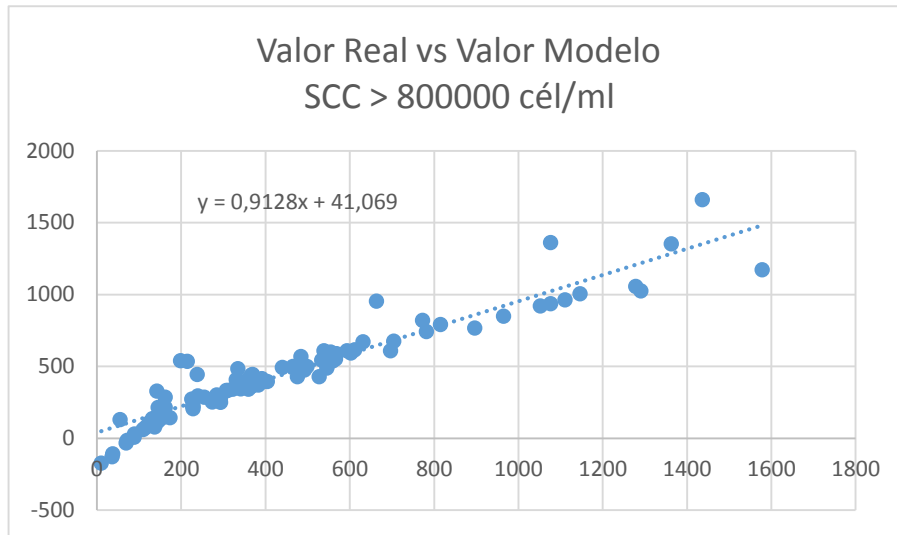


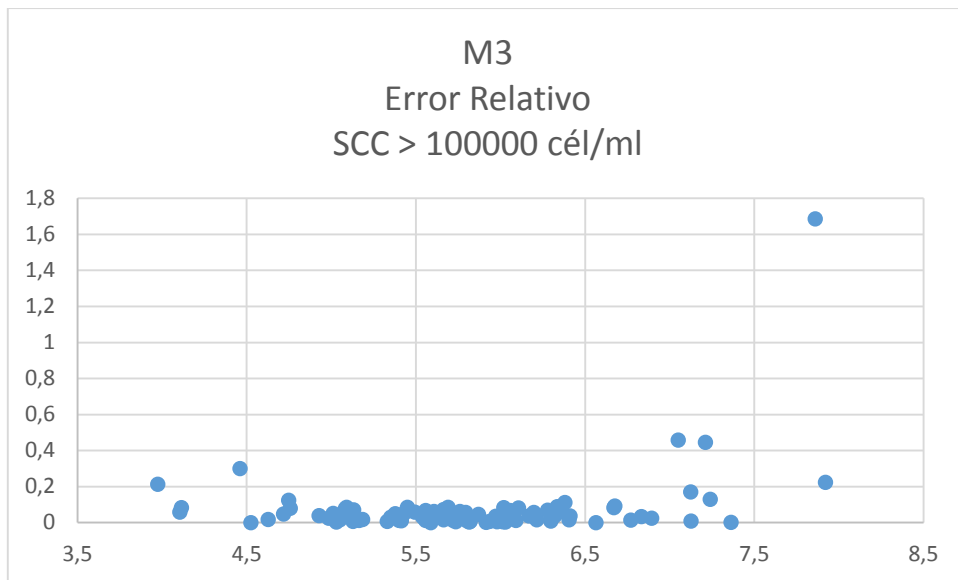
Figura 4.22.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M2 para valores de SCC > 800000 cél/ml

### Modelo M3

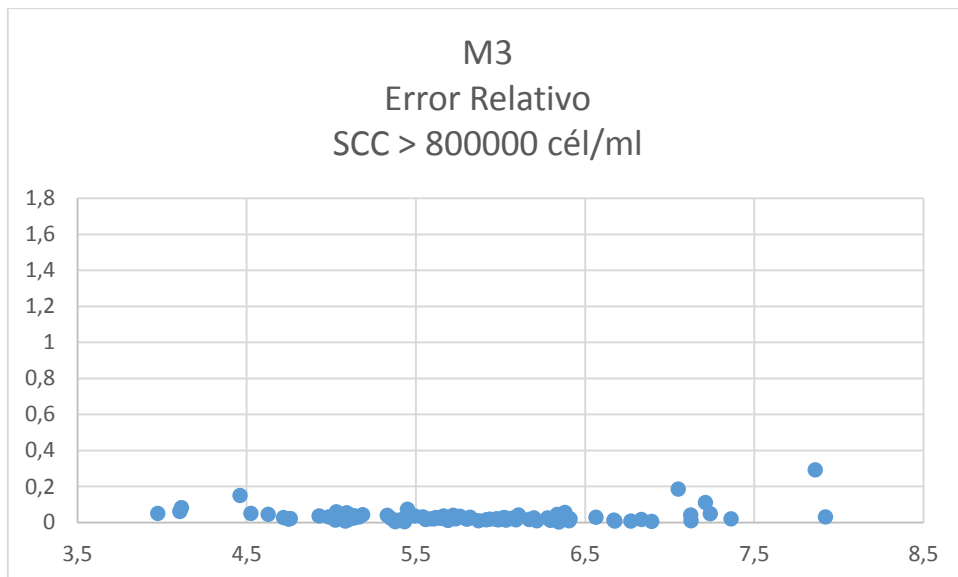
En la Tabla 4.10 se muestra un resumen en porcentajes de los errores cometidos por las predicciones del modelo M3 para valores de SCC superiores a 100000, 200000, 400000 y 800000 células por mililitro. Se puede apreciar que el término  $QF^3$  permite afinar los errores relativos y plantear pequeñas mejoras porcentuales en todos los valores de SCC que en la práctica se traduce en una o dos granjas por debajo del nivel de error planteado. Por el contrario, como se puede apreciar en la Tabla 4.10, el error cometido para granjas con valor de calidad superior a 7,5 puede superar el 160%, empeorando ampliamente los errores cometidos por los modelos M1 y M2. Esa tendencia a incrementar los valores máximos del error relativo se mantiene para valores altos de SCC como se puede apreciar en la Figura 4.24 dónde se muestran los errores relativos producidos para predicciones del modelo para valores de SCC superiores a 800000 cél/ml y en la que se puede ver que el valor máximo alcanzado por el error relativo es superior a los de los modelos M1 y M2 aunque sin ser tan fuerte la subida como la que se produce para valores de SCC mayores de 100000 cél/ml.

Tabla 4.10.- Porcentaje de predicciones del modelo M3 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$ l.

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	58,7	69,56	82,61	85,87
< 10%	89,13	86,96	91,3	95,65
< 15%	92,39	92,39	93,48	96,74
< 30%	95,65	95,65	97,83	100
> 50%	1,1	1,1	1,1	0



**Figura 4.23.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M3 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**



**Figura 4.24.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M3 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 800000 cél/ml**

Como en el caso de los modelos M1 y M2, el modelo M3 aporta malos resultados para granjas con valores de calidad altos (superiores a 7) y especialmente malos para granjas de alto valor de calidad y bajo número de cabezas de ganado.

Analizando la relación lineal entre el valor real y el valor calculado por el modelo que se muestra desde la Figura 4.25 a la Figura 4.28 se aprecia que el modelo M3 no mejora los valores del modelo M2 y mantiene unos resultados similares a los producidos con el modelo M1.

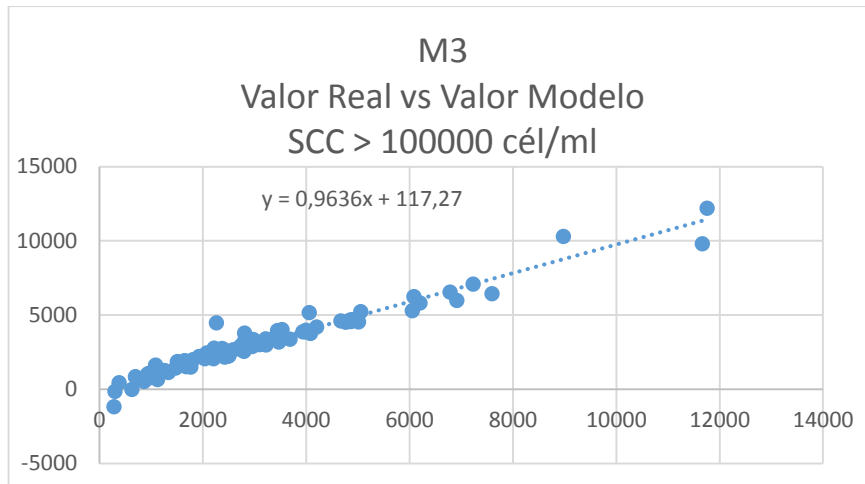


Figura 4.25.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M3 para valores de SCC > 100000 cél/ml

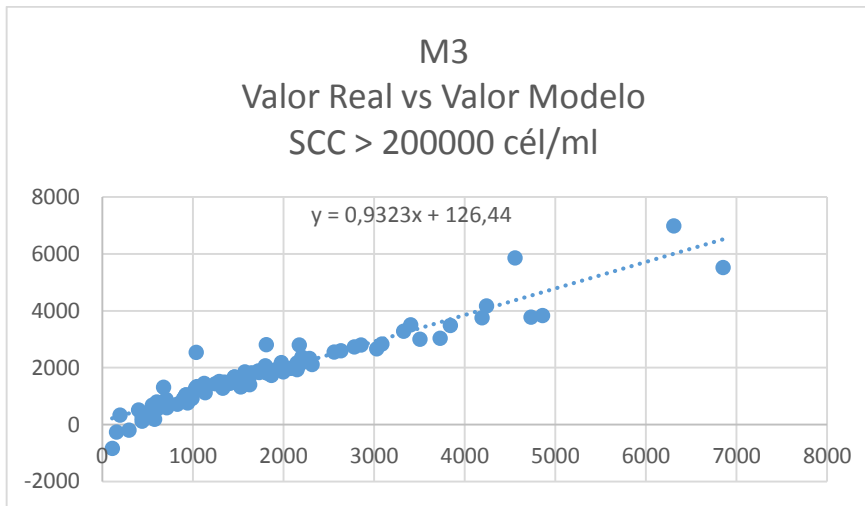


Figura 4.26.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M3 para valores de SCC > 200000 cél/ml

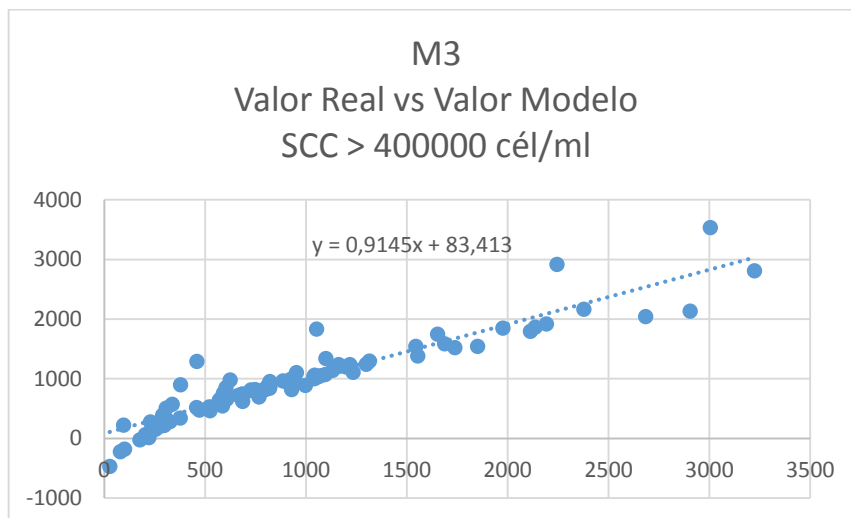
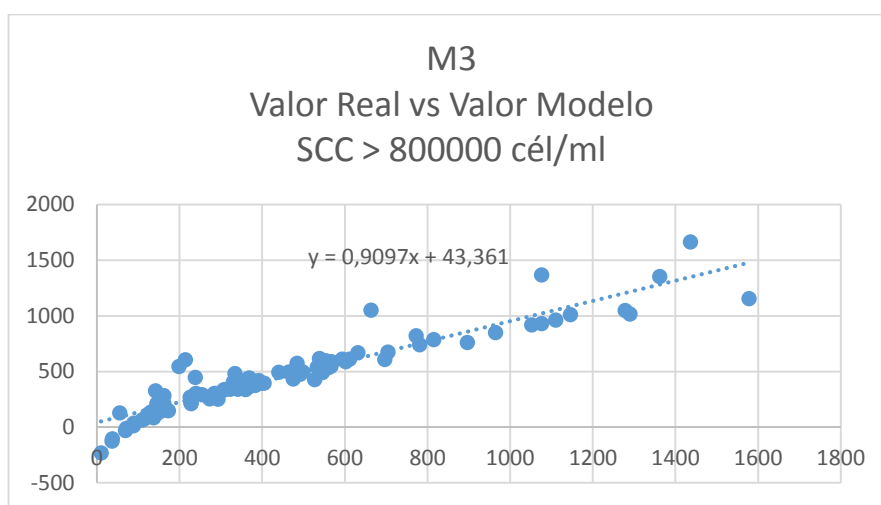


Figura 4.27.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M3 para valores de SCC > 400000 cél/ml



**Figura 4.28.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M3 para valores de SCC > 800000 cél/ml**

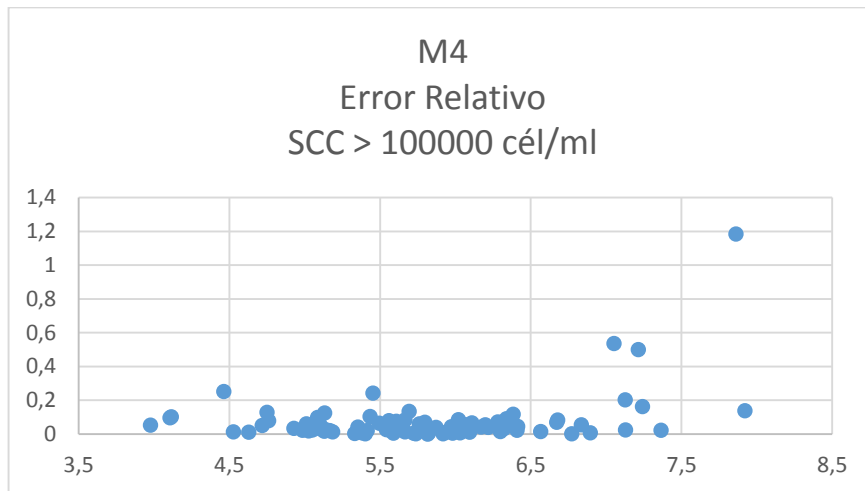
#### **Modelo M4**

En la Tabla 4.11 se muestran los porcentajes de predicciones del modelo M4 que se encuentran por debajo de los errores relativos tomados como referencia para la comparación entre modelos. Los valores de la tabla indica que el modelo M4 es ligeramente inferior al modelo M1 lo que indica que el factor  $NV^2$  introducido afecta poco o nada sobre la calidad de las predicciones del mismo.

**Tabla 4.11.- Porcentaje de predicciones del modelo M4 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$ l.**

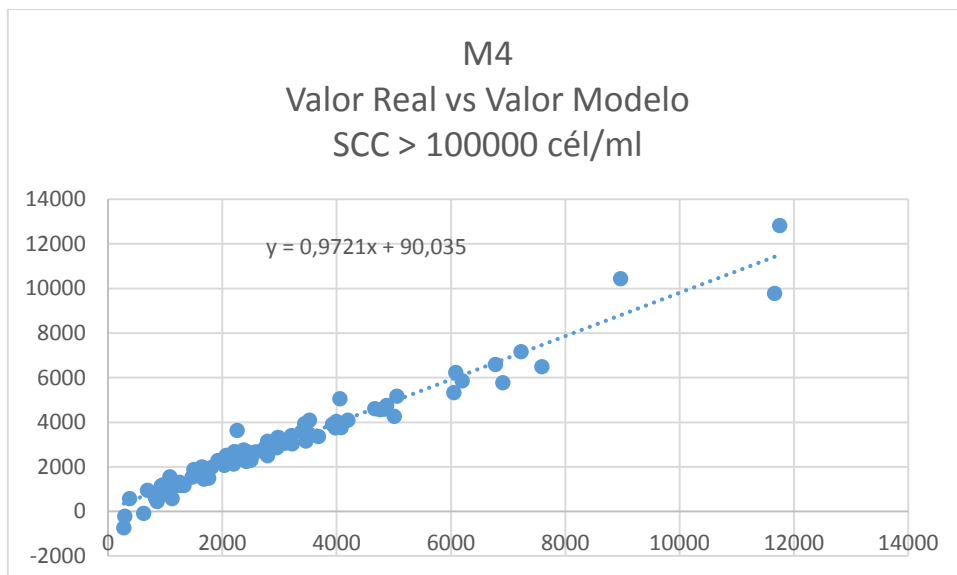
Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	59,78	70,65	82,61	85,87
< 10%	84,78	90,22	92,39	96,74
< 15%	92,39	92,39	95,65	96,74
< 30%	96,74	96,74	97,82	98,91
> 50%	2,2	2,2	1,1	1,1

En la Figura 4.29 se puede confirmar que el modelo M4 presenta el mismo perfil para el error relativo que los modelos M1, M2 y M3 presentando así mismo un mal comportamiento para valores de calidad superiores a 7.

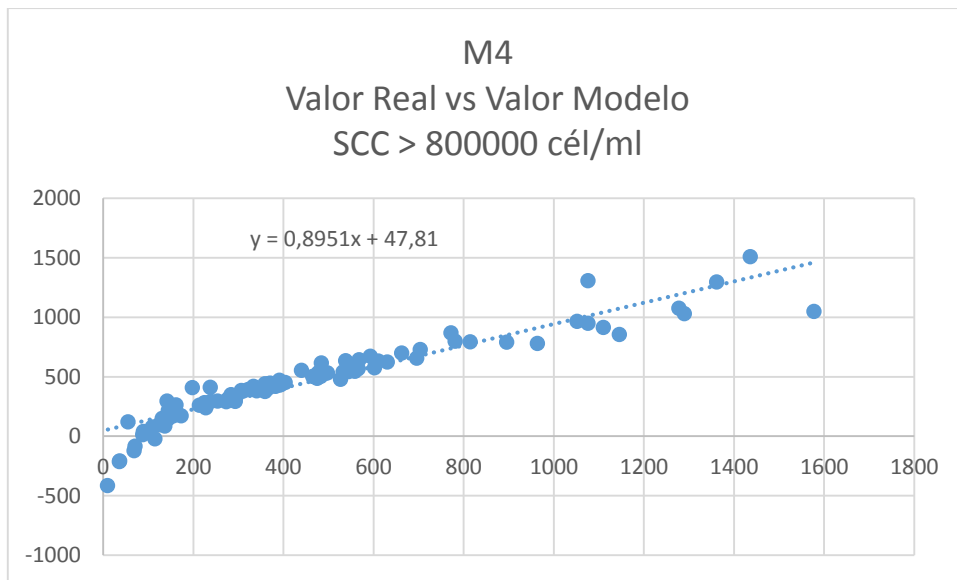


**Figura 4.29.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M4 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**

Representando el valor real del número de cabezas de ganado que presentan un recuento celular superior a uno determinado frente al valor predicho por el modelo M4, comprobamos en la Figura 4.30 que la predicción no es superior a los distintos modelos vistos hasta el momento y es muy similar a la que presenta el modelo M1. La desviación del modelo lineal también empeora para valores altos del SCC como se muestra en la Figura 4.31 debido, principalmente, al menor número de valores utilizados para realizar el ajuste y el mayor peso relativo que cobran los valores en los extremos del rango.



**Figura 4.30.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M4 para valores de SCC > 100000 cél/ml**



**Figura 4.31.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M4 para valores de SCC > 800000 cél/ml**

**Modelo M5**

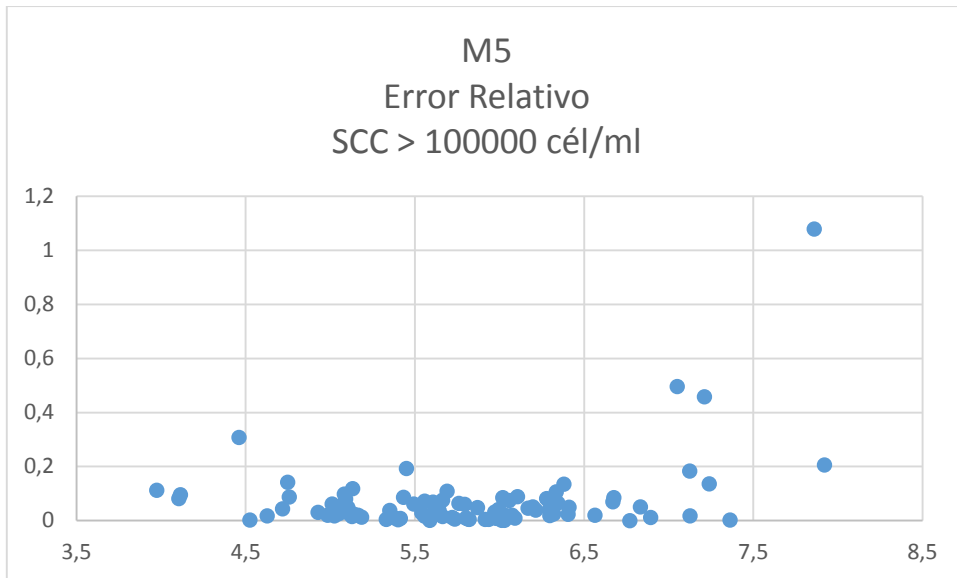
*El modelo M5 plantea un polinomio de segundo grado tanto para el parámetro del número de vacas de la instalación como para el parámetro del valor de calidad. Como se puede ver en la*

Tabla 4.12 dónde se muestran los porcentajes de las predicciones realizadas por el modelo que se encuentran por debajo de los niveles de error seleccionados para comparar los distintos modelos, se produce una ligera mejoría para el nivel de error de 5% frente al modelo M4 y, sobre todo, frente al modelo M1.

**Tabla 4.12.- Porcentaje de predicciones del modelo M5 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por µl**

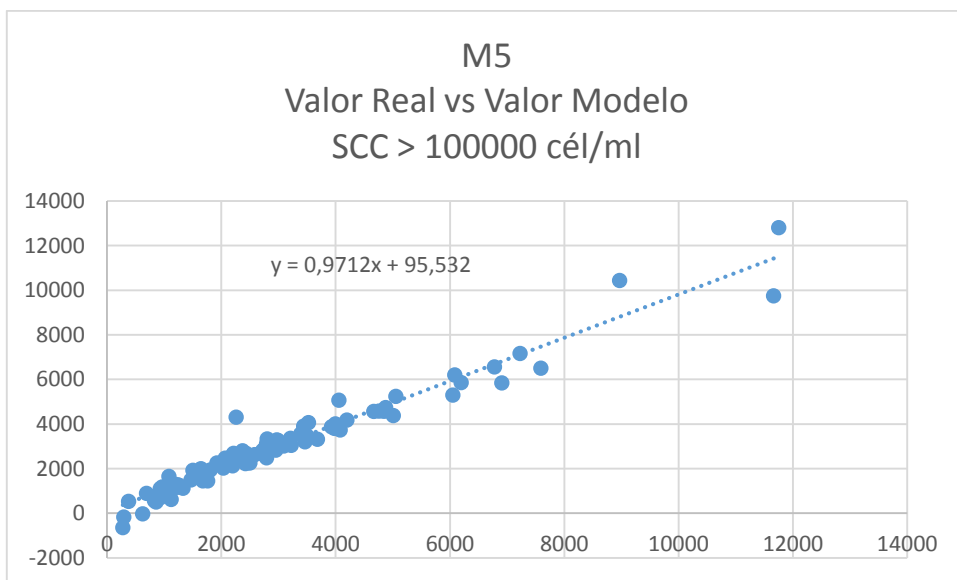
Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	59,78	69,56	82,61	88,04
< 10%	84,78	88,04	94,56	95,65
< 15%	92,39	94,56	95,65	97,83
< 30%	95,65	95,65	97,83	100
> 50%	1,1	2,2	1,1	0

A pesar del mayor porcentaje de casos con un error relativo por debajo del 5%, se puede apreciar en la Figura 4.32 que la distribución del error frente al valor de calidad sigue siendo la misma que para los modelos hasta ahora analizados, presentando un comportamiento deficiente para valores de calidad superiores a 7, con valores que superan ampliamente el 100% de error cuando la calidad de la granja es alta y el número de cabezas es bajo.



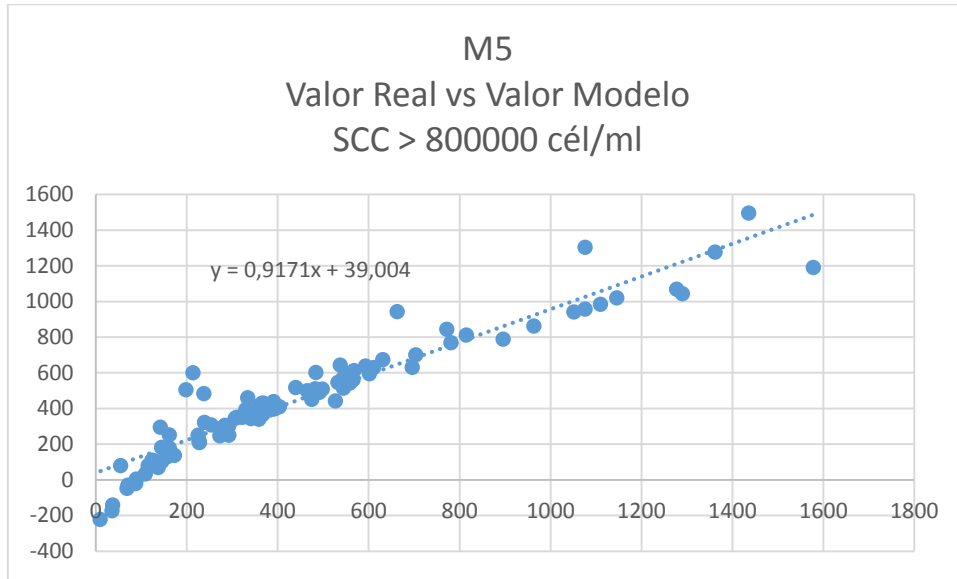
**Figura 4.32.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M5 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**

En cuanto a la relación lineal entre el valor real de una granja y el valor calculado por el modelo, podemos comprobar en la Figura 4.33 y la Figura 4.34 que los polinomios de segundo orden son capaces de mantener la linealidad desde la predicción para valores de SCC mayores de 100000 cél/ml hasta las predicciones para valores de SCC mayores de 800000 cél/ml en unos niveles relativamente constantes y sin bajar la pendiente de la recta de ajuste del 0,9.



**Figura 4.33.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M5 para valores de SCC > 100000 cél/ml**





**Figura 4.34.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M5 para valores de SCC > 800000 cél/ml**

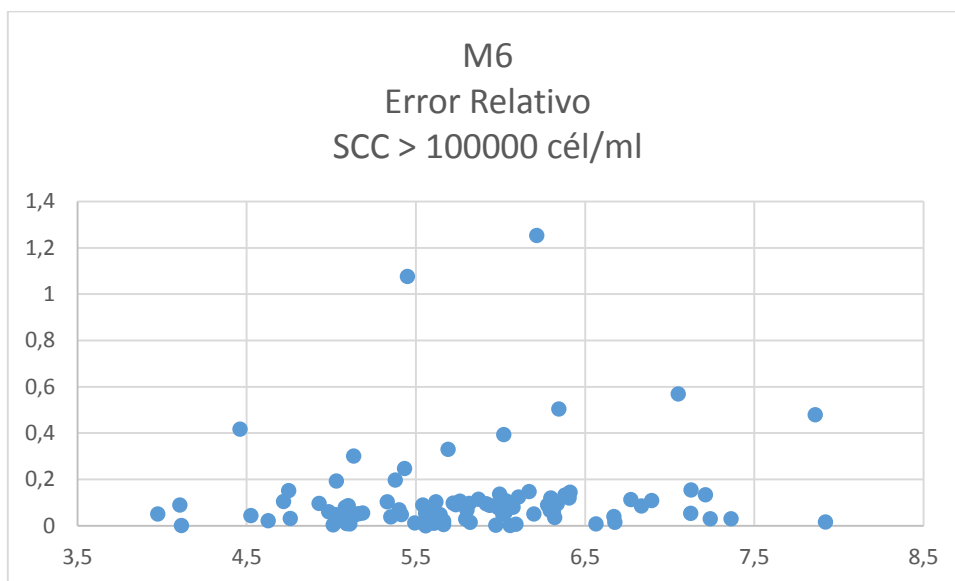
**Modelo M6**

El modelo M6 es el primer modelo logarítmico a analizar de todos los modelos planteados. En la Tabla 4.13 se muestran los porcentajes de sus predicciones que están por debajo de los umbrales de referencia. Se puede comprobar que tiene un comportamiento francamente deficiente para niveles de error por debajo del 5% dando porcentajes, en algunos casos, por debajo del 50% de lo presente en los modelos lineales anteriormente analizados.

**Tabla 4.13.- Porcentaje de predicciones del modelo M6 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por µl.**

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	34,78	59,78	84,78	92,39
< 10%	67,4	86,95	91,3	97,82
< 15%	84,78	90,22	96,74	97,82
< 30%	90,22	95,65	97,83	100
> 50%	3,3	1,1	0	0

Si se analiza la distribución del error relativo en función del valor de calidad en la Figura 4.35 se puede apreciar que los valores para los que el modelo suministra valores muy elevados del error relativo se encuentran distribuidos de manera uniforme a lo largo de todos los valores del valor de calidad y, de la misma manera, no se aprecia un valor de calidad a partir del cual el modelo se degrade y aporte valores incorrectos ya que se puede apreciar cómo para valores superiores a 7,5 se pueden obtener resultados con un error relativo del 40% o inferior al 10%. El mismo efecto se puede apreciar para valores bajos o intermedios del Valor de Calidad.



**Figura 4.35.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M6 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**

Un análisis más detallado sobre los valores del modelo que tienen mayores errores lleva a la conclusión de que, a diferencia de los modelos lineales en los que el elemento limitante del campo de uso es el Valor de Calidad de la instalación, en el modelo M6 el valor que limita de manera severa la aplicabilidad del modelo es el número de vacas que posee la instalación, como se puede apreciar en la Figura 4.36 el modelo produce salidas con alto error relativo cuando el número de cabezas de ganado de la instalación se encuentra en los límites, tanto superior como inferior, que se han utilizado para realizar los cálculos de los parámetros del modelo. Este efecto se puede explicar por el efecto multiplicador del error que posee el logaritmo y que, en los valores más extremos, ocasiona salidas fuertemente distorsionadas.

En la figura se puede apreciar que el modelo no empieza a proporcionar errores relativos inferiores al 20% hasta que el número de vacas de la instalación no supera las 2000 cabezas y, de la misma manera, a partir de las 15000 cabezas de ganado el modelo vuelve a empeorar y producir errores relativos muy elevados.

Se puede comprobar en la Figura 4.37 que el comportamiento se mantiene para predicciones con altos valores de SCC (SCC superior a 800000 cél/ml en la figura) aunque en este caso, el valor del error relativo se reduce en al menos un orden de magnitud y, para los mismos valores de cabezas de ganado, en este caso se habla de errores relativos inferiores al 5%.

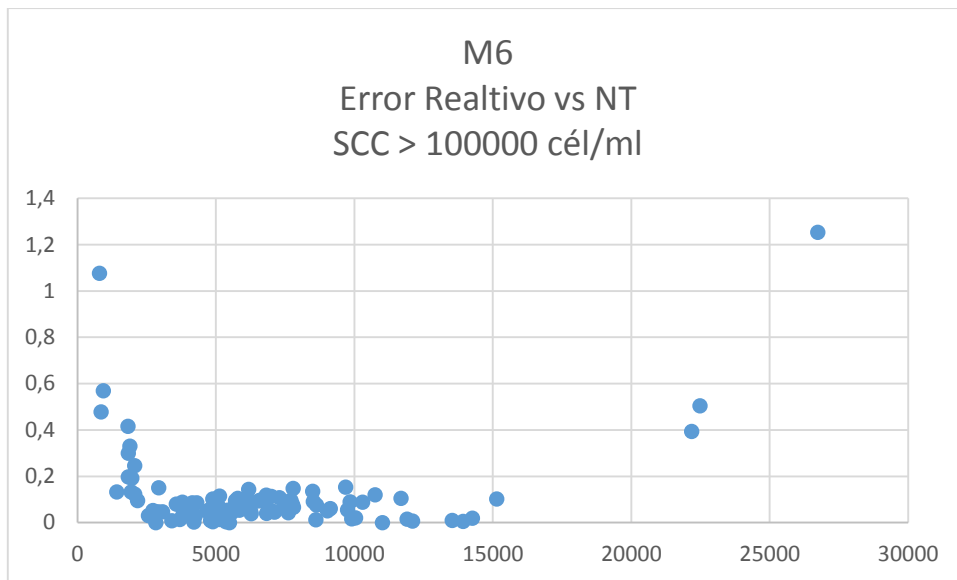


Figura 4.36.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M6 para valores de SCC > 100000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja

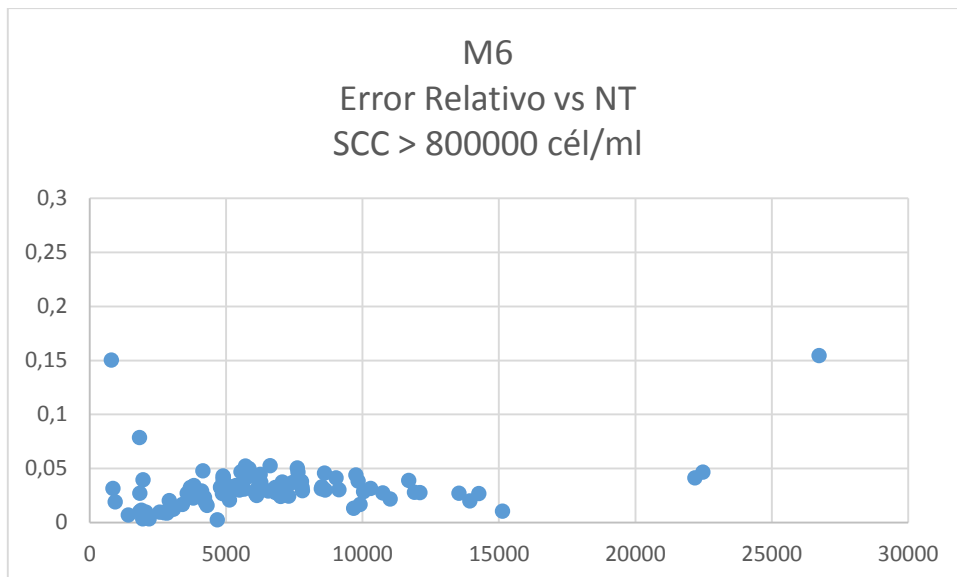
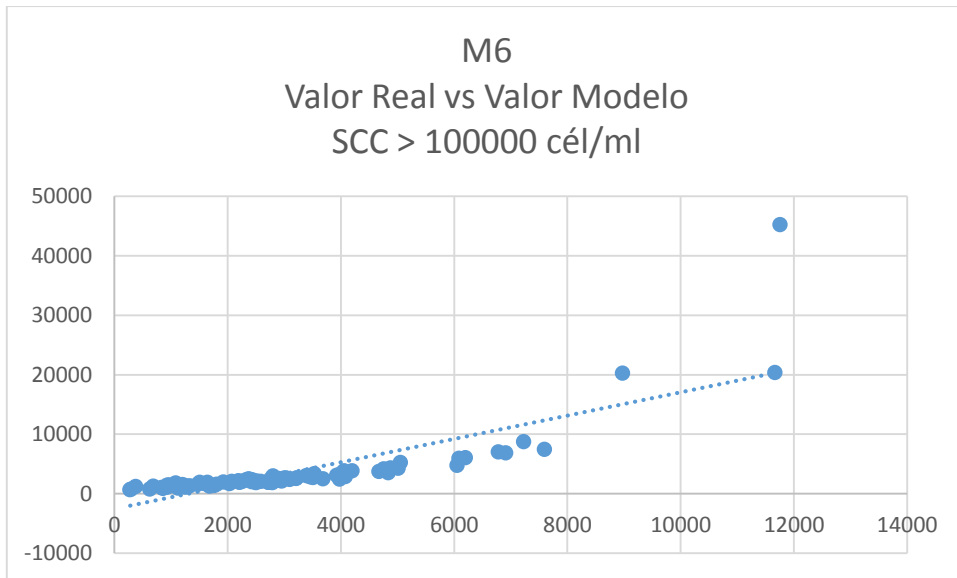
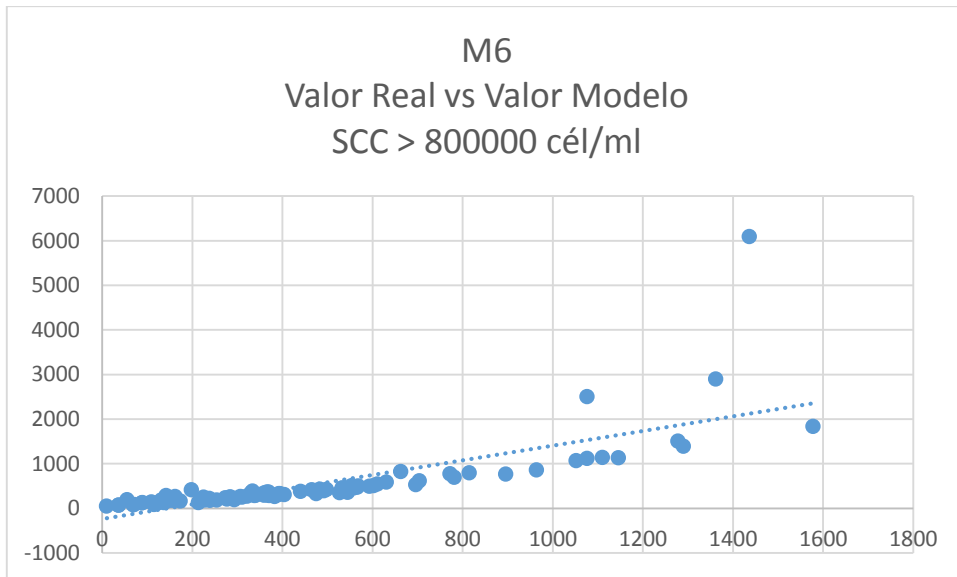


Figura 4.37.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M6 para valores de SCC > 100000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja.

En cuanto a la relación lineal entre el valor real y el valor estimado por el modelo M6 se puede comprobar en la Figura 4.38 que, aunque una gran parte de la salida del modelo mantiene una relación lineal con pendiente constante con los valores reales utilizados para el cálculo del modelo, los grandes errores absolutos que presenta este modelo, ya vistos en la Tabla 4.4; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y posteriores, , hacen que esos valores extremos adquieran un gran peso en el ajuste lineal y anulen las buenas perspectivas que presentaba inicialmente. En la Figura 4.39 se comprueba que el efecto no desaparece cuando la predicción se refiere a valores de SCC superiores a 800000 cél/ml y, aunque la relación lineal es muy alta para una gran mayoría de valores, los resultados extremos siguen contrapesando excesivamente en el ajuste lineal que, recordemos, debería tener una pendiente de 1 y cortar a los ejes en el origen.



**Figura 4.38.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M6 para valores de SCC > 100000 cél/ml**



**Figura 4.39.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M6 para valores de SCC > 800000 cél/ml**

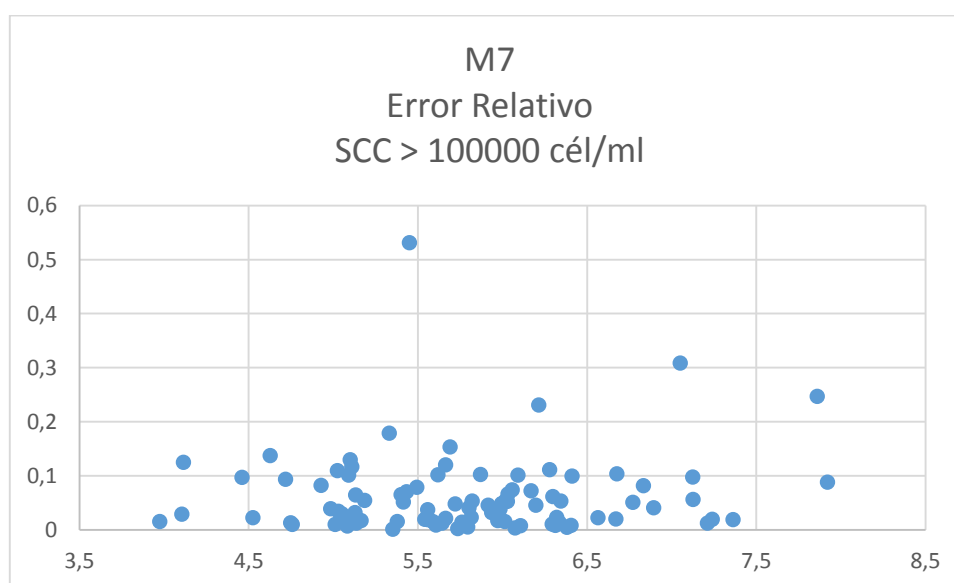
**Modelo M7**

El modelo M7, además de suministrar la salida del modelo en forma logarítmica, plantea un polinomio de segundo orden para el parámetro del número de vacas de la instalación. En la Tabla 4.14 se muestran los resultados de la validación del modelo para los niveles de error utilizados para la comparación. En dicha tabla se puede observar que este modelo reduce rápidamente los grandes errores cometidos por los modelos lineales y el porcentaje de resultados que superan el 50% de error relativo es siempre inferior al resto de modelos y decae rápidamente a cero para valores del SCC superiores a 200000 cél/ml. Otro hecho destacable es que el modelo se comporta excepcionalmente bien para valores de SCC superiores a 200000 cél/ml, con un 92% de las muestras con un error inferior al 10% para SCC superior a 200000 cél/ml que se incrementa a un 99% para el valor de SCC superior a 400000 cél/ml.

**Tabla 4.14.- Porcentaje de predicciones del modelo M7 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$ l**

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	55,43	77,13	90,22	96,74
< 10%	80,43	92,39	98,91	100
< 15%	93,48	98,91	98,91	100
< 30%	97,82	98,91	100	100
> 50%	1,1	0	0	0

Analizando el campo de aplicabilidad del modelo, podemos ver en la Figura 4.40 que presenta puntos con error relativo excesivo para valores de calidad mayores de 7,5 y algunos otros puntos en diferentes valores de calidad. Analizando las figuras 4.41, 4.42 y 4.43 se puede comprobar que los problemas para valores de calidad superiores a 7,5 persisten lo que hace suponer que este modelo adolece del problema que tienen los modelos lineales de su inaplicabilidad para valores altos del Valor de Calidad. Pero si se comprueban los valores del error relativo cometido a esos valores altos del QF se ve que, aunque para la predicción de cabezas de ganado con un SCC superior a 1000000 cél/ml el valor del error es del 60%, este error decae con relativa rapidez a límites razonables para llegar a ser inferior a un 2% para predicciones de vacas con un SCC superior a 8000000 cél/ml.



**Figura 4.40.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M7 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 1000000 cél/ml**

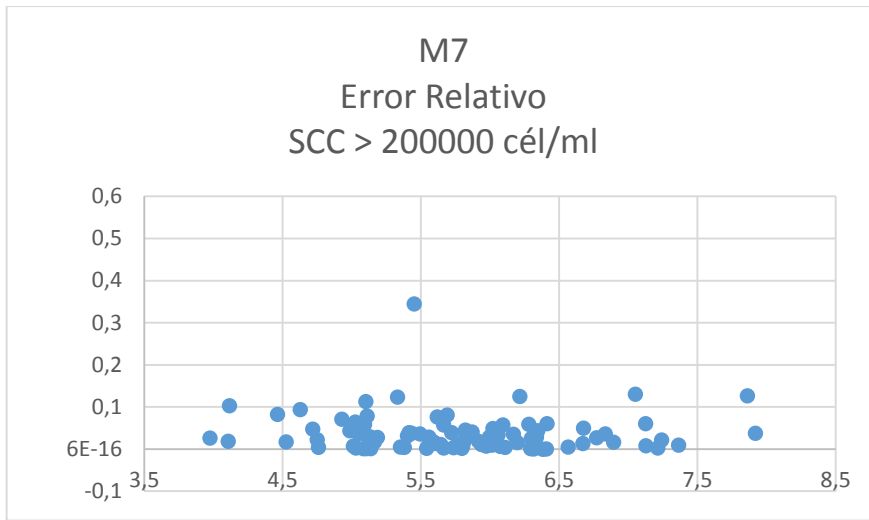


Figura 4.41.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M7 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 200000 cél/ml

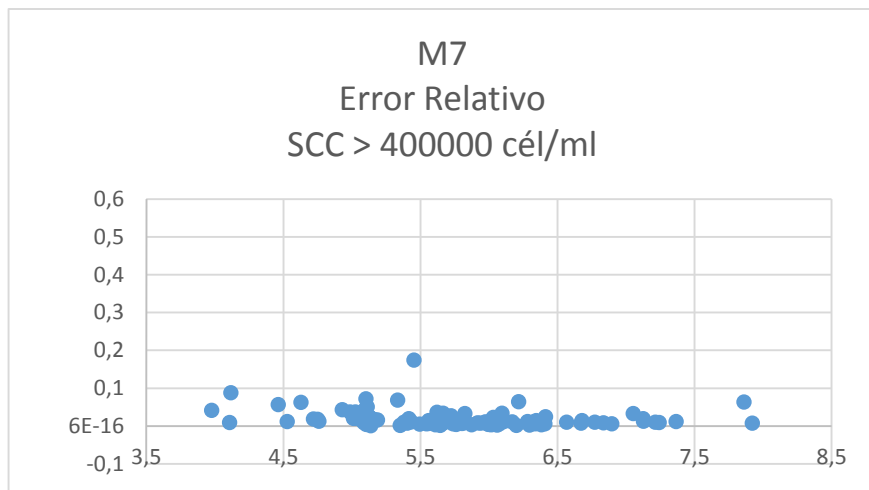


Figura 4.42.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M7 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 400000 cél/ml

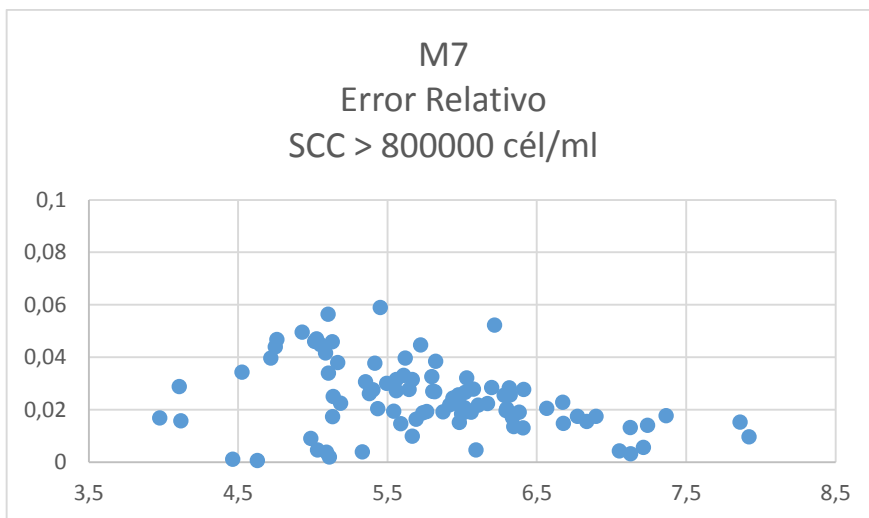


Figura 4.43.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M7 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 800000 cél/ml

La presencia de puntos de alto error relativo a lo largo de todos los valores de calidad puede indicar la dependencia del error con respecto al número de vacas que presenta la granja, como ocurre con el modelo M6. Para analizar esta posible dependencia se muestra la Figura 4.44 donde se ve claramente la influencia del número de vacas en el error cometido por el modelo. Sin embargo, a diferencia del modelo M6, en este caso el error es más acusado para valores bajos del número de vacas que para valores altos. Se aprecia claramente en la figura que las granjas con el número más bajo de cabezas de ganado son las granjas que presentan errores más altos, que el error vuelve a unos límites razonables para el valor de SCC superior a 100000 cél/ml a lo largo de todo el rango poblacional de las granjas, pero vuelve a empeorar en la granja con mayor número de vacas, aunque sin llegar a los niveles de error iniciales. En las figuras 4.45 y 4.46 se puede comprobar que el efecto se mantiene para las predicciones de número de vacas con SCC elevado (en la Figura 4.45 se muestra para SCC superior a 400000 cél/ml y en la Figura 4.46 para SCC superior a 800000 cél/ml) aunque se va amortiguando para las granjas con números bajos de cabezas de ganado quedando únicamente la ganadería con el menor número de vacas con un efecto apreciable y destacado.

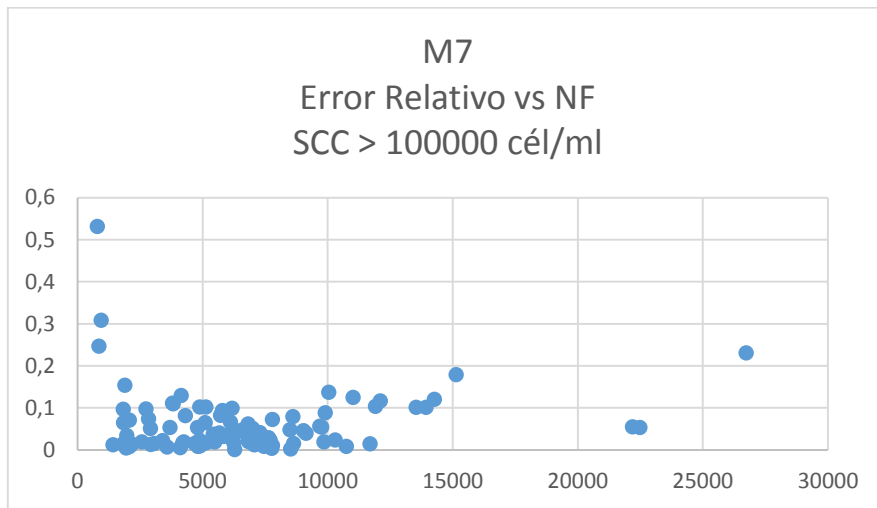


Figura 4.44.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M7 para valores de SCC > 100000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja

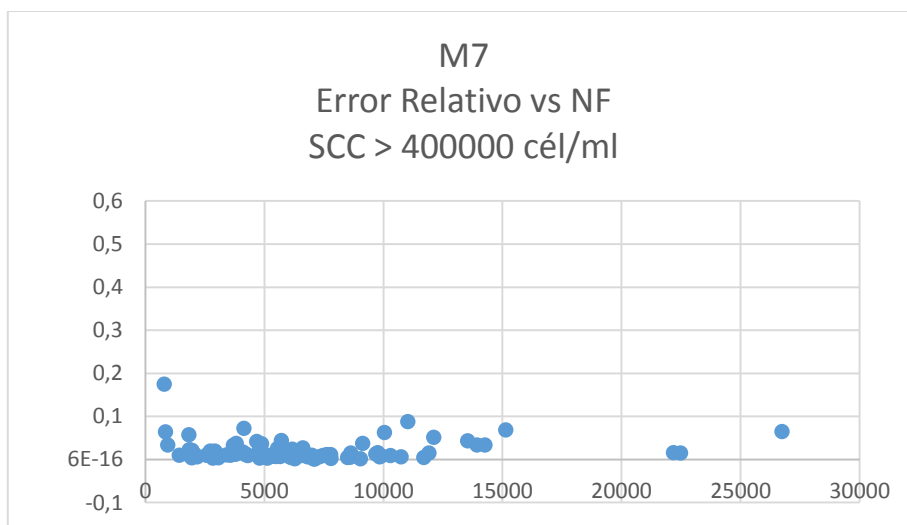
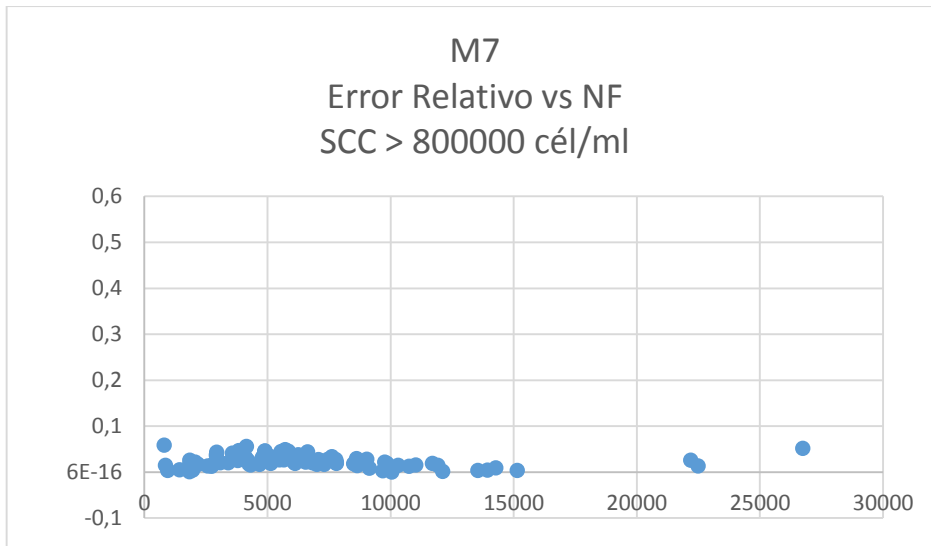


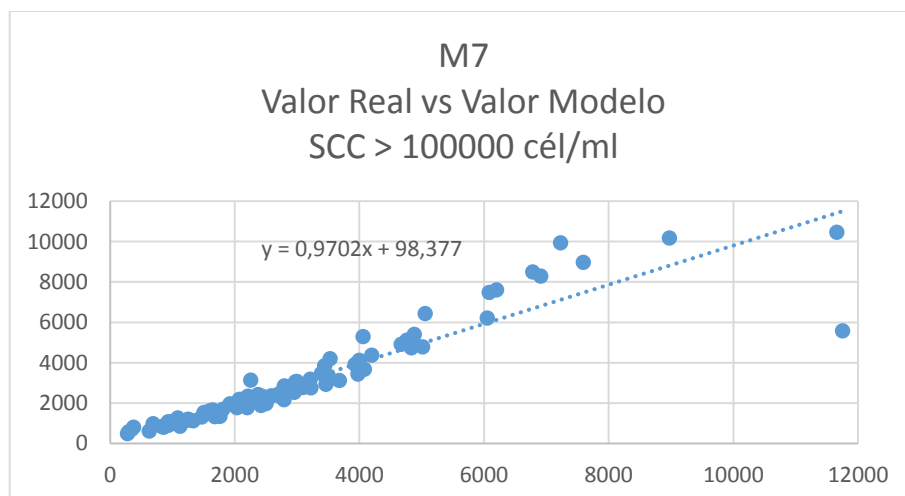
Figura 4.45.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M7 para valores de SCC > 400000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja



**Figura 4.46.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M7 para valores de SCC > 800000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja**

Analizando la relación lineal entre el valor real de la granja y el valor calculado por el modelo se puede apreciar en las figuras 4.47, 4.48, 4.49 y 4.50 que la linealidad es muy alta con valores de la pendiente muy próximos a 1. Se comprueba de nuevo que el número de vacas de la explotación tiene un gran efecto en el error del modelo, ya que los errores más alejados de la linealidad se producen cuando la predicción del modelo tiene que suministrar los valores más altos, que coinciden lógicamente con las granjas con mayor número de cabezas de ganado. Esos errores tan alejados tienen un gran efecto de contrapeso en el ajuste lineal del valor real frente al valor calculado por el modelo.

Se puede apreciar también cómo este modelo responde relativamente mejor cuando el número de muestras es numéricamente inferior, ya que comparando la respuesta para valores de SCC mayor de 100000 cél/ml (gran número de muestras) de la Figura 4.47 frente a la respuesta para SCC mayor de 800000 cél/ml (número de muestras más pequeño) de la Figura 4.50 se puede ver que la linealidad es mayor para este último caso, observando que la mayoría de las salidas se encuentran sobre la línea de tendencia, exceptuando los casos de gran número de vacas comentados anteriormente.



**Figura 4.47.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M7 para valores de SCC > 100000 cél/ml**



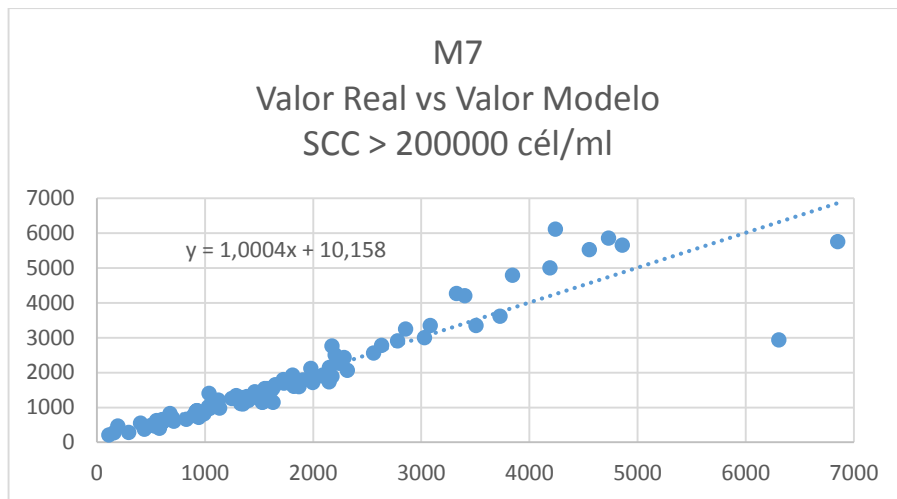


Figura 4.48.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M7 para valores de SCC > 200000 células/ml

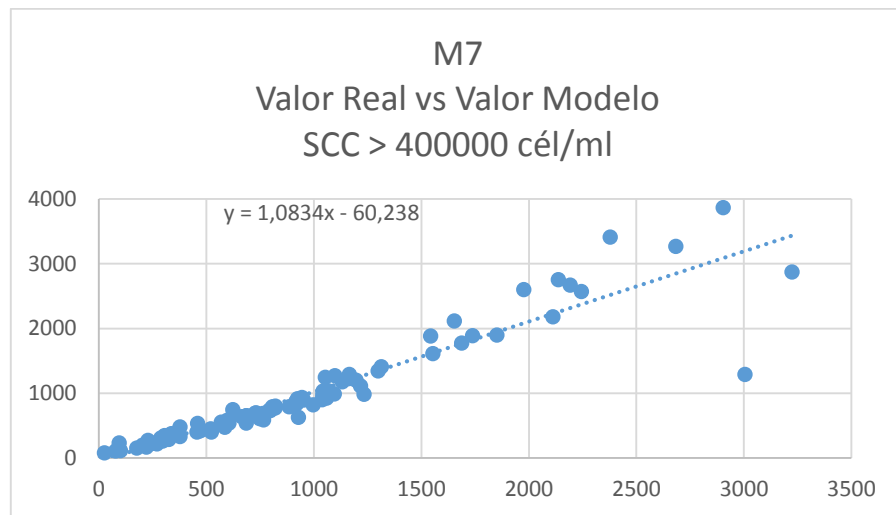


Figura 4.49.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M7 para valores de SCC > 400000 células/ml

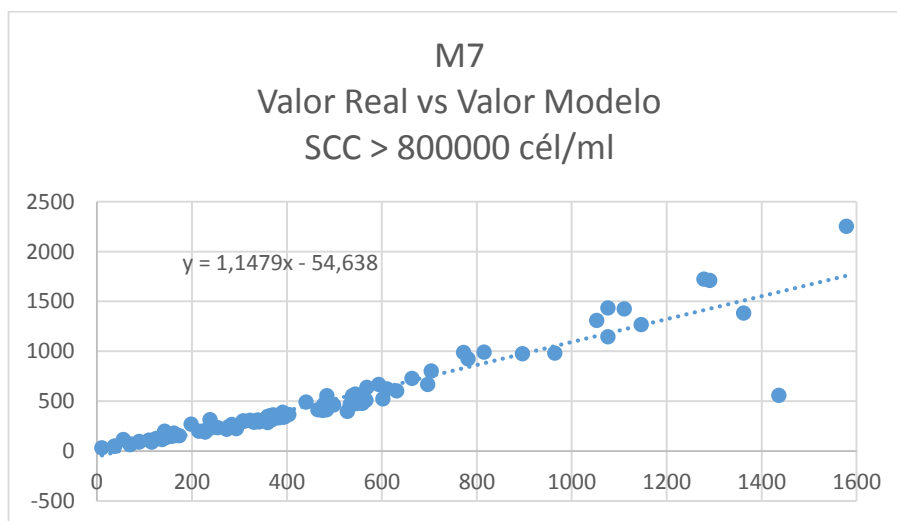


Figura 4.50.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M7 para valores de SCC > 800000 células/ml

### Modelo M8

El modelo M8 presenta dos logaritmos en su expresión, por un lado, aplica el logaritmo al término independiente del número de vacas por instalación y, por otro lado, retorna el número de animales que sobrepasan el valor de recuento de células somáticas fijado como umbral en forma de logaritmo. Este doble efecto del logaritmo retorna unos resultados muy buenos si se atiende a los valores del porcentaje de muestras que se encuentran por debajo de los valores de referencia de error relativo mostrados en la Tabla 4.15.

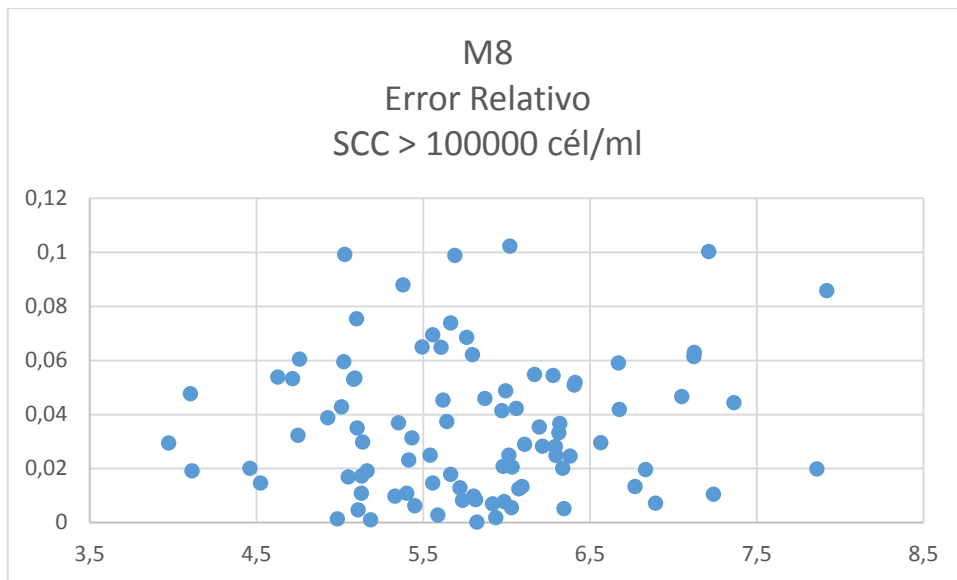
En la tabla se puede apreciar que, incluso para los valores que suministra el modelo para valores de SCC mayores de 100000 cél/ml (tradicionalmente los peores), casi el 98% de los resultados se encuentran por debajo del 10% de error relativo y, sobre todo, que ningún valor proporcionado por el modelo tiene errores relativos superiores al 50%, lo que indica que este modelo controla los valores que suministra y los mantiene en valores razonables.

Cuando se ejecuta el modelo para valores superiores del recuento de células somáticas los errores relativos cometidos son aún inferiores, manteniendo un 94,5% de las predicciones por debajo del 5% de error en valores de SCC superior a 200000 cél/ml, y llegando al 98% para valores de SCC superior a 400000 cél/ml y al 100% en el caso de 800000 cél/ml. Además, es particularmente buena la respuesta para valores de SCC superiores a 800000 cél/ml, donde todas las predicciones tienen un error relativo inferior al 5%. Si se analiza más en detalle la respuesta del modelo para valores de SCC mayores de 800000 cél/ml se ve que el 72,82% de las predicciones tienen un error relativo inferior al 3% con un 5,43% inferior al 1%. Dicho de otra manera, para el 72,82 de los resultados ofrecidos por el modelo para valores de SCC superior a 800000 cél/ml, la capacidad de acertar del modelo es del 97%.

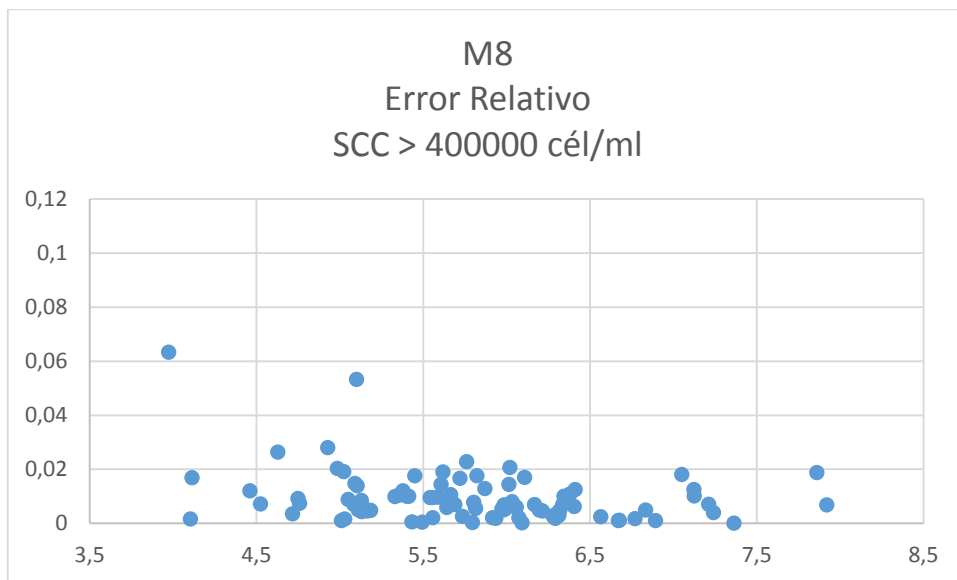
**Tabla 4.15.- Porcentaje de predicciones del modelo M8 que se encuentran por debajo del nivel indicado. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$ l**

Nivel de error	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
< 5%	71,74	94,56	97,83	100
< 10%	97,82	100	100	100
< 15%	100	100	100	100
< 30%	100	100	100	100
> 50%	0	0	0	0

Si se analiza la aplicabilidad del modelo M8, en la Figura 4.51 no se aprecia una especial relación entre los errores producidos y el valor de calidad. Aunque existe una muestra con un alto valor de calidad que muestra un error relativo por encima de los demás, como este caso mantiene un error un valor razonable, no parece indicar una relación de causa-efecto. Se confirma esta situación al analizar la Figura 4.52 en la que se ve que el error de la granja con mayor calidad ya no sobresale sobre los demás, aunque se ha producido un efecto balancín y el valor que ahora sobresale por encima de los demás es el de la granja que posee el valor de calidad más bajo aunque, como se comentó anteriormente, con un error razonable.

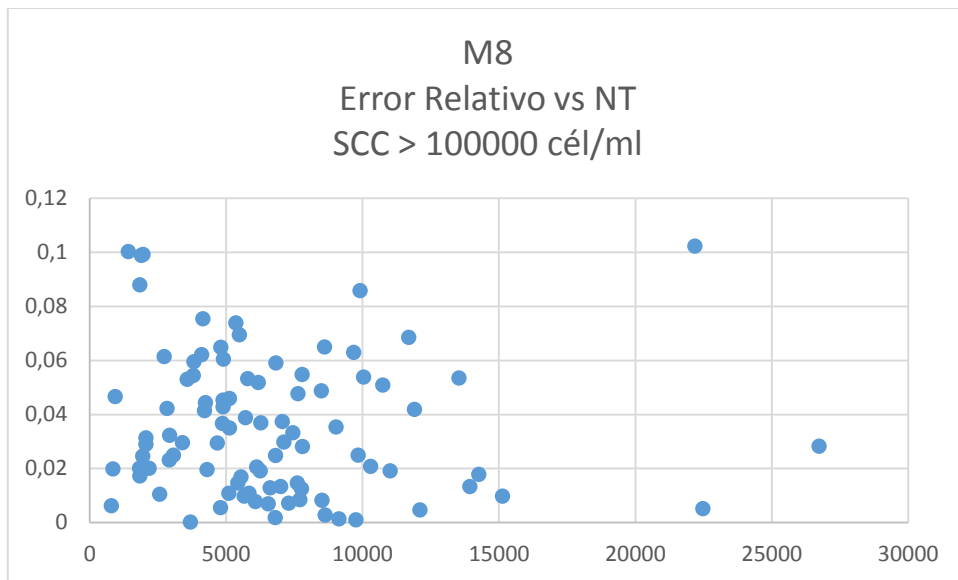


**Figura 4.51.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M8 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 100000 cél/ml**

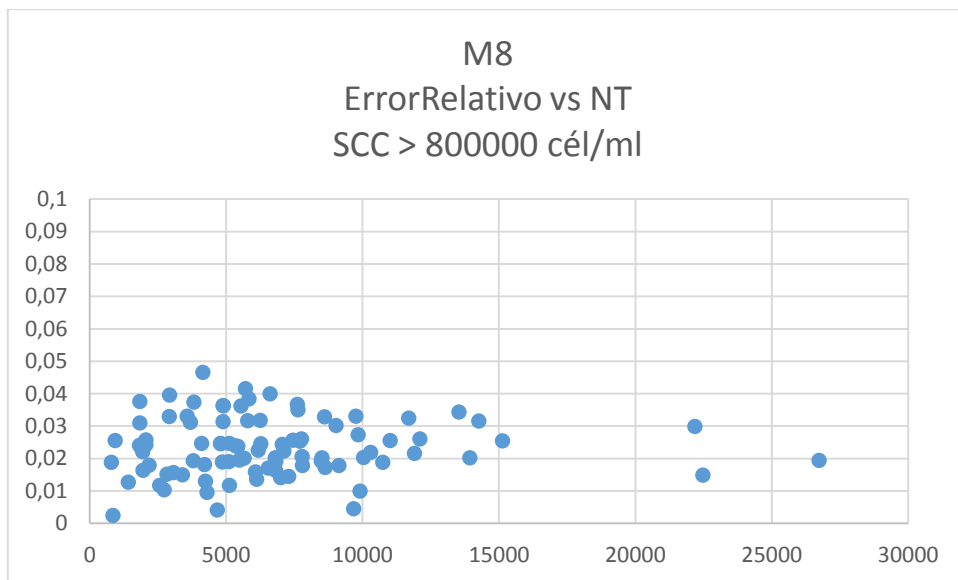


**Figura 4.52.- Valor del error relativo en función del Valor de Calidad para el modelo M8 y una predicción para el número de cabezas con recuento superior a 400000 cél/ml**

Al ser el modelo M8 un modelo logarítmico hay que realizar el análisis de la influencia del número de vacas de la instalación en el comportamiento del modelo. En la Figura 4.53 se representa el error relativo frente al número de cabezas de ganado de la instalación para predicciones del modelo para valores de SCC superiores a 100000 cél/ml. En la figura no se puede apreciar una relación significativa entre ambos parámetros ya que el punto que sobresale sobre la media es el de mayor valor de calidad ya analizado anteriormente. Esta inexistencia de relación entre el número de cabezas de ganado y el ámbito de utilización del modelo se confirma en la Figura 4.54 dónde no se aprecia incrementos significativos del error ni para valores altos ni para valores bajos del número de vacas en la granja.



**Figura 4.53.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M8 para valores de SCC > 100000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja**



**Figura 4.54.- Relación entre el error relativo producido por las predicciones del modelo M8 para valores de SCC > 800000 cél/ml y el número de cabezas de ganado de la granja**

Finalmente, resta analizar la linealidad entre el valor real de la granja y el valor estimado por el modelo.

Como se puede apreciar en las figuras 4.55, 4.56, 4.57 y 4.58 la no presencia de errores demasiado fuera de rango hace que el ajuste lineal sea muy bueno para los valores de SCC de 100000 y 200000 cél/ml, pero es excelente para los valores de SCC de 400000 y 800000 cél/ml ya que, además de que la pendiente es muy próxima a 1, el punto de corte con los ejes es también muy próximo a 0.

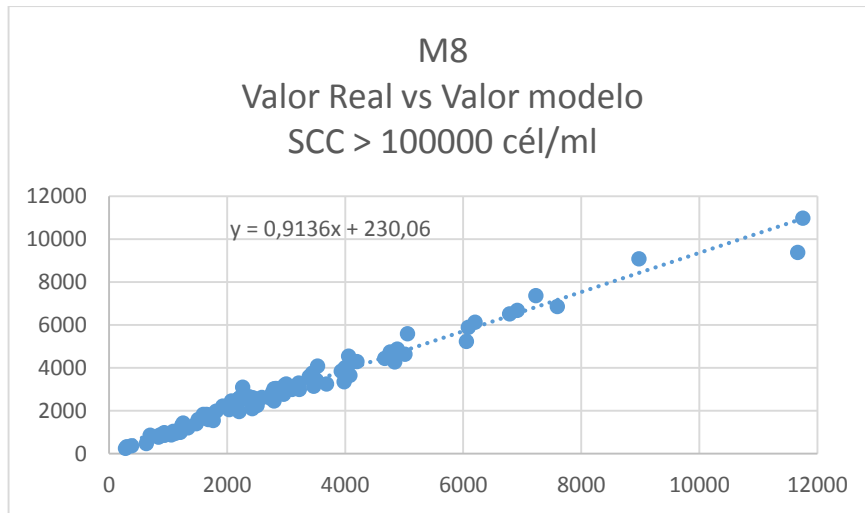


Figura 4.55.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M8 para valores de SCC > 100000 células/ml

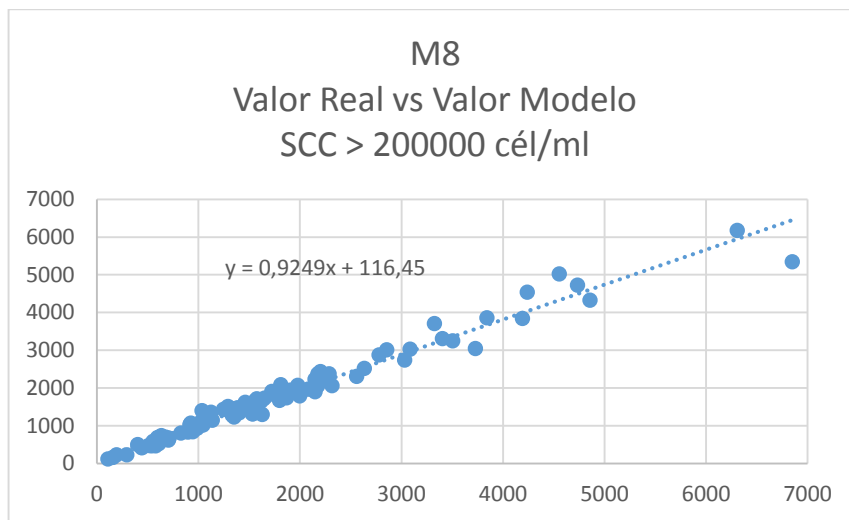


Figura 4.56.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M8 para valores de SCC > 200000 células/ml

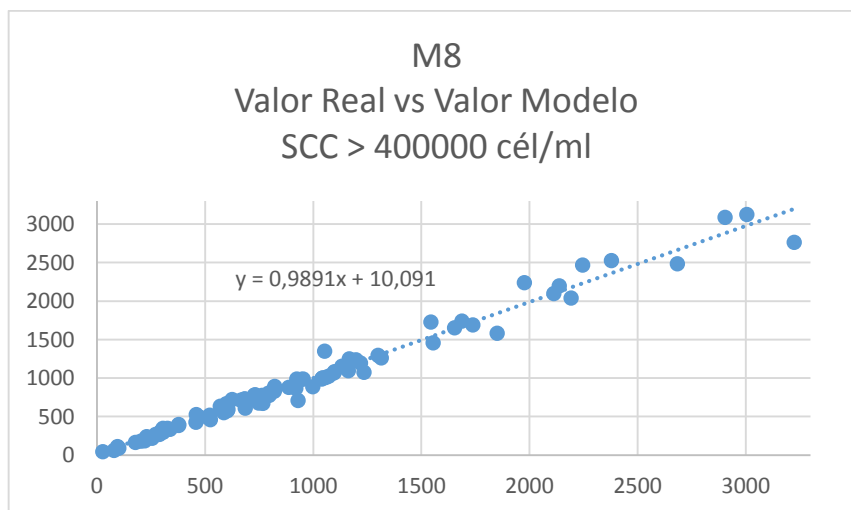
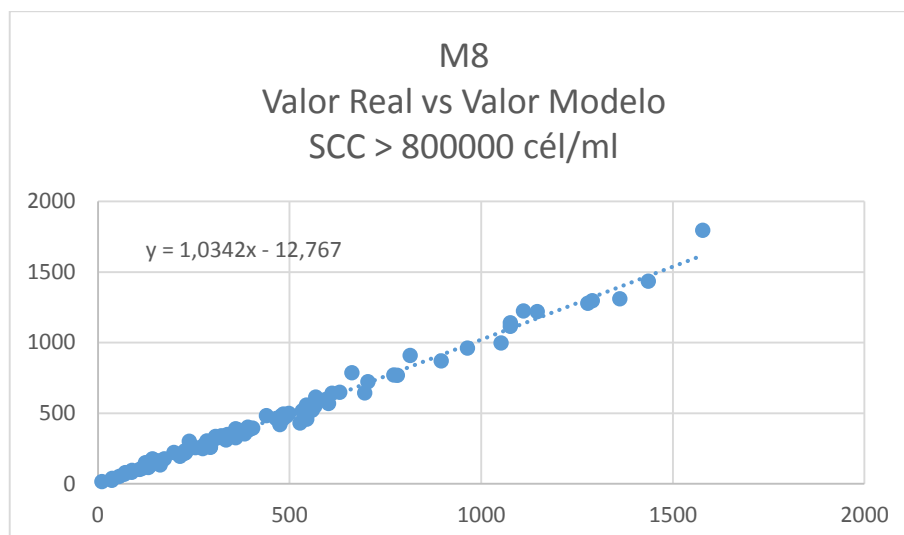


Figura 4.57.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M8 para valores de SCC > 400000 células/ml



**Figura 4.58.- Representación de valor real frente al valor predicho por el modelo M8 para valores de SCC > 800000 cél/ml**

### 4.3.3 Validación con controles lecheros

La prueba definitiva de los modelos construidos hasta ahora consiste en comprobar su funcionamiento con los controles lecheros mensuales como datos de entrada. En cada control lechero se dispone de la información de recuento de células somáticas de cada vaca y por tanto del valor BTSCC y es posible calcular la exactitud de las estimaciones de cada modelo.

La metodología a seguir para proceder la validación cruzada de cada modelo será la siguiente:

- Para cada granja, se calculará el modelo con los datos agrupados de las N-1 granjas restantes utilizando la función `lm` del programa estadístico R, como se hizo en la sección anterior.
- A cada modelo calculado, se le pasarán como parámetros de entrada los datos de cada uno de los controles lecheros disponibles para la granja evaluada, utilizando la función `predict` del programa R. Con la salida del modelo, se calcularán los errores absolutos y relativos cometidos por la estimación dada. Esos valores se almacenarán para su posterior análisis.

El total de valores obtenidos una vez ejecutado cada modelo con todos los controles lecheros mensuales disponibles es de 7968. La media del Valor de Calidad de los controles lecheros es  $QF=5,97$  con un valor máximo de  $QF=11,1$  y un valor mínimo de  $QF=1,896$ . En el caso del número de vacas por instalación, la media es de  $NT=77$  con un valor máximo de  $NT=210$  y un valor mínimo de  $NT=50$ .

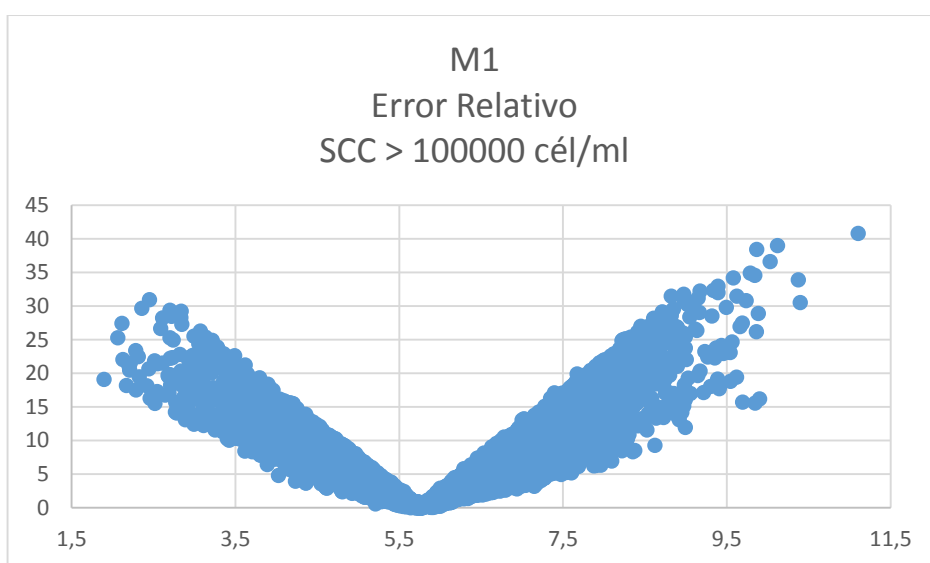
Los resultados obtenidos para los distintos modelos se muestran a continuación.

#### **Modelo M1**

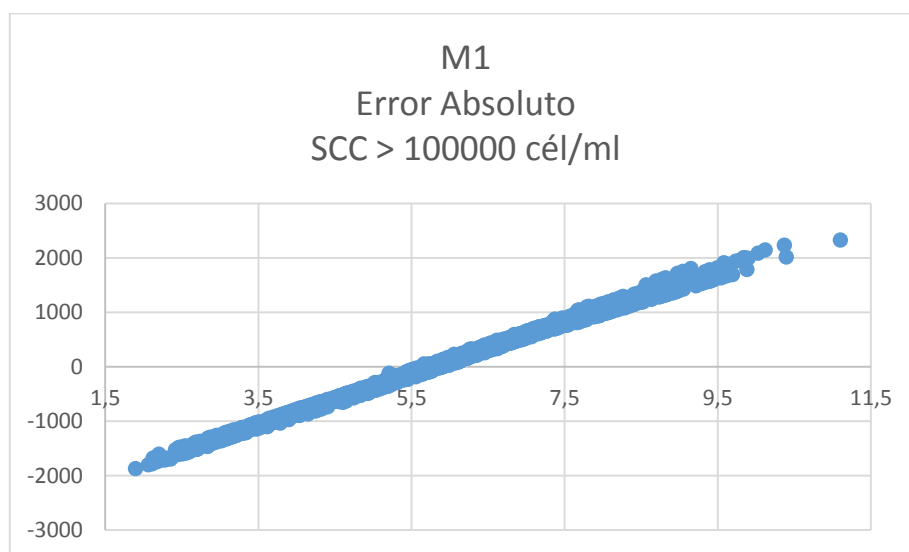
Los resultados del modelo M1 son muy malos. Al calcular el modelo con valores para el número de vacas por granja muy elevado y ser un modelo lineal muy simple, cuando se aplica a los distintos controles lecheros, en los cuales el número de cabezas controladas oscila entre las 50 y las 210, los resultados obtenidos difieren altamente de los valores reales. Otra diferencia fundamental entre los controles lecheros mensuales y los valores agrupados de cada

granja es el rango de variación de QF. En los valores agrupados de las granjas QF tiene una variación entre 3,5 y 8 mientras que para los controles lecheros mensuales la variación está entre 1,9 y 11,2. La explicación de esta diferencia en la variación de QF tan sustancial estriba en el hecho de que los controles lecheros, al ser un muestreo mensual y con un relativamente bajo número de cabezas de ganado, está sujeto a posibles grandes variaciones por posibles episodios de epidemia dentro de la instalación en el caso de los valores bajos de QF, o por periodos más o menos prolongados de baja incidencia de las infecciones intramamarias y buen manejo general en la granja.

En la Figura 4.59 se puede ver que la respuesta del error relativo frente al QF es muy mala con unos errores que superan ampliamente el 100%. Se puede apreciar que el error relativo evoluciona desde grandes valores, disminuyen y pasan por cero en una zona próxima a 5,5 y luego volver a crecer. Este comportamiento es fácilmente explicable por la linealidad del modelo sin más que observar dónde se muestra la evolución del error absoluto cometido por el modelo como se ve en la Figura 4.60



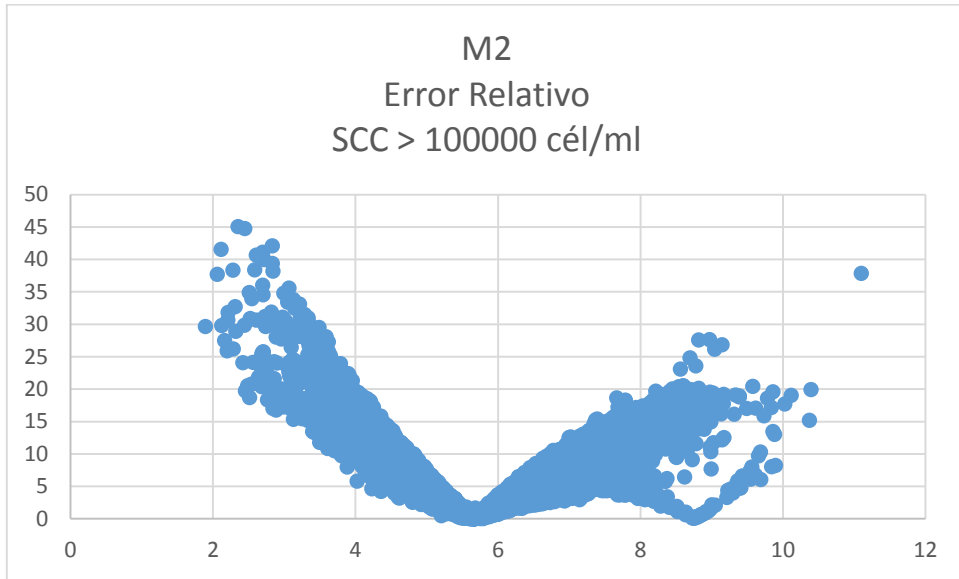
**Figura 4.59.- Error relativo del modelo M1 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales.**



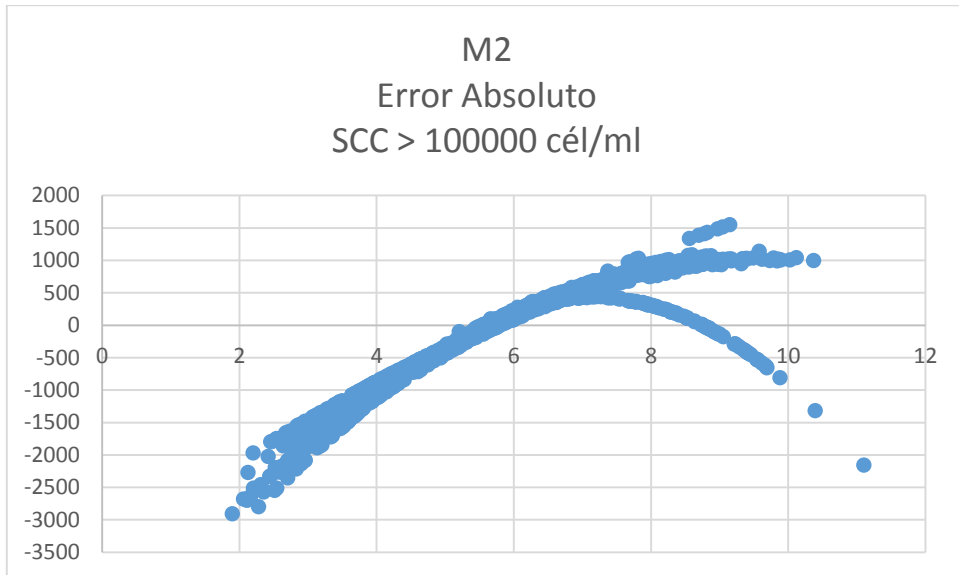
**Figura 4.60.- Evolución lineal del error absoluto del modelo M1 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales**

**Modelo M2**

El modelo M2 tiene los mismos problemas que el modelo M1 y presenta unos valores del error relativo inaceptables cuando se aplica a controles lecheros mensuales. Se puede comprobar en la Figura 4.61 la distribución del error y los valores tan elevados que presenta. A diferencia del modelo M1, el modelo M2 presenta dos pasos por cero que son fácilmente explicables por el polinomio de segundo grado aplicado a QF para el cálculo del modelo. En la donde se muestra la distribución del error absoluto cometido por el modelo, se puede apreciar mucho mejor el efecto del polinomio de segundo grado.



**Figura 4.61.- Error relativo del modelo M2 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales.**

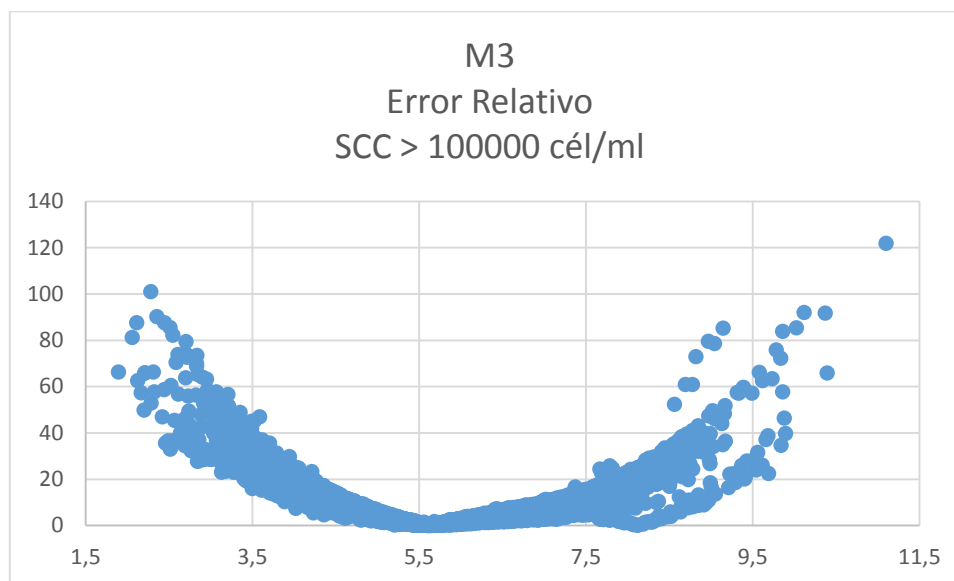


**Figura 4.62.- Evolución lineal del error absoluto del modelo M2 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales**



### **Modelo M3**

El polinomio de tercer grado aplicado a QF en el modelo M3 permite aumentar la zona en la que el error permanece próximo a cero pero, a cambio, los valores máximos se incrementan fuertemente. En la Figura 4.63 se puede apreciar la distribución del error relativo y el mal funcionamiento del modelo M3 con controles lecheros mensuales.



**Figura 4.63.- Error relativo del modelo M3 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales**

### **Modelo M4**

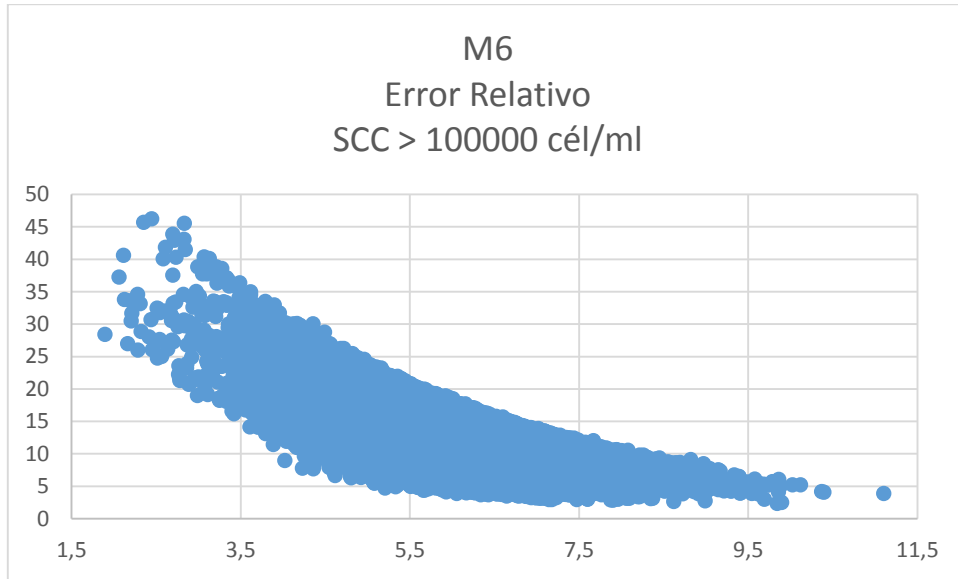
El modelo M4, al igual que el resto de los modelos lineales anteriores, presenta unos niveles de error muy elevados que lo hacen inusable cuando la entrada son datos con estructura similar a los controles lecheros mensuales. La distribución del error relativo es muy similar a la que presenta el modelo M1 con prácticamente el 90% de las estimaciones superando un error relativo del 100%.

### **Modelo M5**

El modelo M5, al plantear un polinomio de segundo grado para el término de QF, presenta una distribución del error relativo respecto al Valor de Calidad idéntica a la que presenta el modelo M2. Al igual que dicho modelo, los valores del error son inaceptables ya que el 90% de las estimaciones tiene un error relativo superior al 100% por lo que lo hace inaplicable cuando los datos de entrada son similares a los que presentan los controles lecheros mensuales.

### **Modelo M6**

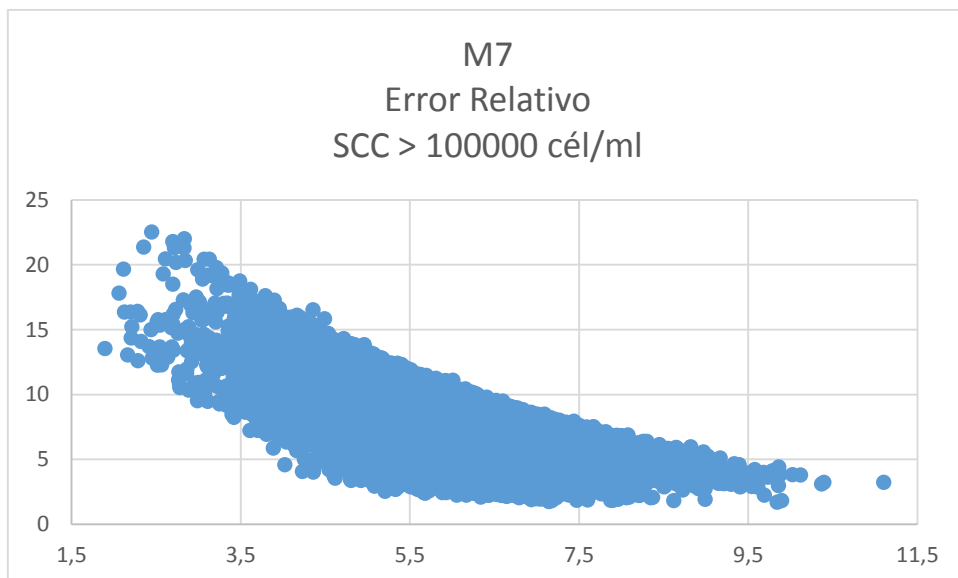
El modelo M6 es el primero de los logarítmicos y se caracteriza por presentar unos errores absolutos muy elevados cuando se valida con datos similares a los utilizados para calcular el modelo. Cuando los datos utilizados para la validación son los procedentes del control lechero mensual, los errores permanecen siendo muy altos. En la Figura 4.64 se puede ver la distribución del error en función de QF y en la misma se puede apreciar que el error nunca desciende de valores muy elevados. En concreto, el 100% de las estimaciones tienen un error relativo superior al 200%. Lógicamente, estos niveles de error hacen al modelo M6 inutilizable para valores de entrada similares a los producidos por los controles lecheros mensuales.



**Figura 4.64.- Error relativo del modelo M6 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales**

**Modelo M7**

Los resultados del modelo M7 se pueden catalogar como “menos malos” respecto a los modelos anteriores ya que, aunque no mejora la precisión del modelo y presenta errores relativos muy altos, al menos estos errores no son tan elevados como en los modelos anteriores. Se puede comprobar en la Figura 4.65 como los errores máximos no son tan elevados como en modelos anteriores a pesar de que los errores mínimos superan ampliamente el 100% de error. Como en los casos anteriores, este modelo no resulta adecuado cuando debe estimar valores de rango similar a los producidos en los controles lecheros mensuales.



**Figura 4.65.- Error relativo del modelo M7 en función de QF cuando se aplica a controles lecheros mensuales**

### **Modelo M8**

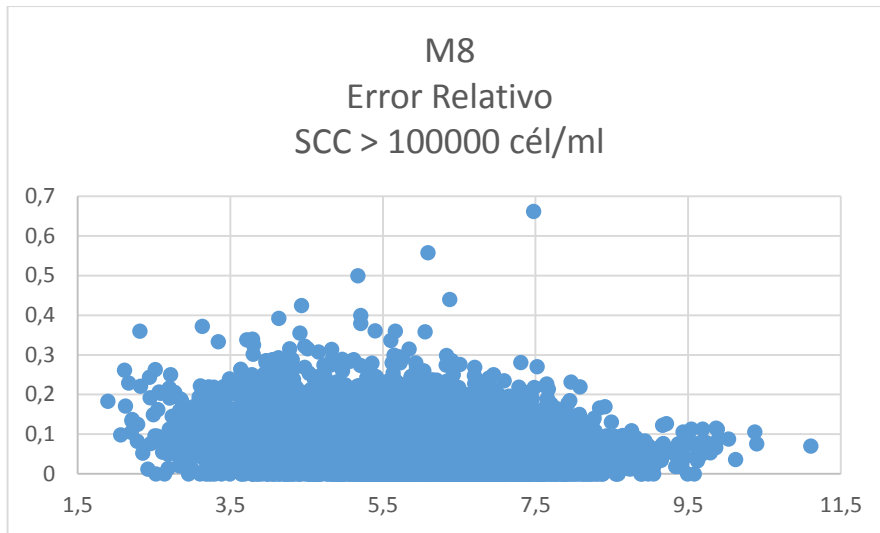
El modelo M8 es el que mejores resultados presentaba cuando la entrada consistía en los datos agrupados de cada granja. Al introducirle los datos mensuales del control lechero, el modelo M8 no sólo presenta de nuevo los mejores resultados sino que los resultados son usables ya que mantiene un nivel de error aceptable. En la Tabla 4.16 se muestran los porcentajes de estimaciones del modelo que se encuentran por debajo de los niveles de error tomados como referencia en la sección anterior. Se puede ver que, aunque la respuesta no es tan buena como la que mostraba este mismo modelo en la Tabla 4.15, sí que se puede considerar muy buena puesto que la disparidad de valores entre los datos con los que se ha alimentado el modelo y los datos con los que se ha generado es muy grande. Los resultados de la Tabla 4.16 no admiten comparación alguna con los modelos precedentes puesto que si estos apenas podían ofrecer resultados por debajo del 200% de error, el modelo M8 ofrece prácticamente el 99% de sus estimaciones por debajo de un 30% de error relativo para todos los niveles de SCC, alcanzando un nivel del 91% de las respuestas por debajo del 5% de error para el umbral de  $SCC > 800000$  cél/ml.

**Tabla 4.16.- Porcentaje de predicciones del modelo M8 que se encuentran por debajo del nivel de error indicado cuando la entrada al modelo son los datos mensuales del control lechero. Valores de la tabla en porcentajes y valores de SCC en miles de células por  $\mu$**

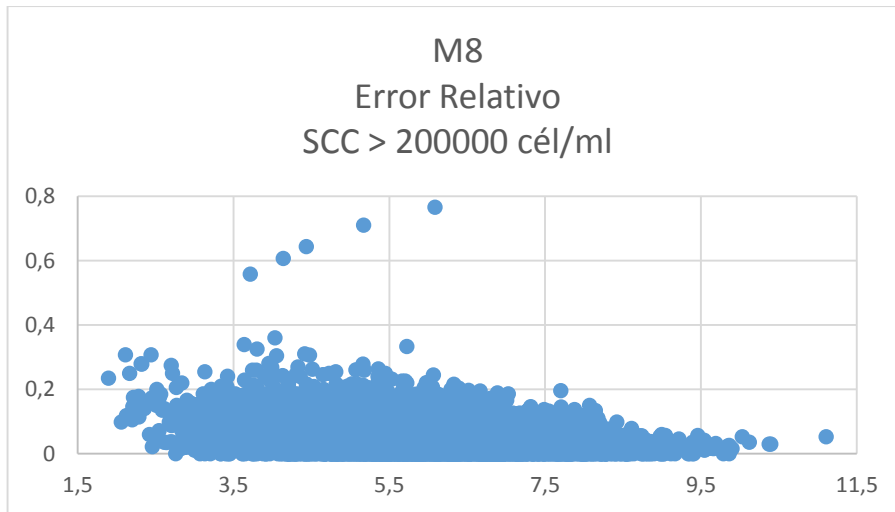
<b>Nivel de error</b>	<b>SCC &gt; 100</b>	<b>SCC &gt; 200</b>	<b>SCC &gt; 400</b>	<b>SCC &gt; 800</b>
< 5%	42,95	55	69,2	91,5
< 10%	74,73	85,16	94,58	99,5
< 15%	90,32	95,47	99,11	99,5
< 30%	99,64	99,8	99,91	99,98
> 50%	0,062	0,1	0,06	0,03

En la Figura 4.66 se aprecia la distribución del error relativo producido por el modelo M8 en función de QF. Se puede ver que los valores máximos del error están contenidos por debajo de 1 y que una cantidad apreciable de las estimaciones se encuentra por debajo del nivel del 10%. En la Figura 4.67 se puede comprobar la existencia de 5 puntos que elevan a valores anormales la distribución del error relativo del modelo. Esos puntos están provocados por la ganadería etiquetada como GAN2893 que posee, para esos controles lecheros, una distribución poco usual, ya que todas o casi todas las cabezas de ganado se encuentran con un nivel de recuento de células somáticas superior a 200000 cél/ml, pero en el siguiente umbral considerado, el nivel de 400000 cél/ml, o bien todas las muestras lo superan o bien una gran cantidad no lo supera para ya, en el umbral de las 800000 cél/ml, apenas tener vacas que lo superan. Está claro que el modelo tiene problemas para estimar un perfil celular de la granja con valores extremos en casi todos los umbrales considerados.

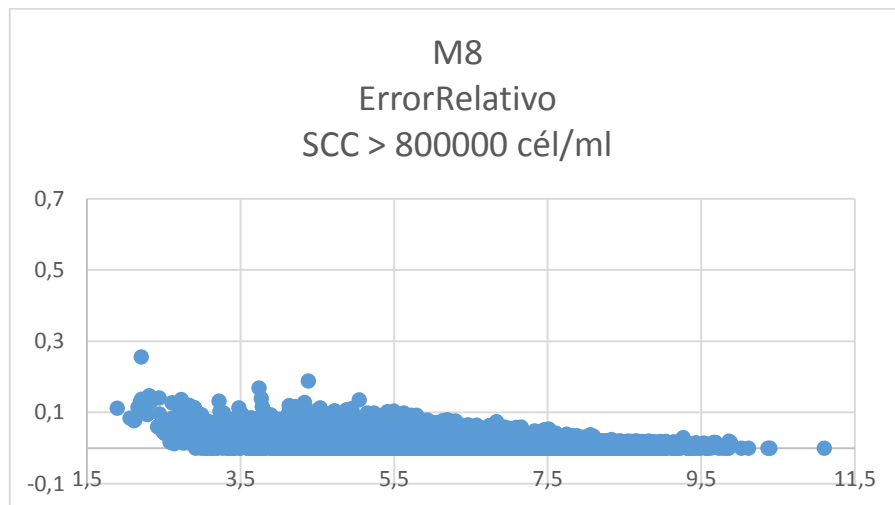
En la Figura 4.68 se aprecia que el error relativo tiene un comportamiento aceptable para valores del recuento celular superior a 800000 cél/ml.



**Figura 4.66.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 100000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales**



**Figura 4.67.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 200000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales**



**Figura 4.68.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 800000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales**

Analizando la relación entre el valor real del control lechero mensual y el valor estimado por el modelo podemos construir la Figura 4.69 en la que se aprecia que el mayor número de puntos usados para construirla (más de 7000) hace que la linealidad se resienta convirtiendo la línea recta en una nube de puntos con una pendiente inferior a 1. En la Figura 4.70 se comprueba que para valores mayores de recuento celular (en la figura superiores a 400000 cél/ml), aunque el error relativo se hace superior y aparece una densa nube de punto en torno al cero y la línea de pendiente 1, la dispersión de los puntos hace que la nube inicial se separe y los puntos más alejados tengan un gran peso en la ecuación de regresión haciendo que la relación lineal entre el valor real y el estimado aparezca de peor calidad.

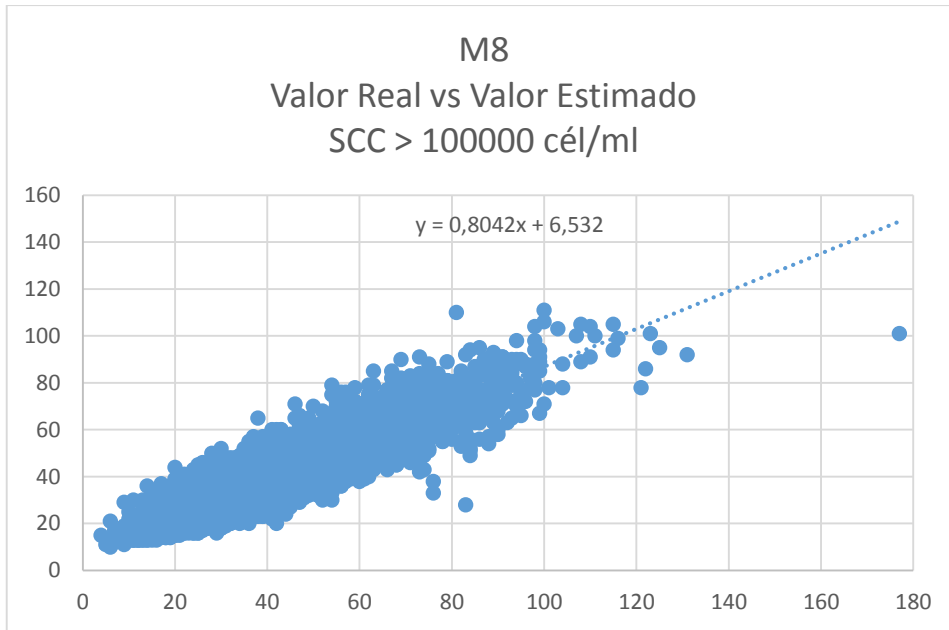


Figura 4.69.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 100000 cél/ml

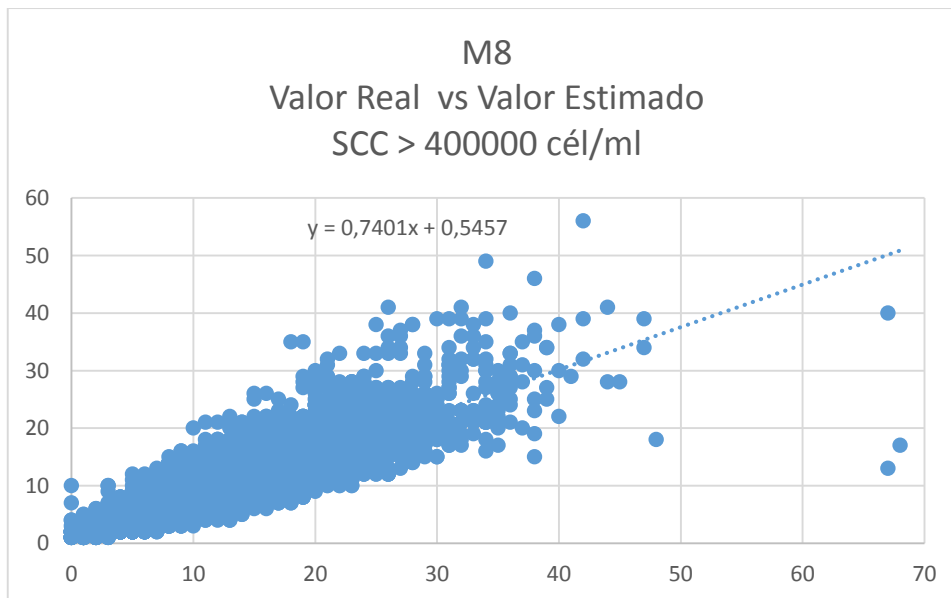


Figura 4.70.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 400000 cél/ml

## 4.4 Caso 2: modelo basado en controles lecheros

En la sección anterior se ha puesto de evidencia que el modelo global, en el que se totalizan todos los datos disponibles de cada granja antes de usarlos para calcular el modelo, adolece del problema fundamental de la enorme diferencia entre el valor del número de vacas por granja utilizado en el cálculo del modelo y el número real de vacas que hay en cada una de las granjas a las que se le va a aplicar. Una manera de reducir esa diferencia entre los datos con los que se calcula el modelo y los datos con los que se va a utilizar, es utilizar para realizar el cálculo de los parámetros del modelo los datos mensuales de control lechero y considerar cada una de esas muestras como si fuera una granja independiente.

Para el cálculo de los parámetros del nuevo modelo utilizaremos cada uno de los controles lecheros mensuales suministrados por la cooperativa ASCOL como si fuera una muestra de una granja independiente. Se dispone de 7968 controles lecheros válidos con una media de 77 vacas por control y con valor medio del QF de 5,97. El cálculo de cada modelo se ha realizado utilizando la función `lm` del paquete estadístico R y se han obteniendo los parámetros del modelo así como el valor del ajuste cuadrático  $R^2$  utilizando la función `summary` del mismo paquete estadístico. La función `summary`, cuando se le suministra como entrada el resultado de la función `lm`, retorna los coeficientes del modelo así como los parámetros estadísticos básicos que permiten verificar la bondad del ajuste lineal.

Una vez realizados los cálculos, se obtienen los valores del parámetro de ajuste lineal  $R^2$  que se muestran en la Tabla 4.17.

**Tabla 4.17.- Valores de R2 para los modelos evaluados y para los distintos valores de recuento de células somáticas en [cél/μl].**

Modelo	SCC > 100	SCC > 200	SCC > 400	SCC > 800
$N = A * NT + B * QF + C$	0,8098	0,7473	0,7283	0,7177
$N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D$	0,8098	0,7508	0,7438	0,7561
$N = A * NT + B * QF + C * QF^2 + D * QF^3 + E$	0,8099	0,7509	0,7438	0,7563
$N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$	0,8101	0,7486	0,7305	0,7197
$N = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D * QF^2 + E$	0,8102	0,7520	0,7455	0,7573
$Log(N) = A * NT + B * QF + C$	0,7656	0,7434	0,7524	0,7548
$Log(N) = A * NT + B * NT^2 + C * QF + D$	0,7861	0,7579	0,7620	0,7590
$Log(N) = A * log(NT) + B * QF + C$	0,7851	0,7567	0,7618	0,7593

Comparando los resultados con los obtenidos en la Tabla 4.2 se puede apreciar un empeoramiento general del ajuste en todos los modelos y, en algunos que han respondido especialmente bien como el modelo M8, el empeoramiento es muy apreciable convirtiéndolo en el segundo peor modelo, sólo detrás del modelo M6.

Estos números tan bajos del parámetro  $R^2$  respecto al modelo calculado con los datos totalizados de las granjas pueden ser explicados por el número de puntos utilizados para realizar el cálculo del modelo. En el primer caso, al totalizar todos los muestreos de cada

granja y convertirlo en una única entrada, el modelo se construyó con 92 puntos que son relativamente fáciles de alinear. En este segundo caso, al utilizar cada uno de los muestreos de control lechero como un punto válido para construir el modelo, se dispone de 7968 puntos para construir el modelo, lo que constituye una nube de posibles valores más difíciles de aproximar con cualquier ajuste, aunque posiblemente den lugares a salidas del modelo más afinadas.

#### **4.4.1 Validación del modelo basado en controles lecheros**

Para validar los modelos se utilizará la metodología de la validación cruzada. Para realizar la validación de un modelo utilizando la validación cruzada se calcula el modelo con las  $n-1$  muestras disponibles y, una vez calculado, se le aplica el modelo a la muestra restante. Con los valores estimados por el modelo para esa muestra y los valores reales de la misma, se pueden calcular los errores cometidos por el modelo. Repitiendo el proceso para todas las muestras disponibles se obtienen  $n$  valores de error que permiten evaluar la eficacia del modelo.

Aunque, tal y como se ha planteado en las premisas para realizar el cálculo del modelo, todos los valores de cada uno de los controles lecheros mensuales se consideran independientes, para realizar la validación se va a considerar el factor “granja” y se validaran los distintos controles agrupados por la granja a la que pertenecen. De esta manera, la metodología anteriormente comentada varía ligeramente. El proceso de validación consistirá en la siguiente operativa:

- Del conjunto total de controles lecheros mensuales disponibles (espacio de  $n$  muestras) se separan los  $m$  controles lecheros de una granja concreta.
- Con los  $n-m$  controles restantes se calculan los parámetros del modelo utilizando la función `lm` del paquete estadístico R.
- Una vez calculados los parámetros del modelo, usando la función `predict` del paquete estadístico R, se le aplica el modelo a los  $m$  controles de la granja seleccionada.
- Con los  $m$  valores estimados por el modelo y los  $m$  valores reales de los controles lecheros mensuales, se calculan los errores cometidos por el modelo para estimar los puntos correspondientes a esa granja.
- Se repite el proceso para cada una de las 92 granjas de las que se disponen controles lecheros mensuales para obtener 7968 puntos de evaluación que serán posteriormente analizados.

La diferencia entre la metodología de validación agrupada por granjas o la metodología considerando cada control completamente independiente difiere básicamente en el número de puntos utilizados para realizar el cálculo de los parámetros del modelo. En el segundo caso, el número de puntos utilizado en todos y cada uno de los controles es de  $n-1$  siendo  $n = 7968$ . Para el primer caso, el número de puntos utilizados para calcular cada modelo difiere y se calculará con la fórmula  $n - m_i$ , siendo  $m_i$  el número de controles disponibles para la granja  $i$ . Para evaluar si los resultados con una u otra metodología eran muy dispares se realizaron cálculos con uno y otro método y los valores diferían en apenas un 0,1% por lo que se ha optado por mantener la abstracción de la “granja” en la validación de los resultados.

#### 4.4.2 Resumen de resultados de validación

En las tablas 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 se muestran los porcentajes de las estimaciones de cada modelo para el número de vacas que se encuentran por encima de los umbrales de células somáticas de 100000, 200000, 400000 y 800000 cél/ml respectivamente y que se encuentran dentro del porcentaje de error definido. En esta ocasión, debido a la mejora sustancial de los errores cometidos por todos los modelos cuando se aplica a datos de entrada similares a los producidos por los controles lecheros mensuales, se han estimado unos porcentajes de error más ajustados que los considerados en la validación del modelo basado en datos agrupados. Ahora se analizarán los resultados para estimaciones exactas (porcentaje de error igual a cero), estimaciones con un error relativo inferior al 2%, 5%, 10% y, finalmente, un porcentaje de error superior al 20% para controlar los casos más alejados de los valores reales. El modelo M8 es el único para el que se han extraído datos concretos del error cometido por sus estimaciones cuando se calculan los parámetros del modelo usando datos agrupados y se aplican a datos de control lechero mensual. En la Tabla 4.18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los porcentajes de estimaciones por debajo de los errores relativos considerados como referencia y se puede comprobar que sus resultados son de inferior calidad a los que se obtienen utilizando el modelo calculado usando los datos de control lechero agrupados.

Analizando las tablas se puede comprobar que los modelos polinómicos son, en general, peores que los modelos que contienen algún término logarítmico, en especial el modelo M5 es el segundo peor de todos los modelos para las estimaciones en el umbral de SCC > 100000 cél/ml y los modelos M1 y M4 son los peores modelos para el resto de umbrales donde obtienen los peores valores de error para las estimaciones realizadas. En el caso de los modelos con términos logarítmicos, el modelo M6 es el peor de todos los modelos para umbrales de SCC > 100000 cél/ml pero luego recupera capacidad de precisión en sus estimaciones y es el tercer mejor modelo para los umbrales de 200000, 400000 y 800000 cél/ml siendo los dos mejores los modelos M7 y M8.

Está clara que la superioridad de los modelos con términos logarítmicos en su formulación parece indicar la existencia de una relación logarítmica subyacente entre el número de cabezas de ganado con un recuento celular superior a un umbral determinado y el Valor de Calidad definido en función del BTSCC.

Los dos mejores modelos atendiendo al nivel de error relativo producido son, sin discusión posible, los modelos M7 y M8, ambos con términos logarítmicos. Excepto para la estimación exacta del número de vacas con un umbral de SCC superior a 100000 cél/ml, que es mejor la del modelo M3 por un 0,19%, para el resto de umbrales de recuento celular y valores de error relativo, las estimaciones de los modelos M7 y M8 siempre se encuentran en la primera o segunda posición diferenciándose por unas pocas décimas porcentuales entre sí.

Debido a esta clara diferenciación de los modelos M7 y M8 del resto de modelos, se va a proceder a realizar un análisis más exhaustivo de los resultados de ambos modelos.



**Tabla 4.18.- Porcentaje de muestras de cada modelo que se encuentran en los niveles de error relativo de referencia para un valor del SCC > 100000 cél/ml**

<b>Umbral Error SCC &gt; 100</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
= 0%	6,50	6,40	6,55	6,12	6,17	5,95	6,22	6,36
< 2%	19,44	19,43	19,44	19,39	19,35	18,96	20,28	20,32
< 5%	42,04	42,09	41,93	41,78	41,89	40,74	43,16	43,4
< 10%	73,33	73,34	73,41	73,03	73,02	72,39	75,10	75,01
>20%	3,34	3,33	3,34	3,31	3,34	3,99	2,90	2,91

**Tabla 4.19.- Porcentaje de muestras de cada modelo que se encuentran en los niveles de error relativo de referencia para un valor del SCC > 200000 cél/ml**

<b>Umbral Error SCC &gt; 200</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
= 0%	8,17	8,66	8,67	8,52	8,79	8,99	9,2	9,5
< 2%	25,72	26,84	26,84	25,4	26,42	27,69	29,05	28,83
< 5%	54,34	54,82	54,76	53,83	54,29	56,56	59,1	58,76
< 10%	85,22	85,89	85,82	85,25	85,75	86,43	87,8	87,79
>20%	0,92	0,93	0,93	0,82	0,94	0,97	0,83	0,84

**Tabla 4.20.- Porcentaje de muestras de cada modelo que se encuentran en los niveles de error relativo de referencia para un valor del SCC > 400000 cél/ml**

<b>Umbral Error SCC &gt; 400</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
= 0%	13,69	14,81	14,88	14,17	14,34	15,52	16,03	16,16
< 2%	41,6	43,88	43,91	40,85	42,72	45,73	47,2	47,45
< 5%	75,97	77,54	77,45	75,69	77,12	79,47	80,45	80,45
< 10%	96,34	96,52	96,52	96,66	96,7	96,77	97,04	97,01
>20%	0,14	0,13	0,13	0,14	0,1	0,13	0,14	0,14

**Tabla 4.21.- Porcentaje de muestras de cada modelo que se encuentran en los niveles de error relativo de referencia para un valor del SCC > 800000 cél/ml**

<b>Umbral Error SCC &gt; 800</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>
= 0%	22,52	26,12	26,29	22,6	25,55	27,1	27,38	27,36
< 2%	62,9	67,37	67,34	62,83	67,02	69,39	69,75	69,7
< 5%	92,27	93,95	93,93	92,58	93,91	94,45	94,52	94,58
< 10%	99,5	99,51	99,51	99,51	99,55	99,56	99,61	99,64
>20%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

### **Resultados de validación del modelo M7**

En la Figuras 4.71, 4.72, 4.73 y 4.74 se muestra la distribución del error relativo producido en las estimaciones del modelo M7 respecto al Valor de Calidad. Se puede apreciar que, salvo la presencia de algunos valores sueltos ocasionados por granjas con perfil celular poco habitual (todas las vacas por encima de uno o de varios umbrales), el 97% de las estimaciones para el caso de recuento celular superior a 100000 cél/ml y el 99% para el resto de umbrales celulares

se encuentran por debajo del límite de error relativo del 20%, acercándose cada vez más a cero cuanto mayor es el umbral de células somáticas llegando a tener un 99% de las estimaciones con un error inferior al 8% en el umbral de 800000 cél/ml.

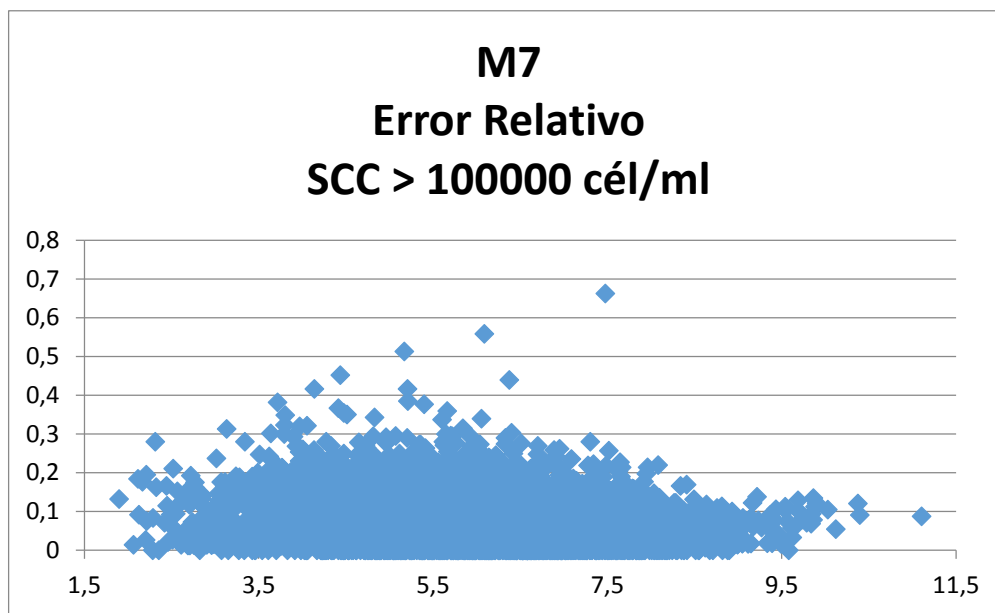


Figura 4.71.- Error relativo del modelo M7 en función de QF para valores de SCC > 100000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

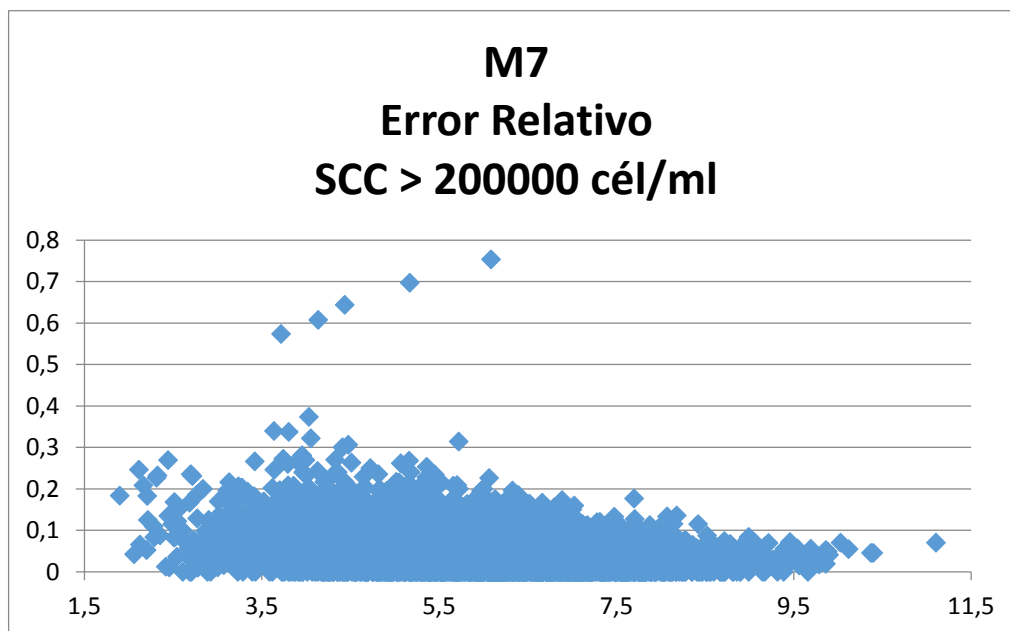


Figura 4.72.- Error relativo del modelo M7 en función de QF para valores de SCC > 200000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

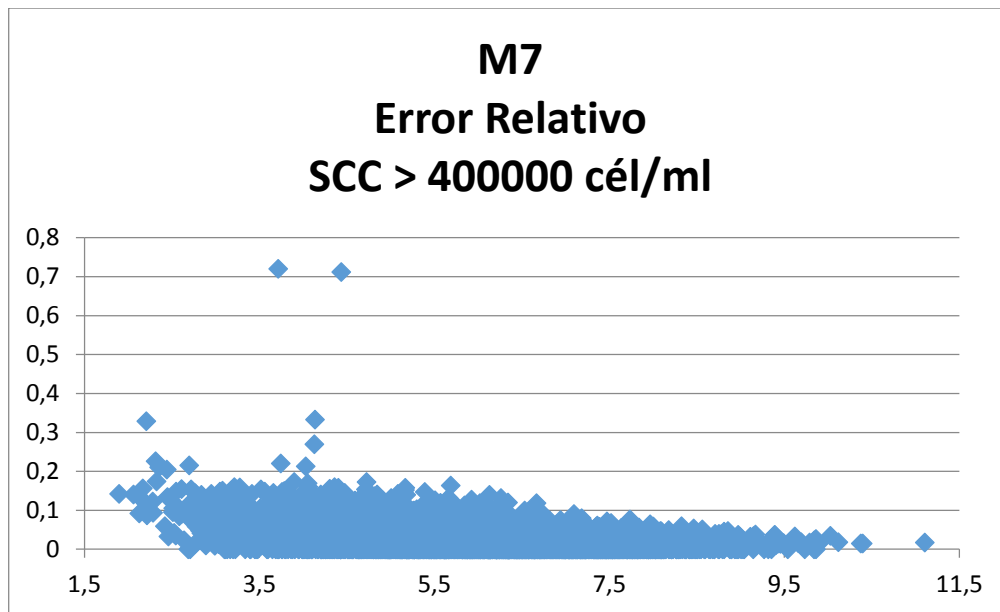


Figura 4.73.- Error relativo del modelo M7 en función de QF para valores de SCC > 400000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

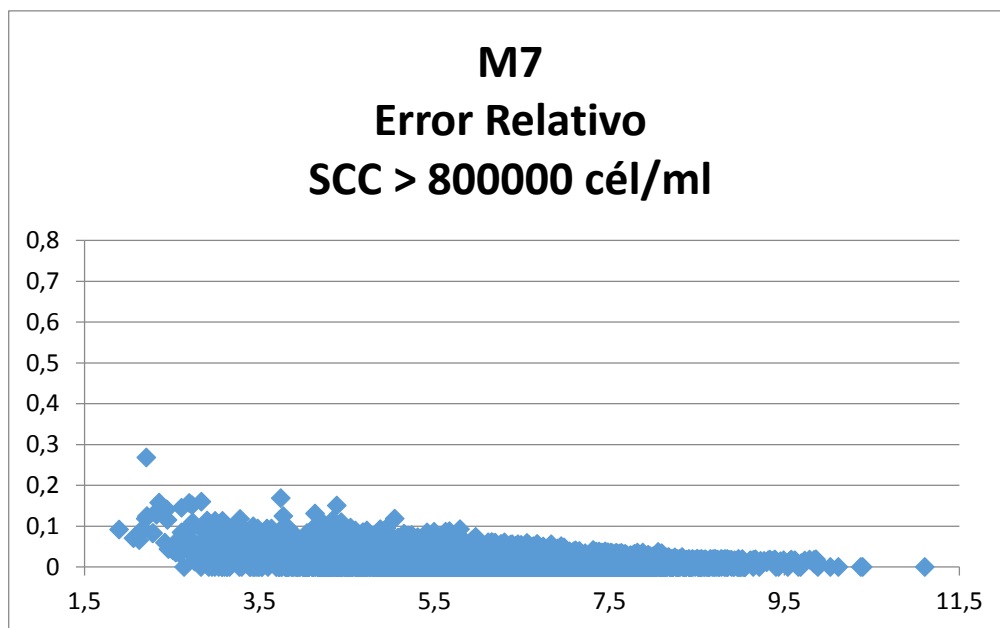


Figura 4.74.- Error relativo del modelo M7 en función de QF para valores de SCC > 800000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

En las figuras no se aprecia ninguna dependencia o variación significativa de las estimaciones respecto al valor de QF ofreciendo el modelo M7 unos resultados equilibrados a lo largo de todo el rango de QF presente en las muestras.

En las Figuras 4.75, 4.76, 4.77 y 4.78 se muestra la relación lineal entre el valor real con el que se alimentó al modelo y el valor estimado por él. Se puede comprobar como la gran cantidad de muestras disponibles (7968 controles lecheros mensuales) convierten la recta en una nube de puntos alrededor de una línea de tendencia rectilínea. Viendo las ecuaciones de las líneas de tendencia que representan los puntos en cada una de las figuras se comprueba que la pendiente de la línea se mantiene más o menos constante a lo largo de los distintos umbrales de recuento celular, pero el punto de intersección con el eje vertical se aproxima

cada vez más a cero con el incremento de recuento celular, lo cual coincide con la mejora en el error relativo cometida por las estimaciones para altos valores de SCC.

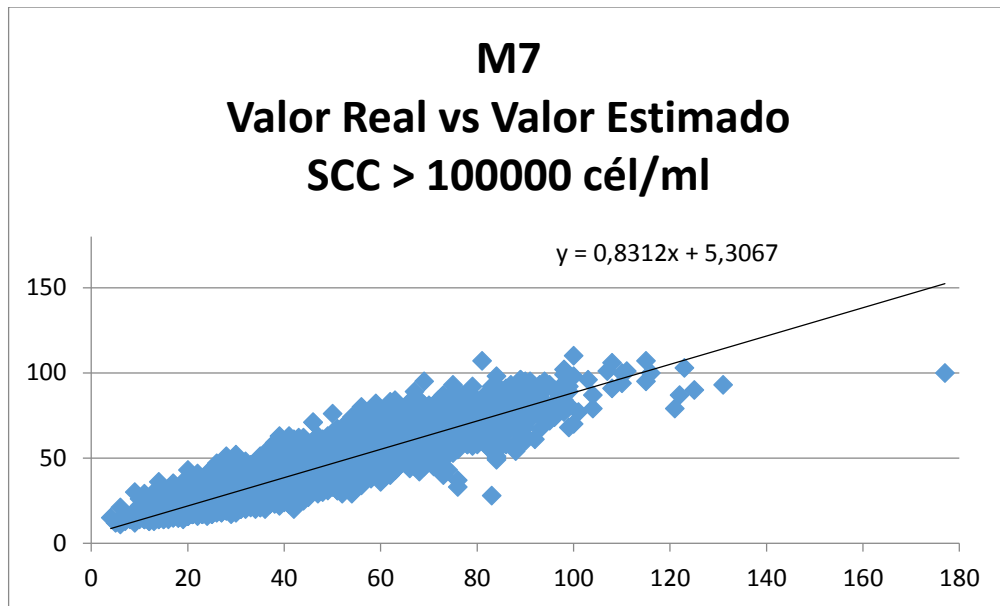


Figura 4.75.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M7 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 100000 cél/ml

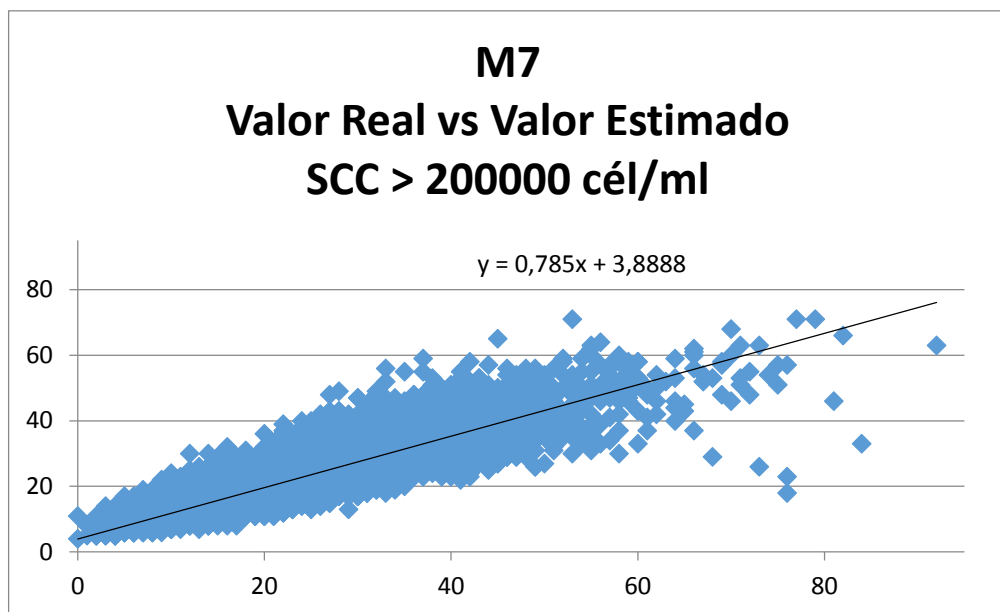


Figura 4.76.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M7 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 200000 cél/ml

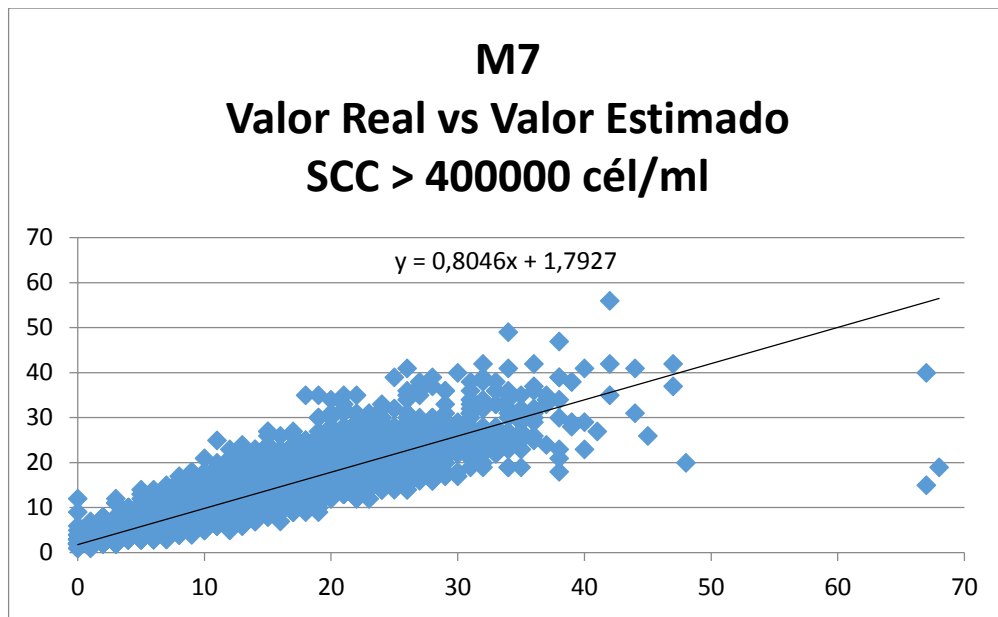


Figura 4.77.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M7 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 400000 cél/ml

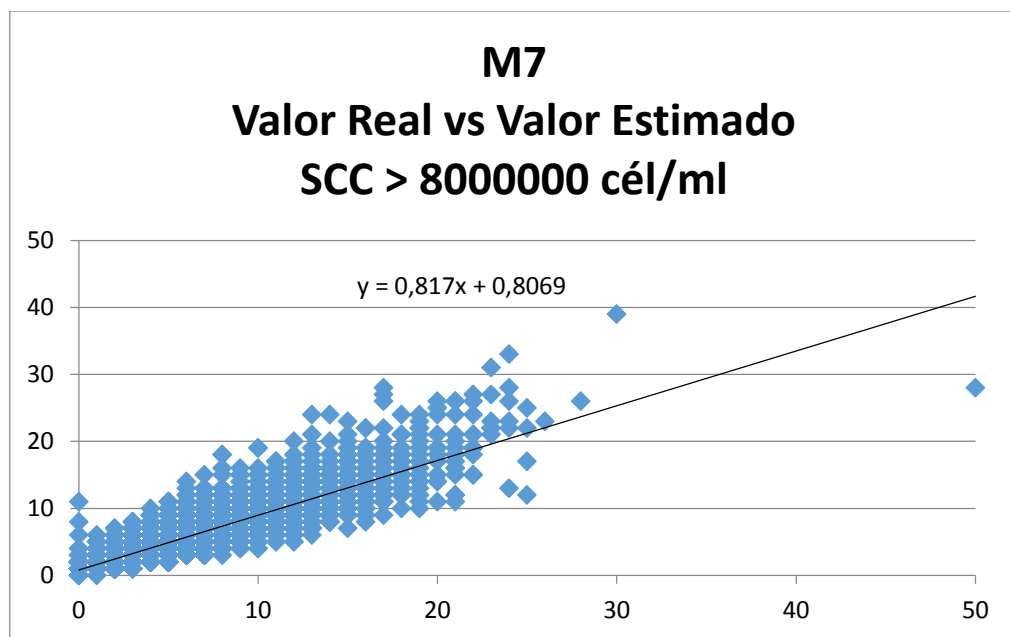


Figura 4.78.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M7 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 8000000 cél/ml

**Resultados de validación del modelo M8**

En la Figuras 4.79, 4.80, 4.81 y 4.82 se muestra la distribución del error relativo respecto al Valor de Calidad para las estimaciones del modelo M8 para distintos valores del umbral de células somáticas. Como en el caso del modelo M7, se puede apreciar la presencia de algunos valores sueltos con alto valor del error relativo ocasionados por granjas con distribuciones extrañas de la ganadería (todas las vacas por encima de uno o de varios umbrales). A excepción de esos valores, de nuevo el 97% de las estimaciones para el caso de recuento celular superior a 100000 cél/ml y el 99% para el resto de umbrales celulares se encuentran

por debajo del límite de error relativo del 20%, acercándose cada vez más a cero cuanto mayor es el umbral de células somáticas llegando a tener un 99% de las estimaciones con un error inferior al 8% en el umbral de 800000 cél/ml.

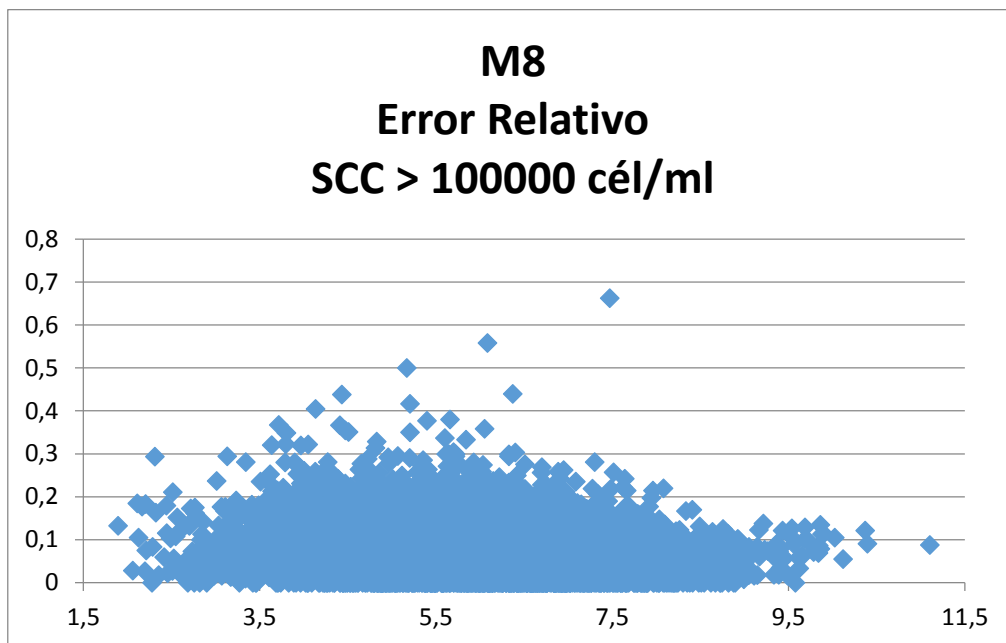


Figura 4.79.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 100000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

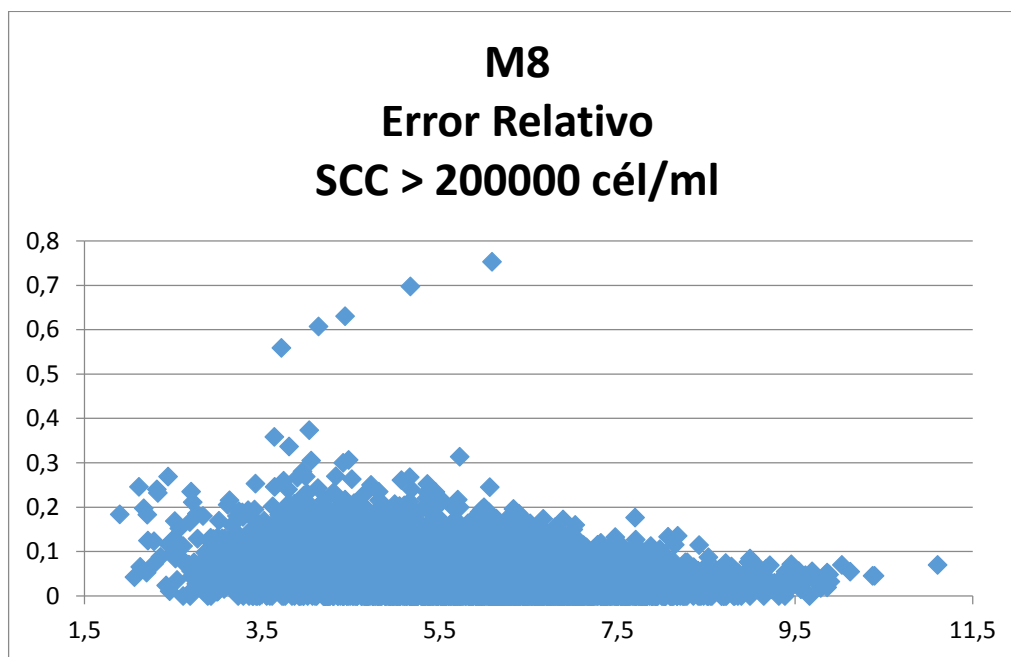


Figura 4.80.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 200000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

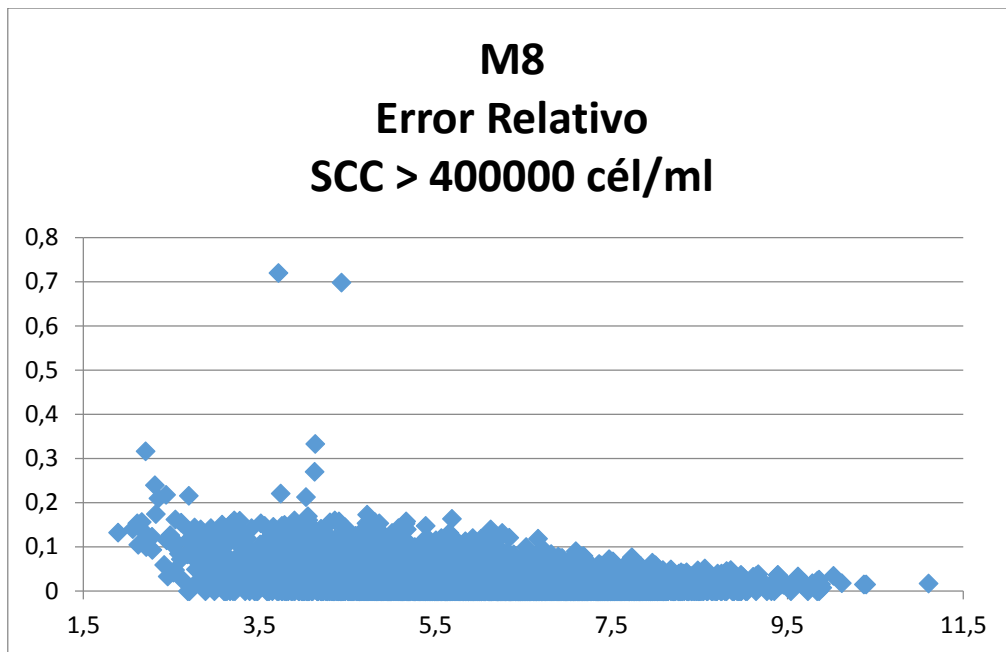


Figura 4.81.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 400000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

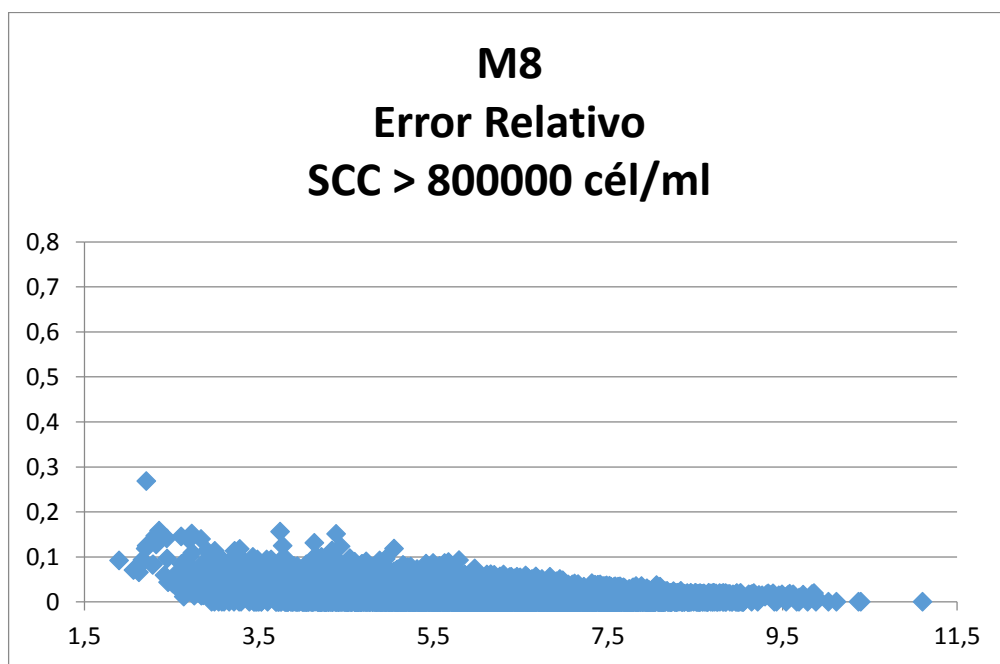


Figura 4.82.- Error relativo del modelo M8 en función de QF para valores de SCC > 800000 cél/ml cuando se aplica a controles lecheros mensuales

En las figuras, la evolución del error relativo no ofrece ninguna variación o dependencia significativa para valores concretos o extremos de QF, ofreciendo el modelo M8 unos resultados equilibrados a lo largo de todo el rango de QF presente en las muestras.

En las Figuras 4.83, 4.84, 4.85 y 4.86 se muestra la relación lineal entre los valores reales de los controles lecheros mensuales con los que se calcularon los parámetros del modelo y el valor estimado por el modelo para esos mismo valores. De nuevo, la gran cantidad de muestras disponibles (7968 controles lecheros mensuales) convierten la recta en una nube de puntos alrededor de una línea de tendencia rectilínea. Viendo las ecuaciones de las líneas de

tendencia que representan los puntos en cada una de las figuras se comprueba que la pendiente de la línea se mantiene más o menos constante a los largo de los distintos umbrales de recuento celular, pero el punto de intersección con el eje vertical se aproxima cada vez más a cero con el incremento de recuento celular, lo cual coincide con la mejora en el error relativo sufrida por las estimaciones para altos valores de SCC.

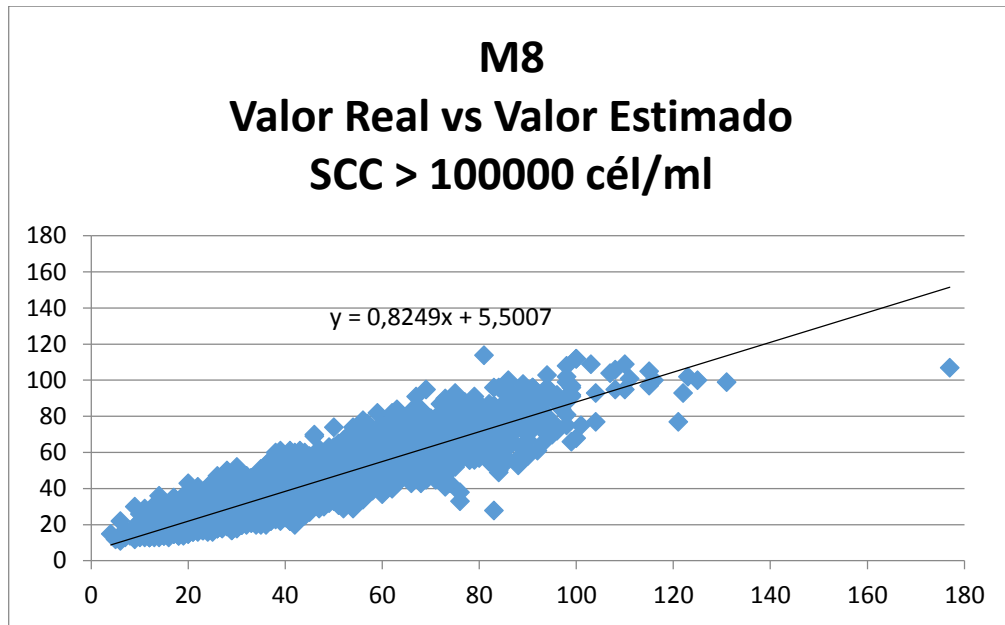


Figura 4.83.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 100000 cél/ml

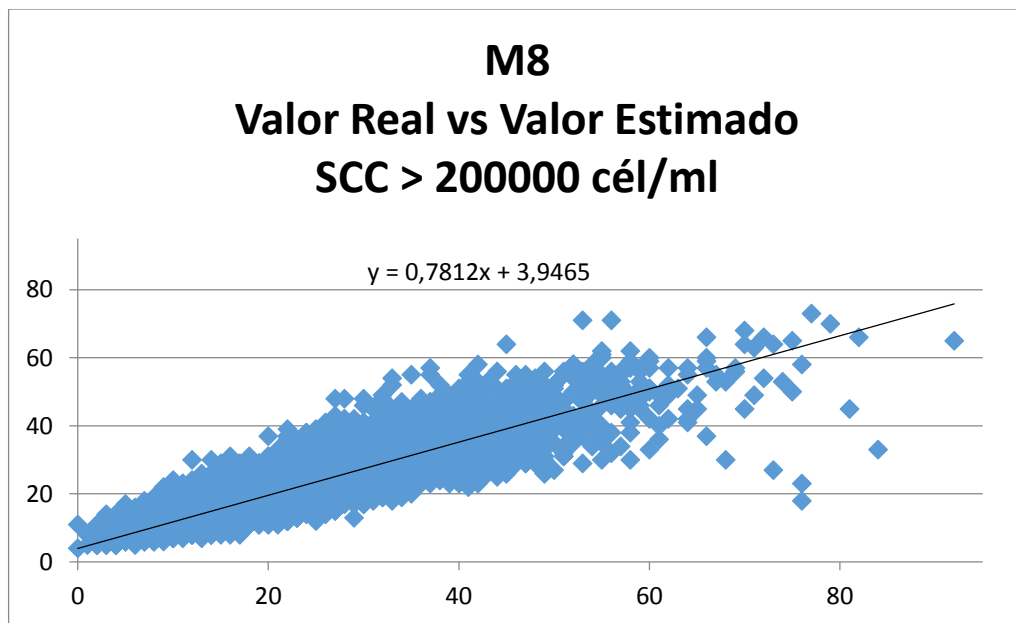


Figura 4.84.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 200000 cél/ml



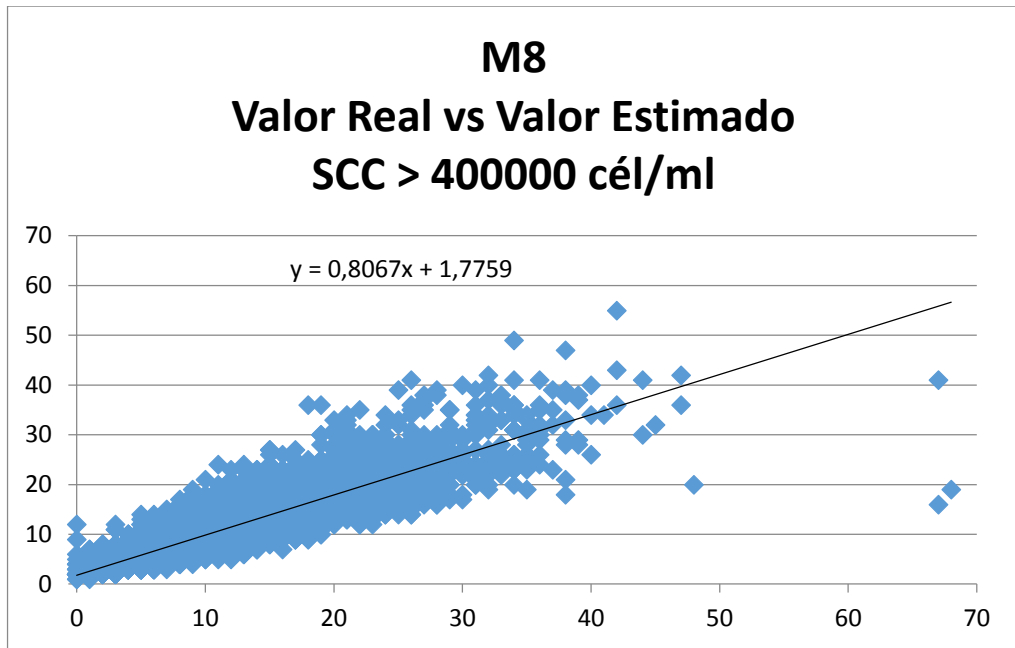


Figura 4.85.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 400000 cél/ml

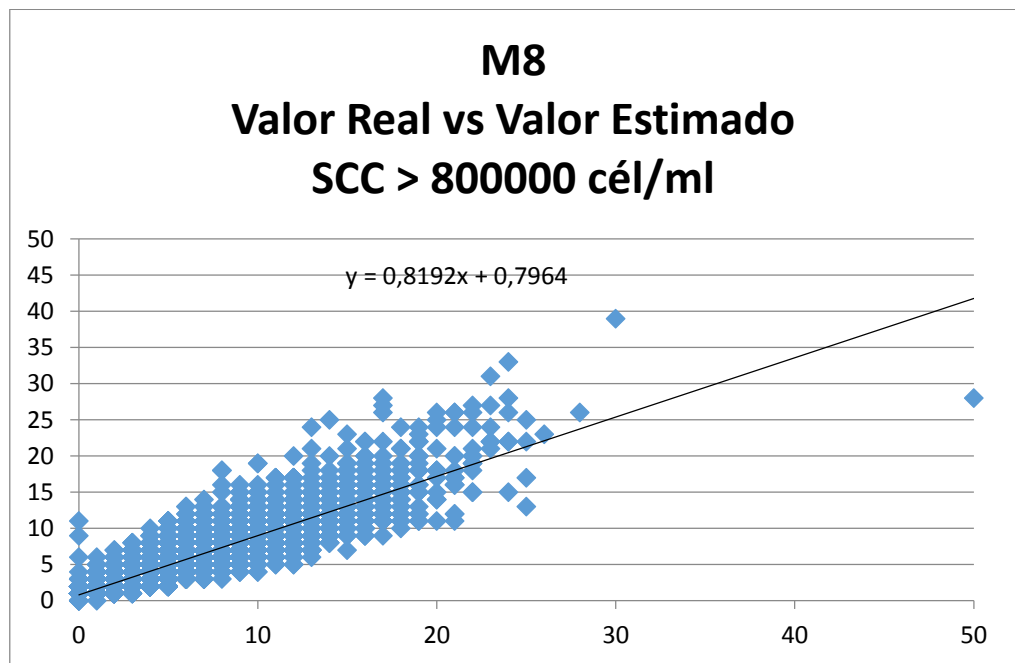


Figura 4.86.- Representación de valor real frente al valor estimado por el modelo M8 para valores mensuales de control lechero y para valores de SCC > 800000 cél/ml

# Capítulo **5**

## **Modelo de producción**

## 5.1 Consideraciones previas sobre el modelo

El objetivo de este capítulo es la obtención de un modelo que relacione dos de los parámetros cuantificables más importantes de una instalación ganadera de leche, la producción y el recuento celular.

Como se ha visto en el capítulo del estado del arte, en la literatura científica y en las pautas tradicionales de manejo de una ganadería se ha venido sosteniendo que el recuento de células somáticas afecta fuertemente a la producción de leche, y que este efecto se traduce en una importante reducción de la producción en la medida en que se incrementen los recuentos celulares. De esta forma, se pone de manifiesto una relación explícita entre el recuento celular y los ingresos netos de cada explotación ganadera y, de hecho, se ha venido considerando que esta relación es la primera causa a la hora de justificar las pérdidas económicas potenciales de tal explotación.

La consideración del concepto de mastitis subclínica –que es asintomática– pero que incrementa el recuento celular como causa de pérdidas, va ligada a este efecto y así ha sido indicado en la literatura científica analizada. La idea es que el animal está lo suficientemente enfermo para incrementar sensiblemente la respuesta del sistema inmunitario, pero no demasiado enfermo como para manifestar los síntomas propios de una situación clínica.

En realidad, parece lógico que tal relación entre recuento celular y producción exista, puesto que si un determinado animal puede producir una cantidad de leche diaria estando en una situación sanitaria óptima, esa producción se verá reducida cuando tal situación no sea buena tendiendo a verse más reducida cuanto más deteriorada esté la situación sanitaria. Y más aún si el problema de salud está directamente relacionado con los órganos más implicados en la producción, como es el caso de la mastitis. Llegados a este punto, hay que destacar que es universalmente asumido que la aparición de mastitis produce un incremento del recuento celular (SCC) y que es la propia enfermedad infecciosa la que causa la pérdida de producción y que la variable que permite la cuantificación es el SCC:

$$\text{Mastitis} \Rightarrow \Delta SCC \quad \Delta P = f(SCC)$$

donde  $\Delta SCC$  es el incremento del recuento celular debido a la presencia de la enfermedad,  $P$  es la producción de leche y  $\Delta P$  la pérdida de producción.

Más difícil de demostrar es la relación inversa, esto es, que un incremento del recuento celular sea debido a la presencia de mastitis y que ese recuento celular alto produzca una pérdida de producción proporcional a su incremento. Del mismo modo, es igualmente difícil demostrar la relación entre la presencia de la denominada mastitis subclínica (aquella mastitis que se presenta asintomática), el incremento de recuento celular y las variaciones en la producción de leche de una vaca.

En este capítulo se intentará dar algún tipo de respuesta a alguna de las interrogantes planteadas.

## 5.2 Primera aproximación al modelo

Para realizar un modelo de la producción de una explotación ganadera tendremos que considerar que la producción lechera de cada animal va a depender de muchos factores tales como la propia genética del animal, las condiciones ambientales, el manejo, la alimentación, el estado de salud, el sistema de ordeño, el número de parto, los días en leche y, por supuesto, el SCC. Así, en un contexto más amplio, la figura 1 muestra un esquema de estas relaciones para cada animal dentro de cada explotación y en una determinada zona geográfica.

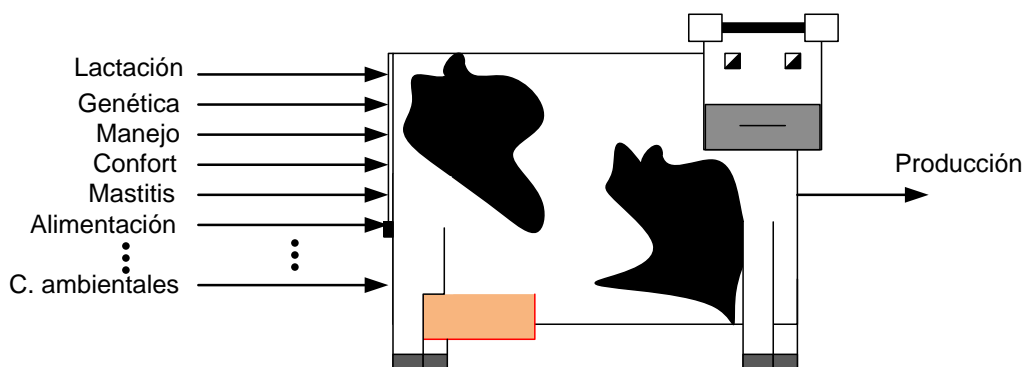


Figura 5.1.- Factores que afectan a la producción lechera de una vaca

Si el modelo de la Figura 5.1 pudiera materializarse en un conjunto de relaciones explícitas tendríamos la capacidad de saber cómo se comportaría la producción del animal en unas determinadas condiciones, pero desgraciadamente ese modelo resulta muy complejo, puesto que no es fácil hablar de relaciones universales a la hora de precisar la influencia de cada parámetro de entrada en la producción final. Por ello, resulta mucho más sencillo buscar modelos agregados en los que los parámetros que se manejan sean los valores promedio de cada explotación o de una determinada zona geográfica (Figura 5.2).

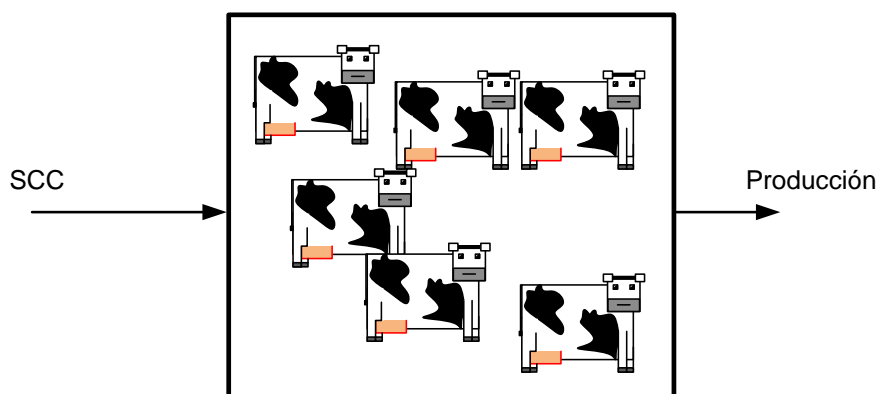


Figura 5.2.- Modelo agregado de SCC

Si el objetivo es relacionar el efecto del recuento celular sobre la producción, parece lógico trabajar con una situación en la que todos los parámetros se muevan a lo largo de su campo de medida y categorizar en función de las variables que se pretende que formen parte del modelo. En tal caso, la máxima variabilidad de los demás parámetros se obtendrá con una muestra muy numerosa de animales.

Para ello, se consideran los datos de todos los animales en control lechero de Asturias (España) desde 1992 hasta 2012 lo que hace un total de 1,6 millones de controles individuales a vacas lecheras de 209 explotaciones en los que se han analizado los valores de producción, los nutricionales y el SCC de cada una de ellas. Para que el modelo incluya la evolución de los animales a lo largo del tiempo, de todos estos datos disponibles se han seleccionado aquellos animales que presentaban un seguimiento en sus controles durante al menos tres lactaciones. Este filtrado reduce el volumen de registros disponibles a 1,4 millones de casos. Con esto registros se ha procedido a realizar un nuevo proceso de filtrado descartando aquellos controles incompletos o erróneos, en los que alguno de los datos no exista o haya errores manifiestos. También se ha procedido a eliminar los registros de aquellas vacas para las cuales no se podía determinar de manera efectiva el número de días en leche en el que se sometió al control debido a la pérdida del primero de una lactación. Este filtrado reduce finalmente el número de casos a poco más de un millón doscientos mil controles, en concreto, 1284676 controles.

Para facilitar el estudio y análisis de los datos, se van a agrupar los datos de recuento celular por categorías. De esta manera se evita la dispersión producida por la enorme variedad de valores distintos que puede tener este valor. Para establecer las distintas categorías de recuento celular se va a aplicar el criterio que utiliza el índice *Linear Score* de asignar los valores de cada categoría de manera logarítmica de tal manera que el valor asignado a una categoría sea el doble de grande que el valor asignado a la categoría anterior y representar cada categoría con el valor de recuento celular que se encuentra en su centro.

Tras agrupar los animales por categorías de recuento celular nos encontramos con los resultados que se presentan en la Tabla 5.1, correspondientes al número de vacas presentes en cada categoría. La cuarta columna de la tabla muestra el valor medio de la producción a 10 días de todas las vacas que se encuentran en esa categoría de SCC.

**Tabla 5.1.- Número de vacas y producción media a 10 días en cada una de las categorías de recuento celular estudiado.**

Intervalo de SCC [cél/μl]	Total vacas	SCC asignado [cél/μl]	Producción 10 días [Kg]
Menos de 50	63042	25	327,43
50-100	28105	75	298,98
100-200	19272	150	278,73
200-400	12649	300	267,26
400-800	7989	600	270,53
800-1600	4891	1200	280,15
1600-3200	2947	2400	282,70
Más de 3200	1929	4800	271,89

El perfil general del total de animales en cada categoría de recuento celular se presenta en la gráfica de la Figura 5.3 y la relación entre el SCC asignado a cada una de las categorías elegidas (el centro del intervalo) y la producción media de cada una de las categorías, en la Figura 5.4. En la figura 5.5 se muestran los mismos datos que en la figura 5.4 pero utilizando una escala logarítmica en el eje de las ordenadas para mostrar mejor la tasa de variación de la producción con el recuento celular.

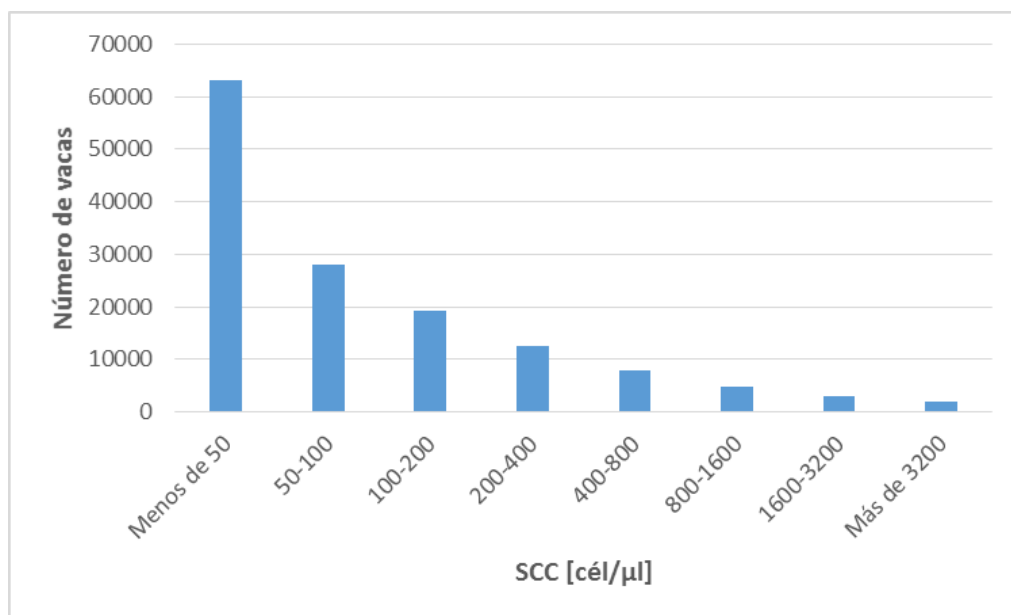


Figura 5.3.- Distribución del número de vacas en las distintas categorías de recuento celular

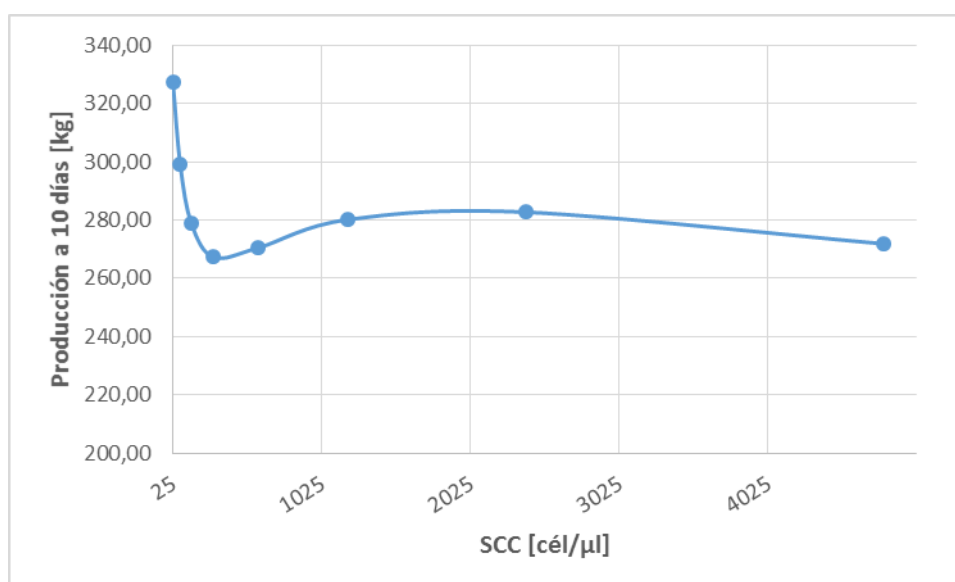
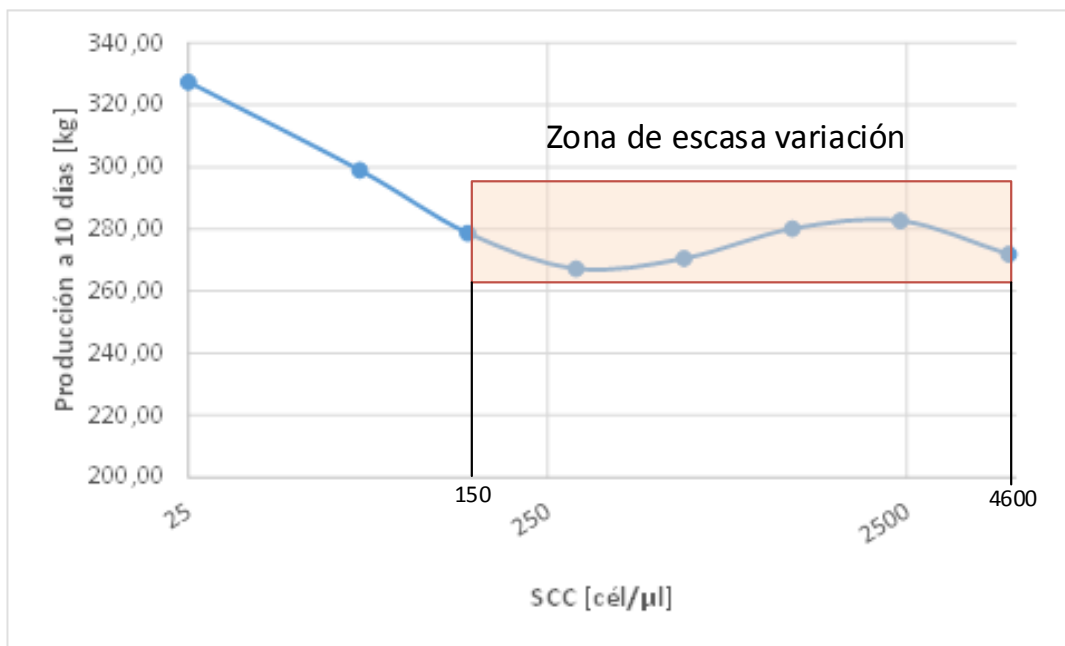


Figura 5.4.- Representación de la producción media a 10 días para cada categoría de recuento celular

Con las limitaciones que un umbral rígido puede suponer para decidir entre el estado de salud y de enfermedad, a la vista de los resultados se puede establecer que un animal está completamente sano cuando su recuento no supera el valor de 75 células/μl, valor a partir del cual las pérdidas de producción achacables se hacen muy apreciables. Se puede apreciar que a valores bajos de recuento celular la producción se mantiene a niveles altos para caer muy rápidamente a partir del momento que el recuento celular supera los 75 células/μl. Pero una vez se sobrepasa un umbral de recuento celular, se aprecia que la variación de la producción no es muy alta, manteniéndose en una línea de escasa variabilidad contradiciendo los resultados comúnmente aceptados de que valores altos de recuento celular provocan caídas altas de la producción, tal y como cuantifican parámetros tales como el *Linear Score*.



**Figura 5.5.- Representación de la producción media a 10 días para cada categoría de recuento celular (escala logarítmica)**

La divergencia de los resultados obtenidos con los resultados habitualmente admitidos en la literatura publicada hasta la fecha y dado el volumen tan alto de animales que se han utilizado durante los veinte años de toma de datos hace necesario plantearse una segunda aproximación al modelo, en la que se tengan en cuenta más aspectos.

## 5.3 Segunda aproximación al modelo

El número de variables que interviene en el modelo de producción es bastante elevado y algunas de ellas deben ser consideradas puesto que presentan un efecto claro sobre él. Tal es el caso del número de partos o lactación de cada animal, un parámetro que afecta a la producción y que establece una serie de condicionantes a la vida productiva de cada vaca.

Por todo esto, se considerará un modelo con dos variables de entrada, el recuento celular (SCC) y el número de partos o lactación (L) tal como se presenta en la Figura 5.6.

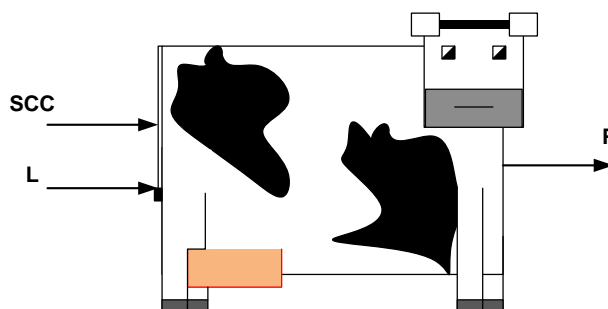


Figura 5.6

La estructura de la muestra de datos presenta casos que varían desde  $L=1$  hasta  $L=13$ , si bien el número de casos en que  $L$  es mayor que 10 es muy pequeño en relación con los demás y se han eliminado del estudio por no disponer de suficientes casos como para obtener resultados significativos en esas lactaciones. Esto reduce ligeramente el número de animales con cuyos datos se está trabajando a 57064 que equivalen a 140727 registros teniendo en cuenta que un animal tendrá registros en varias lactaciones, es decir se han eliminado menos del 0,15% de los casos. En la Tabla 5.2 se presenta el correspondiente resumen.

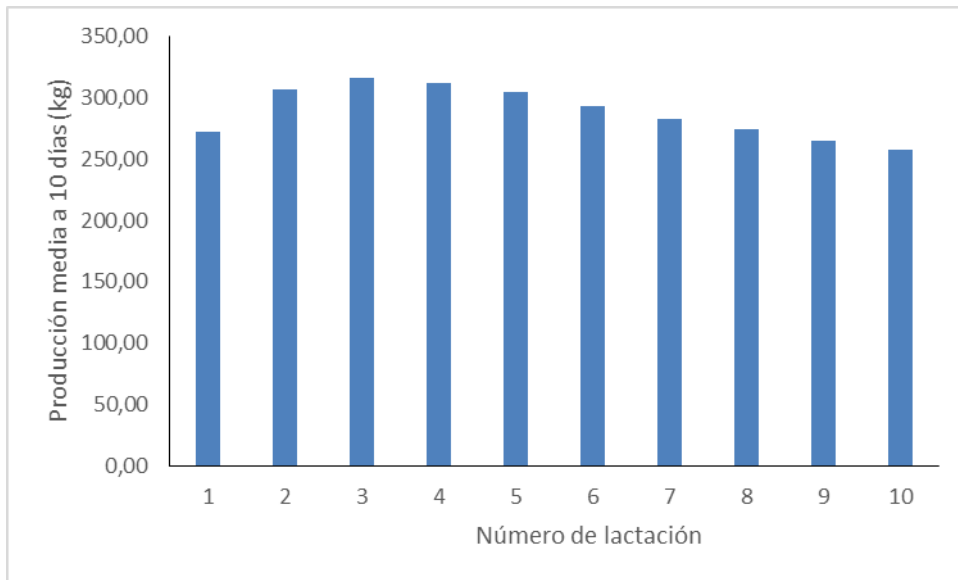
Tabla 5.2.- Número de vacas disponibles por lactación y valores medios de recuento celular y producción media a 10 días.

Lactación L	Número de vacas	SCC [cél/μl]	Producción 10 días [Kg]
1	44858	176,60	272,51
2	35982	254,81	306,68
3	25206	326,55	315,72
4	15720	397,85	312,24
5	9077	439,53	305,05
6	5055	454,59	293,32
7	2669	494,77	282,66
8	1269	519,77	273,83
9	610	530,48	265,30
10	281	565,53	257,76

La representación de la producción en función de la lactación  $L$  se lleva a cabo en la Figura 5.7 en la que se muestra la evolución de la producción media de la muestra a lo largo de las distintas lactaciones.

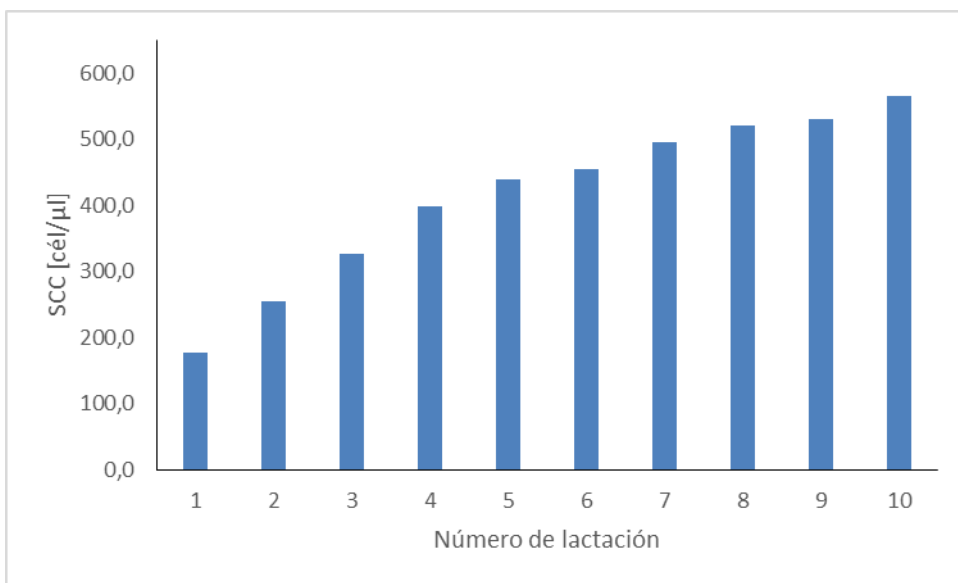
Se observa que el máximo productivo de los animales está en la tercera lactación y que, a partir de ese punto, la producción cae casi linealmente con la lactación a razón de unos 12 l/lactación en valores normalizados a 10 días.





**Figura 5.7.- Evolución de la producción media a lo largo de las lactaciones**

Además de la evolución de la producción se puede analizar la evolución del recuento celular a lo largo de las lactaciones, como se muestra en la Figura 5.8 en la cual se representan los valores de SCC.



**Figura 5.8.- Evolución del recuento celular medio a lo largo de las lactaciones**

En la figura 5.8 se puede comprobar que el recuento celular se incrementa con la lactación de forma monótona lo que parece indicar que el modelo matemático agregado podría ser de la forma del que se presenta en la Figura 5.9 sin menoscabo de la influencia que puedan suponer los demás factores indicados al comienzo del estudio (días en leche, alimentación, genética, manejo, confort...).

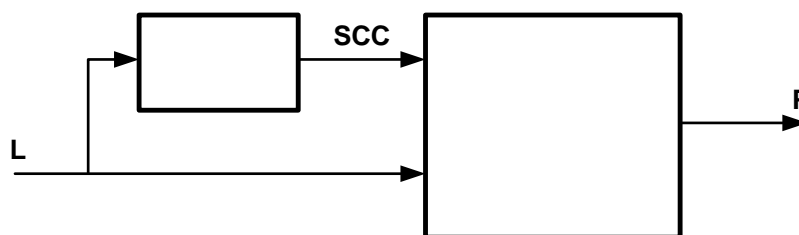


Figura 5.9.- Posible esquema de funcionamiento del modelo de producción

En la interpretación del modelo no se debe llegar a la conclusión de que el valor del recuento celular es un efecto del número de lactación del animal sin que medie otra causa más que el número de partos. No es correcto. La interpretación más adecuada del modelo de la Figura 5.9 es que la aparición de mastitis es más probable a medida que el animal ha pasado por más lactaciones lo que influye en un incremento de los valores de recuento celular.

En cualquier caso, a la vista de los resultados previos parece evidente que el análisis del problema exige un estudio individual en cada una de las lactaciones ya que la influencia que L presenta sobre la producción aparenta ser notable. Así pues, se procede a agrupar los animales por categorías de SCC según el mismo criterio logarítmico que se expresaba en la Tabla 5.1, aunque ahora sólo se mostrará el valor representativo de cada intervalo. El resultado se muestra en la Tabla 5.3 donde n es el número de vacas que han dado un determinado valor de SCC en un control y PL es la producción media normalizada a 10 días de todos esos controles en la lactación L.

Tabla 5.3. Número de vacas disponibles en cada lactación para cada categoría de recuento celular considerada junto con la producción media a diez días.

SCC [cél/ μl]	Lactación 1		Lactación 2		Lactación 3		Lactación 4		Lactación 5	
	n	P1 [kg]	N	P2 [l]	n	P3 [l]	n	P4 [l]	n	P5 [l]
25	20018	284,9	18173	351,7	11437	371,4	6574	371,4	3415	367,1
75	10320	270,7	6829	307,7	4795	324,3	2850	324	1600	321,9
150	6409	259,7	4448	279,6	3307	291,9	2198	295,2	1394	289,9
300	3577	255,6	2871	266,1	2337	277,1	1612	275,6	1034	272,7
600	2135	257,4	1626	274,1	1492	280,5	1074	279,3	720	271,4
1200	1199	259,5	1043	285,3	955	295,2	705	289,3	404	280,6
2400	742	254,9	614	288,9	527	297,9	410	295,3	309	286,9
4800	458	242,2	378	275,8	356	286,4	297	284,2	201	278,6

SCC [cél/μl]	Lactación 6		Lactación 7		Lactación 8		Lactación 9		Lactación 10	
	n	P6 [l]	N	P7 [l]	n	P8 [l]	n	P9 [l]	n	P10 [l]
25	1834	355,2	874	343,5	406	336,3	190	325,4	100	320,4
75	880	309,9	463	300,9	207	293,6	99	280,4	44	279,1
150	742	281,1	446	276,6	201	264,7	80	263,7	33	246,8
300	581	265,4	325	254,2	169	248,7	90	242,8	37	232,8
600	469	259,5	248	253,7	121	244,5	72	245,3	19	230,1
1200	285	269,3	149	263,6	85	253,2	36	240,5	24	234,9
2400	165	277,1	93	258,9	44	248,4	23	237,1	15	229,5
4800	99	267,9	71	247,5	36	249,2	20	224,2	9	260,2

El análisis de los datos arroja conclusiones semejantes para cada lactación a las que se obtenían del análisis de los datos en su conjunto: no hay pérdida significativa de producción a

partir del valor de 150 cél/μl. Para casi todas las lactaciones este mantenimiento de la producción se alcanza para el intervalo que va desde 300 a 1600 cél/μl. Para una mayor claridad de lo expuesto estos datos se presentan en la gráfica conjunta de la Figura 5.10.

A raíz de los resultados obtenidos, la relación entre el recuento celular y la producción no parece nada clara excepto para los recuento más bajos, por debajo de las 150 cél/μl. Así, el modelo de pérdida de producción basado en el *linear score* se diluye en la totalidad de los casos y la producción más parece depender de la lactación que de la situación de enfermedad de los animales. De esta forma, la situación denominada tradicionalmente como “mastitis subclínica” que se caracteriza por ser casi asintomática y por presentar recuentos celulares sostenidos en valores medios y no muy elevados no parece ser causa de pérdida alguna de producción para valores altos del recuento celular aunque no se puede descartar en los niveles más bajos ya que la producción sufre un descenso pronunciado cuando el SCC pasa de 25 a 150 cél/μl.

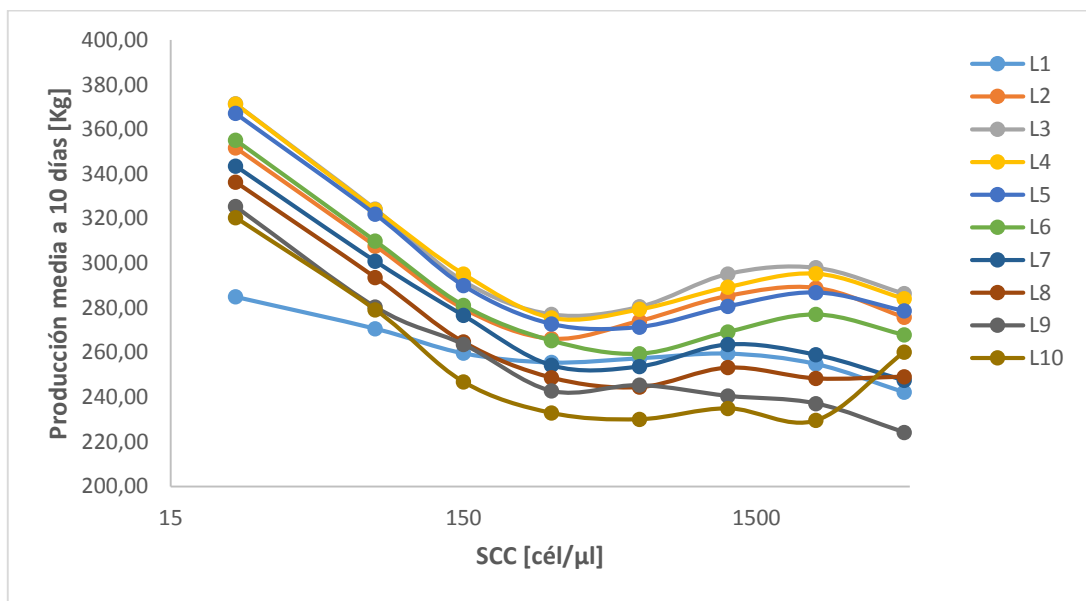


Figura 5.10.- Relación entre la producción media de leche a 10 días y el recuento celular para cada lactación.

## 5.4 Tercera aproximación al modelo

Otro de los posibles factores que puede influir en la producción de leche de una vaca es el número de días que han pasado después de cada parto, término que se conoce como “Días En Leche” (DEL). Conociendo los procesos biológicos que regulan la producción de leche, parece evidente que cada vaca evolucionará en su capacidad producción según el tiempo que haya transcurrido desde el comienzo de la lactación, ya que en los días iniciales después del parto la producción será mayor para alimentar mejor a una cría inexistente, para ir evolucionando día a día a una menor producción que permite el destete del ternero.

De esta forma, el nuevo modelo que se plantea ahora es el que supone manejar tres variables de entrada: la lactación (L), los días en leche (DEL) y el recuento celular (SCC) para explicar la producción, según se indica en la Figura 5.11.

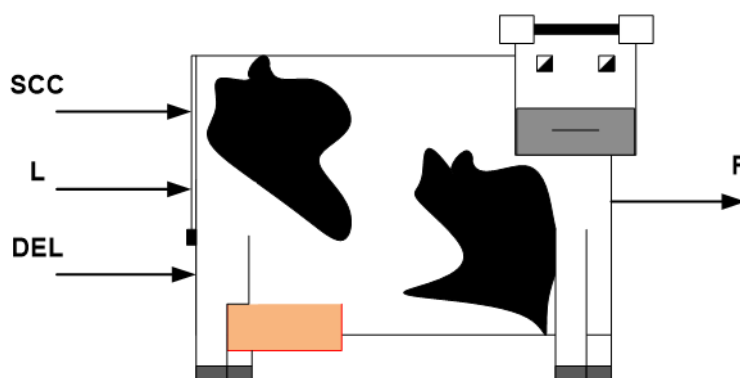


Figura 5.11.- Nuevo esquema de funcionamiento del modelo de producción.

Para poder construir el modelo, se va a representar la producción en función de DEL para observar la relación existente entre ambos. En la Figura 5.12 se ve la relación para valores de  $DEL < 500$ , aunque la mayoría de los casos, no se prolonga mucho más allá de  $DEL = 305$ . Para suavizar el aspecto de las curvas y homogenizar los resultados a lo largo de las distintas lactaciones, para representar los días en leche se ha definido una nueva variable denominada DEL5. Esta variable agrupa las medias de los valores de producción de todas las cabezas de ganado de 5 en 5 días, es decir, se emplean valores promedio de 5 días.

El análisis de las gráficas indica que la producción presenta un patrón similar en todos los casos con un máximo entre 45 y 50 días y que incluye tres zonas diferentes:

- a) Una primera zona tras el parto en la que la producción va incrementándose hasta alcanzar el máximo entre los 45 y 50 días.
- b) Una segunda zona, tras el máximo, en la que se produce una caída casi lineal con los días en leche a razón de 0,8 l/día (litros en valores normalizados a 10 días) y que llega hasta el entorno de los 305 días de lactación. Sólo las lactaciones 1 y 2 tienen pendientes menores mientras que el valor de la pendiente es similar para las demás.
- c) Una última zona en la que la producción casi es estable, con una muy ligera pendiente negativa después de los 305 días de lactación.

La técnica de modelado más extendida es la definida por Wood como se ha visto en el capítulo 3 de este documento; en este trabajo se valorarán otras posibilidades con modelos más sencillos y que sean capaces de representar razonablemente este comportamiento.

Después de varias pruebas con distintas posibilidades, se ha comprobado que el modelado de las dos primeras zonas, que son las que más interés presentan, se puede realizar empleando regresiones cuadrática y lineal, respectivamente. Los valores de  $R^2$  obtenidos en esas regresiones superan el valor de 0,98 para la mayoría de las lactaciones.

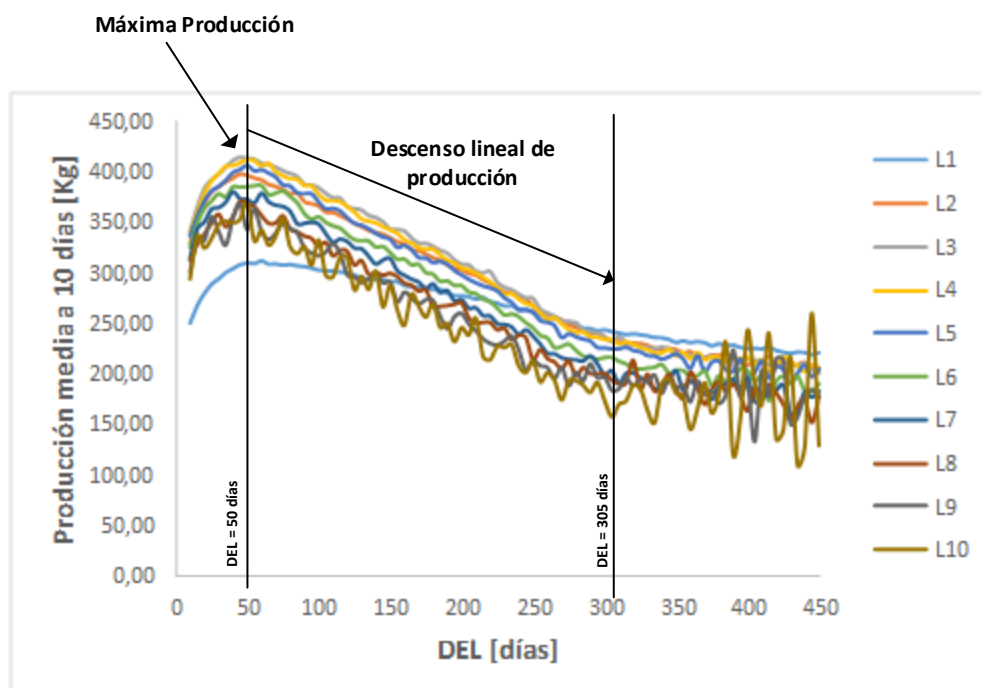


Figura 5.12.- Curve de producción media a 10 días para las distintas lactaciones.

Así, el modelo de producción en función de los días en leche (DEL5) sigue esta función:

Si  $DEL5 \leq 50$ :

$$P = A \cdot DEL5^2 + B \cdot DEL5 + C$$

Si  $DEL5 > 50$ :

$$P = D \cdot DEL5 + E$$

Calculando los valores de los coeficientes para las distintas lactaciones se obtienen los resultados de la tabla 5.4 para el modelo combinado de  $DEL5 \leq 50$  y  $50 < DEL5 \leq 305$ . Para calcular los parámetros de la tabla se han filtrado todos los datos disponibles aplicando los siguientes criterios:

- Sólo se han utilizado los datos de las vacas hasta  $DEL5 = 305$ , que es el valor más habitual de duración de una lactación, ignorando el resto de valores.
- Para cualquier valor de  $DEL5$ , sólo se han considerado válidos sus valores de producción media a 10 días si están calculados a partir de un número de cabezas de ganado que sea superior al 30% de la media de reses disponible para todos los  $DEL5$ . De esta manera se evita que valores de  $DEL5$  con un número bajo de vacas tengan una influencia demasiado grande en el modelo al incorporar valores de producción media muy divergentes. Esta condición ha eliminado el primer elemento de todas las lactaciones ya que el número de vacas disponible para calcular la media de producción en  $DEL5 = 1$  nunca ha superado el 30% de las vacas disponibles en el resto de los valores de  $DEL5$ .

En la figura 5.13 se muestra una comparativa del número de vacas disponibles para cada valor de  $DEL5$  y para cada lactación. Se puede comprobar claramente la gran diferencia de cabezas de ganado disponibles en cada valor de  $DEL5$  entre las primeras lactaciones y las últimas, disponiendo, a partir de la cuarta lactación, de una cantidad inferior al 30% de la media de cabezas de la lactación número 1.

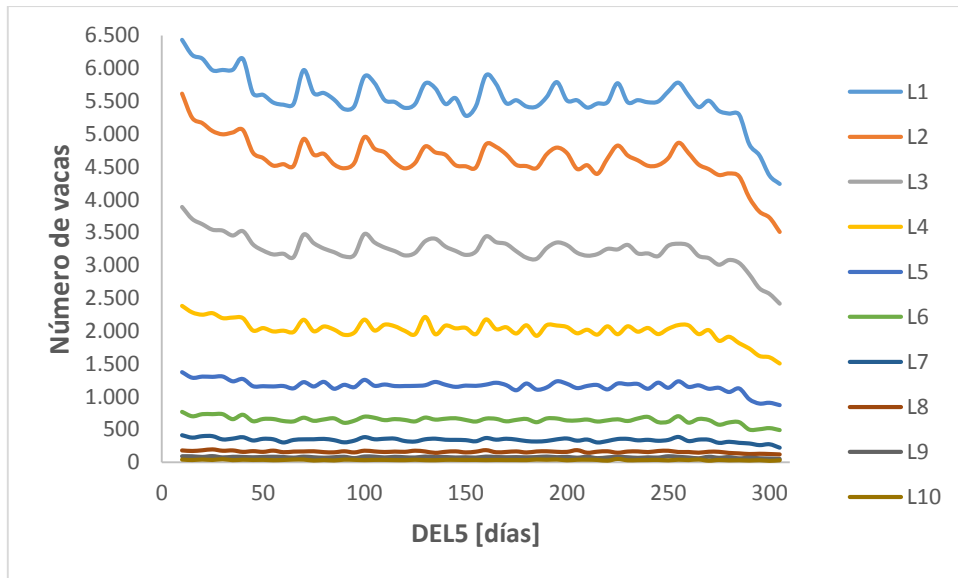


Figura 5.13.- Número de cabezas de ganado disponibles para calcular las medias en cada valor de DEL5y en cada lactación.

Teniendo en cuenta los filtros anteriores, los parámetros se calculan utilizando el programa de análisis estadístico R usando la función de regresión lineal `lm`.

Tabla 5.4.- Coeficientes calculados del modelo de producción para cada lactación.

Lactación	Tramo 0-50 días			Tramo 50-305 días	
	A	B	C	D	E
1	-0,03702	3,6300	219,6173	-0,2882	332,3933
2	-0,05754	5,0039	288,3661	-0,655	431,710
3	-0,05473	4,9678	300,8393	-0,7389	456,6321
4	-0,05946	5,2663	294,2410	-0,7445	453,2807
5	-0,03946	3,9894	303,4631	-0,7376	444,0516
6	-0,05247	4,4728	290,3367	-0,7259	428,0408
7	-0,05787	4,7793	277,4250	-0,7187	415,0537
8	-0,02665	2,8657	289,6334	-0,6883	398,8746
9	-0,04248	3,5140	279,3623	-0,6886	389,3422
10	-0,02514	2,9093	279,5303	-0,7087	383,7439

Los coeficientes A, B son prácticamente constantes, C y E dependen de la lactación (L) y de la producción media y D es constante para  $L > 2$ ,

Este modelo presenta un comportamiento similar al propuesto por Wood que establece una relación del tipo:

$$P = a \cdot n^b \cdot e^{cn}$$

Donde n es el número de semanas en leche y a, b y c son tres coeficientes a determinar en función de los valores de producción.

Ya que la disposición de datos que se está manejando en este trabajo no usa las semanas en leche sino los días en leche agrupados de cinco en cinco (DEL5), el modelo de Wood se transforma de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P = a \cdot DEL5^b \cdot e^{c \cdot DEL5}$$

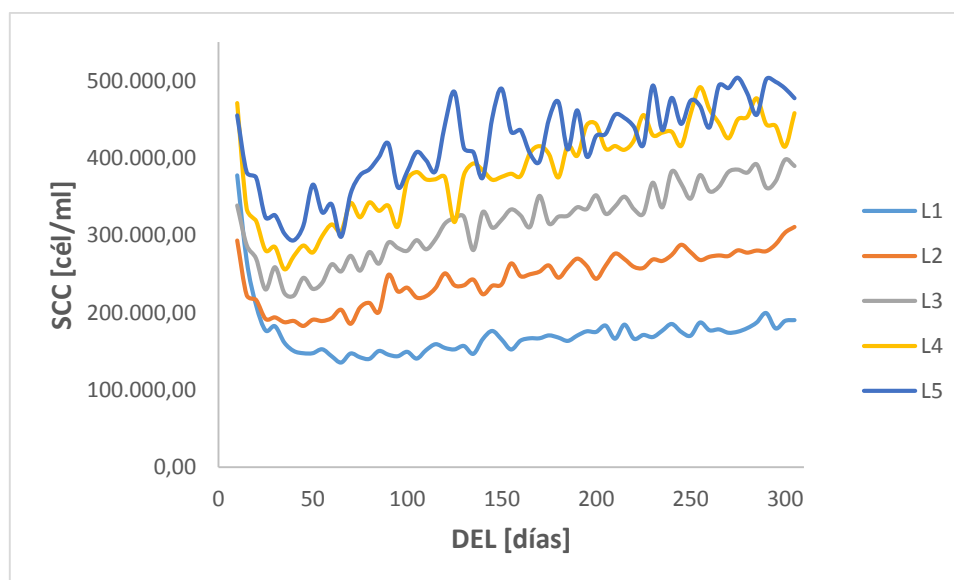
En la tabla 5.5 se muestran los coeficientes calculados para este modelo de Wood.

**Tabla 5.5.- Coeficientes calculados del modelo de Wood para todas las lactaciones**

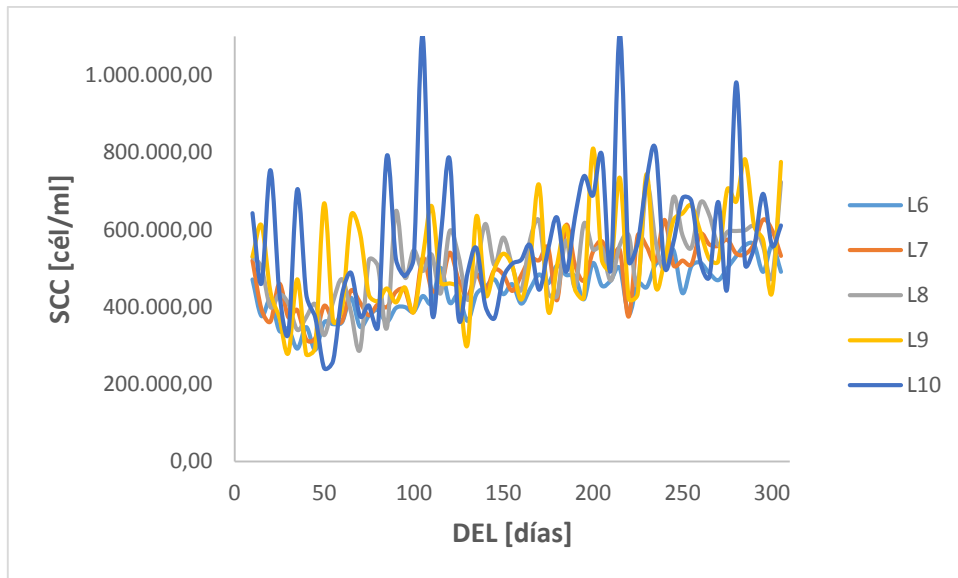
Lactación	Parámetros		
	a	b	c
1	183.8172	0.154074	-0.002023
2	244.5721	0.157762	-0.003139
3	239.8889	0.178656	-0.003467
4	239.14	0.177876	-0.003507
5	236.8417	0.175267	-0.003524
6	232.8552	0.171088	-0.003572
7	229.7792	0.167408	-0.003621
8	225.5721	0.162279	-0.003585
9	228.824	0.152163	-0.003587
10	219.2078	0.16517	-0.00392

Por otro lado, el comportamiento del recuento celular en función de DEL5 para cada una de las distintas lactaciones se presenta en la Figura 5.14, para las lactaciones de la 1 a la 5, y en la figura 5.15, para las lactaciones de la sexta a la décima, donde se aprecia para todas las lactaciones la típica caída de SCC después del parto y, después, un suave incremento de SCC con los días en leche, aunque tal situación presenta una pendiente pequeña y una dispersión importante, sobre todo para  $L > 5$ , como se puede apreciar en la figura 5.15.

Teniendo en cuenta los resultados, no se considerará el efecto de los días en leche sobre el recuento celular porque las pequeñas pendientes observadas quedan dentro de los respectivos intervalos de confianza para aquellas lactaciones en las que se dispone de un número de muestras adecuado y en aquellas lactaciones con menos número de muestras, la variabilidad del parámetro es demasiado alta como para poder ser modelada. La conclusión que se puede obtener es que la probabilidad de que una vaca sufra una mastitis es similar en cualquier momento de cada lactación aumentando esa probabilidad con la lactación, con el tiempo.



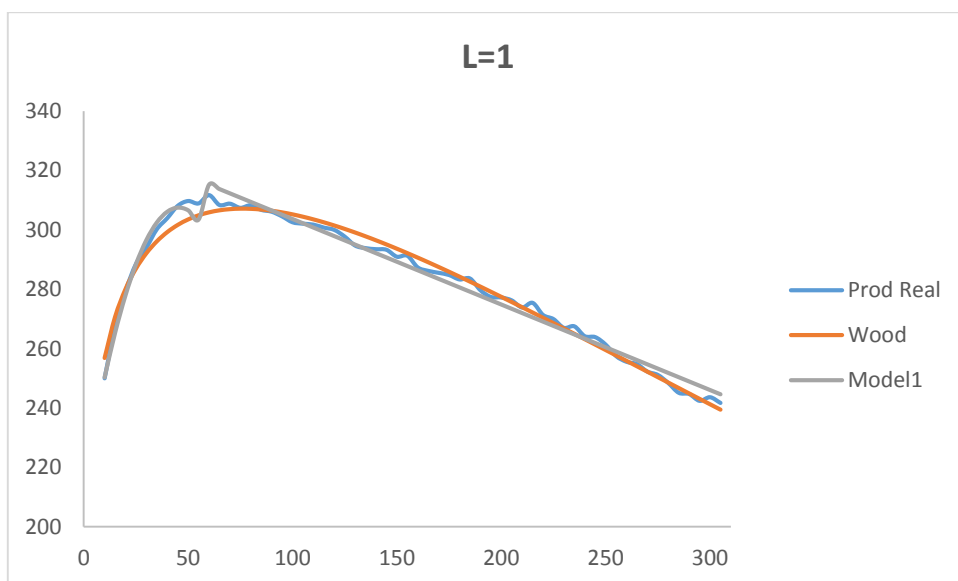
**Figura 5.14.- Variación del recuento celular con los días en leche, para las lactaciones desde la primera a la quinta.**



**Figura 5.15.- Variación del recuento celular con los días en leche, para las lactaciones desde la sexta a la décima.**

Se puede concluir que el modelado de la producción en función de los días en leche (DEL) presenta una evolución fija en cada lactación e incluso similar para todas las lactaciones, con la salvedad lógica de la primera y algunas variaciones en la quinta y la octava lactación, y siendo el término independiente de ambas expresiones el que sufre mayores variaciones a lo largo de las lactaciones.

En las figuras desde la 5.16 a la 5.25 se comparan las predicciones ofrecidas por el modelo de Wood y los modelos M1 y M2 para las lactaciones de la 1 a la 10; en las figuras desde la 2.26 a la 5.35 se comparan los residuales en función de DEL y en las figuras desde la 3.36 a la 5.45 los residuales que producen los tres modelos respecto a los valores reales.



**Figura 5.16.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 1.**



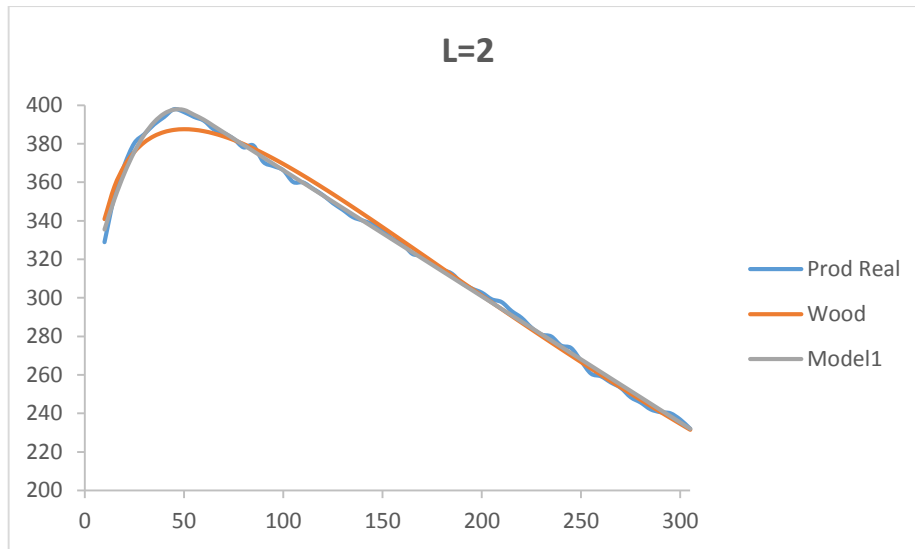


Figura 5.17.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 2.

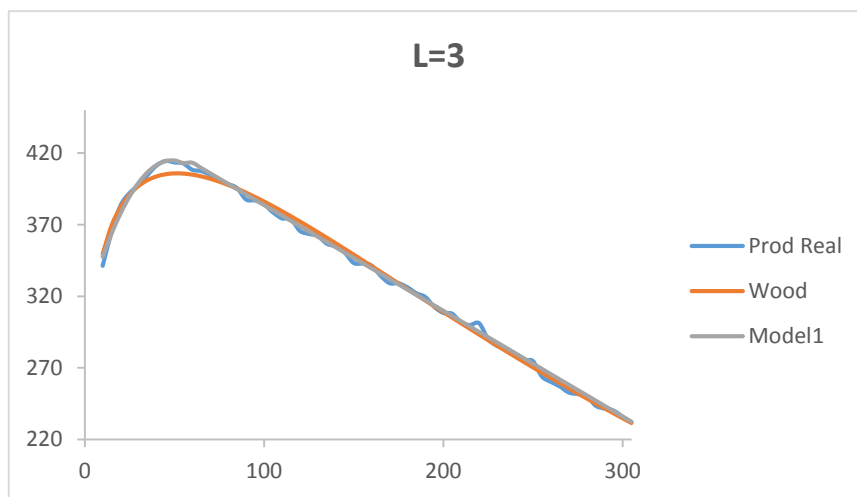


Figura 5.18.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 3.

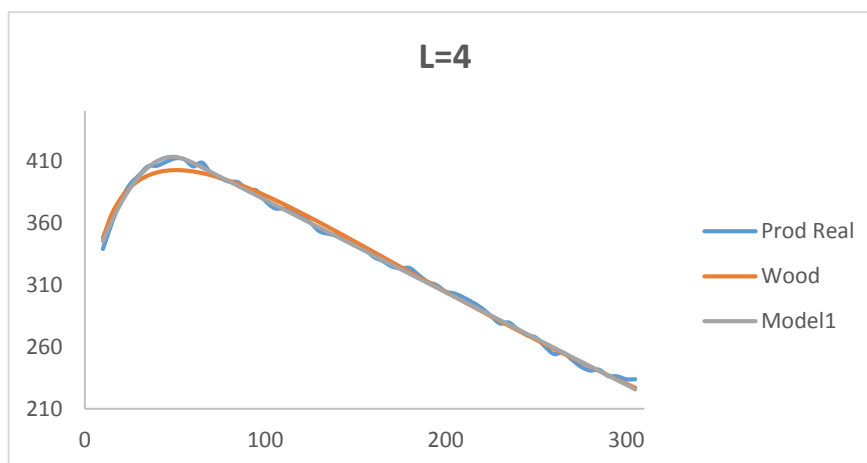


Figura 5.19.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 4.

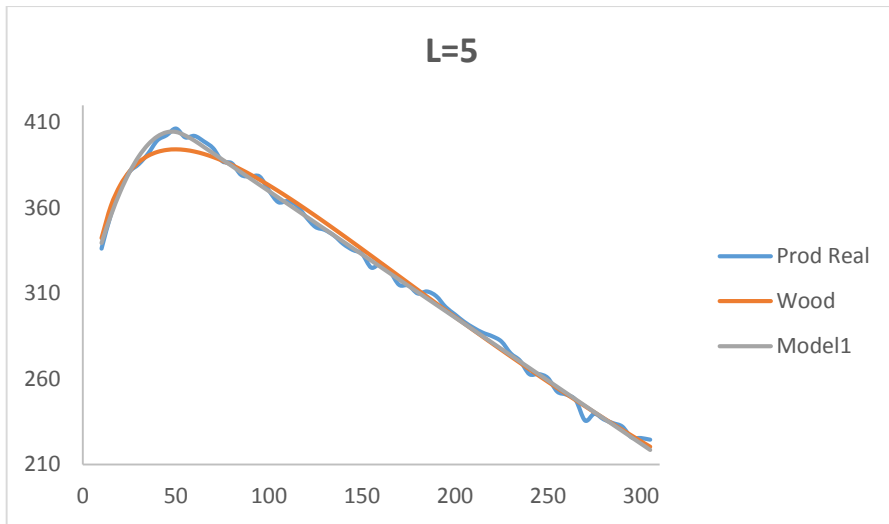


Figura 5.20.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 5.

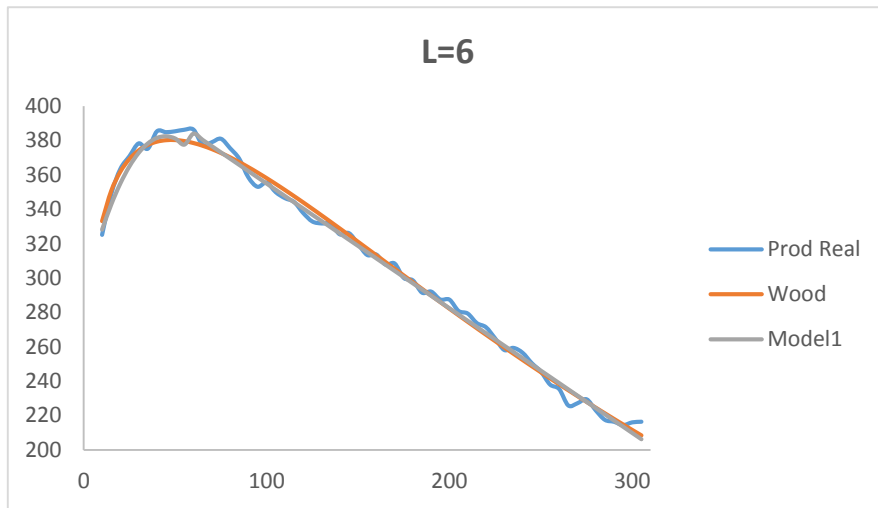


Figura 5.21.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 6.

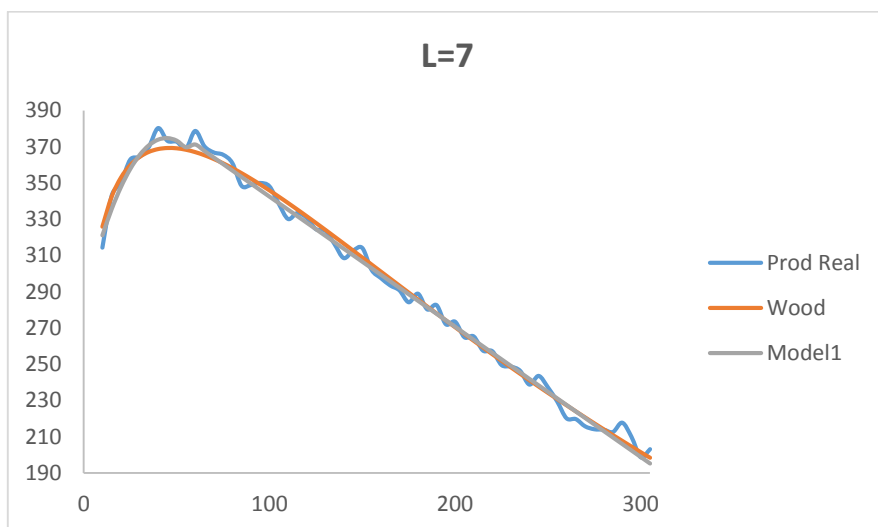
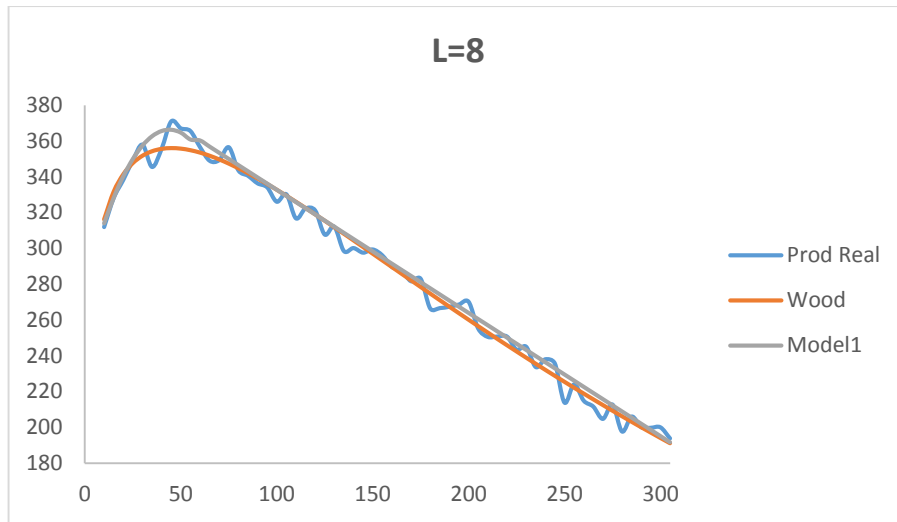
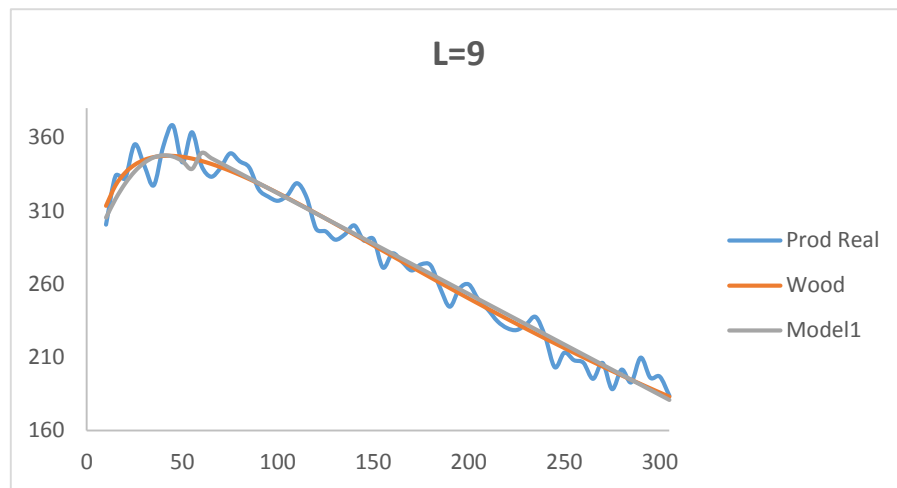


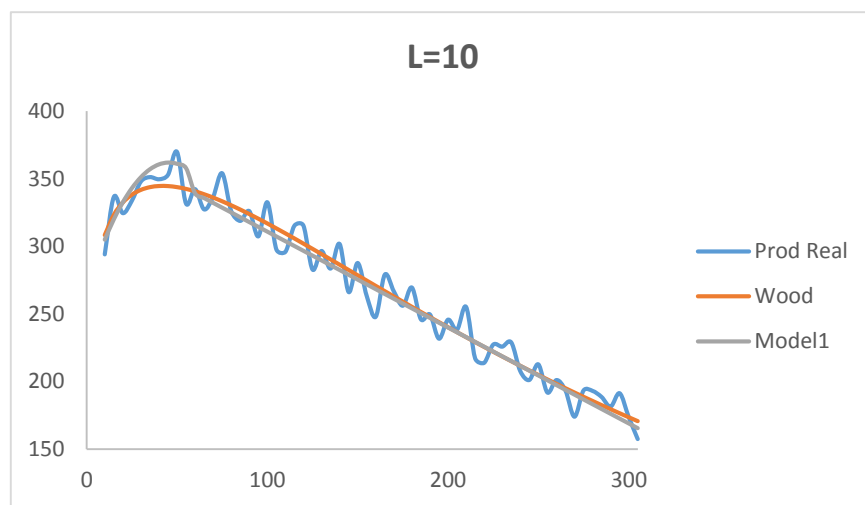
Figura 5.22.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 7.



**Figura 5.23.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 8.**



**Figura 5.24.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 9.**



**Figura 5.25.- Comparación entre la producción real, el modelo de Wood y el modelo de producción para la lactación 10.**

El comportamiento de los dos modelos (Wood y modelo a tramos), resulta similar para todas las lactaciones aunque hay algunas diferencias:

- En el modelo a tramos aparece una variación en la zona de máxima producción que afea la curva, aspecto que en el modelo de Wood no se muestra.
- En el modelo a tramos, se observa un mejor ajuste en la zona de máxima producción que con el modelo de Wood.

Sin embargo, en líneas generales, el comportamiento es muy parecido.

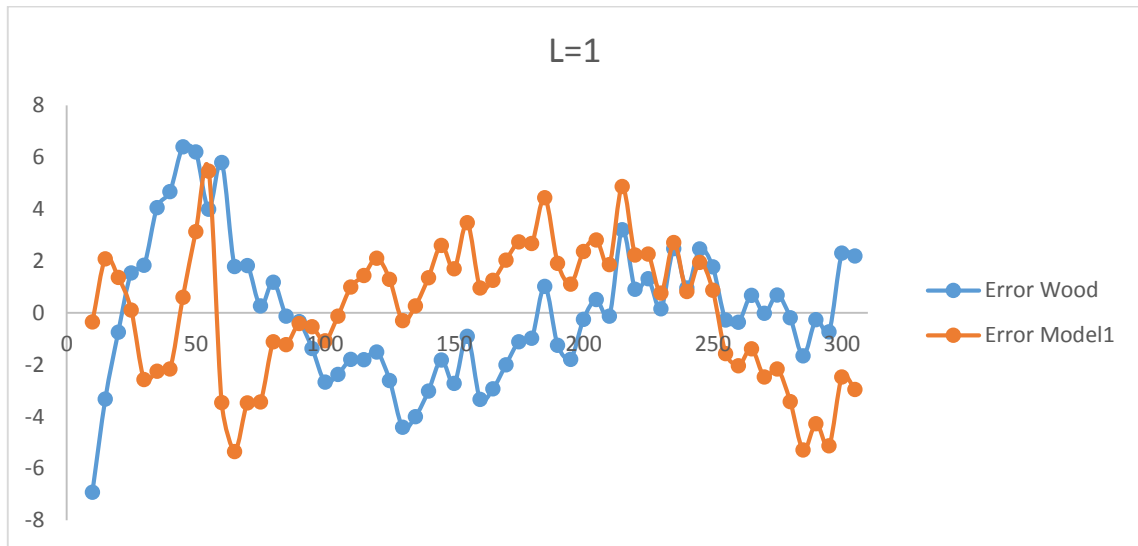


Figura 5.26.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 1.

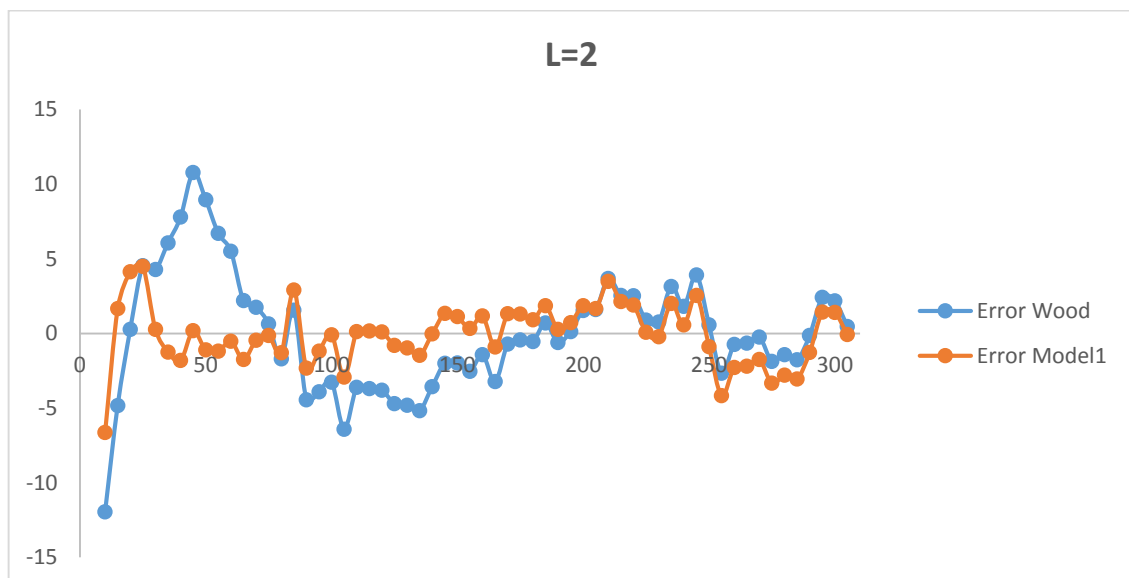


Figura 5.27.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 2.

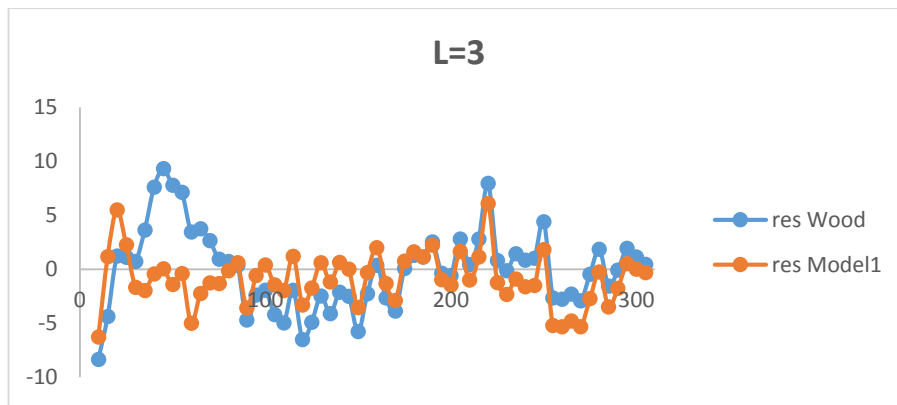


Figura 5.28.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 3.

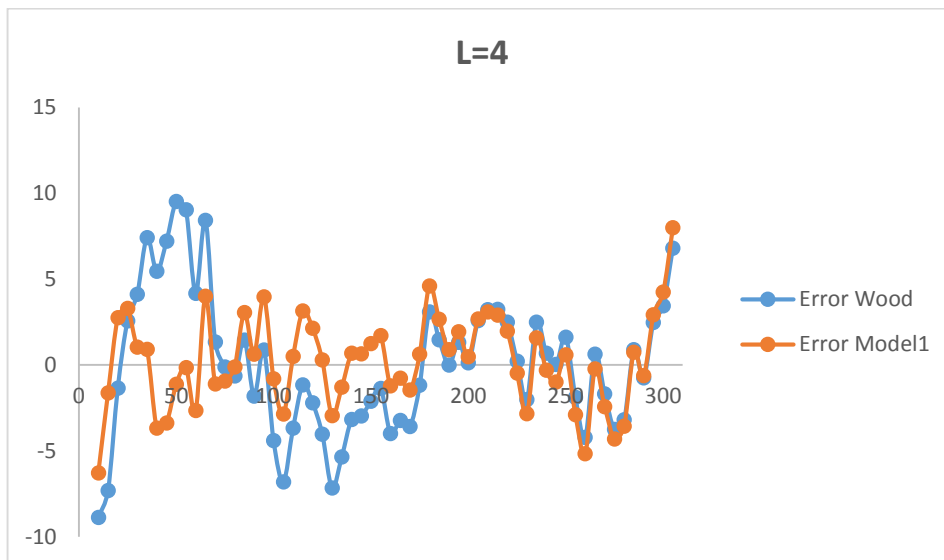


Figura 5.29.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 4.

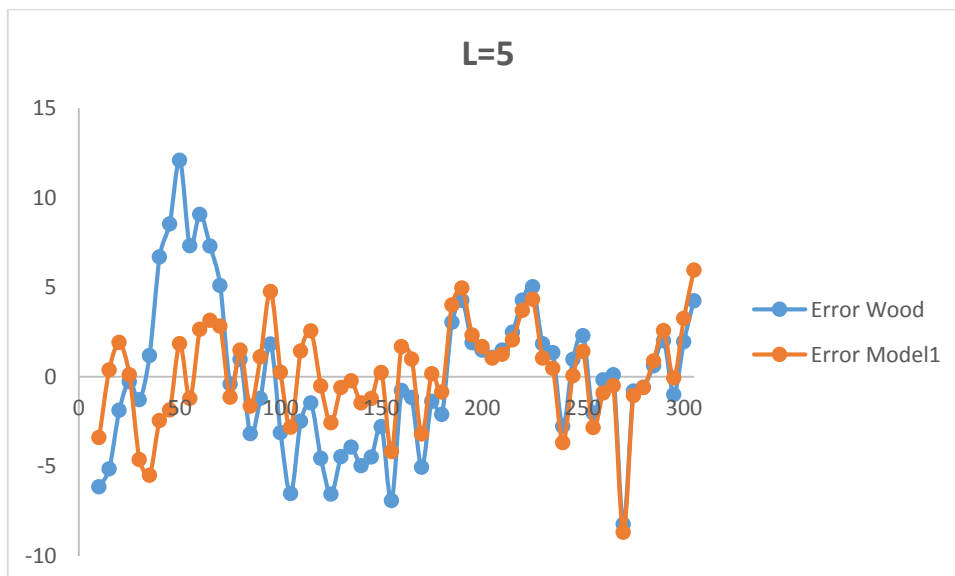


Figura 5.30.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 5.

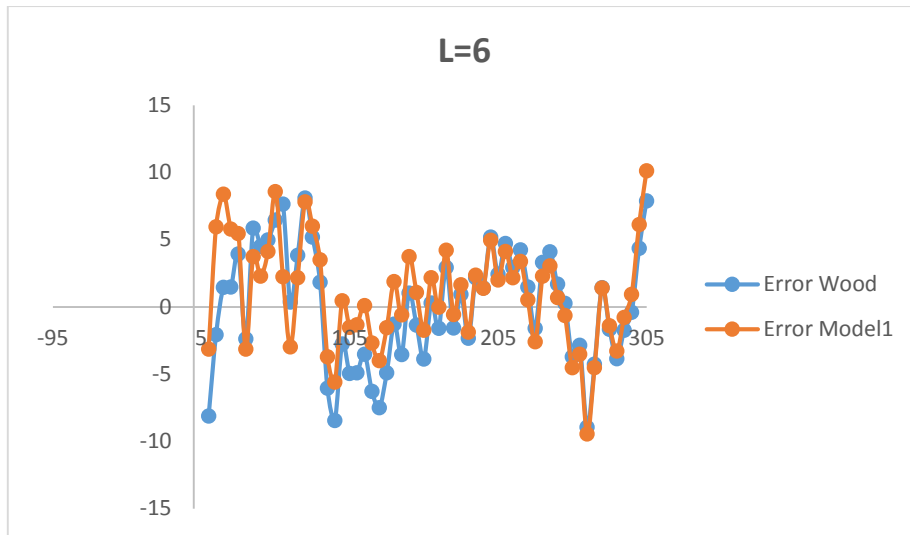


Figura 5.31.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 6.

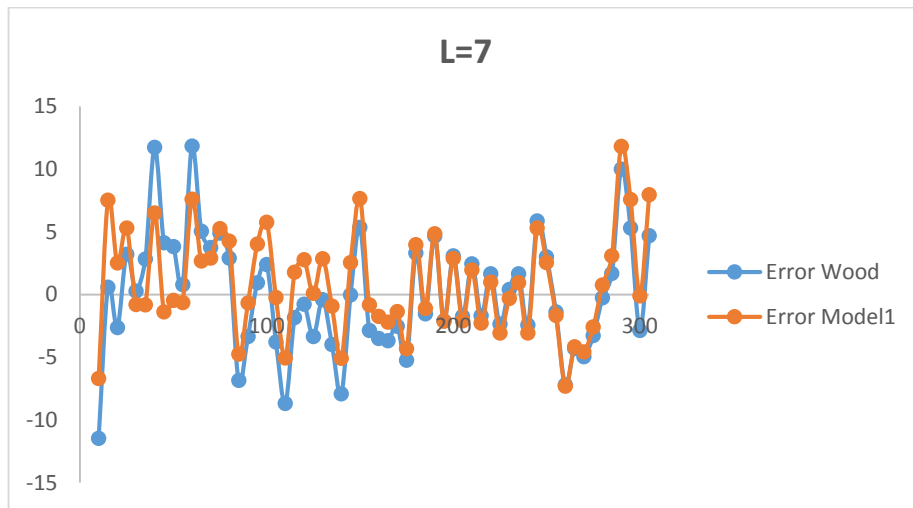


Figura 5.32.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 7.

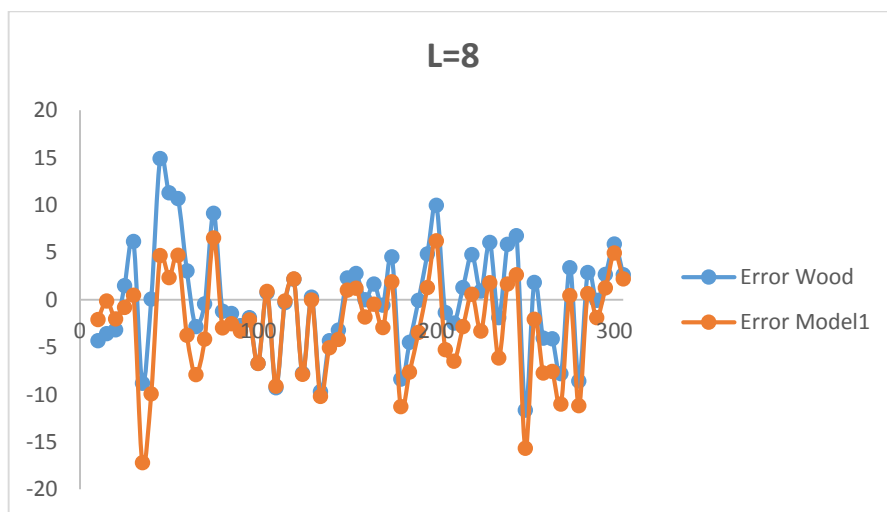


Figura 5.33.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 8.

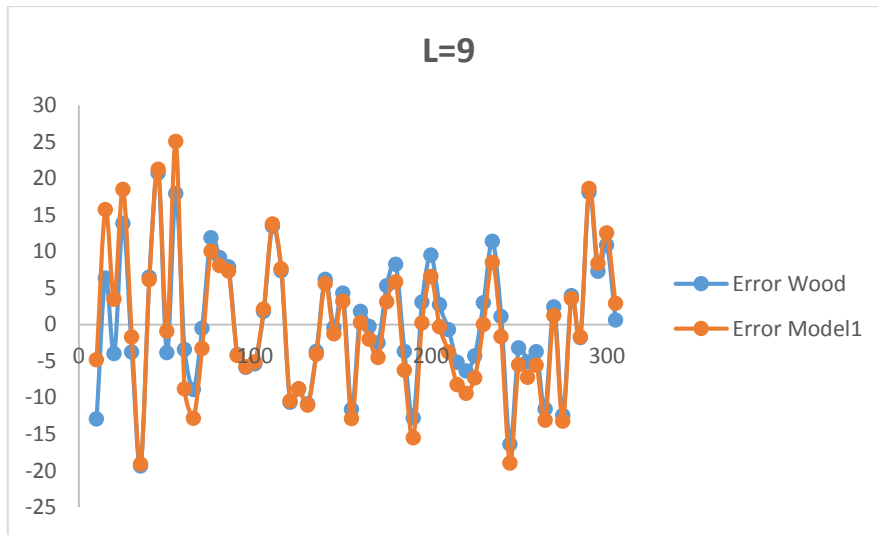


Figura 5.34.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 9.

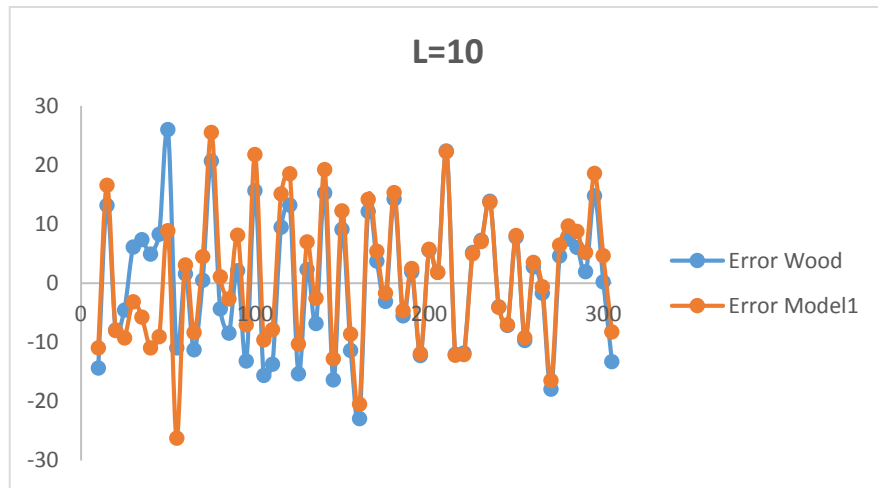


Figura 5.35.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción en función de los días en leche para la lactación 10.

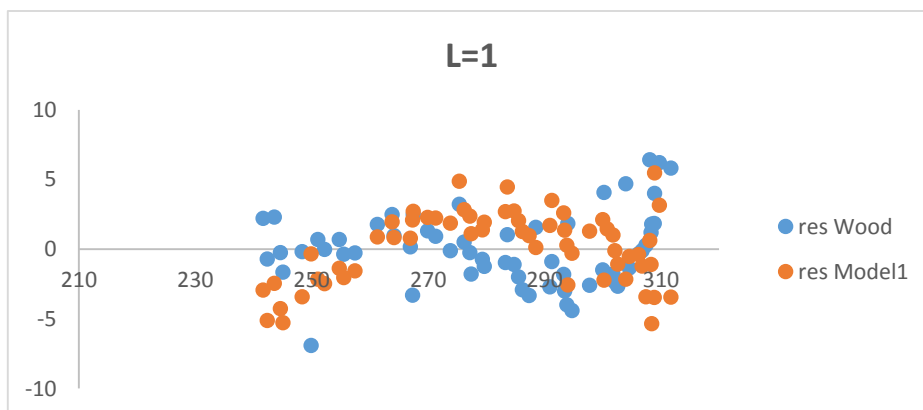
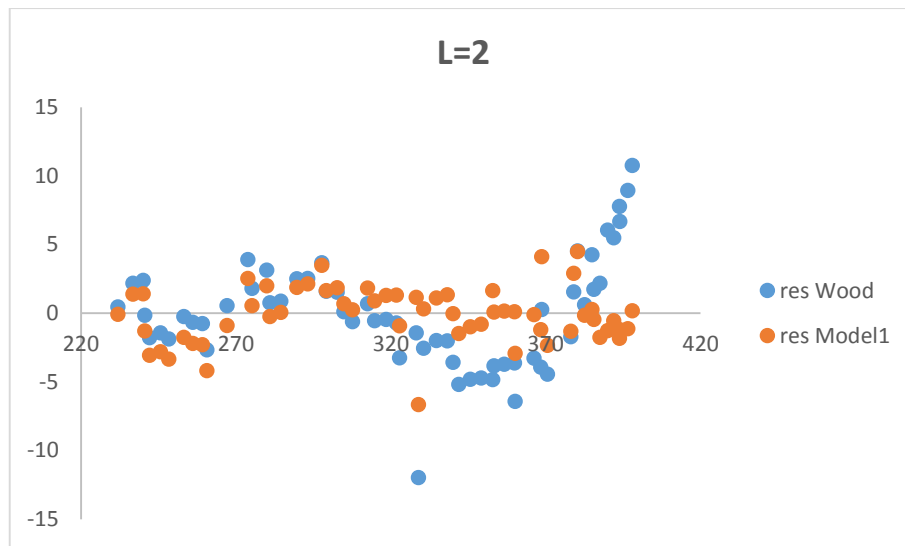
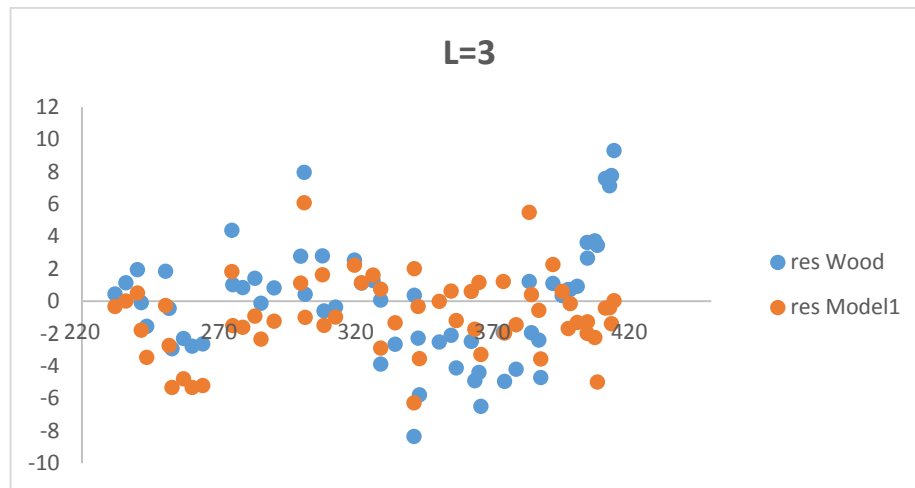


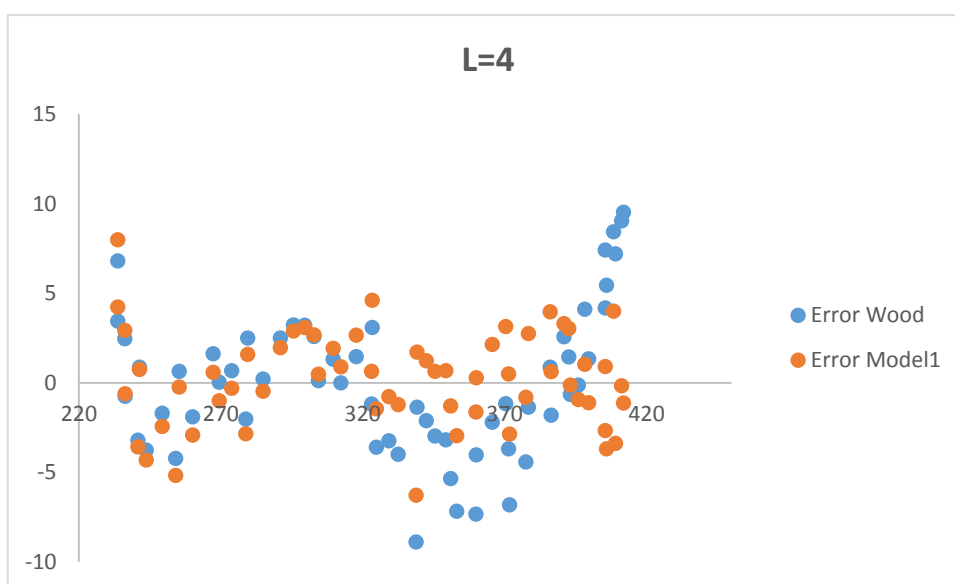
Figura 5.36.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 1.



**Figura 5.37.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 2.**



**Figura 5.38.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 3.**



**Figura 5.39.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 4.**



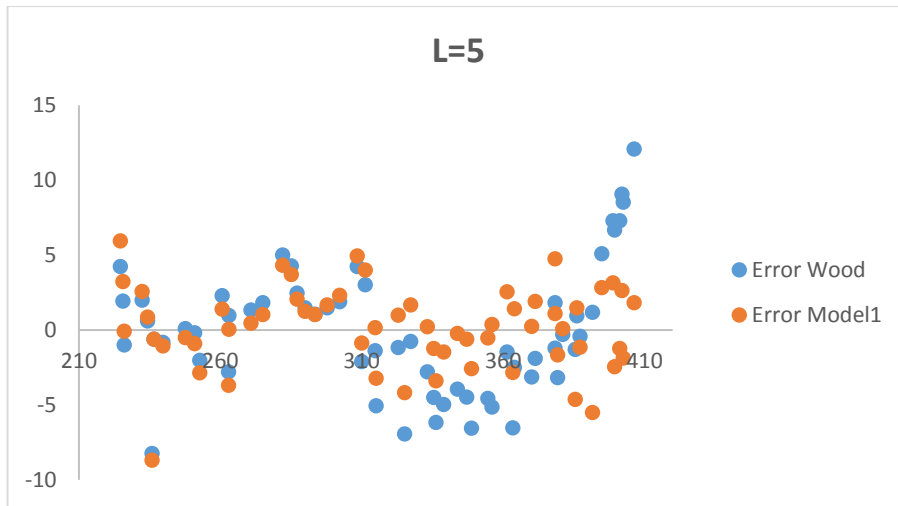


Figura 5.40.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 5.

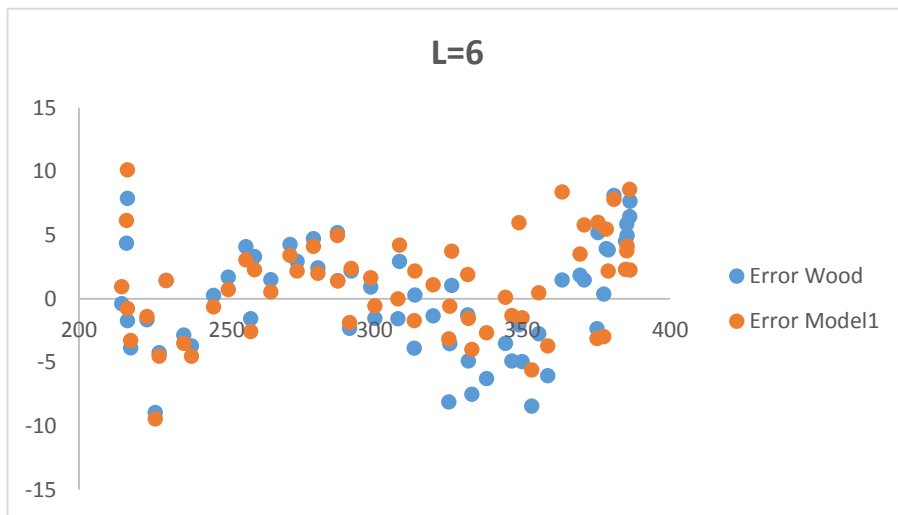


Figura 5.41.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 6.

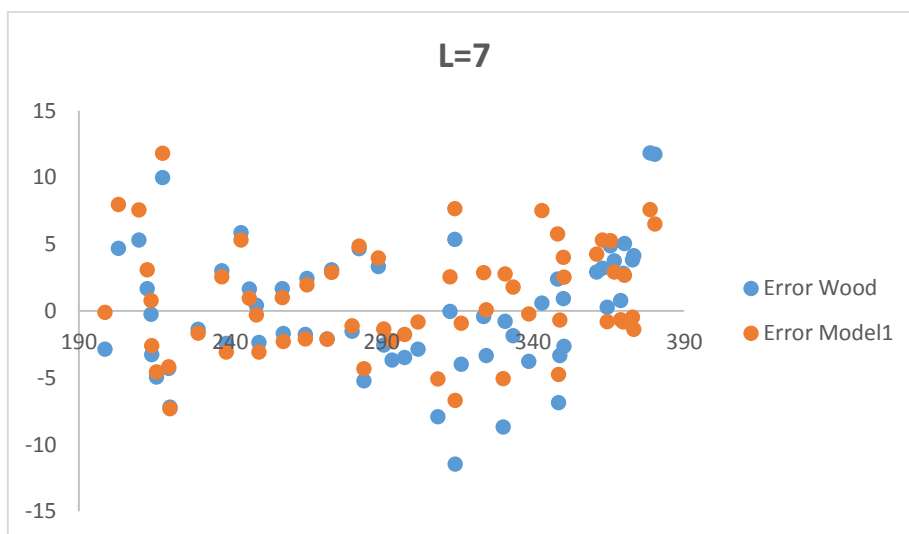
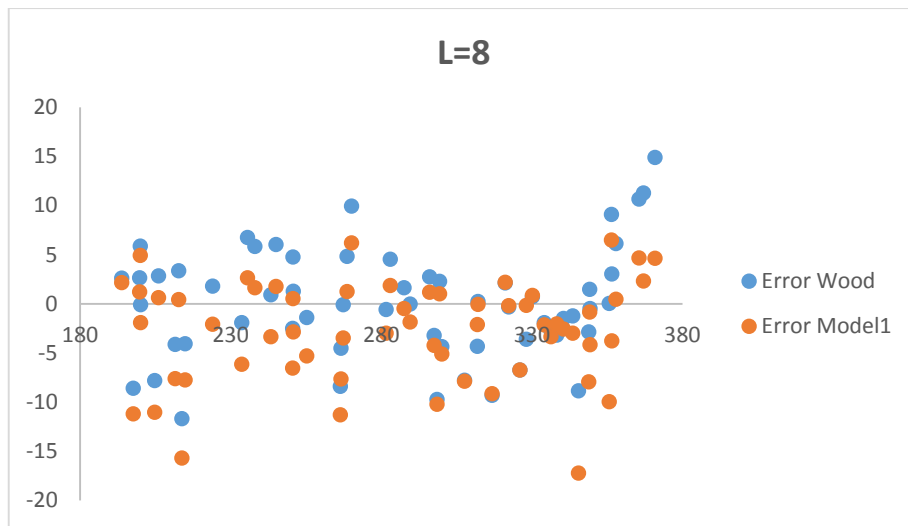
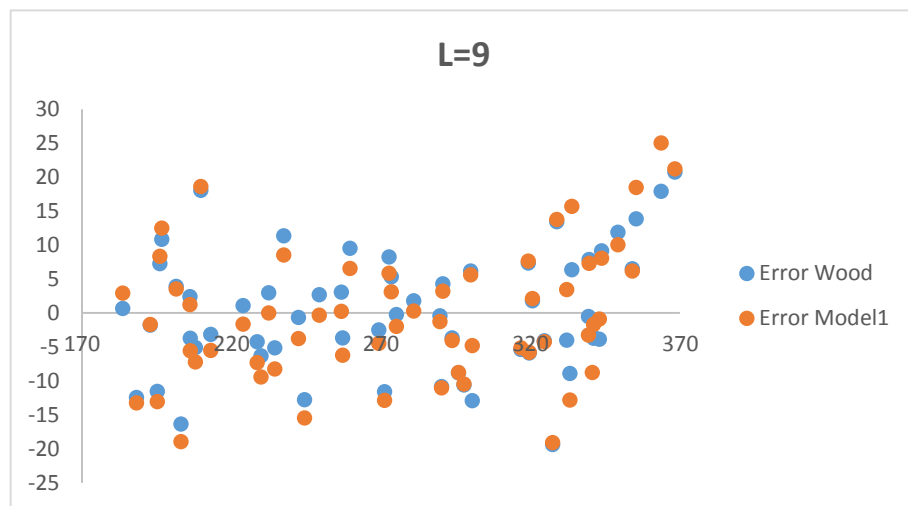


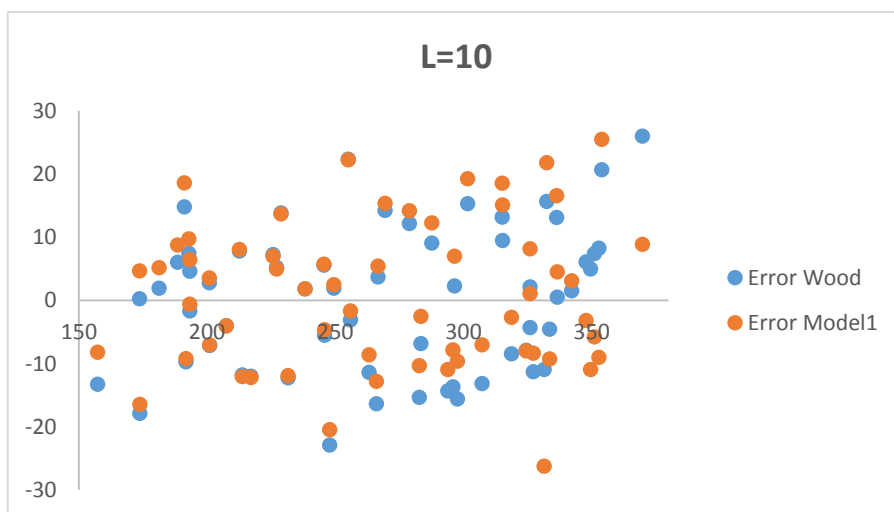
Figura 5.42.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 7.



**Figura 5.43.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 8.**



**Figura 5.44.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 9.**



**Figura 5.45.- Representación de los residuos del modelo de Wood y del modelo de producción para la lactación 10.**

En cualquiera de los casos, sea con el modelo propuesto o con el tradicional modelo de Wood, lo cierto es que la producción de leche se puede modelar sin mayores dificultades en función de L y DEL5..

Para comparar los dos modelos, se usa como método el estándar, basado en los gráficos de Bland-Altman que pone en dos ejes los puntos de predicción de ambos modelos: en abscisas se representan los promedios de los dos modelos y, en ordenadas, la diferencia entre ellos, de forma que cada punto tiene coordenadas:

$$\left( \frac{P1 + P2}{2}, P1 - P2 \right)$$

Donde P1 es la producción de uno de los modelos y P2, la del otro. En las gráficas de la 5.46 a la 5.55 se incluyen los gráficos de Bland-Altman para todas las lactaciones. En cada gráfica se muestra también como una línea la media de las diferencias y las líneas que delimitan los límites superior e inferior del 90% de ajuste, que se calculan como la media de las diferencias  $\pm 1,96 * \text{desviación típica de las diferencias}$ . Se puede observar en los gráficos que la media de las diferencias es prácticamente cero para todas las lactaciones y que la gran mayoría de los promedios permanece dentro de los límites de confianza del 90% lo que permite llegar a la conclusión de que ambos modelos son equivalentes.

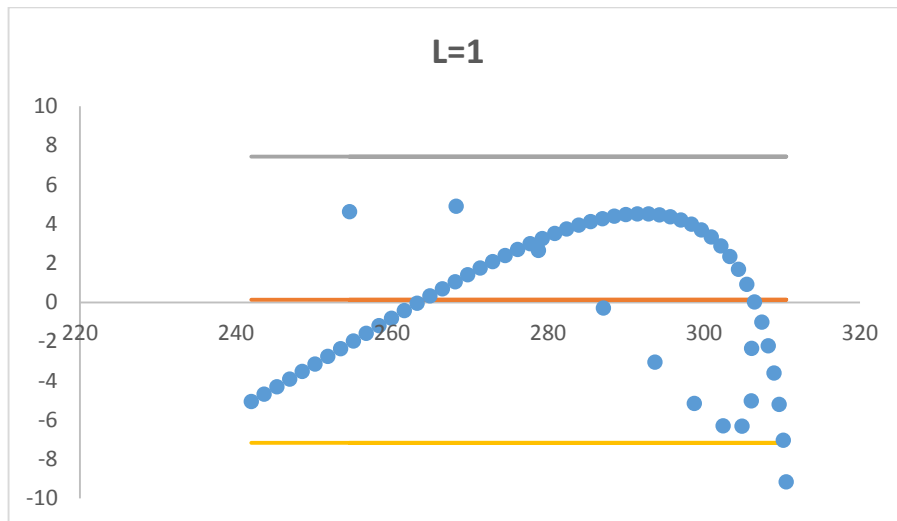


Figura 5.46.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 1.

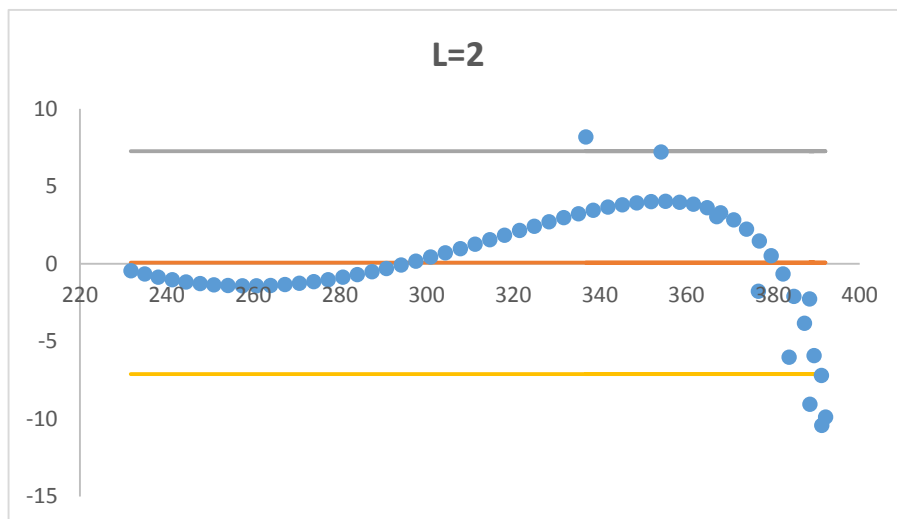


Figura 5.47.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 2.

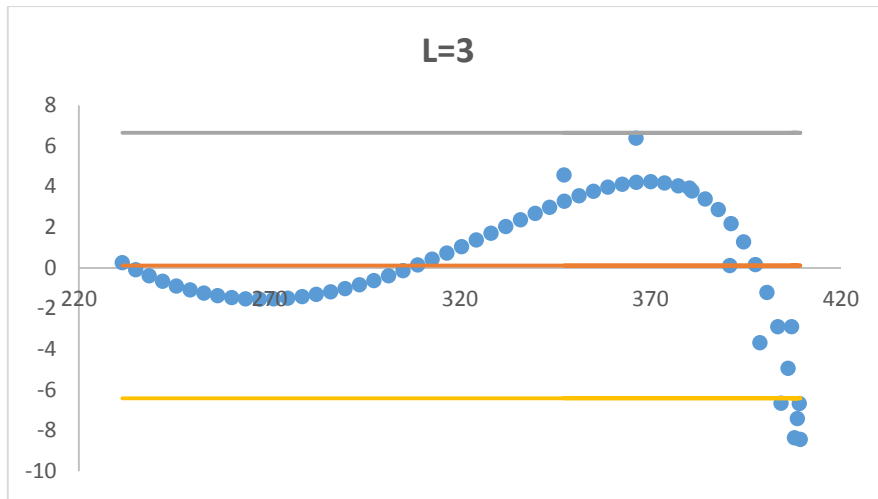


Figura 5.48.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 3.

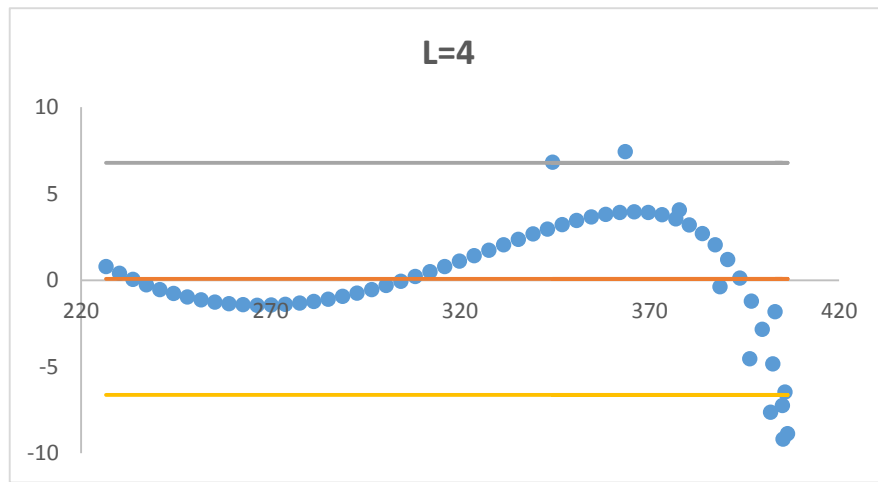


Figura 5.49.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 4.

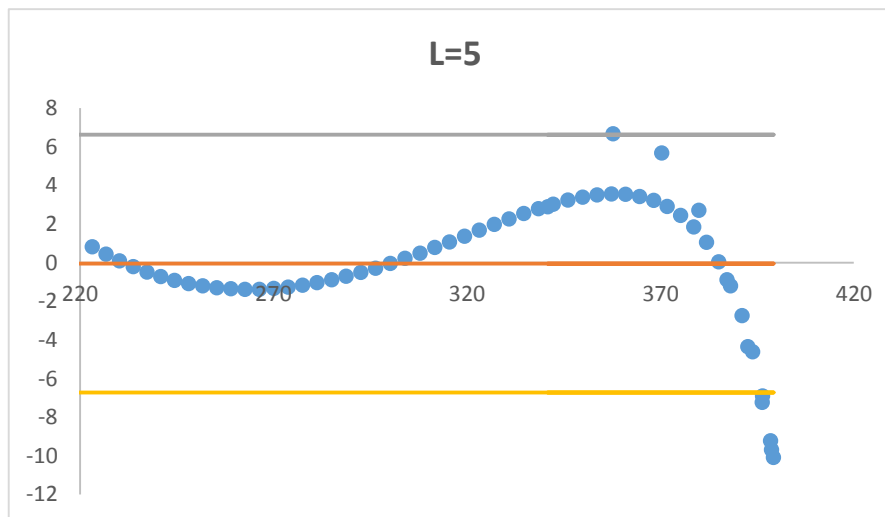
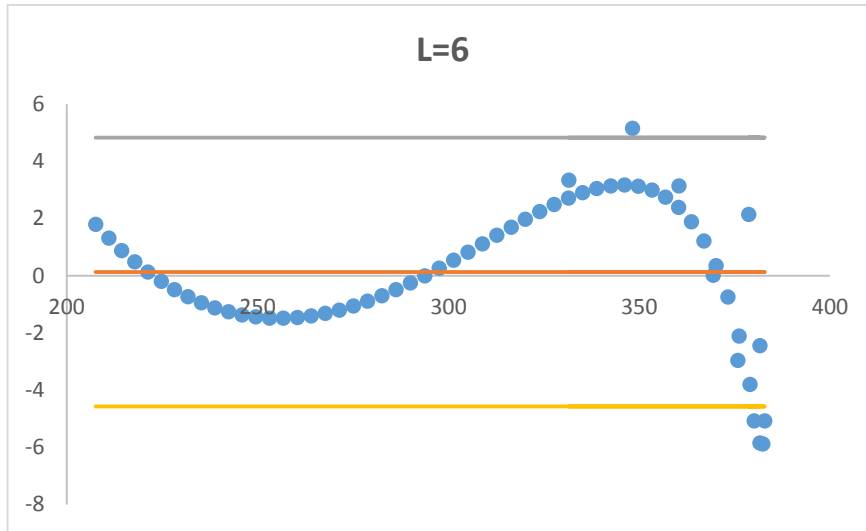
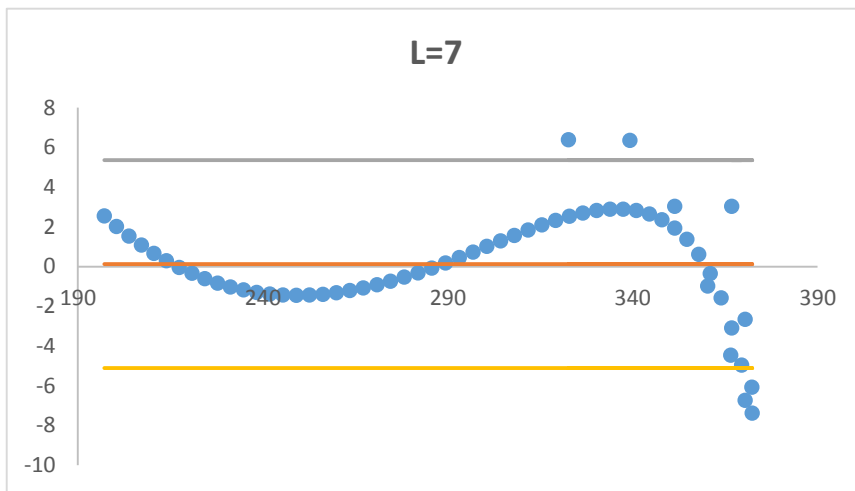


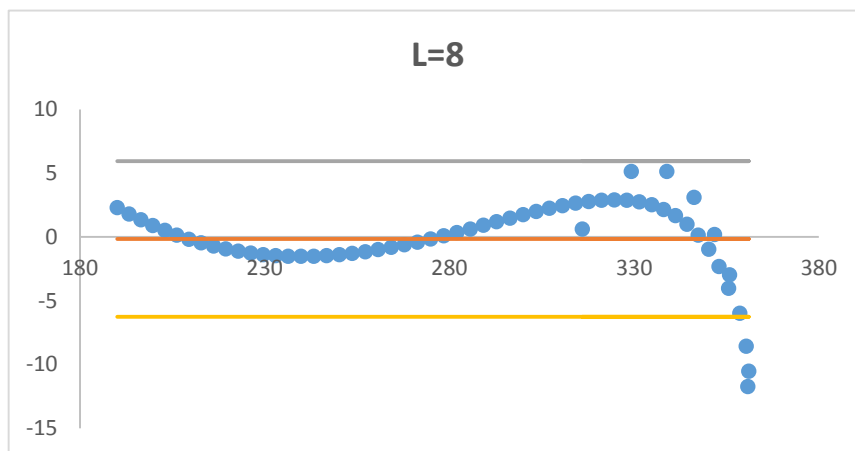
Figura 5.50.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 5.



**Figura 5.51.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 6.**



**Figura 5.52.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 7.**



**Figura 5.53.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 8.**

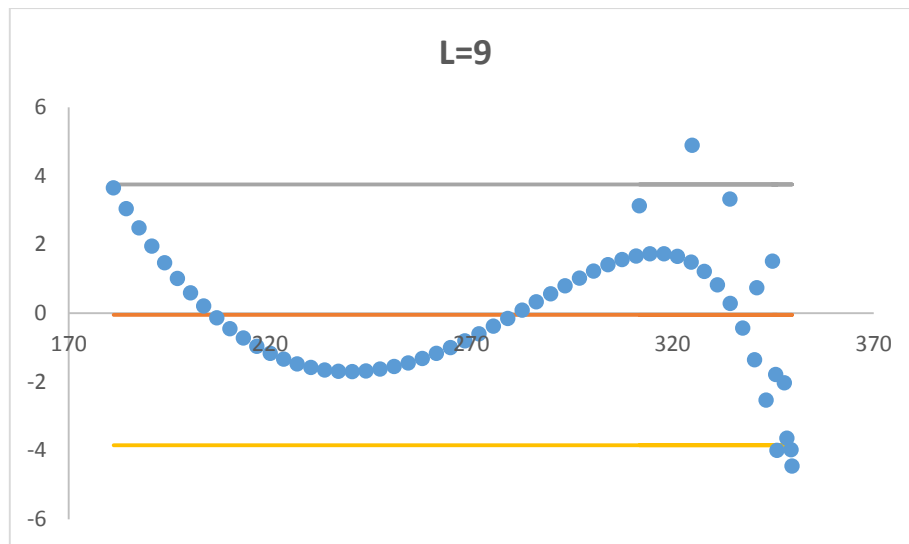


Figura 5.54.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 9.

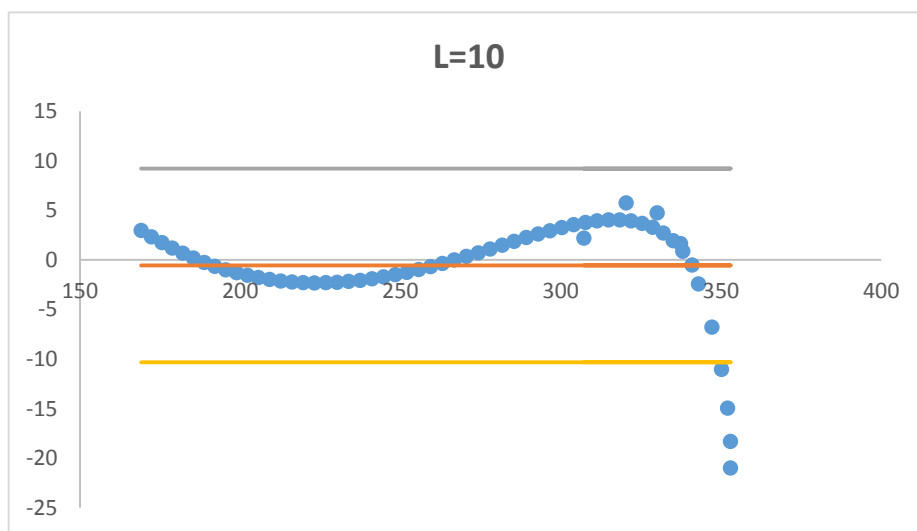


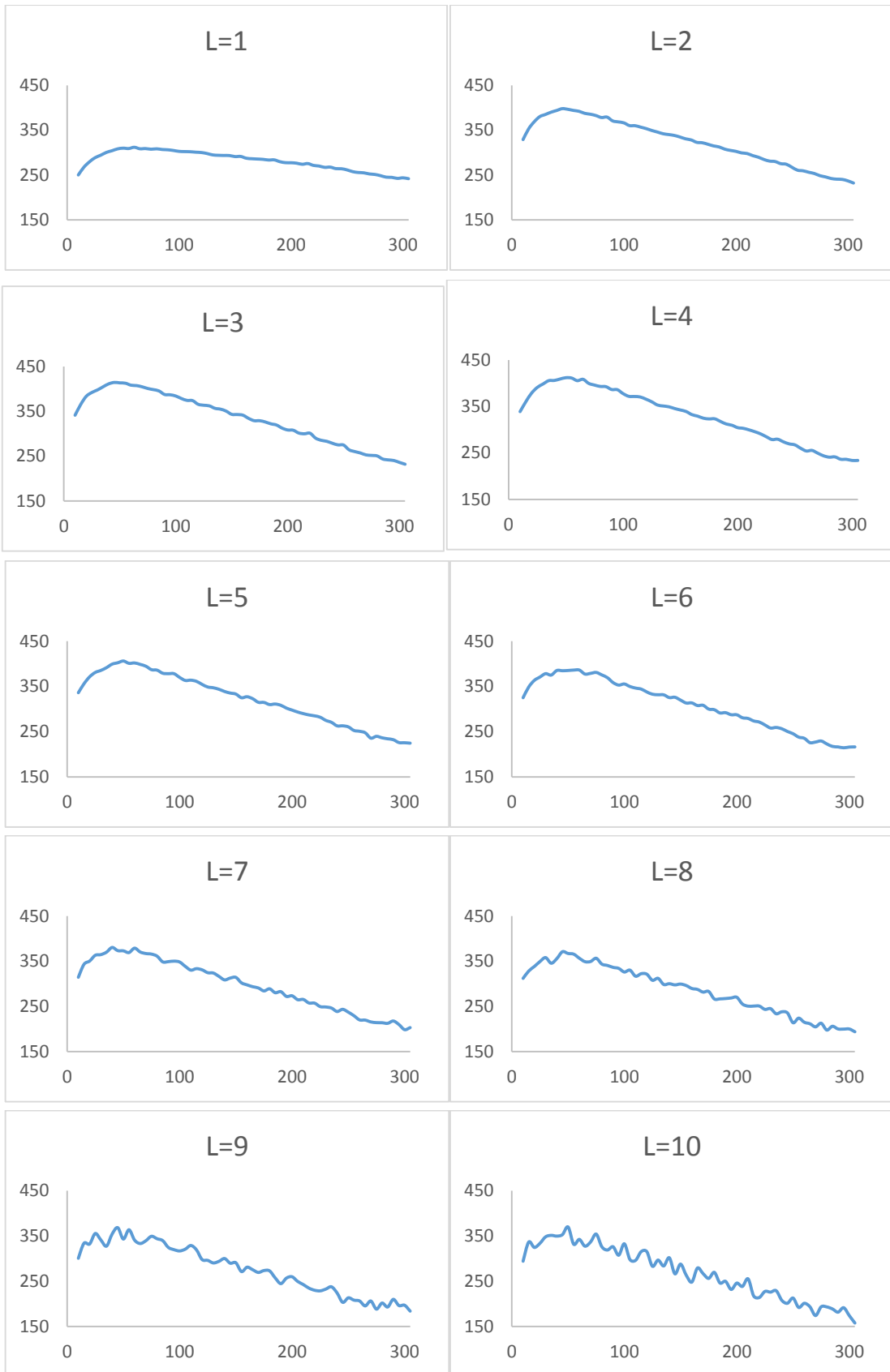
Figura 5.55.- Gráfica Bland-Altman comparativa de los modelos de Wood y de producción para la lactación 10.

## 5.5 Comprobación del efecto de SCC sobre la producción

Una vez calculado un modelo de producción en el que no interviene el recuento celular para explicar los datos de producción, es conveniente cuantificar si realmente el recuento celular no es un factor a tener en cuenta y, si tiene alguna influencia, cuantificar entre qué valores se mueve la influencia del SCC sobre la producción. Para realizar este análisis se seguirá trabajando con los datos de aquellas vacas de las que se disponga al menos 8 controles por lactación y de, al menos, 3 lactaciones. Las producciones en cada lactación serán normalizadas a 305 días ignorándose todos los datos que sobrepasen ese umbral de tiempo.

Como se indicó al principio del presente capítulo, para realizar el estudio se agruparán los datos de los controles de 5 en 5 días usando la variable DEL5. En la figura 5.56 se muestra el comportamiento agregado para cada una de las 10 lactaciones consideradas de la evolución de la producción normalizada a 10 días en función del parámetro DEL5. En la figura 5.57 se muestra para las mismas 10 lactaciones la evolución de los recuentos celulares (SCC) en función del mismo parámetro DEL5. El comportamiento observado de los agregados de producción y SCC no difieren de los presentados en la inmensa mayoría de las publicaciones sobre el tema, por lo que puede considerarse que el conjunto de datos sobre los que se trabaja es similar a la mayoría de los datos procedentes de vacas del mismo tipo (Holstein) y de explotaciones de carácter intensivo, como las propias de cualquier país con un sector ganadero desarrollado.

Se puede observar tanto en la figura 5.56 como en la 5.57, que a medida que se incrementa el número de lactación, las curvas son más oscilantes e irregulares. Esto es debido a que el número de datos utilizados para construir las curvas decrece a medida que la lactación es mayor ya que la fracción de vacas que tienen un número elevado de lactaciones es pequeña.



**Figura 5.56- Eje horizontal DEL5 [días]. Eje vertical Producción normalizada a 10 días [kg]**



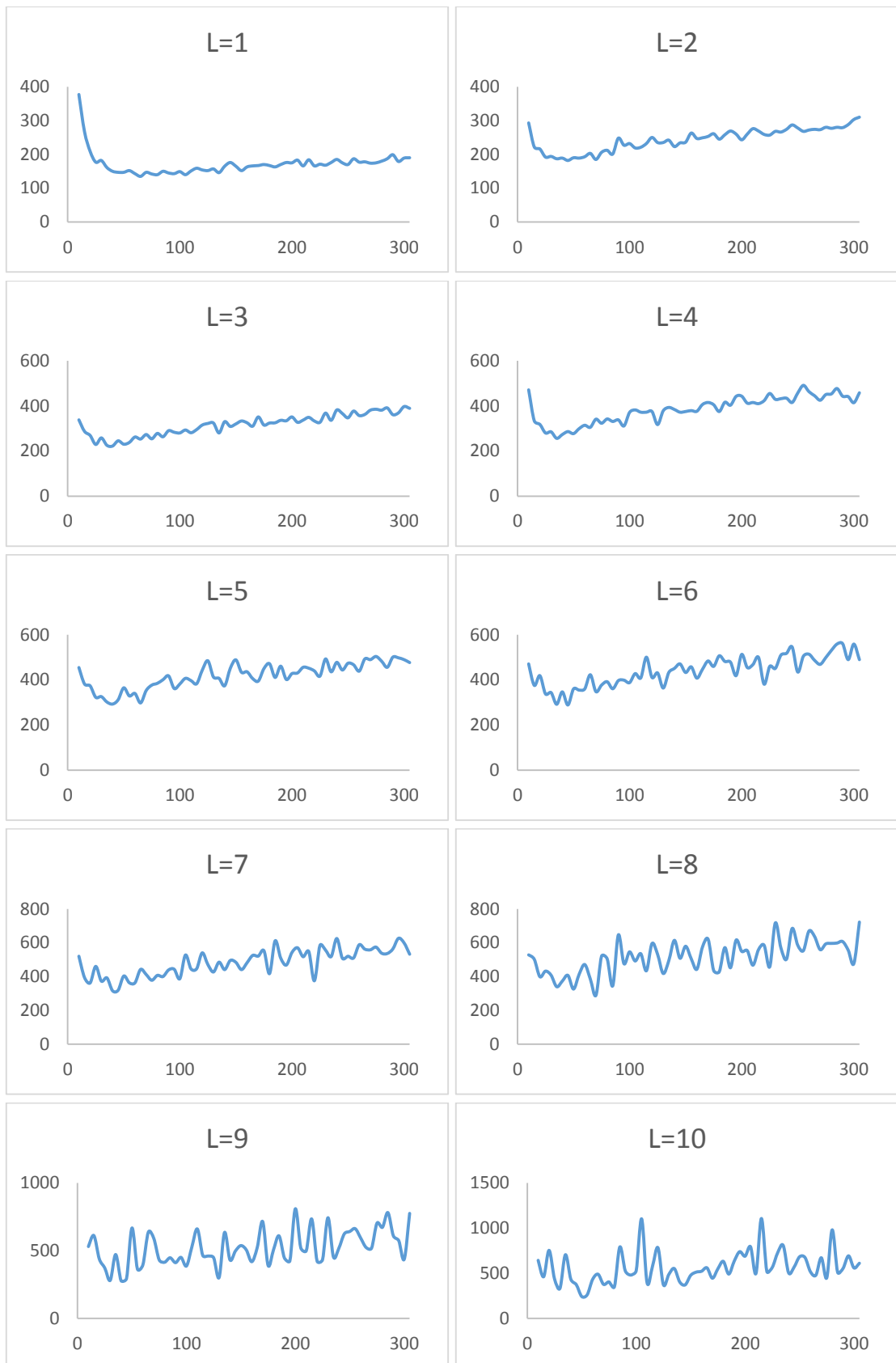


Figura 5.57.- Eje horizontal DEL5 [días]. Eje vertical SCC [cél/μl]

Ciertamente, analizando las figuras 5.56 y 5.57 se observa una tendencia del SCC al alza en función de DEL5 en todas las lactaciones que coincide con una tendencia a la baja de la producción en función de DEL5 en esas mismas lactaciones. Sin embargo, no es necesario ni suficiente que la pérdida de producción sea explicada por el SCC sino que existen otros factores propios del animal y que son ajenos al recuento celular y a la mastitis que pueden explicar este descenso de producción. El que dos variables que dependen de un parámetro tengan evoluciones similares no exige que tengan relación de dependencia entre ellas. En este caso, para desvelar si existe o no dependencia entre la producción y el SCC, se realiza el estudio que sigue a continuación.

Para hacer este estudio y obtener ese resultado se han clasificado por categorías todos los controles de vacas en función del SCC siguiendo el método de la Tabla 5.1. En esta clasificación se han usado las 8 categorías de SCC que se en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6.- Categorías de recuento celular objeto de estudio.**

<b>Valores de recuento celular [cél/μl]</b>	<b>Valor asignado representando la categoría [cél/μl]</b>
SCC < 50	25
50 < SCC < 100	75
100 < SCC < 200	150
200 < SCC < 400	300
400 < SCC < 800	600
800 < SCC < 1600	1200
1600 < SCC < 3200	2400
SCC > 3200	4800

Una vez realizada la clasificación de los controles se ha calculado la producción normalizada a 305 días de todas las cabezas de ganado y se ha agrupado en función del recuento celular y de la lactación. En la tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos y en la figura 5.48 se muestran gráficamente.

**Tabla 5.7. Producción de leche normalizada a 305 días en función de la lactación y del recuento celular.**

<b>Lactación</b>										
<b>Recuento celular [cél/μl]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
SCC<50	8712	10367	10581	10740	10536	9960	9737	9425	9125	8759
50<SCC<100	8558	9918	10274	10251	10038	9409	9154	8837	8520	8253
100<SCC<200	8462	9432	9969	9759	9655	9131	8869	8484	8312	7652
200<SCC<400	8412	9433	9706	9579	9360	9053	8754	8290	8150	7969
400<SCC<800	8372	9493	9832	9716	9324	8879	8577	8255	8085	7671
800<SCC<1600	8328	9538	9948	9656	9455	8894	8576	8156	7910	7025
1600<SCC<3200	8037	9313	9528	9632	9126	8959	8377	7992	7331	6420
SCC>3200	7631	8793	9107	9152	8777	8441	7979	7922	6436	6009

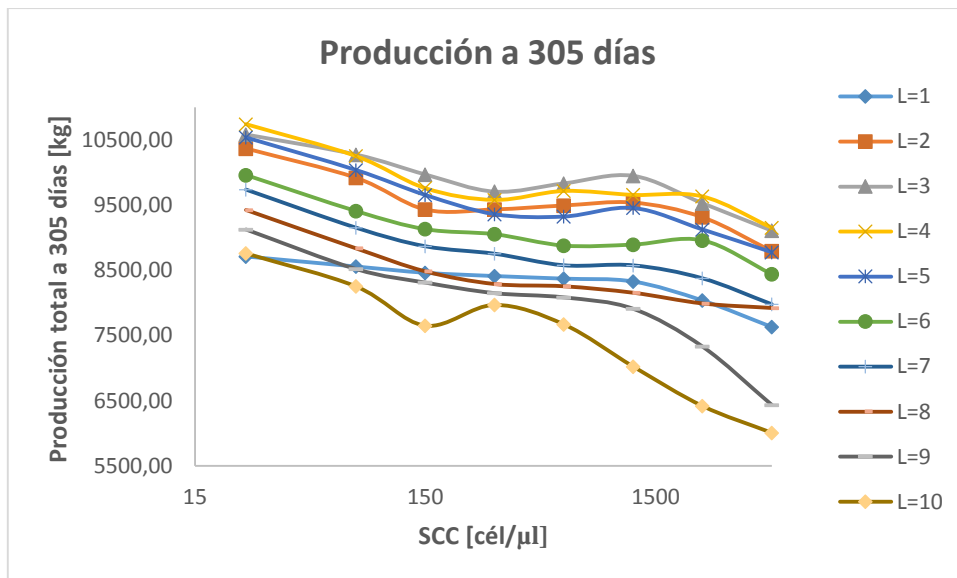


Figura 5.58.- Producción normalizada a 305 días en función del recuento de células somáticas de cada lactación

Atendiendo a todos los estudios realizados en la literatura científica anterior, se considera que una vaca está sana cuando el SCC < 200 cél/μl. Esta afirmación establece un umbral un tanto categórico y puede terminar por hacer creer que no debería haber una pérdida apreciable en la producción hasta que se superase ese umbral, a partir del cual la producción debería precipitarse más o menos rápidamente.

En cambio, si analizamos los datos disponibles, y tal como se muestra en la Figura 5.58, se puede comprobar que se produce un descenso de la producción extremadamente acusado cuando se pasa de la categoría de menos de 50 cél/μl (denotada por el valor SCC = 25 cél/μl) a las categorías de 50-100 cél/μl (denotada por SCC = 75 cél/μl) y de 100-200 cél/μl (SCC = 150 cél/μl) y que, una vez se ha situado la producción en esos niveles de recuento celular, la producción no se modifica sustancialmente hasta que no se supera ampliamente el umbral de las 3600 cél/μl. Por tanto, de acuerdo con los datos de esta gráfica, los conceptos manejados tradicionalmente no parecen confirmarse.

Por el contrario, si se considera el umbral de SCC = 50 cél/μl, sí que hay una pérdida apreciable de producción hasta las dos categorías siguientes: 75 y 150 cél/μl y, a partir de ahí se mantiene estable.

Para cuantificar la pérdida de producción real, se han presentado los datos de las tablas 5.8 y 5.9: en ellas se muestra la pérdida de producción cuando se pasa de una categoría de recuento celular a la inmediata siguiente, tanto en términos absolutos de producción (Tabla 5.8) como en términos relativos (Tabla 5.9).

Como se puede observar, la zona correspondiente a SCC comprendido entre 200 y 1600 cél/μl muestran los menores valores de pérdidas de producción, mientras que los peores casos se obtienen para el cambio entre categoría con recuentos celulares bajos y con recuentos celulares muy altos. En algunos casos, al pasar de un recuento celular al inmediatamente siguiente, la producción no evoluciona de manera negativa si no que aumenta la producción, aunque no lo hace de forma significativa. Estos casos no se deben interpretar como que la producción aumenta al aumentar el recuento celular, si no que al no tener influencia el recuento celular sobre la producción cuando el SCC se mueve entre ciertos valores, la producción puede oscilar sin consecuencias.

Tabla 5.8. Pérdida de producción a lo largo de una lactación al duplicar el recuento celular.

Lactación SCC	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5	L=6	L=7	L=8	L=9	L=10
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	154	449	307	489	498	551	583	588	605	506
150	96	486	305	492	383	278	285	353	208	601
300	50	-1	263	180	295	78	115	194	162	-317
600	40	-60	-126	-137	36	174	177	35	65	298
1200	44	-45	-116	60	-131	-15	1	99	175	646
2400	291	225	420	24	329	-65	199	164	579	605
4800	406	520	421	480	349	518	398	70	895	411

Tabla 5.9. Pérdida porcentual de producción a lo largo de una lactación al duplicar el recuento celular. Se destacan los casos en los que la pérdida es menor del 2%, menor del 0,5% y en los que es mayor del 5%

Lactación SCC	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5	L=6	L=7	L=8	L=9	L=10
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	1,799	4,527	2,988	4,770	4,961	5,856	6,369	6,654	7,101	6,131
150	1,134	5,153	3,059	5,042	3,967	3,045	3,213	4,161	2,502	7,854
300	0,594	-0,011	2,710	1,879	3,152	0,862	1,314	2,340	1,988	-3,978
600	0,478	-0,632	-1,282	-1,410	0,386	1,960	2,064	0,424	0,804	3,885
1200	0,528	-0,472	-1,166	0,621	-1,386	-0,169	0,012	1,214	2,212	9,196
2400	3,621	2,416	4,408	0,249	3,605	-0,726	2,376	2,052	7,898	9,424
4800	5,320	5,914	4,623	5,245	3,976	6,137	4,988	0,884	13,906	6,840

## 5.6 Comprobación del efecto de SCC sobre la producción a través de la lactación DEL5 patrón

A partir de los datos disponibles, es posible construir para cada uno de los niveles definidos de recuento celular y para cada una de las lactaciones una lactación promedio para una vaca promedio sin más que promediar los valores para cada uno de los períodos DEL5 disponibles. Esta lactación promedio sería la lactación DEL5 patrón. El método de trabajo para obtener la lactación DEL5 patrón será el siguiente:

1. Para cada uno de los controles lecheros mensuales de la base de datos de ASCOL, se escanean los valores de las vacas que contiene y se clasifican por lactación, días en leche de la vaca, y categoría de recuento celular en el que se encuentra la vaca.
2. Las lactaciones se normalizarán a 305 días en leche por lo que los datos de aquellas reses que superen ese valor de DEL serán ignorados. Pero únicamente se ignorarán los datos que superen los 305 días en leche.
3. Para construir una lactación DEL5 patrón se recorren los datos de los controles de las vacas que se encuentran en la lactación deseada. Para cada uno de los 61 puntos ( $305/5 = 61$ ) DEL5 se buscan todas las cabezas de ganado para las que se dispone un control en ese DEL5 y se realiza la media del dato de interés. En este caso se hará con la producción normalizada a 10 días presente en el control.
4. Cada uno de los valores promedio calculado en cada punto DEL5 configurará el dato de producción para la vaca patrón en ese valor de días en leche de la lactación calculada.

Tal y como se ha definido esta estrategia de configuración de la lactación DEL5 patrón, es el mismo mecanismo utilizado para calcular los parámetros del modelo de producción. Pero si en el punto 3 se añade un nivel más de filtrado y se calcula la media únicamente para cabezas de ganado que tengan un determinado nivel de recuento celular, la lactación DEL5 patrón construida corresponderá ahora a vacas con el nivel deseado de recuento celular. De esta forma, se pueden obtener lactaciones DEL5 patrón para vacas con un recuento celular por ejemplo, inferior a 50 cél/ $\mu$ l, siendo esta lactación un referente estadístico de gran calidad para evaluar la producción del ganado dentro de ese recuento celular. En la tabla 5.10 se muestra un ejemplo de cómo serían los datos obtenidos de una lactación DEL5 patrón para varias categorías de recuento celular.

**Tabla 5.10.- Ejemplo de datos calculados para una lactación DEL5 patrón para diversas categorías de recuento celular**

<b>DEL</b>	<b>Pm SCC_25</b>	<b>Pm SCC_75</b>	<b>Pm SCC_150</b>	<b>Pm SCC_300</b>	<b>Pm SCC_600</b>
5	241,33	221,50	241,86	218,25	165,00
10	258,37	253,77	250,60	247,95	240,72
15	273,62	267,93	261,37	264,11	267,14
20	283,15	278,82	277,44	277,26	275,36
25	291,45	286,77	286,96	286,66	288,00
30	296,25	292,16	291,93	299,53	292,28
35	302,52	300,10	298,96	293,40	295,87
40	304,80	302,92	307,44	306,83	298,02
45	308,46	306,99	308,71	305,88	317,30
50	312,48	306,07	311,25	301,53	310,08
55	310,67	306,79	306,50	312,24	311,52
60	312,13	314,61	309,94	310,27	305,79
65	309,58	308,05	306,92	305,15	304,58
70	309,92	309,12	309,70	301,96	312,07
75	307,77	308,34	307,61	310,22	304,13
80	309,04	308,14	309,33	307,64	305,65
85	307,20	308,04	307,60	306,17	301,23
90	308,79	307,24	298,62	300,10	303,61
95	306,81	303,67	303,57	300,59	303,76
100	304,03	303,01	301,11	300,56	296,00
105	302,79	305,41	297,25	302,27	294,08
110	303,47	302,75	299,97	298,60	294,79
115	303,28	299,80	297,08	300,73	306,08
120	303,11	299,64	293,04	299,10	294,26
125	301,52	295,38	293,50	296,04	290,73
130	296,18	294,26	297,23	290,52	287,40
135	296,64	292,99	291,27	293,06	283,02
140	.....	.....	.....	.....	.....

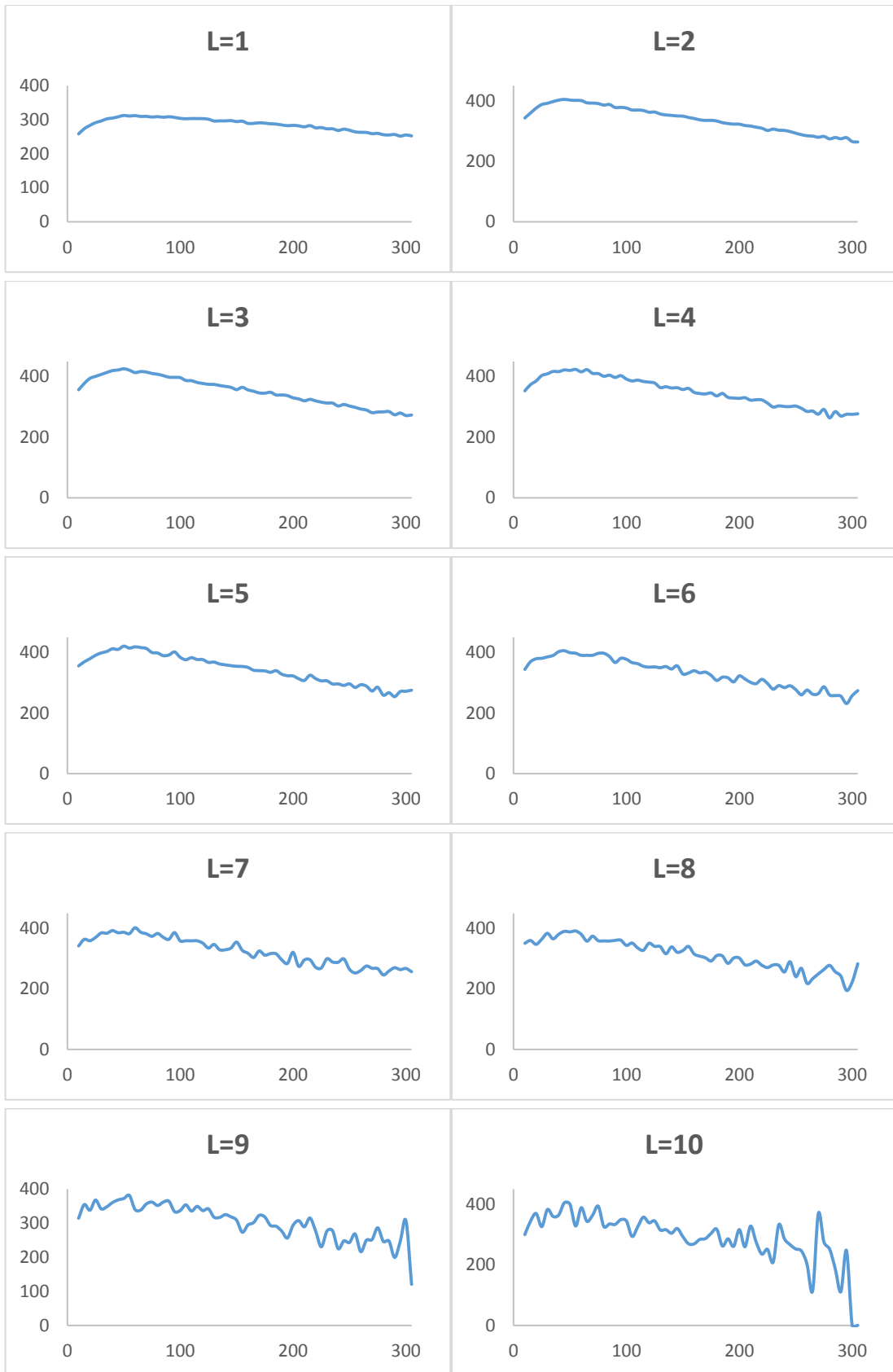
La validez estadística de la lactación DEL5 patrón depende lógicamente del número de datos disponibles para calcular cada uno de los valores promedio en cada punto DEL5. Si el número de controles disponibles en una determinada lactación en un valor DEL5 concreto es demasiado bajo, la lactación DEL5 patrón tendrá que prescindir de ese punto en su construcción. A modo de ejemplo, se muestran en la tabla 5.11 el número de controles disponibles para obtener los puntos DEL5 para todas las lactaciones con un recuento celular de 25 cél/μl. En la tabla se puede apreciar que el número de controles disponibles para realizar los cálculos desciende rápidamente con el número de lactación y para lactaciones superiores a L=6 ó L=7, el número de datos disponibles empieza a hacer que los resultados no sean todo lo significativos que es deseable. Otro aspecto que se aprecia fácilmente es el escaso número de valores disponibles en todas las lactaciones para el punto DEL5 = 5 que aconseja eliminarlo de todos los estudios posteriores para que no perturbe las conclusiones posibles.

El patrón de distribución seguido por los datos mostrado en la tabla 5.10 se repite para todas las categorías de recuento celular: pocos datos en DEL5 = 5 y un número menguante de datos disponibles según se avanza en las lactaciones. También, como consecuencia de la distribución de categorías de recuentos celulares mostradas en la figura 3, el número global de datos disponibles se va haciendo menor conforme el SCC es mayor.

**Tabla 5.11.- Número de controles disponibles en cada lactación y en cada punto DEL5 para calcular la lactación DEL5 media para la categoría de recuento celular 25 cél// $\mu$ l.**

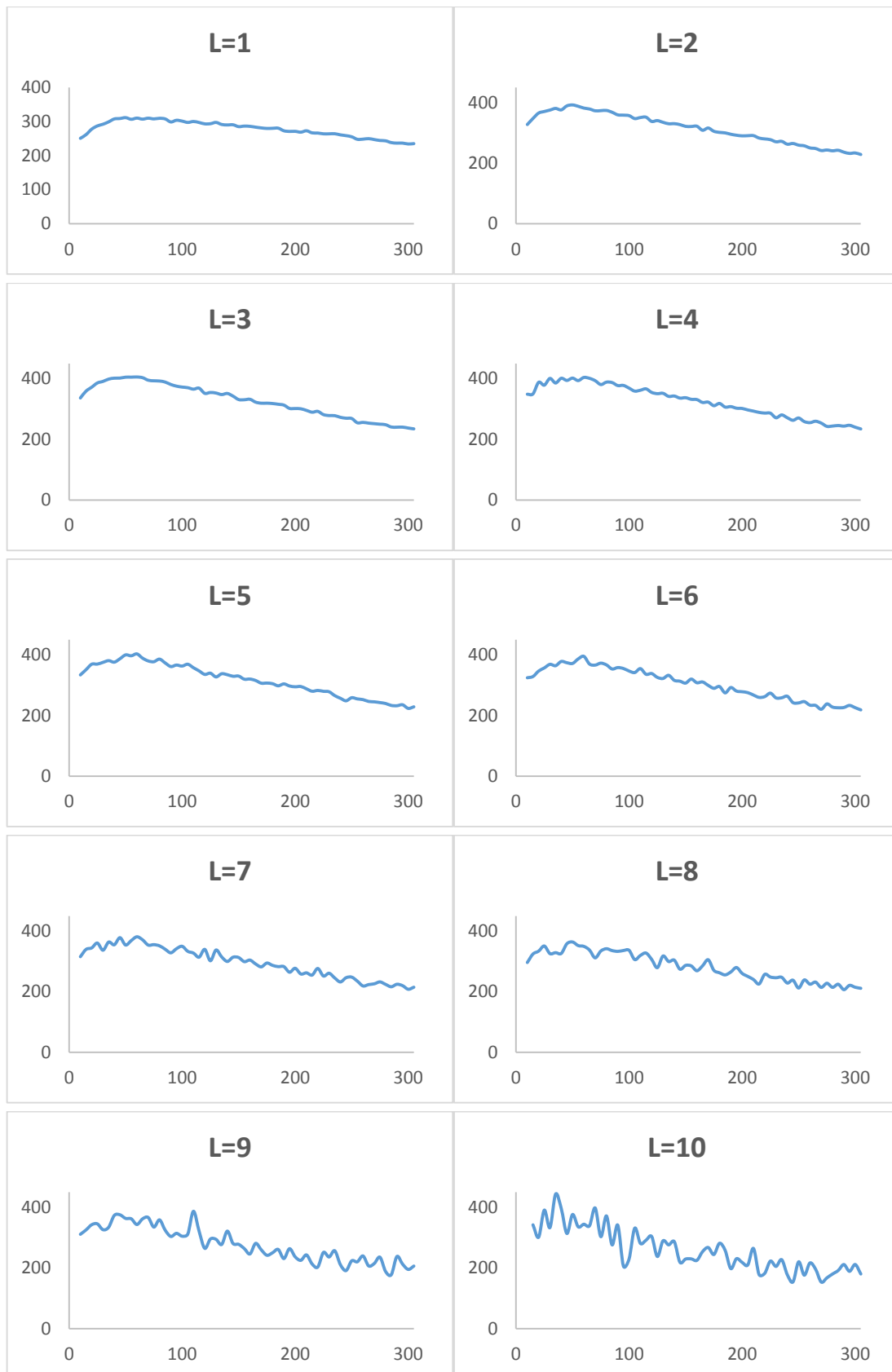
DEL	NL1	NL2	NL3	NL4	NL5	NL6	NL7	NL8	NL9	NL10
5	3	5	0	1	2	0	0	0	0	0
10	1369	1674	999	513	280	165	75	29	17	13
15	2147	2513	1581	871	466	223	115	45	34	16
20	2643	2734	1770	1048	533	281	168	60	23	16
25	2908	2833	1826	1082	563	300	144	77	35	13
30	3078	2901	1786	1059	583	333	138	71	32	19
35	3308	2869	1829	1084	529	284	130	71	26	12
40	3544	2960	1825	1039	576	269	148	57	25	16
45	3198	2738	1712	946	506	263	128	56	29	14
50	3289	2690	1676	943	480	254	154	60	26	17
55	3185	2619	1628	939	491	270	127	63	38	10
60	3129	2523	1588	897	474	254	107	53	23	10
65	3186	2491	1566	902	472	240	106	52	25	13
70	3411	2677	1592	913	476	262	115	51	31	10
75	3187	2536	1561	832	460	239	106	50	26	9
80	3204	2448	1482	803	447	215	112	52	26	16
85	3011	2336	1406	797	418	218	114	56	24	4
90	2965	2194	1358	744	421	205	86	50	22	14
95	3004	2201	1348	771	397	197	86	44	14	12
100	3093	2271	1413	822	429	237	121	43	22	13
105	3082	2243	1358	665	386	194	105	44	21	12
110	2889	2137	1266	688	365	186	108	44	25	12
115	2872	2038	1197	667	397	176	96	40	24	9
120	2810	1849	1115	650	357	183	82	42	17	5
125	2811	1907	1190	656	367	161	70	42	14	7
130	2885	2020	1155	670	333	194	98	40	18	10
135	2817	1928	1158	577	321	150	85	34	17	7
140	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Para comprobar si las lactaciones patrón construidas guardan relación con las curvas de producción habituales, como ejemplo, en las figuras 5.59 y 5.60 se puede ver el aspecto que tienen las curvas de producción frente a los días en leche de las lactaciones DEL5 patrón para las categorías de recuento celular de  $SCC < 50$  cél/ $\mu$ l y  $200 < SCC < 300$  cél/ $\mu$ l. En ambas figuras se puede apreciar que las lactaciones DEL5 patrón siguen el mismo formato de evolución que una lactación normal. También se puede apreciar que, debido a la distribución de los datos disponibles, para las lactaciones superiores a la sexta la escasez de valores hace que la media de la producción no mantenga una línea continua y homogénea, con fuertes variaciones que hacen que la utilización de la lactación DEL5 patrón no sea aconsejable para lactaciones superiores a la sexta.



**Figura 5.59.- Aspecto general de la lactación DEL5 patrón para la categoría de recuento celular de SCC < 50 cél/μl en todas las lactaciones.**





**Figura 5.60.- Aspecto general de la lactación DEL5 patrón para la categoría de recuento celular de  $200 < \text{SCC} < 300 \text{ cél}/\mu\text{l}$  en todas las lactaciones.**

Una vez se ha comprobado que la lactación patrón es similar a la curva de lactación de una cabeza de ganado se puede utilizar para verificar las conclusiones obtenidas sobre la

influencia del recuento de células somáticas en la producción. Para ello, inicialmente se va a representar la curva de lactación DEL5 patrón para las categorías de recuento celular SCC < 50 cél/μl (denotada por SCC = 25 cél/μl) y SCC entre 50 y 100 cél/μl (denotada por SCC = 75 cél/μl) de todas las lactaciones para comprobar si se produce el descenso acusado de la producción obtenido en las secciones anteriores. Para evitar la escasez de datos y la imprecisión producida por las oscilaciones en los valores, se va a realizar únicamente para las lactaciones de la primera a la sexta. Las figuras de la 5.61 a la 5.66 muestran claramente como la producción de las vacas con un recuento celular inferior a 50 cél/μl (categoría SCC = 25 cél/μl) es superior a la producción de vacas con un recuento celular entre 50 y 100 cél/μl (categoría SCC = 75 cél/μl) a lo largo de todos los días de la lactación y para todas las lactaciones consideradas. Se puede apreciar que las diferencias son menores para la primera lactación ya que la curva de producción de las novillas es mucho más plana que la de vacas de mayor edad, por lo que la diferencia en la producción se ve menos afectada por el recuento celular.

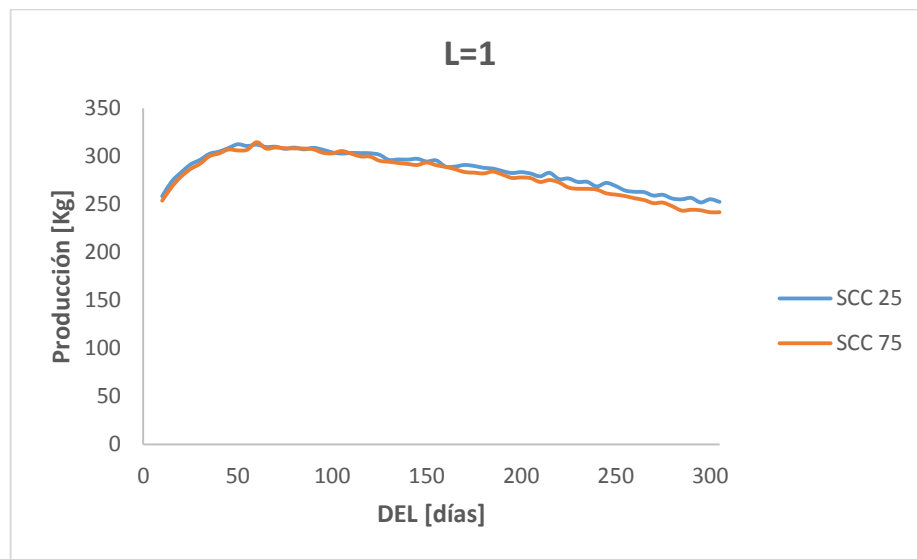


Figura 5.61.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC = 75 cél/μl en la lactación 1.

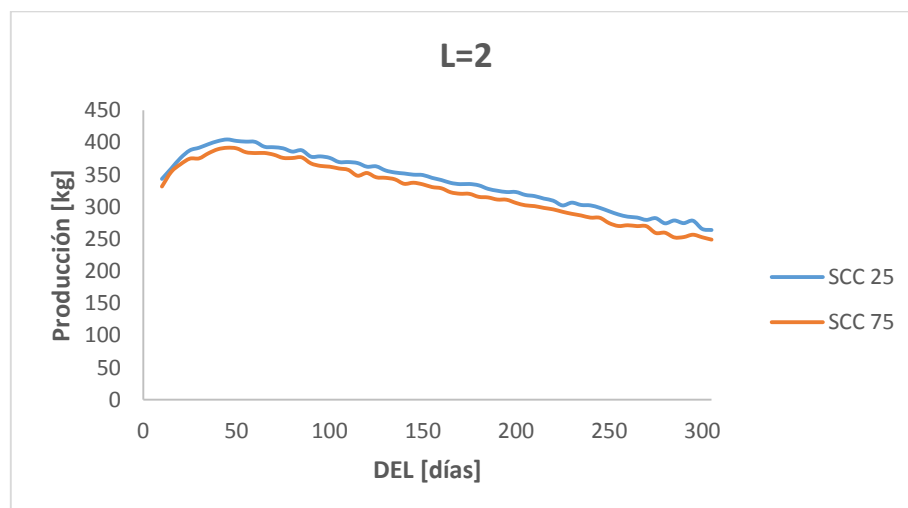
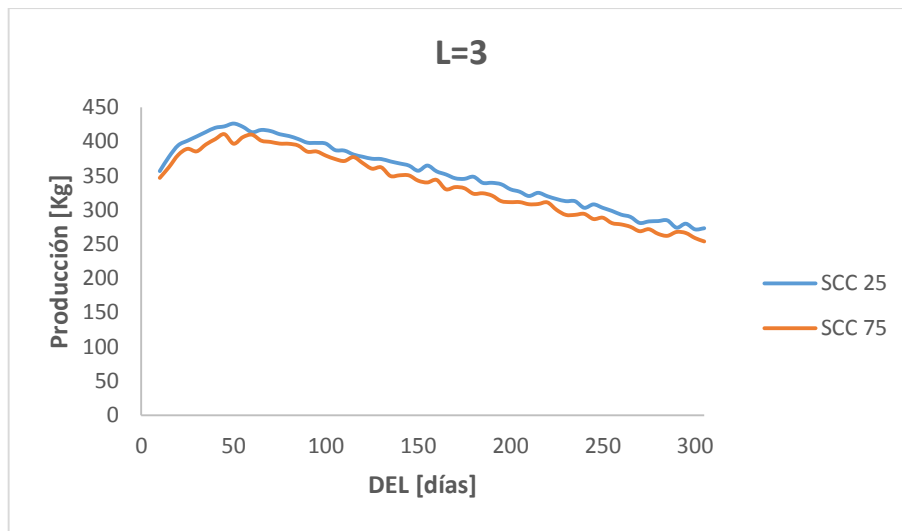
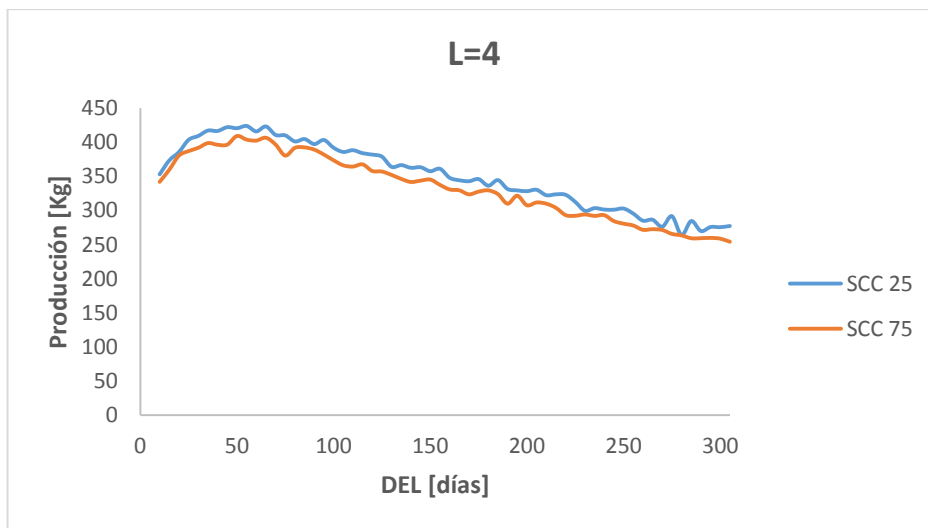


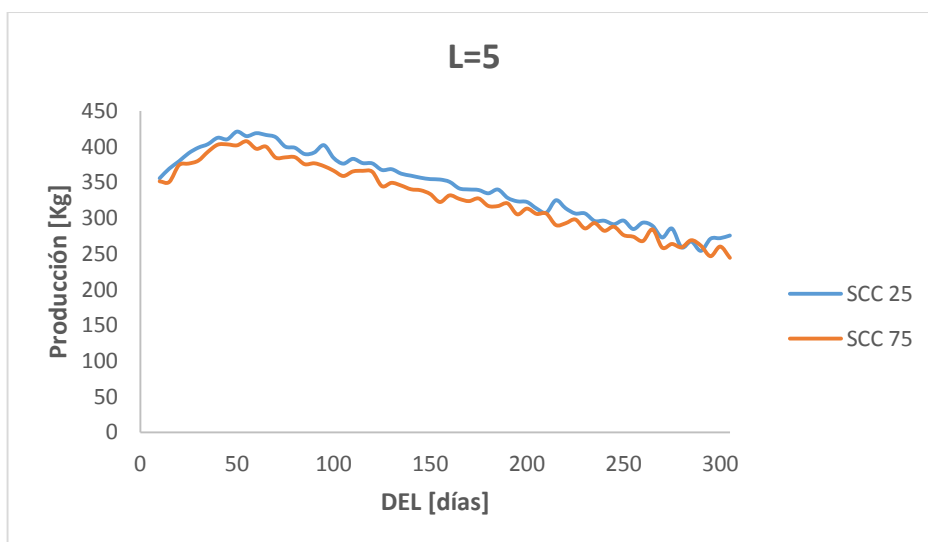
Figura 5.62.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC =75 cél/μl en la lactación 2.



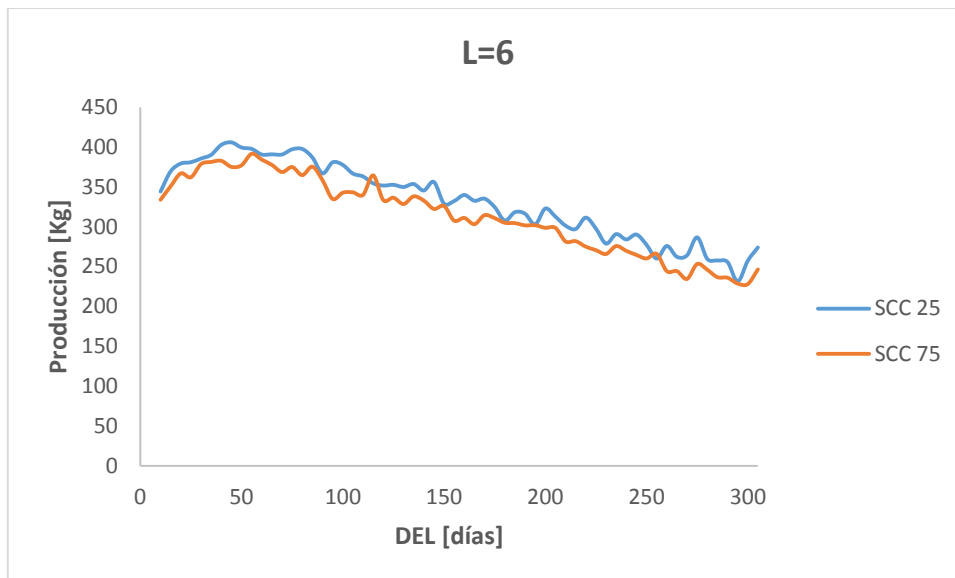
**Figura 5.63.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC =75 cél/μl en la lactación 3.**



**Figura 5.64.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC = 75 cél/μl en la lactación 4.**



**Figura 5.65.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC = 75 cél/μl en la lactación 5.**



**Figura 5.66.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 25 cél/μl y SCC = 75 cél/μl en la lactación 6.**

Una vez que se ha confirmado el descenso de producción para incrementos de recuento celular en la parte más baja de la escala, el siguiente paso es comprobar la evolución de la producción para incrementos del recuento celular en el resto de la escala. En las figuras de la 5.67 a la 5.72 se muestran las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías denotadas por los puntos medios de cada una de ellas, que van desde SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl, y para las lactaciones de la primera a la sexta. En total, abarcan un campo de recuento celular entre 50 y 1600 cél/μl.

De las gráficas se puede extraer de nuevo la conclusión de que las novillas mantienen una producción muy estable e independiente del recuento celular. En el resto de lactaciones se puede comprobar que la respuesta en producción de las cabezas de ganado no está condicionada por el nivel de recuento celular manteniéndose la producción en niveles similares a lo largo de la lactación, independientemente del número de células consideradas. Este resultado es coincidente con los obtenidos anteriormente que indican que, a partir de un cierto valor, la producción no se ve influenciada por el incremento o descenso del recuento celular. Hay que hacer notar que en los últimos días de la lactación, a partir del día 200 aproximadamente, la producción de las vacas con un recuento celular más bajo (SCC = 75 cél/μl) decae con menos pendiente que las vacas con un recuento más alto mostrando que el nivel de recuento celular sí puede influir en la velocidad de la pérdida de producción sufrida a lo largo de la lactación con el aumento de los días en leche.

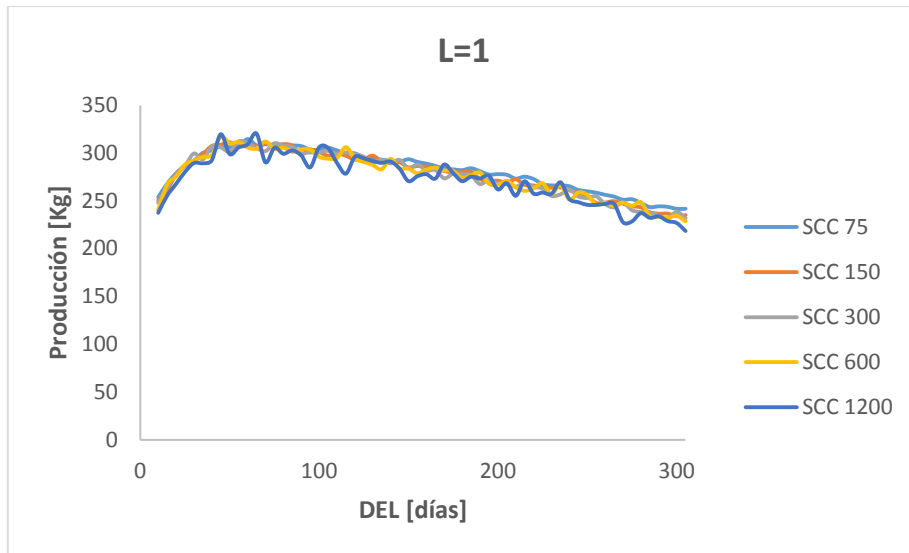


Figura 5.67.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 1.

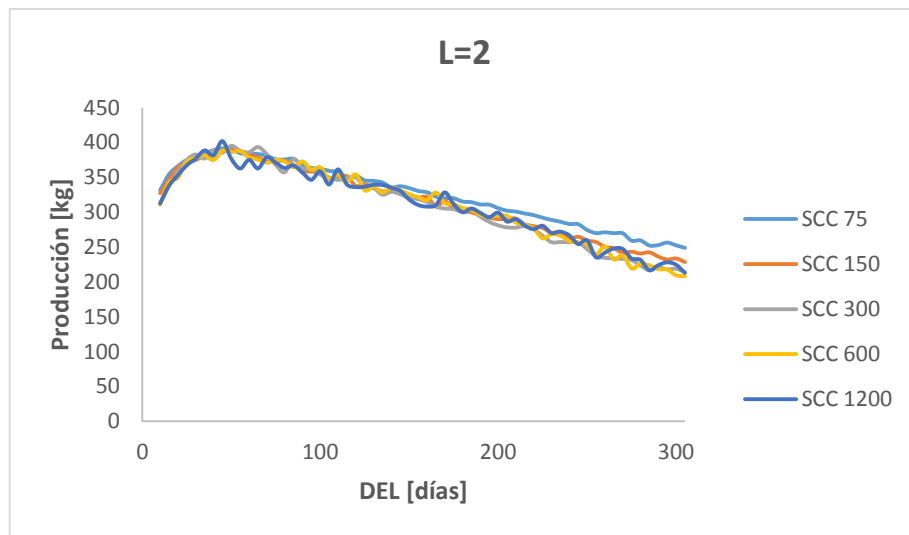


Figura 5.68.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 2.

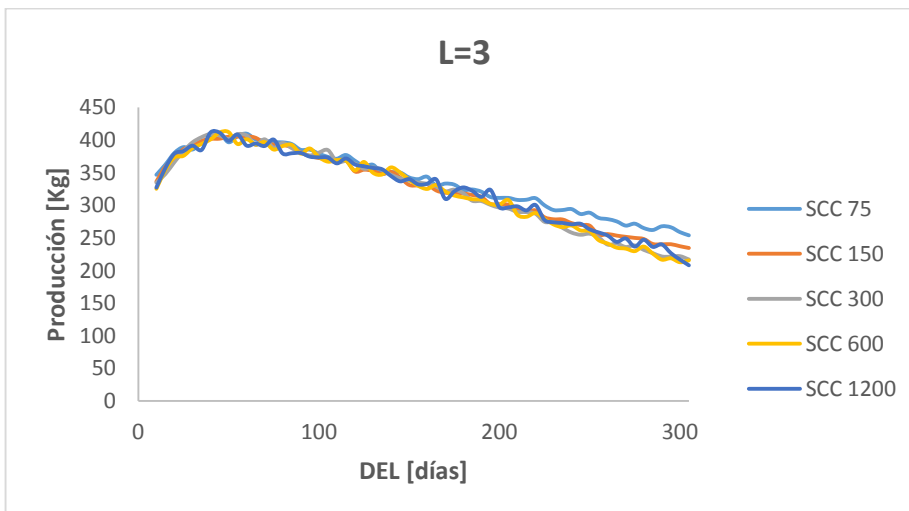
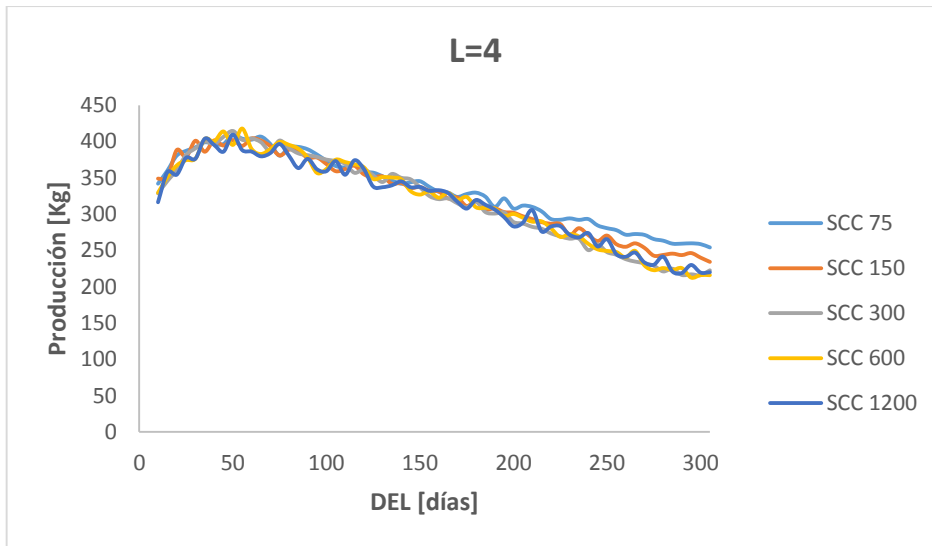
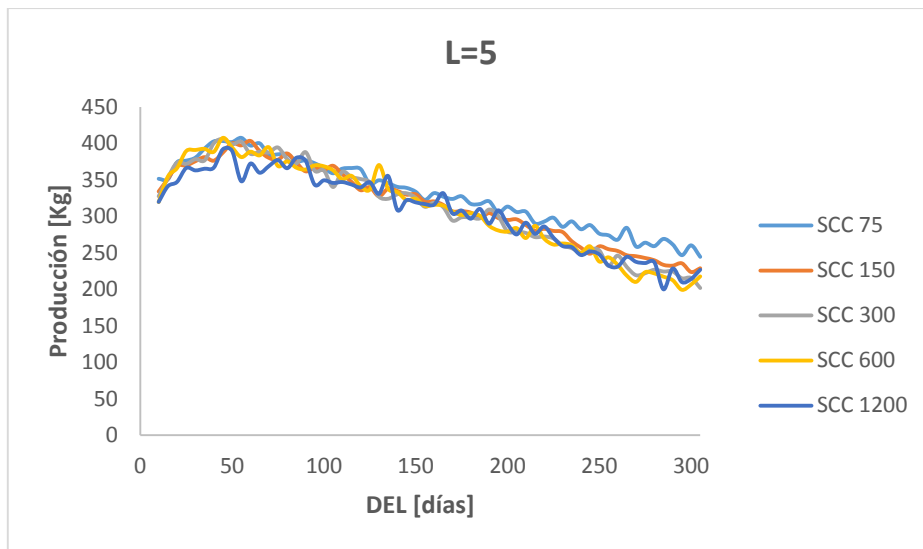


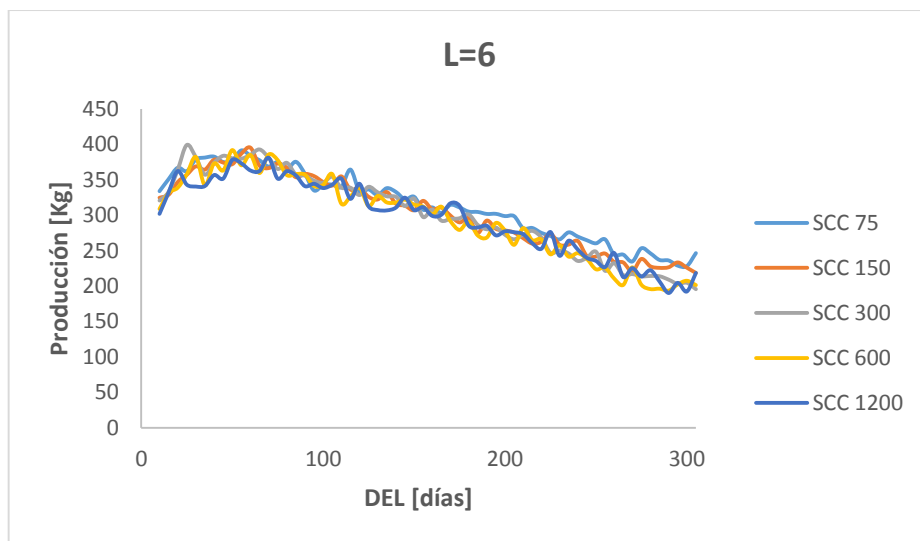
Figura 5.69.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 3.



**Figura 5.70.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 4.**



**Figura 5.71.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 5.**



**Figura 5.72.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 75 cél/μl a SCC = 1200 cél/μl en la lactación 6.**

El último análisis que queda por realizar para comprobar la influencia del recuento celular en la producción consiste en evaluar si los cambios en el extremo superior de la escala de células somáticas producen un descenso acusado de la producción o, por el contrario, no producen efecto apreciable como se ha visto con los niveles intermedios. Para ello se han construido las gráficas de la 5.73 a la 5.78 en las que se exhiben las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl y para las lactaciones de la primera a la sexta. Estas categorías de SCC abarcan un campo de recuento celular entre 400 y 9999 cél/μl, siendo éste último el valor máximo presente en los sistemas de medida empleados para realizar el recuento, basados en citometría de flujo. Se utilizan las categorías SCC = 600 cél/μl y SCC = 1200 cél/μl como referencia ya que, como hemos visto, para valores intermedios de las categorías de recuento celular, la curva de producción se mantiene aproximadamente estable.

Debido a la escasez de datos utilizados para crear la lactación DEL5 patrón de las categorías mostradas, las gráficas presentan irregularidades y oscilaciones muy acusadas que no facilitan la tarea de interpretación. A pesar de todo, se puede apreciar que la línea de producción correspondiente a la categoría SCC = 4800 cél/μl se mantiene claramente por debajo de las curvas de producción del resto de categorías en todas las lactaciones consideradas, siendo muy evidente en las cuatro primeras lactaciones. En el caso de la categoría SCC = 2400 cél/μl, correspondiente a un recuento celular entre 1600 y 3200 cél/μl, el efecto no es tan evidente a lo largo de toda la curva de lactación, pero sí se puede apreciar que hasta aproximadamente el día 150 la producción es inferior al resto de categorías de referencia, pasando a partir de ese momento a ser muy similar a la producción de las categorías de referencia. Parece entonces evidente que en la categoría SCC = 2400 cél/μl tenemos una pérdida efectiva de producción precisamente en el período de la lactación en el que los animales son más productivos.

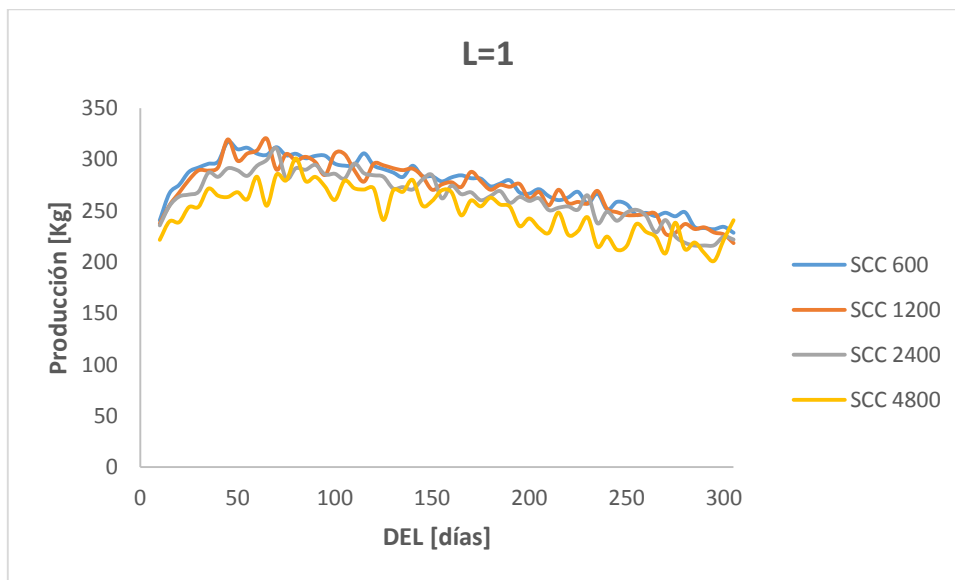


Figura 5.73.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 1.

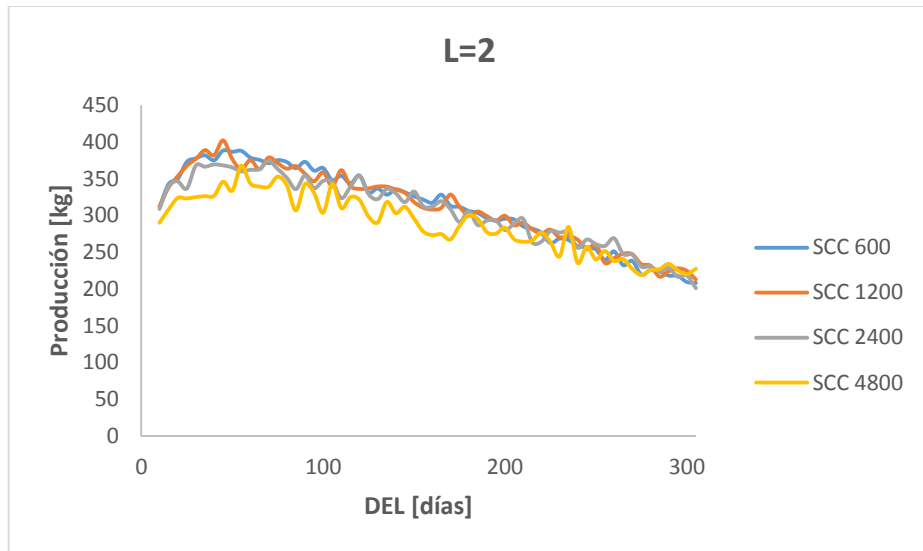


Figura 5.74.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 2.

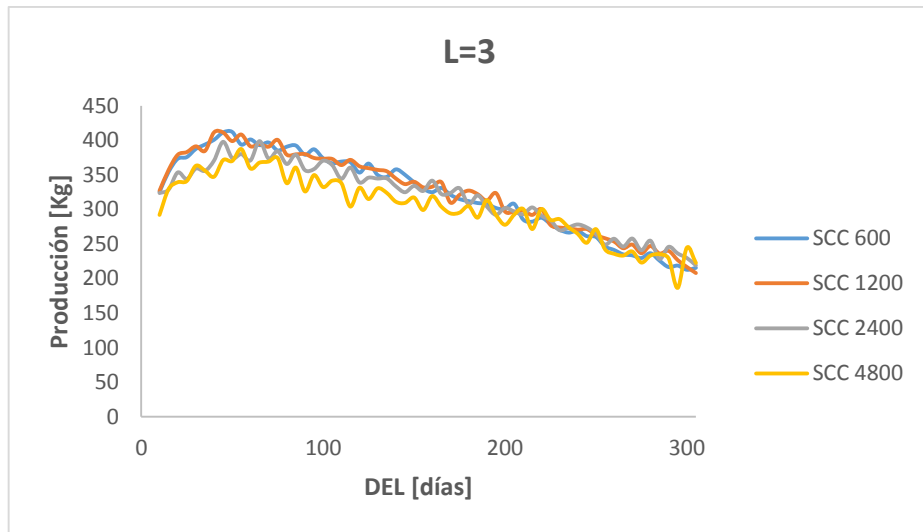


Figura 5.75.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 3.

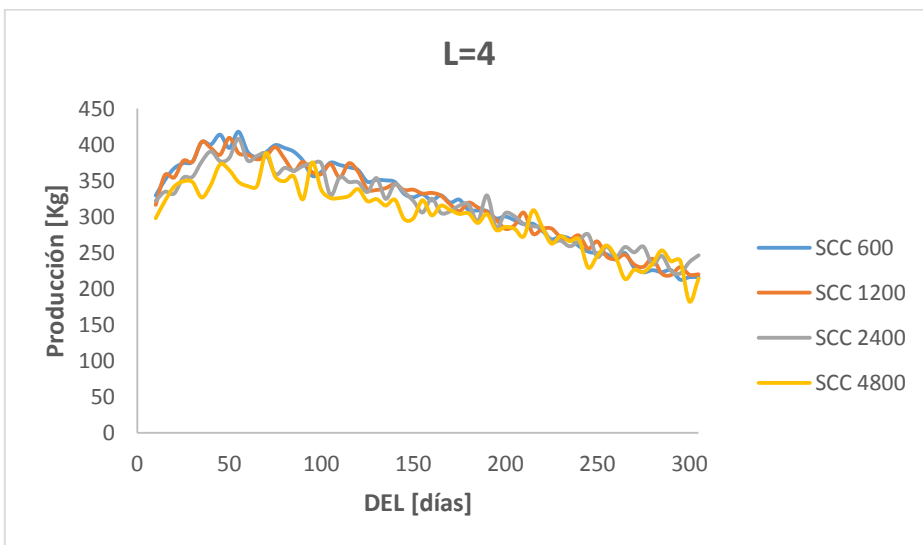


Figura 5.76.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 4.



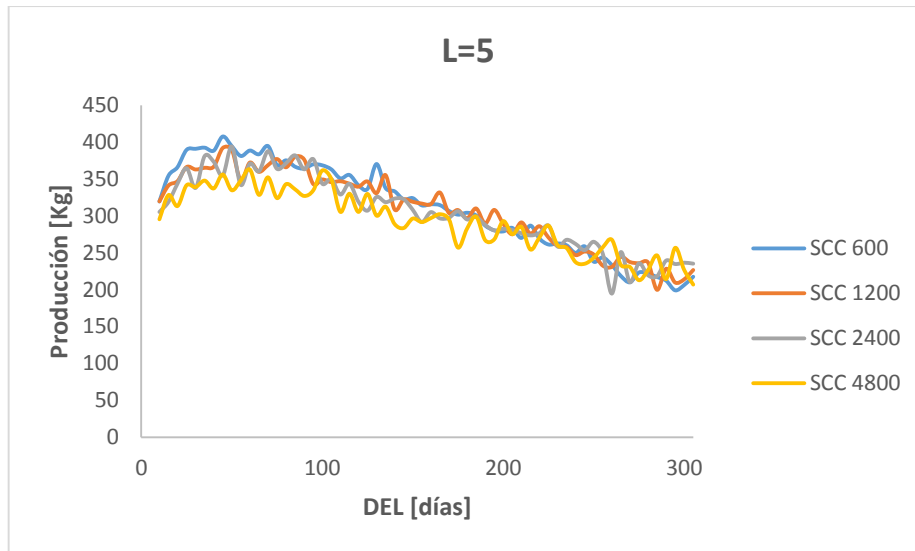


Figura 5.77.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 5.

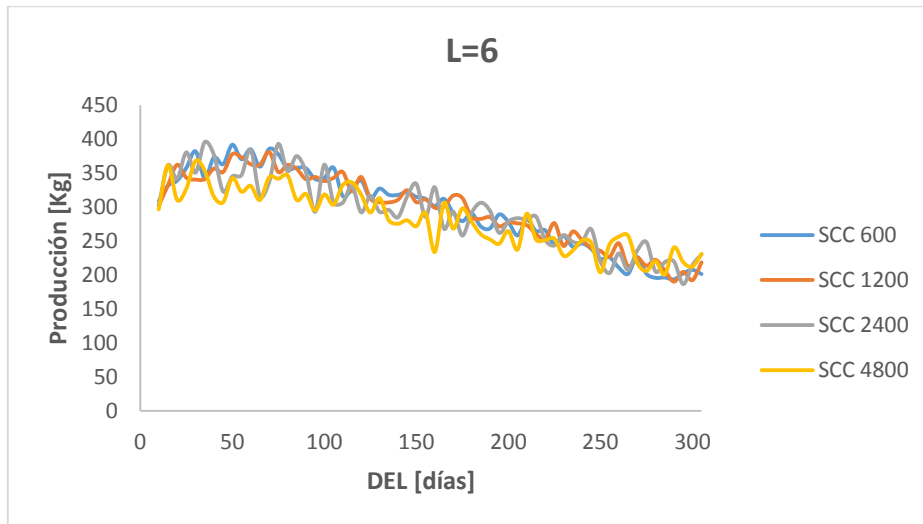


Figura 5.78.- Comparación de las curvas de producción de la lactación DEL5 patrón para las categorías de SCC = 600 cél/μl a SCC = 4800 cél/μl en la lactación 6.

## 5.7 Discusión sobre la relación entre la producción y el SCC

Una vez analizados los datos anteriores podemos obtener una serie de conclusiones en relación a la influencia del recuento celular en la producción de leche de una vaca frisona asturiana:

1. El umbral de recuento celular que afecta a la producción de una vaca es mucho más bajo de lo que se venía estableciendo. El decremento de producción producido al duplicar el nivel de SCC sólo es significativo cuando se pasa de un nivel muy bajo a otro también bajo, pero ligeramente superior. Este descenso se puede cuantificar en un 2% para  $L=1$  y entre un 3% y un 7% para  $L > 1$ .
2. Teniendo en cuenta el umbral actual de enfermedad, sintomática o asintomática, considerado habitualmente en 200 cél/ $\mu$ l, no tiene sentido hablar de pérdidas de producción con el incremento del recuento celular ya que la variación de la producción para esos niveles de SCC es muy baja y no siempre en el mismo sentido.
3. Las pérdidas de producción no vuelven a ser significativas hasta que el recuento celular es francamente elevado ( $SCC > 2400$  cél/ $\mu$ l). A estos niveles de recuento celular es altamente probable que el animal haya desarrollado una enfermedad sintomática, por lo que parece lógico que la producción del animal enfermo descienda.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores parece claro que se debe proponer un nuevo umbral de recuento de células somáticas para establecer el nivel de enfermedad y, por tanto, el nivel a partir del cual el incremento del SCC es un indicador de la pérdida de producción. A raíz de los resultados obtenidos, se sugiere un nivel alrededor de 50 cél/ $\mu$ l. Este puede considerarse como el nivel fisiológico típico de un animal sano. Por encima de este punto, hay una cierta reacción del sistema inmunitario que termina por causar pérdidas de producción. Una vez que este efecto se ha producido en alguna medida, ya no hay cambios en función de si esta reacción es mayor o menor. La producción es sensiblemente igual para un animal que tenga una leve reacción ( $SCC = 150$  cél/ $\mu$ l) que para un animal con una fuerte reacción ( $SCC = 2400$  cél/ $\mu$ l).

# Capítulo **6**

## **Modelado de las lactaciones largas**

## 6.1 Estudio de las lactaciones largas

Durante el proceso de creación del modelo de producción se optó para la realización de los cálculos por la definición de una lactación de tamaño estándar para todas las cabezas de ganado de duración igual a 305 días. La lactación de 305 días en leche es una lactación de duración estándar que permite comparar los resultados de producción de animales procedentes de distintas explotaciones. Esta ha sido una de las razones fundamentales por las que se ha optado por esa duración en la creación del modelo de producción. La lactación de 305 días en leche es también una lactación con gran arraigo en la gestión que los ganaderos hacen de sus explotaciones ya que ajusta perfectamente los ciclos biológicos de la vaca, incluido el secado, a la duración de un año natural, facilitando que la lactación en que se encuentra una cabeza de ganado sea un indicativo directo de su edad y viceversa.

Pero durante el manejo de los datos necesarios para el cálculo del modelo de producción se ha observado que, a pesar de que la mayoría de las cabezas de ganado estudiadas se ajustan más o menos perfectamente al patrón de lactaciones de 305 días en leche, existe una cantidad no despreciable de reses que superan, en algunos casos muy ampliamente, ese valor límite de los 305 días en leche. En la figura 6.1 se muestra la distribución del número de controles lecheros mensuales disponibles para cada valor de DEL5 en las seis primeras lactaciones hasta el valor  $DEL5 = 610$ , valor que duplica la duración de una lactación estándar de 305 días. En la gráfica se ha utilizado la escala logarítmica para representar el número de controles para facilitar su interpretación, pero se puede apreciar claramente como a partir del día 305 el número de controles disponibles decae fuertemente, pero se mantiene a niveles apreciablemente altos hasta valores muy elevados de DEL. En la tabla 6.1 se muestran los datos disponibles para cada una de las lactaciones, expresados en número de cabezas de ganado y no en controles, y en la tabla 6.2 se muestra la misma información en porcentajes. Se puede comprobar que no llega ni al 50% el número de vacas que tienen una lactación estandarizada de 305 días aunque ese porcentaje mejora y se acerca al 60% de vacas con la lactación finalizada cuando se considera una duración de la lactación de 30 días más en leche. A partir de ese punto la duración de las lactaciones van decayendo progresivamente pero manteniendo un número de reses suficientemente significativo.

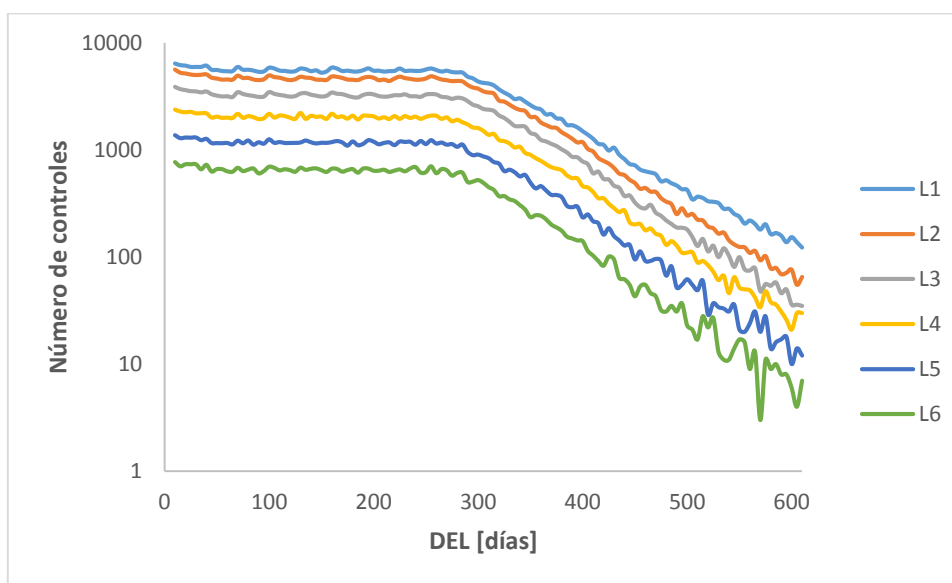


Figura 6.1.- Número de controles disponibles para cada valor de DEL5

**Tabla 6.1.- Frecuencia en número de cabezas de ganado de días en leche de duración de cada lactación**

<b>Lactación</b> <b>Duración (días)</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>	<b>L7</b>
≤ 305	15673	13538	9391	6089	3596	2087	1140
305 < del < 335	5490	4772	3408	1997	1180	682	359
335 < del < 365	5159	4388	3127	1919	1095	604	332
365 < del < 395	4179	3466	2437	1499	848	438	204
395 < del < 425	2156	1780	1249	766	423	213	113
425 < del < 455	1595	1225	850	518	285	139	76
455 < del < 485	1032	777	562	345	197	95	47
485 < del < 515	687	535	367	247	118	59	23
515 < del	1963	1090	707	438	231	110	38
Total vacas	37934	31571	22098	13818	7973	4427	2332

**Tabla 6.2.- Frecuencia en porcentaje de días en leche de duración de cada lactación**

<b>Lactación</b> <b>Duración (días)</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>	<b>L7</b>
≤ 305	41,32	42,88	42,50	44,07	45,10	47,14	48,89
305 < del < 335	14,47	15,12	15,42	14,45	14,80	15,41	15,39
335 < del < 365	13,60	13,90	14,15	13,89	13,73	13,64	14,24
365 < del < 395	11,02	10,98	11,03	10,85	10,64	9,89	8,75
395 < del < 425	5,68	5,64	5,65	5,54	5,31	4,81	4,85
425 < del < 455	4,20	3,88	3,85	3,75	3,57	3,14	3,26
455 < del < 485	2,72	2,46	2,54	2,50	2,47	2,15	2,02
485 < del < 515	1,81	1,69	1,66	1,79	1,48	1,33	0,99
515 < del	5,17	3,45	3,20	3,17	2,90	2,48	1,63

## 6.2 Lactaciones largas. Origen

La primera cuestión que ha de plantearse ante las lactaciones largas es el porqué de las mismas, cuál es la razón por la que una gran cantidad de vacas tienen una duración de su lactación superior a la normalizada de 305 días. Inicialmente se pueden plantear dos posibles respuestas a estas cuestiones:

- 1) Se ha producido un fallo en la detección del celo de la vaca, o
- 2) es un deseo expreso del ganadero para prolongar la lactación de una vaca con una alta producción de leche.

La lactación de 305 días en leche está planificada de tal manera que, para que se ajuste a esos 305 días, es necesario que la vaca sea inseminada y preñada en el primer celo después del parto y se produzca la gestación a lo largo de la lactación hasta llegar al periodo de secado, previo al parto. Una lactación de 305 días en leche se ajusta aproximadamente a la duración de un año natural. Pero, inseminar en el primer celo después del parto no es una tarea sencilla ya que las vacas no muestran el celo de manera conspicua o se producen fallos en la inseminación de la misma. Cada vez que se pierde un celo de una vaca sin inseminación, se alarga la duración de la lactación unos 21 días de promedio a la vez que se reduce la tasa de nacimiento de terneros por año. Ante esta situación es importante plantear el coste económico de la pérdida de un celo o, consecuentemente, el coste económico en términos de pérdida de producción, de alargar la lactación estándar más allá de 305 días.

Para analizar si la lactación larga se produce por un deseo expreso del ganadero de prolongar la lactación de una vaca de alta producción se puede comparar la producción de las reses con una lactación normalizada con la producción de las cabezas de ganado con una lactación larga. En las figuras de la 6.2 a la 6.7 se muestran las curvas medias de producción durante 305 días en leche para las 6 primeras lactaciones de vacas con una lactación estándar de 305 días y vacas con una lactación más larga de esos 305 días. Se puede comprobar en todas y cada una de ellas que la producción media de las vacas que han tenido una lactación larga ha sido superior durante el período de lactación estándar que la media del resto de reses. Estos resultados avalan la hipótesis de que el ganadero extiende de manera voluntaria la lactación a aquellas vacas que tienen una alta producción o bien, que aquellas vacas con una alta producción presentan un celo más difícil de localizar o una tasa de fracaso reproductivo mayor.

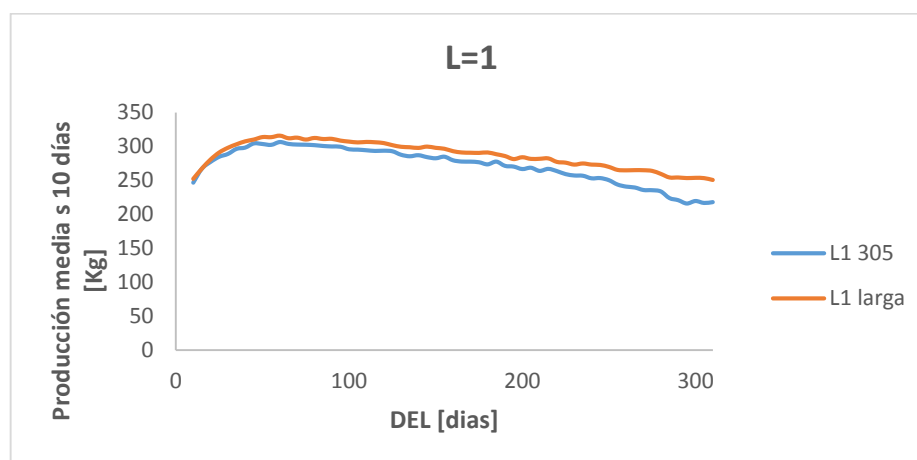
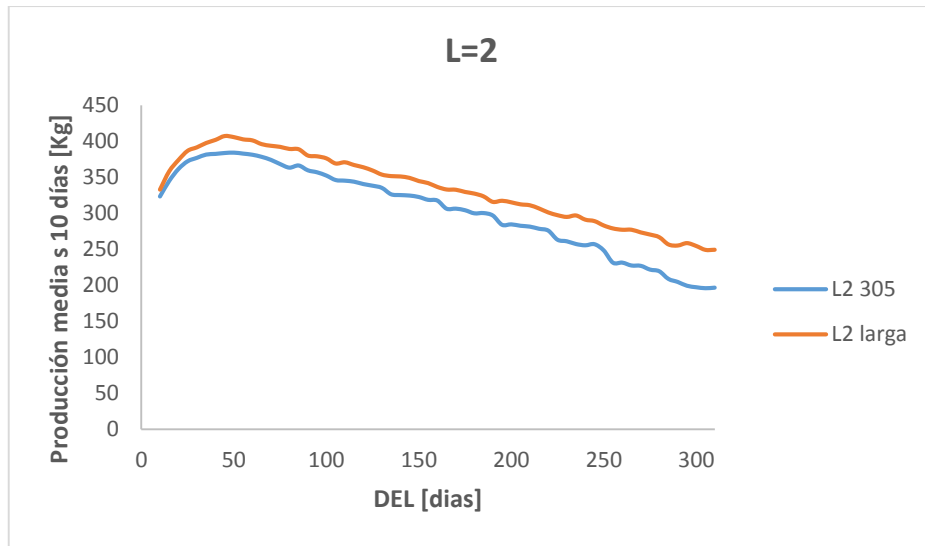
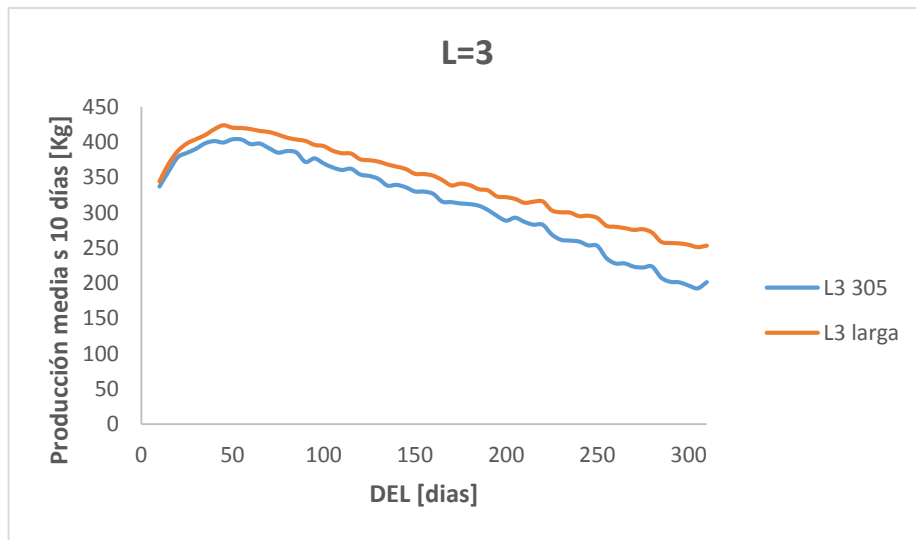


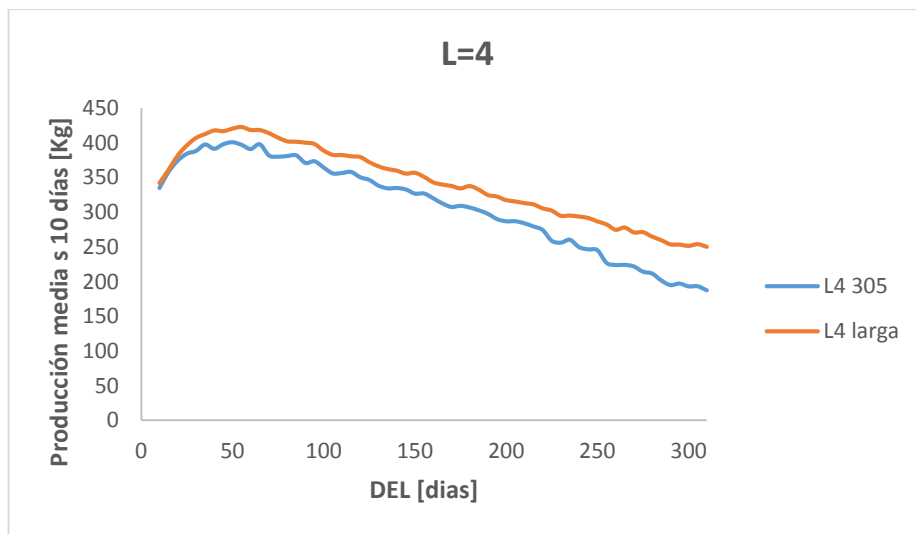
Figura 6.2.- Producción media de vacas de primera lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche



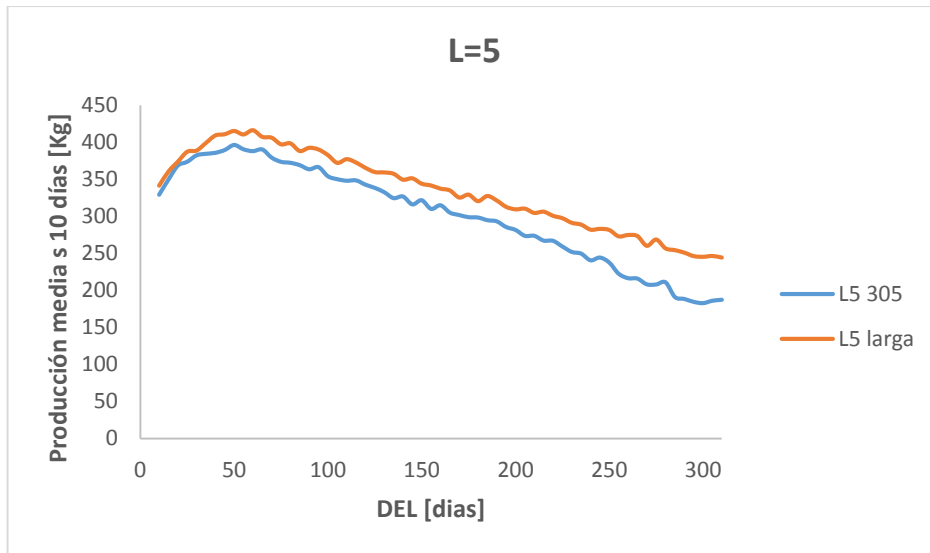
**Figura 6.3.- Producción media de vacas de segunda lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche**



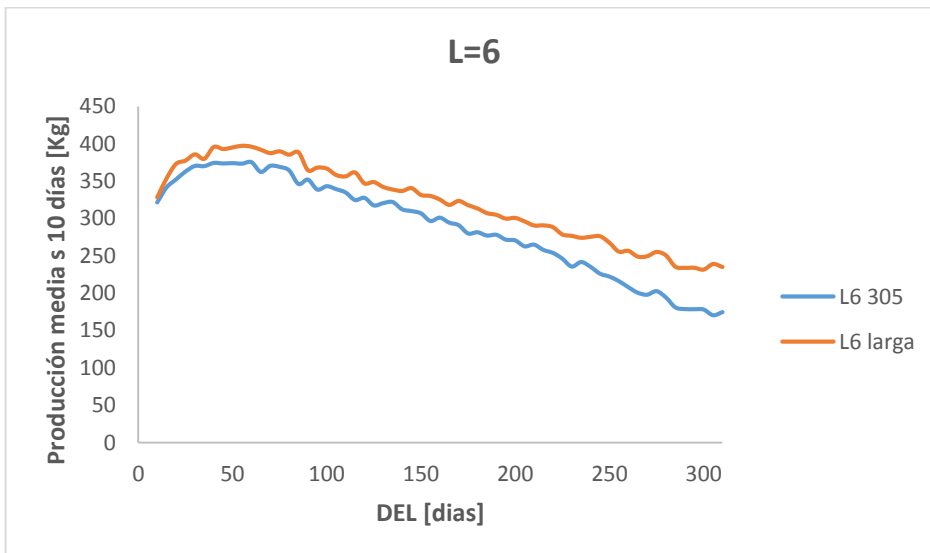
**Figura 6.4.- Producción media de vacas de tercera lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche**



**Figura 6.5.- Producción media de vacas de cuarta lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche**



**Figura 6.6.- Producción media de vacas de quinta lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche**



**Figura 6.7.- Producción media de vacas de sexta lactación con una duración estándar de la lactación de 305 días en leche frente a vacas con una duración superior a 305 días en leche**



## 6.3 El coste económico de las lactaciones

Para analizar el coste de extender una lactación más allá del día 305 se tendrán que analizar las curvas de producción de aquellas vacas que han superado esa duración. En los datos mostrados en la tabla 6.1 se puede comprobar que aunque el número de cabezas de ganado que superan los 305 de días en leche es muy alto para las distintas lactaciones (superior al 50%) este número va decayendo bastante rápidamente con los sucesivos meses hasta llegar a disponer de un número de reses muy bajo para poder obtener conclusiones extrapolables al resto de rebaños. Aunque se dispone de datos para vacas con valores de días en leche muy elevados (el registro más grande de la base de datos pertenece a una vaca con 1800 días en leche) parece razonable limitar el estudio hasta periodos mucho más cortos ya que el número de datos decrece progresivamente a medida que llegamos a valores de DEL5 más altos. Como un valor razonable de partida se puede considerar el de los 610 días en leche, exactamente el doble de una lactación estándar. De la misma manera, para mantener un número suficiente de cabezas de ganado, también se limitará el número de lactación sobre la que se realizará el estudio hasta la sexta.

En la figura 6.8 se muestra la curva de producción de aquellas vacas que han tenido una lactación de al menos 610 días en leche. En la gráfica se puede apreciar claramente como el descenso de producción que se produce entre los días 50 y 305, que ya ha sido modelado con una recta de pendiente constante, sufre a partir del día 305 un cambio de pendiente muy acusado. Se hace evidente que el modelo utilizado para modelar la lactación estándar de 305 días no podrá ser utilizado para modelar las lactaciones extendidas.

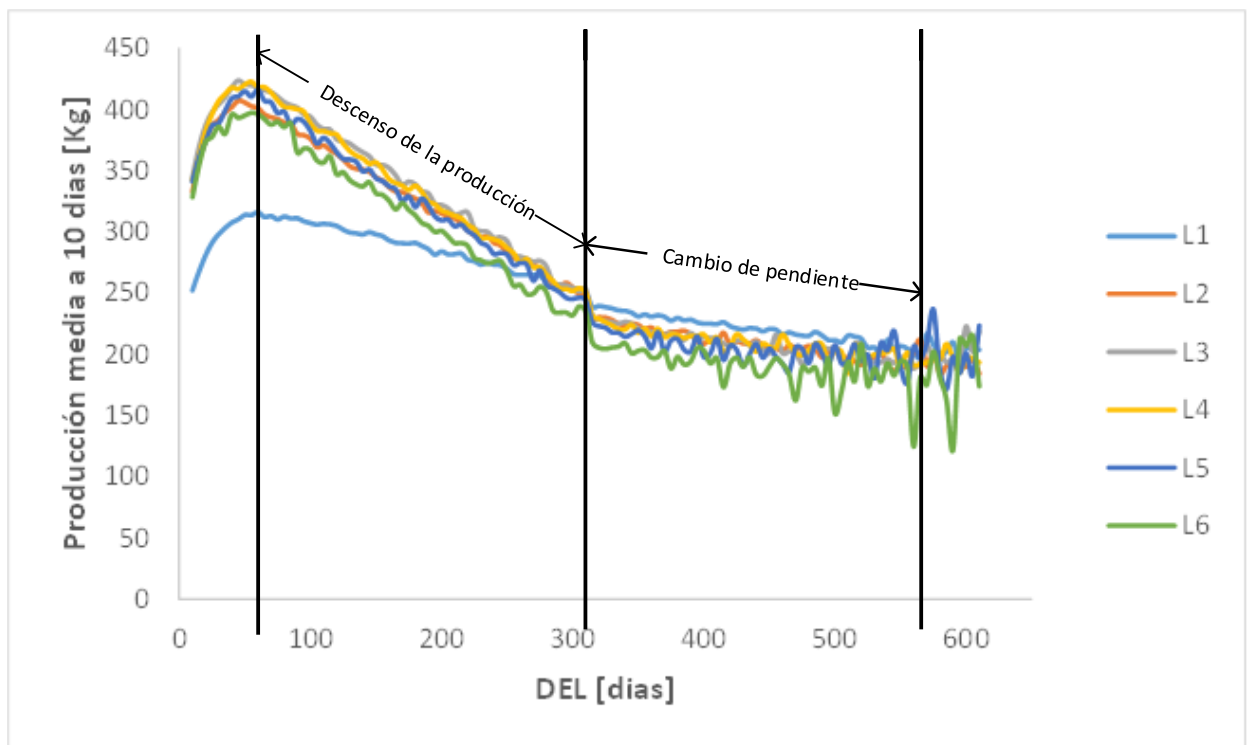


Figura 6.8.- Comparativa de la curva de producción hasta 610 días en leche para las lactaciones desde la primera a la sexta.

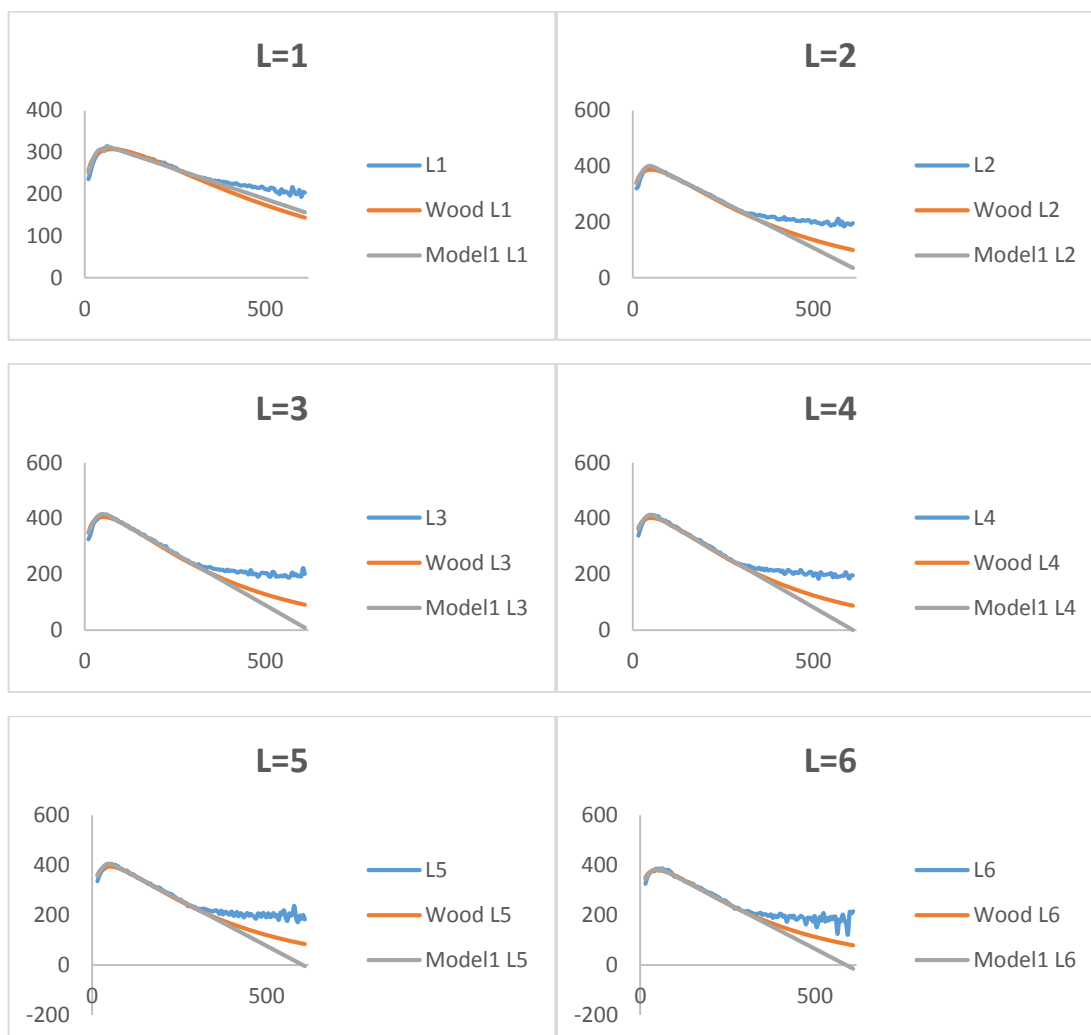
En la tabla 6.3 se puede analizar la producción media de las cabezas de ganado con una lactación de 610 días y la distribución de esa producción hasta los 305 días en leche y a partir de esos 305 días hasta los 610 días en leche. Además, se muestra el porcentaje de esa producción que corresponde al período de lactación comprendido entre los 305 y los 610 días en leche. En la tabla se puede apreciar claramente que la primera lactación, al mostrar un punto de inflexión menor a partir del día 305, es la lactación que muestra un desequilibrio menor entre la producción de la lactación estándar y la extendida, rebajando en apenas 6 puntos la producción teórica esperada del 50%. En el resto de lactaciones se comprueba que en ese 50% extra de tiempo que se amplía la lactación sólo se consigue el 39% de la producción total manteniendo una distribución desequilibrada de un 61%-39% de la producción en ambas partes de la lactación.

**Tabla 6.3.- Distribución de la producción antes y después de los 305 días en leche de las cabezas de ganado con lactaciones de hasta 610 días en leche.**

<b>Lactación</b>						
<b>Producción (Kg)</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>
<b>Total</b>	15136,23	16079,72	16420,30	16281,10	15935,10	15083,67
<b>A 305 días</b>	8450,79	9743,32	10061,30	9932,60	9715,32	9280,90
<b>Hasta 610 días</b>	6685,45	6336,40	6358,99	6348,50	6219,77	5802,77
<b>Porcentaje 305-610</b>	44,17	39,41	38,73	38,99	39,03	38,47

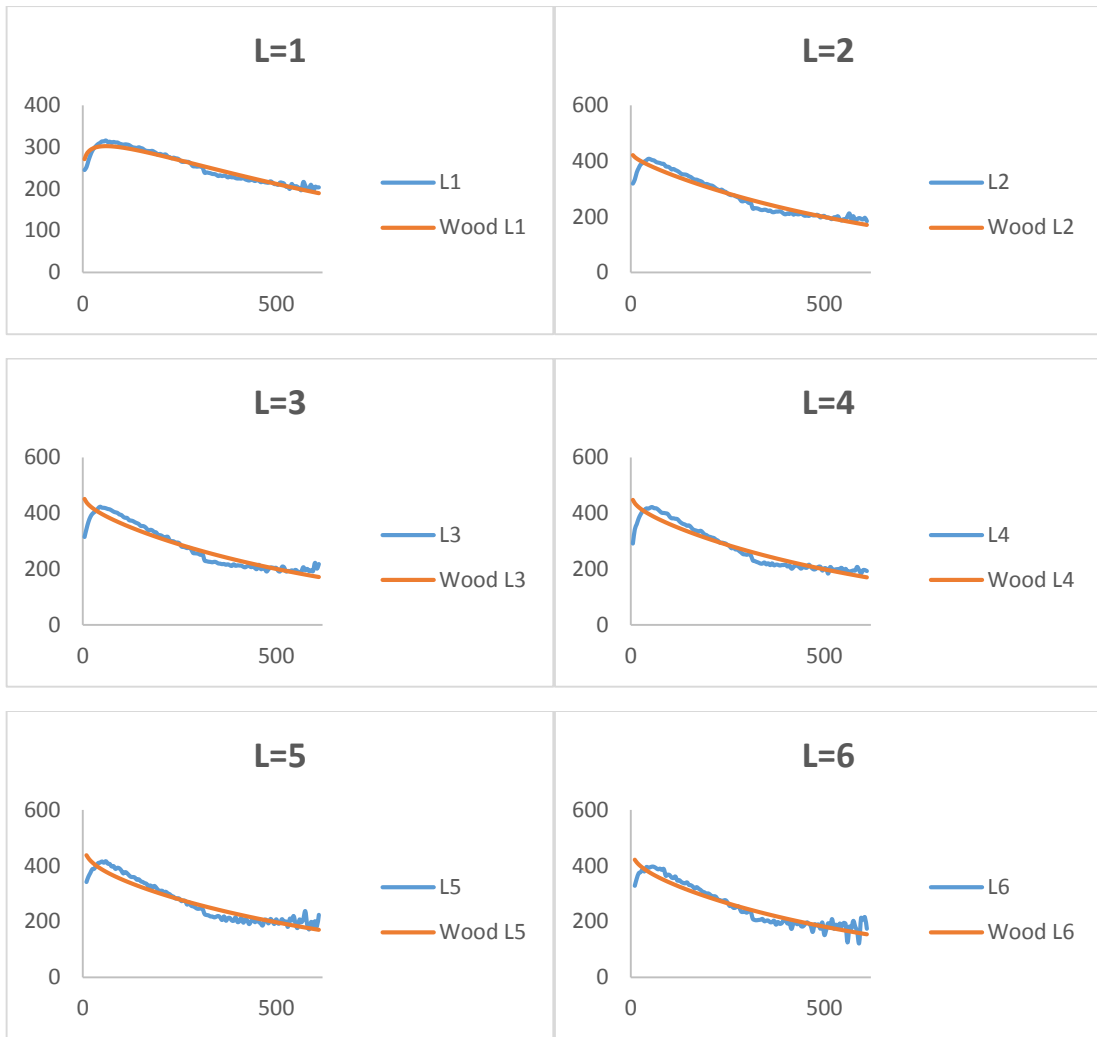
En la figura 6.9 se muestran las discrepancias entre la curva de lactación de aquellas vacas con lactaciones de hasta 610 días con las curvas de lactación predichas por los modelos de Wood y el modelo lineal de producción calculado en la sección anterior. Se puede ver claramente que ambos modelos siguen fielmente la curva de producción hasta el día 305, momento en el que la curva de producción media real tiene un cambio de pendiente acusado, haciéndose más horizontal, lo que ocasiona que los modelos empleados se alejen cada vez más de la predicción correcta.

Ni el modelo de Wood ni el modelo lineal van a poder adaptarse a las lactaciones extendidas.. Pero se puede plantear la cuestión de si el modelo de Wood podrá adaptarse a las lactaciones extendidas sin más que recalculando sus parámetros con los datos de hasta 610 días en leche.



**Figura 6.9.- Comparativa del funcionamiento de los modelos de Wood y lineal con la curva de producción de vacas con de hasta 610 días en leche para las seis primeras lactaciones.**

En la figura 6.10 se muestran los resultados obtenidos al calcular los parámetros del modelo de Wood para lactaciones de hasta 610 días en leche. Se puede ver fácilmente que el modelo no ajusta bien y sufre de los mismos problemas que el modelo lineal. A la vista de esos resultados se puede concluir que el modelo de Wood no funciona con lactaciones extendidas y es necesario calcular un nuevo modelo que nos permita estimar la producción de las cabezas de ganado pasados los 305 días en leche.



**Figura 6.10.-Predicciones del modelo de Wood calculado para adaptarse a lactaciones de hasta 610 días en leche frente a la curva de producción media.**

## 6.4 Cálculo del modelo de lactaciones largas

El modelo de producción calculado en la sección anterior plantea un modelo dividido en segmentos en función de los días en leche para adaptarse a la evolución de la curva de producción natural:

1. Un segmento cuadrático entre 0 y 50 días en leche que permite ajustar de manera adecuada la rampa de ascenso de la curva de producción natural.
2. Un segmento lineal entre los 50 y los 305 días en leche que se adapta a la rampa de descenso de la producción que se produce después del pico al que se llega aproximadamente en los 50 días en leche.

Atendiendo a la forma de las curvas de producción de las lactaciones largas que se observa en la figura 6.8 parece lógico pensar que se tendrá que añadir un tercer segmento a partir de los 305 días en leche y muy probablemente de forma lineal o cuadrática.

Para calcular el tercer segmento del modelo se utilizará el programa de análisis estadístico R, en concreto la función de ajuste lineal  $lm$ , a la que se le introducirán los datos de producción media disponibles de todas las cabezas de ganado con datos entre los días 305 y 610. Se calcularán los coeficientes de dos posibles formas para el modelo:

- Modelo lineal de la forma:

$$P = A * DEL + B$$

- Modelo polinómico de la forma:

$$P = C * DEL^2 + D * DEL + E$$

Al ejecutar los datos en el programa estadístico R se han obtenido los resultados de la tabla 6.3. En las figuras de la 6.11 a la 6.22 se muestran las estimaciones de los dos modelos construidos frente a la media de producción real para cada una de las lactaciones así como los residuos obtenidos por cada modelo. De la observación de las gráficas se puede obtener la conclusión de que ambos modelos son muy similares y producen unos resultados equivalentes.

**Tabla 6.3.- Coeficientes de los modelos de lactaciones largas y valores  $r^2$  obtenidos.**

Lactación	A	B	$r^2$	C	D	E	$r^2$
L1	-0,138	282,45	0,9002	0,0002511	-0,3677	333,0	0,9182
L2	-0,145	274,26	0,8233	0,0004473	-0,5543	364,3	0,8723
L3	-0,117	262,77	0,5832	0,0008382	-0,8840	431,5	0,7765
L4	-0,127	266,66	0,7242	0,0004790	-0,5653	363,1	0,7882
L5	-0,089	245,78	0,2884	0,0007639	-0,7883	399,6	0,4215
L6	-0,113	242,31	0,2519	0,0007624	-0,8103	395,8	0,3191

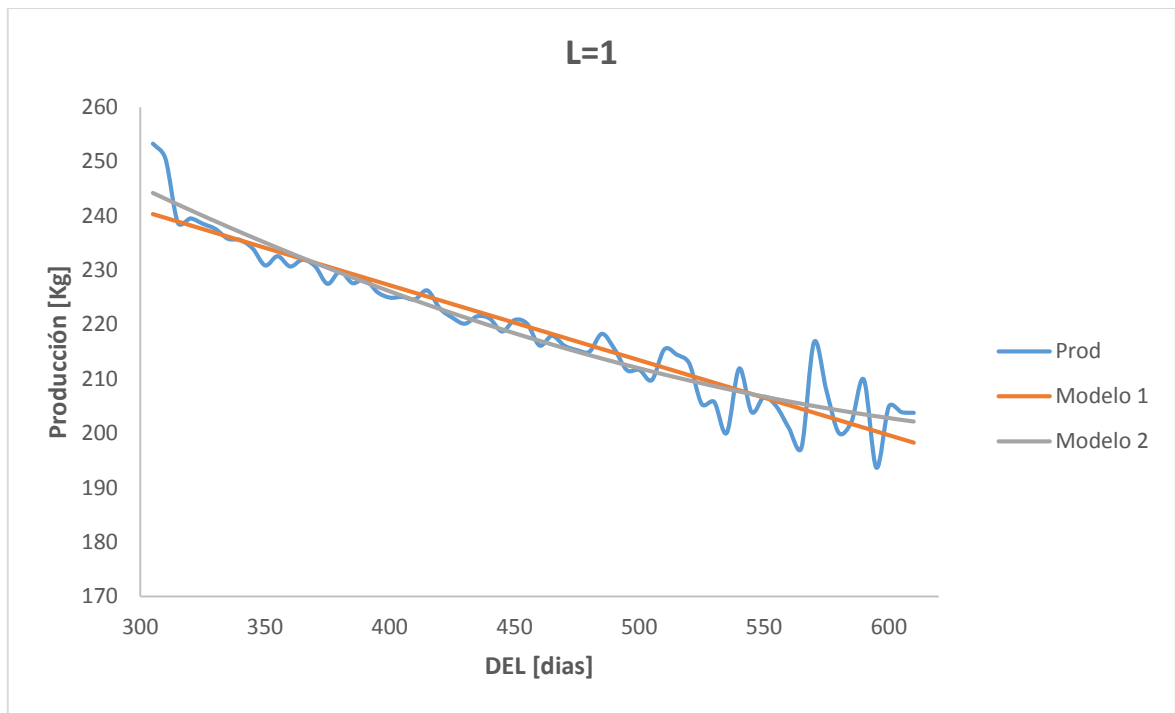


Figura 6.11.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 1.

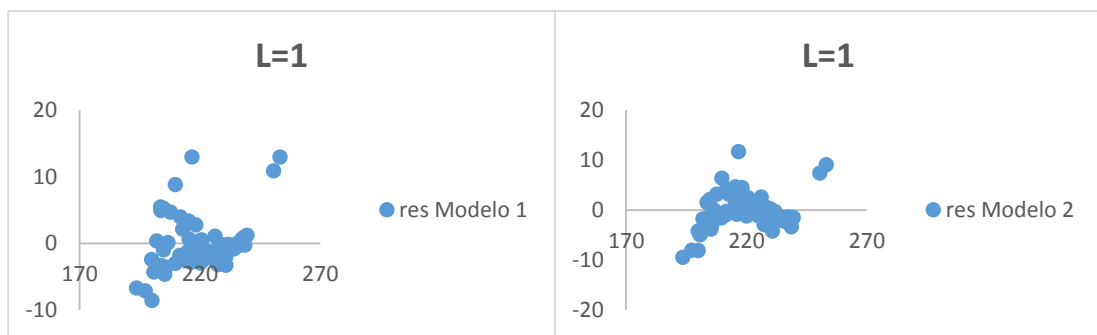


Figura 6.12.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 1.

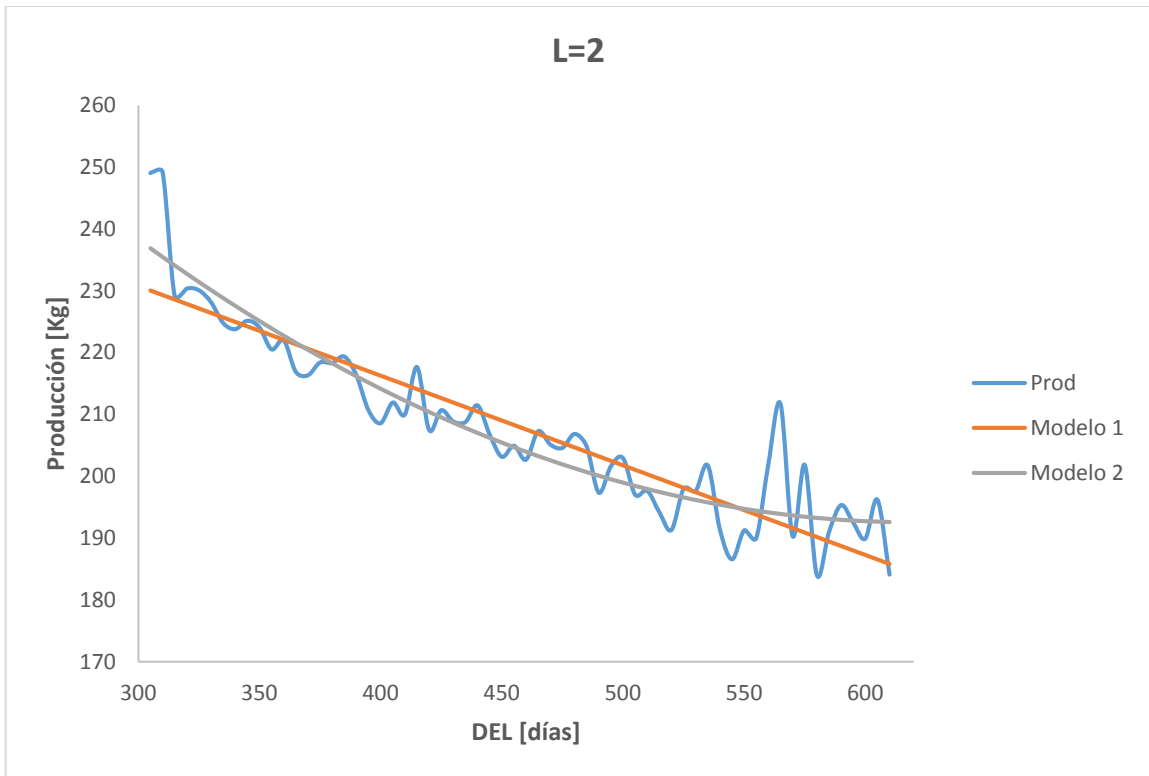


Figura 6.13.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 2.

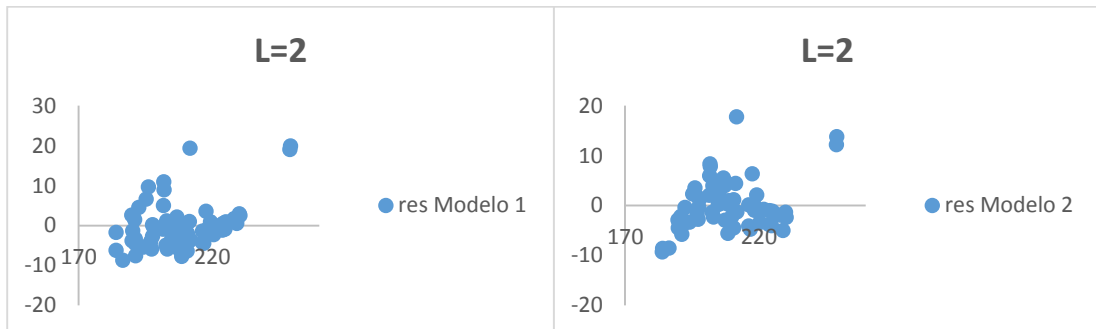


Figura 6.14.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 2.

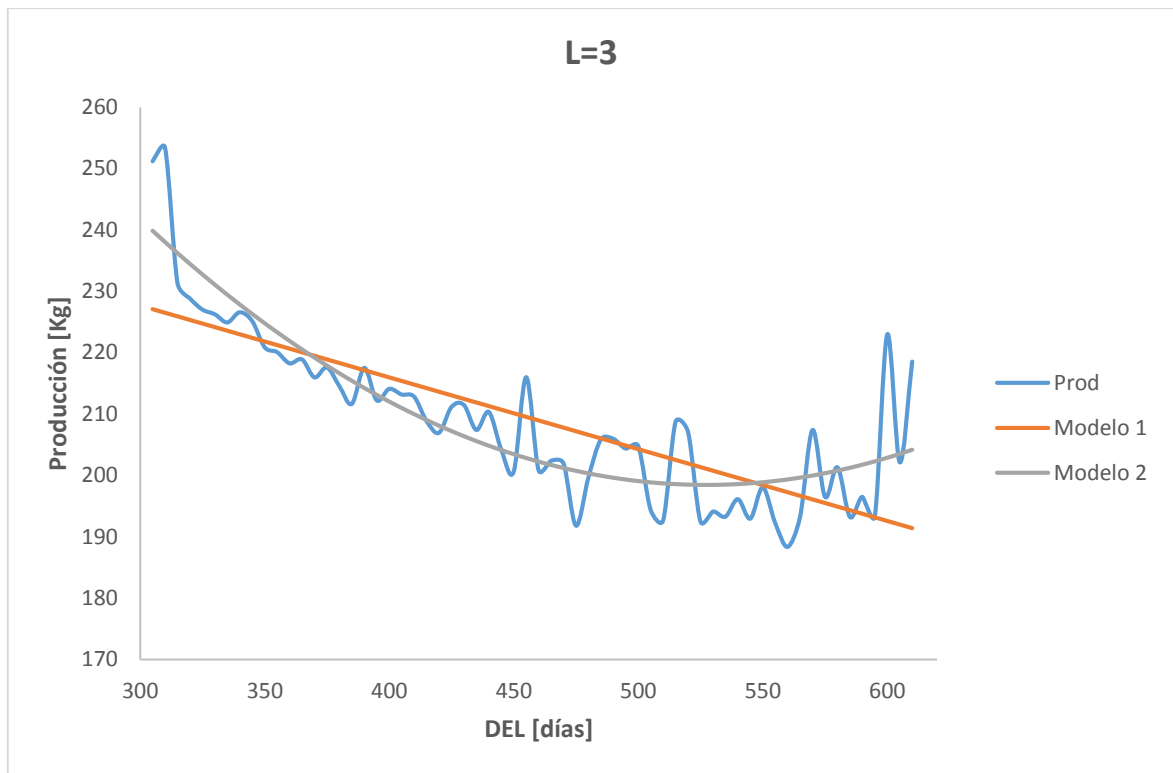


Figura 6.15.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 3.

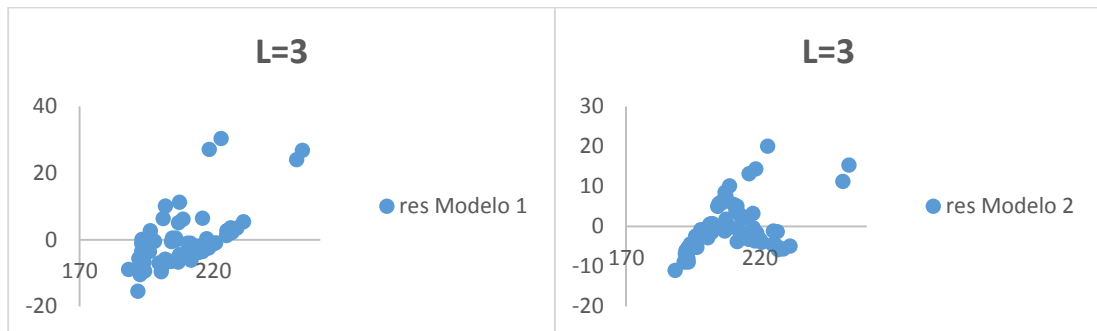


Figura 6.16.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 3.



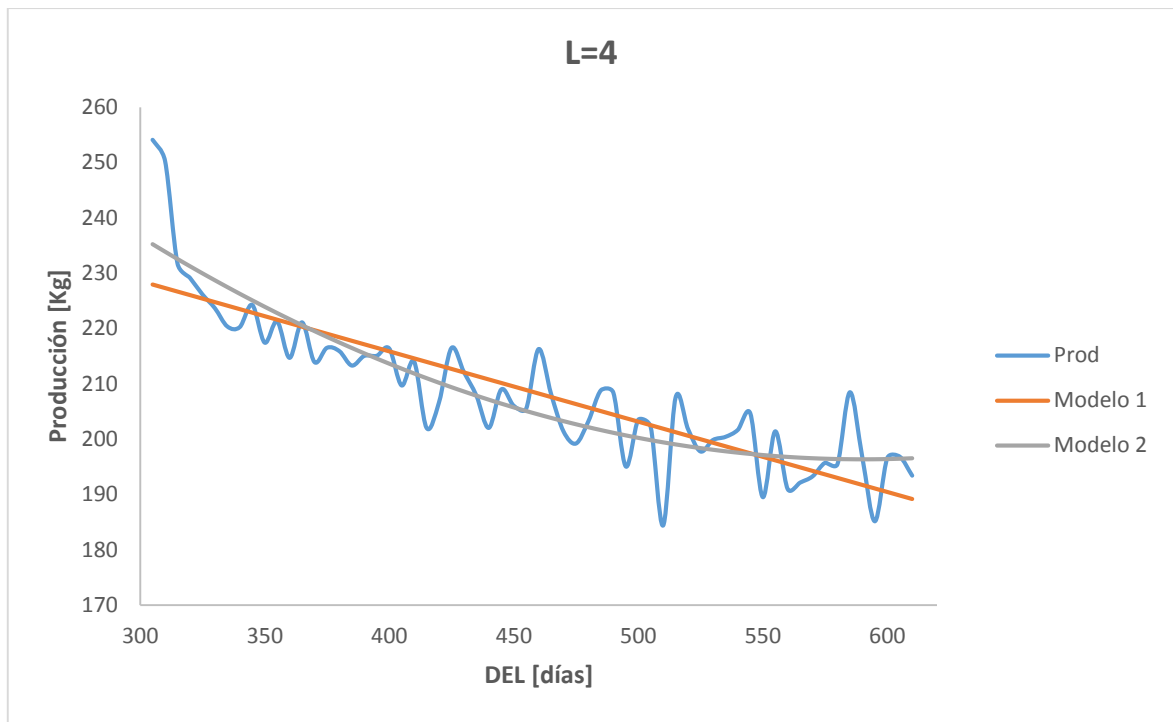


Figura 6.17.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 4.

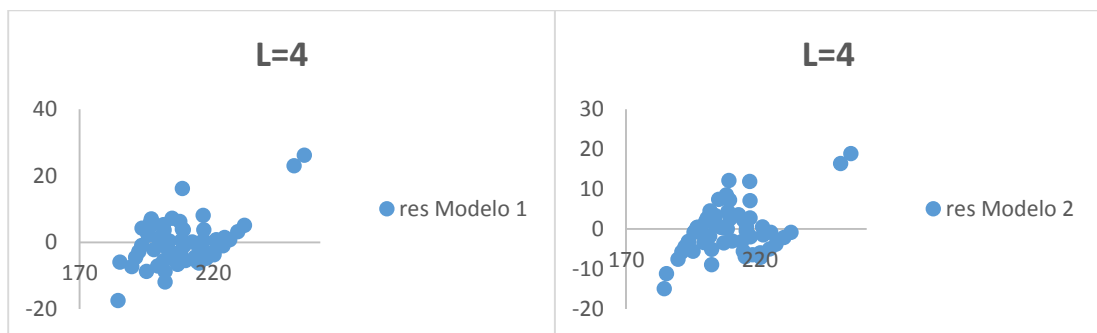
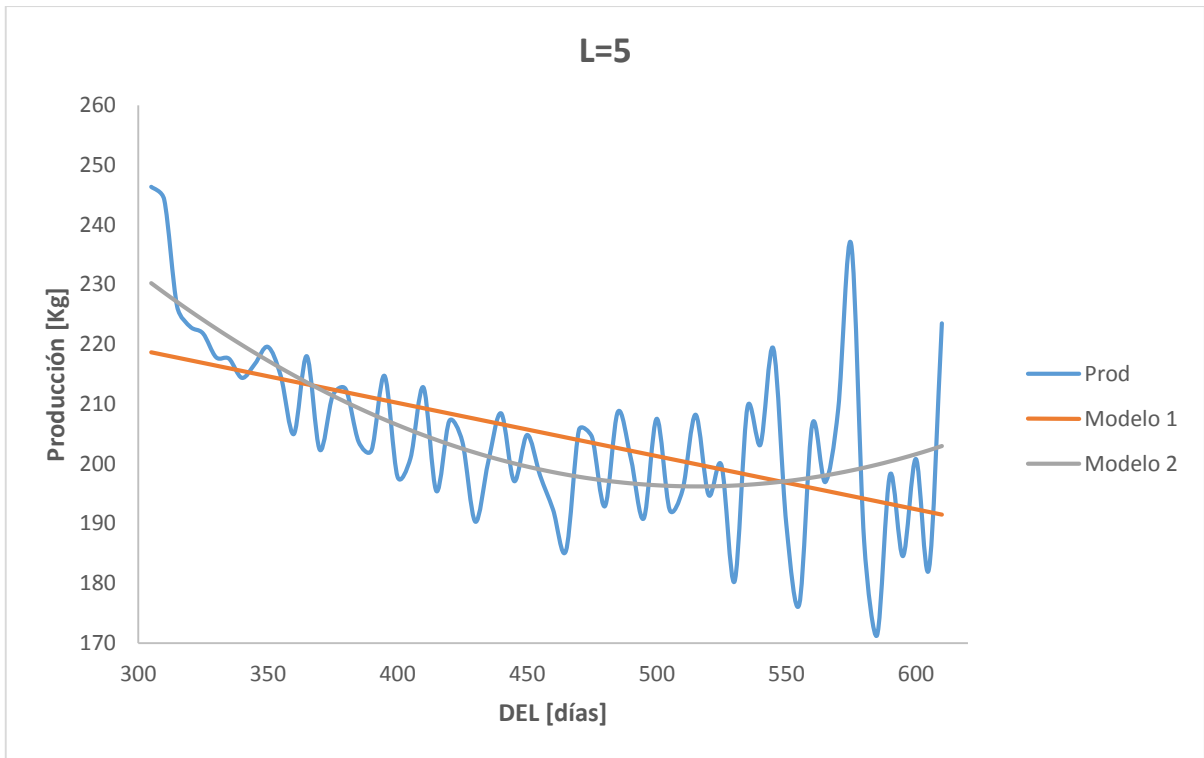
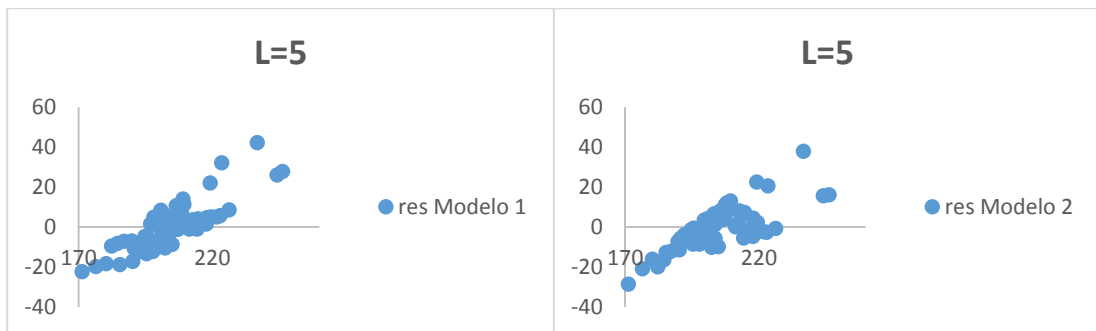


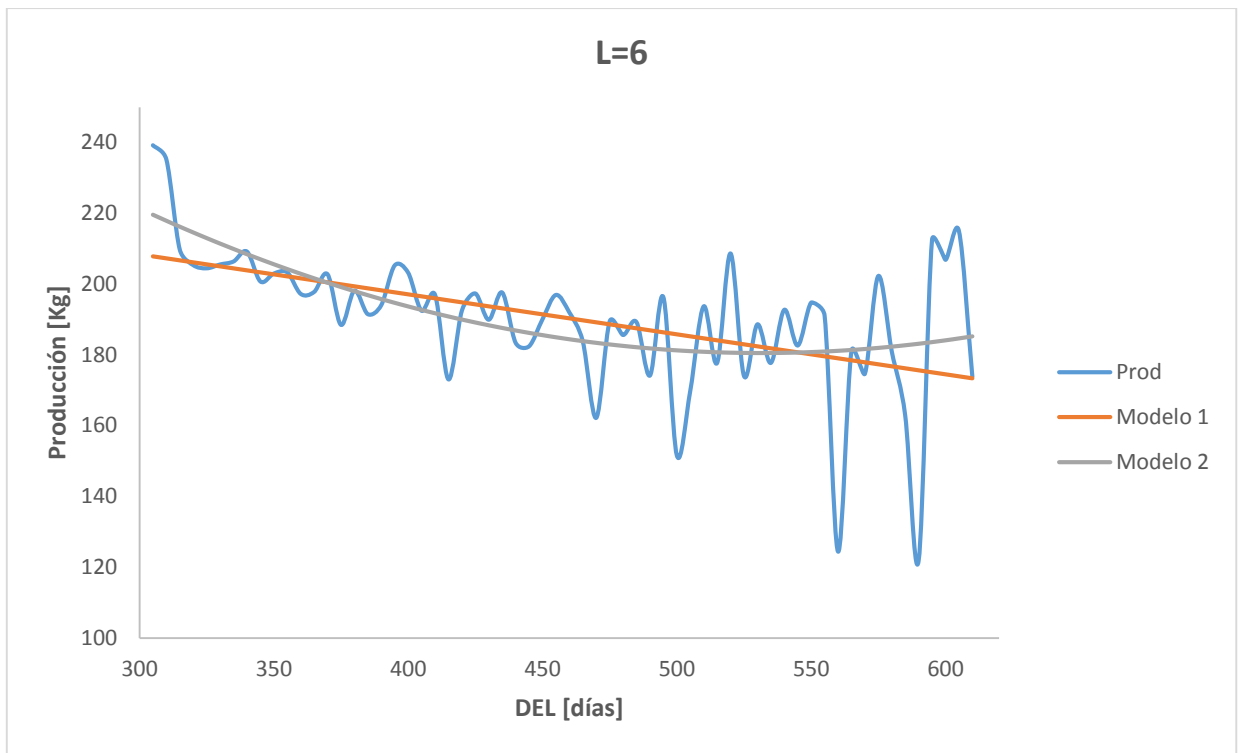
Figura 6.18.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 4.



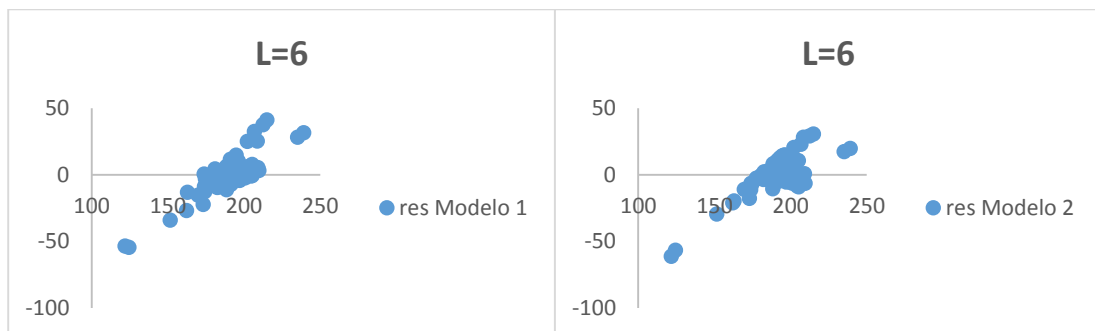
**Figura 6.19.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 5.**



**Figura 6.20.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 5.**



**Figura 6.21.- Comparativa entre las estimaciones del modelo lineal y las estimaciones del modelo polinómico con la producción media real para la lactación 6.**



**Figura 6.22.- Residuos de los modelos lineal y polinómico para la lactación 6.**

En la tabla 6.4 se muestran los datos de producción para cada lactación obtenidos con cada uno de los modelos junto con los datos de la producción media real, así como el error absoluto y el relativo cometido por cada uno de los modelos. Comparando los datos de producción estimados con los datos de producción reales se observa que los modelos predicen una producción ligeramente superior a la observada, aunque la desviación es muy baja, con un promedio de 12 Kg de más para el modelo lineal y de menos de 8 kg para el modelo polinómico. Observando los datos de la tabla se puede concluir que ambos modelos son muy precisos para calcular la producción media de las cabezas de ganado entre los días 305 y 610 de lactación ya que el error máximo cometido no supera los 19 kg de leche sobre 6200 kg producidos lo que significa un error relativo inferior al 0,3% de la producción real. De los datos también se puede concluir que el modelo polinómico es ligeramente mejor en sus estimaciones que el modelo lineal, aunque el incremento marginal de precisión, en el mejor de los casos de 9 kg de leche en el total de la lactación (un 0,1%), puede no justificar el incrementar la complejidad de los cálculos.

**Tabla 6.4.- Valores estimados de producción y errores absolutos y relativos de los modelos lineal y polinómico de lactaciones largas.**

<b>Lactación</b>						
<b>Producción entre 305 y 610 días [Kg]</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>
<b>Media real</b>	6671,66	6320,99	6360,60	6338,76	6229,03	5793,06
<b>Modelo Lineal</b>	6678,58	6330,58	6372,97	6351,32	6247,62	5805,06
<b>Modelo Polinómico</b>	6677,57	6326,84	6365,93	6347,98	6238,57	5803,98
<b>Error modelo lineal [Kg]</b>	6,93	9,59	12,37	12,56	18,59	12,00
<b>Error modelo polinómico [Kg]</b>	5,91	5,85	5,33	9,22	9,54	10,92
<b>% error modelo lineal</b>	0,107	0,152	0,194	0,198	0,298	0,207
<b>% error modelo polinómico</b>	0,088	0,092	0,084	0,145	0,153	0,188

Como resumen se puede concluir que ambos modelos, tanto el lineal como el polinómico, son adecuados para estimar la producción de una cabeza de ganado en el período de su lactación que comprende entre los días 305 a 610. Por su simplicidad, el modelo lineal es más estable y mantiene una precisión adecuada, por lo que es el más conveniente para su uso habitual. Atendiendo a la representación gráfica de las estimaciones de los modelos mostradas en las figuras desde la 6.11 a la 6.22, es posible que ambos modelos presenten errores grandes en la previsión de producción en un valor DEL5 concreto, más que nada debido a las grandes oscilaciones presentes en los valores reales de producción a causa del bajo número de cabezas de ganado usadas en el cálculo, pero la fortaleza de ambos modelos está en la previsión del acumulado de producción, previsión que realizan con un elevado porcentaje de precisión.

## 6.5 Análisis económicos basados en los modelos

Al inicio de esta sección se han estimado dos posibles causas por las que se producen las lactaciones largas: un deseo expreso del ganadero o un fallo en la detección del celo de la vaca. Con la construcción del modelo de lactaciones largas se está en condiciones de realizar valoraciones económicas en función de la leche producida, de cada una de esas causas y, asimismo, plantear respuestas a posibles alternativas que surgen ante las lactaciones largas.

### 6.5.1 Lactación perpetua

Un primer cuestionamiento que se puede realizar ante las lactaciones largas es si es rentable, en términos de producción, extender la lactación de una vaca más allá de lo habitual y eliminar de su vida productiva la inseminación, el proceso de secado y el posterior parto. El análisis que se va a realizar solo tendrá en cuenta el coste en términos de producción, de kilogramos de leche producida y no en términos económicos de balance de ingresos y gastos ya que, aunque la ración y los gastos asociados a una vaca en producción son distintos de la ración y gastos de una vaca en proceso de secado o en el estado de preparto, tener en cuenta esos gastos excede los objetivos de este trabajo.

Para hacer la comparativa se plantearán dos lactaciones completas de 305 días en leche con un período intermedio de secado de 60 días frente a una lactación extendida a ese mismo período. Teniendo en cuenta el planteamiento, los primeros 305 días de ambas lactaciones serían comunes y las diferencias entre ambos casos empezarían a partir del día 305, momento en el que se produciría el secado en un caso, y la continuación en producción en el otro. Como se dispone de los datos de las seis primeras lactaciones, tanto las medias reales como los datos de los modelos, es posible plantear las diferencias para las distintas secuenciaciones de lactaciones. Así, se podrán comparar los datos cuando a la primera lactación le sigue la segunda, o cuando a la segunda le sigue la tercera. En las figuras de la 6.23 a la 6.27 se muestran los tramos de lactación comparables para las secuencias que se pueden construir. A saber:

- Primera lactación seguida de la segunda lactación. Figura 6.23  $L=1 + L=2$ .
- Segunda lactación seguida de la tercera lactación. Figura 6.24  $L=2 + L=3$ .
- Tercera lactación seguida de la cuarta. Figura 6.25  $L=3 + L=4$ .
- Cuarta lactación seguida de la quinta lactación. Figura 6.26  $L=4 + L=5$ .
- Quinta lactación seguida de la sexta lactación. Figura 6.27  $L=5 + L=6$ .

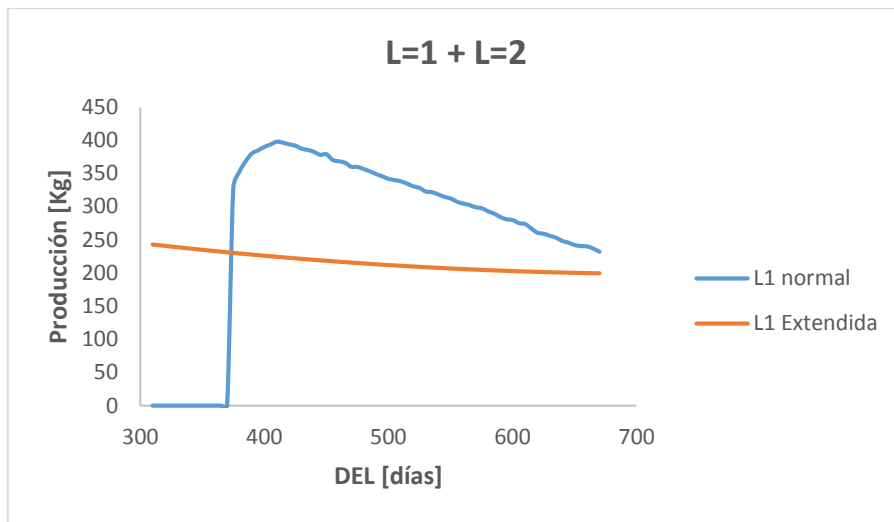


Figura 6.23.- Comparativa de la producción de una vaca en lactación extendida con una vaca con lactación estándar de 305 días en leche. Tramo DEL > 305 días. Secuenciación L=1-L=2.

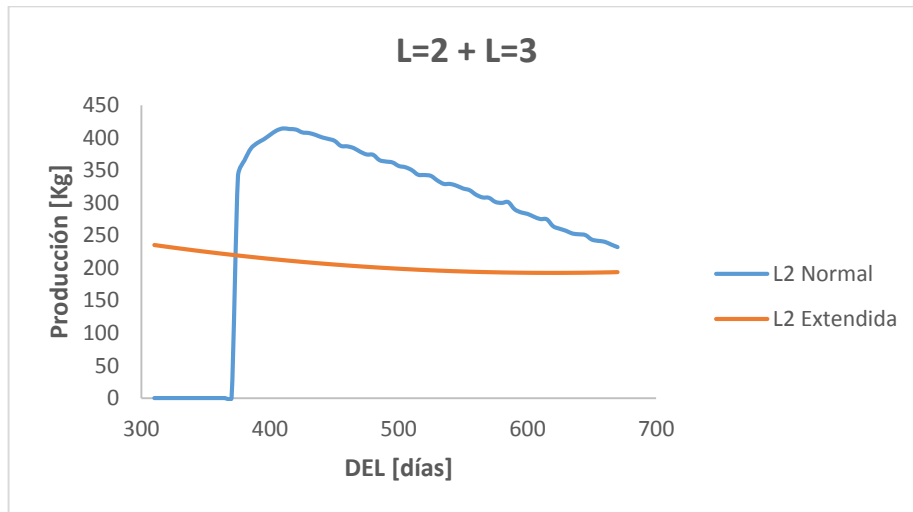


Figura 6.24.- Comparativa de la producción de una vaca en lactación extendida con una vaca con lactación estándar de 305 días en leche. Tramo DEL > 305 días. Secuenciación L=2-L=3.

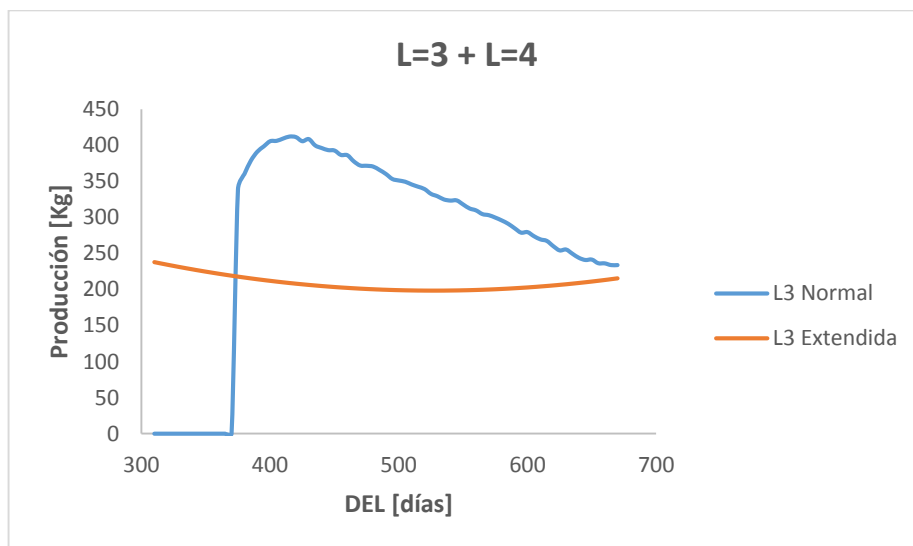
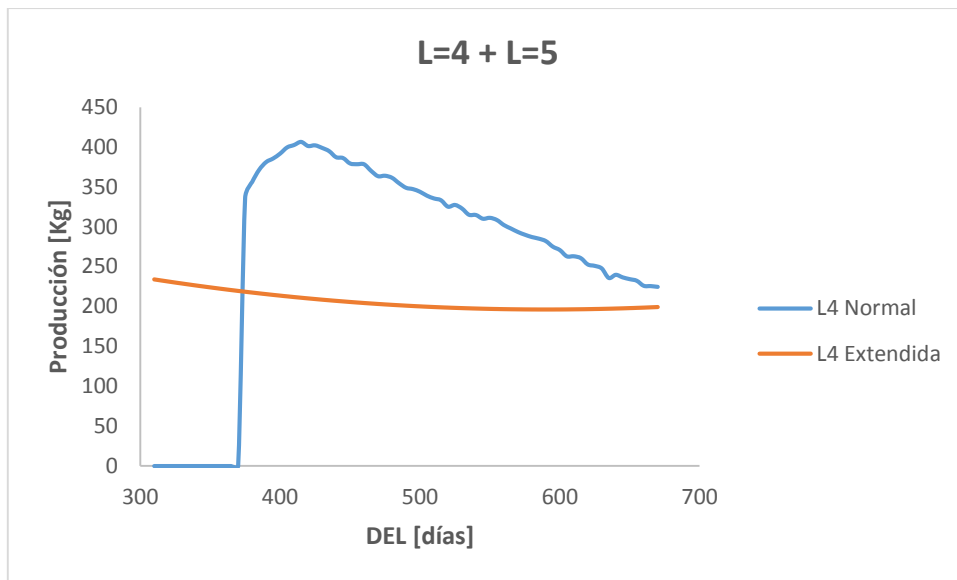
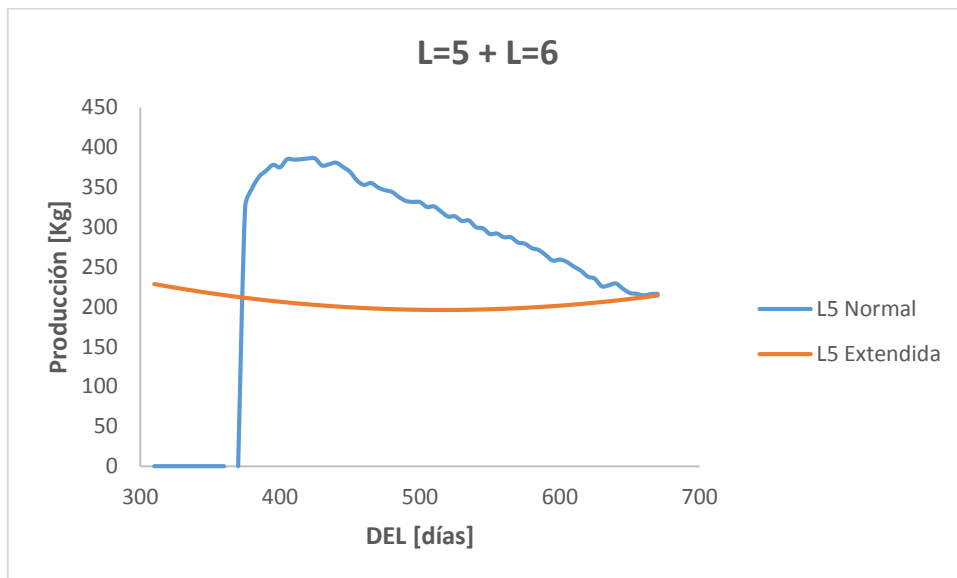


Figura 6.24.- Comparativa de la producción de una vaca en lactación extendida con una vaca con lactación estándar de 305 días en leche. Tramo DEL > 305 días. Secuenciación L=3-L=4.



**Figura 6.24.- Comparativa de la producción de una vaca en lactación extendida con una vaca con lactación estándar de 305 días en leche. Tramo DEL > 305 días. Secuenciación L=4-L=5.**



**Figura 6.24.- Comparativa de la producción de una vaca en lactación extendida con una vaca con lactación estándar de 305 días en leche. Tramo DEL > 305 días. Secuenciación L=5-L=6.**

En la tabla 6.5 se muestra la producción para ambos tipos de lactaciones del tramo 305-700 días en leche que es el tramo en el que se produce la diferencia de producción. Se puede comprobar que, sea cual sea la secuenciación de lactaciones planteadas, la producción de la lactación extendida siempre será menor que la secuenciación de dos lactaciones estándar de 305 días en leche. En este último caso, el peso del incremento de la producción que tiene la curva de producción en los primeros 50 días en leche es determinante para el resultado final de la comparativa. Otra dato que se puede observar en la tabla es que la secuencia de la segunda lactación con la tercera es la peor de todas las posibilidades para la lactación extendida, con pérdidas de producción del 25%. Esto es lógico que así sea puesto que la tercera lactación es normalmente la lactación de máxima producción en la vida útil de una vaca. Por el contrario, la secuencia que involucra a la primera lactación y la segunda es la más favorable a la lactación extendida, con pérdidas del 19%, resultado también esperable ya que la pendiente en el día 305 de la curva de producción de las vacas en primera lactación era la

menor de todas las lactaciones estudiadas, por lo que estas vacas son las que sufren menos variación al alargar sus días en leche.

**Tabla 6.5**

<b>Secuencia Lactaciones</b>	<b>L1+L2</b>	<b>L2+L3</b>	<b>L3+L4</b>	<b>L4+L5</b>	<b>L5+L6</b>
<b>Producción [Kg]</b>					
Normal 305-700	9698,99	10014,35	9891,20	9652,41	9241,56
Extendida 305-700	7880,47	7484,5	7624,70	7534,61	7490,70
Pérdida producción	1818,52	2529,85	2266,50	2117,80	1750,86
% Pérdida producción	18,75	25,26	22,91	21,94	18,95

Como conclusión final se puede decir que, desde el punto de vista de la producción total de leche, es más rentable mantener las lactaciones de 305 días y proseguir con los procesos clásicos de secado y parto que mantener una vaca en producción más allá del día 305. Y, en el caso de alargar la lactación de alguna cabeza de ganado, evitar en lo posible las secuencias de lactaciones que incluyan a las lactaciones tercera y cuarta, que son las de máxima producción.

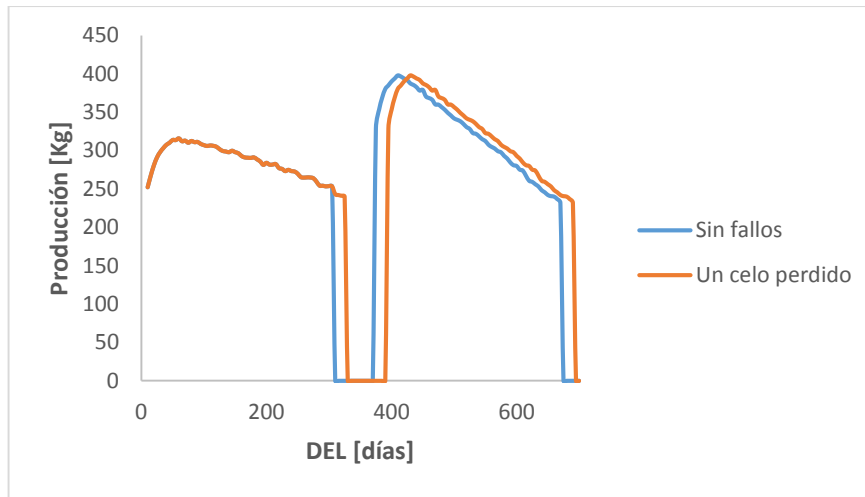
En estas conclusiones no se han tenido en cuenta los riesgos inherentes al proceso de secado, período en el que los estudios elevan el riesgo de contraer mastitis hasta en un 20%, o cualquier infección intramamaria que, como hemos visto en la sección anterior, pequeños incrementos en el recuento celular disminuye de manera notable la producción.

### **6.5.2 El coste de la pérdida de un celo**

Entre las razones de la existencia de las lactaciones larga se ha comentado la posibilidad del fallo en la inseminación de la vaca por una deficiente detección del periodo de celo de la misma. Cada vez que se pierde un celo, la lactación de alarga una media de 21 días y, como se ha visto, la rentabilidad en términos de producción de una lactación extendida es inferior a la rentabilidad de una lactación estándar por lo que se puede concluir que la pérdida de un período de celo tiene un coste en términos de pérdida de producción.

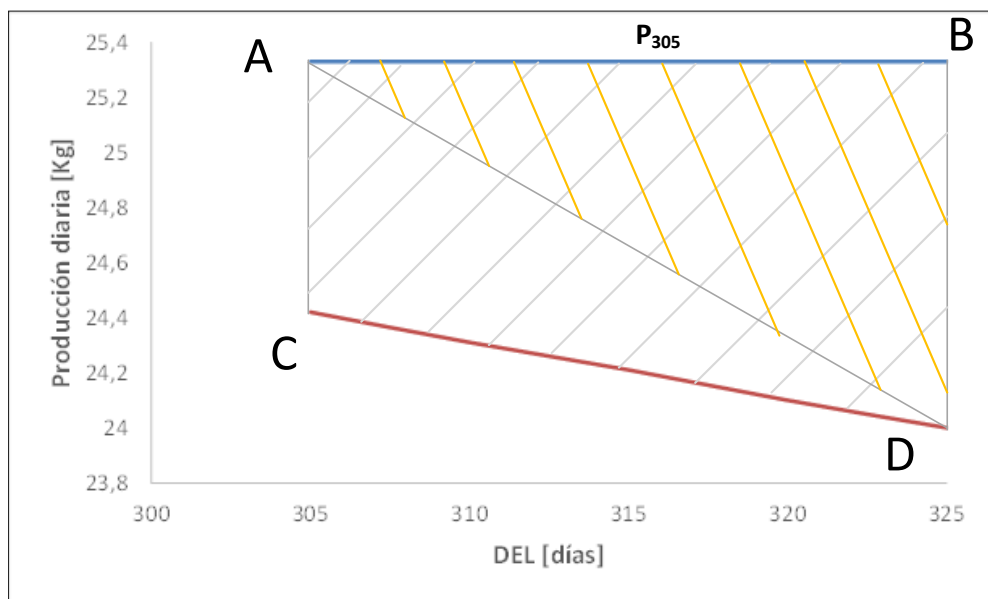
La cuantificación del coste de la pérdida de un celo es un proceso no trivial que depende en gran medida de las prácticas de gestión de la explotación en la que se encuentra localizada la cabeza de ganado. En términos de curva de producción, como se aprecia en la figura 6.25, la pérdida de un celo simplemente desplaza la curva de producción una media de 21 días. En esos 21 días la vaca estaría produciendo por debajo del nivel óptimo que estaría definido por el valor a 305 días en leche por lo que se puede considerar que la pérdida producida por el retraso en la inseminación sería la diferencia entre lo que produce la vaca en esos días y lo que produce la vaca en el días 305.





**Figura 6.25.- Curva de producción normal frente a curva de producción desplazada a causa de un periodo de celo perdido.**

En la figura 6.26 podemos ver la metodología utilizada para realizar el cálculo de la pérdida de producción asignable a un celo fallido en cada lactación. La línea AB es la línea de producción media real el día 305 de la lactación. La línea CD es la estimación de producción que hace el modelo de lactaciones largas para los 21 días adicionales de lactación que provoca la pérdida del celo. Utilizando únicamente los datos proporcionados por el modelo, la pérdida de producción vendría determinada por el área del rectángulo ABCD, pero se puede comprobar que pequeños errores de ajustes en el modelo hacen que no coincidan los valores de P<sub>305</sub> suministrados por el modelo y los calculados a partir de los datos de control lechero. Para mejorar la precisión del cálculo, se obtendrá el área del triángulo ABD como valor de la pérdida de producción ocasionada por un celo perdido. Los vértices de este triángulo serán el punto A que es el valor de la producción media calculada el días 305 y el punto D, que es la estimación de producción que hace el modelo de lactaciones largas en el día 326 de lactación (día 305 más los 21 días que añade un celo perdido). Aunque aparentemente el área del triángulo ACD representaría el error cometido en el cálculo de la producción perdida, esto no es realmente así ya que los puntos A y C deberían ser el mismo si la estimación del modelo de lactaciones largas fuese exacta al 100%.



**Figura 6.26.- Cálculo de la pérdida de producción atribuible a la pérdida de un periodo de celo.**

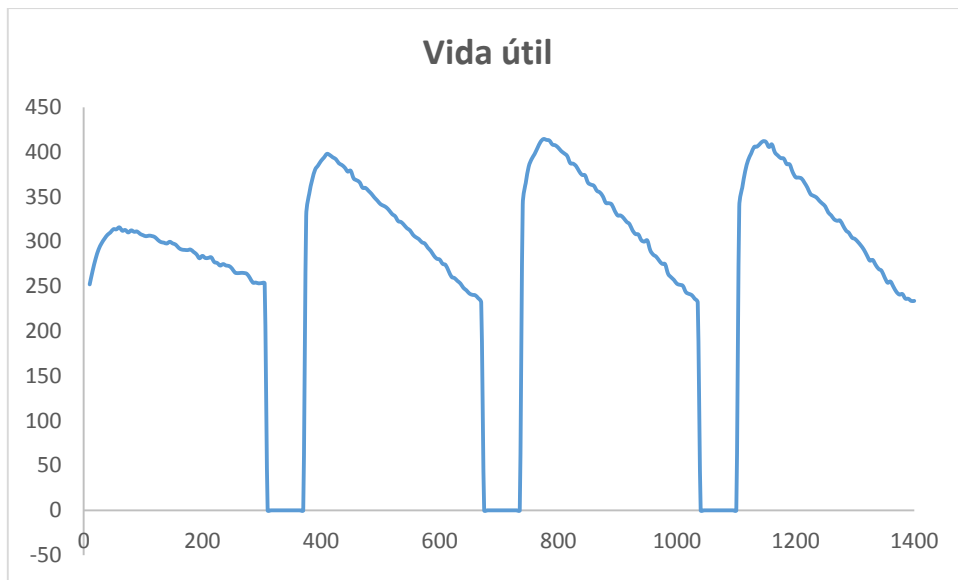
Se ha procedido a calcular las pérdidas estimadas de producción por retrasos de períodos de uno a tres celos en la inseminación y para todas las lactaciones. Los resultados se muestran en la tabla 6.6 donde se muestra la producción en DEL=305 como referencia sobre la que se calculan las pérdidas y la producción en DEL=326, DEL=347 y DEL=368 que se corresponderían con los días en leche que duraría una lactación en la que se pierden uno, dos y tres celos respectivamente.

**Tabla 6.6.- Pérdidas de producción por pérdidas de hasta tres celos referidas al día DEL=305 para las lactaciones de la primera a la sexta.**

<b>Lactación</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>L5</b>	<b>L6</b>
<b>Producción [Kg]</b>						
<b>Producc. 305</b>	253,30	231,97	232,00	233,79	224,58	216,32
<b>Producc. primer celo</b>	239,82	231,14	232,40	229,72	223,80	212,67
<b>Producc. segundo celo</b>	235,64	225,82	225,68	224,62	218,04	206,43
<b>Producc. tercer celo</b>	231,70	220,90	219,70	219,94	212,96	200,86
<b>Pérdida prod. 1<sup>er</sup> celo</b>	14,155	0,876	-0,415	4,275	0,819	3,838
<b>Pérdida prod. 2<sup>o</sup> celo</b>	37,073	12,921	13,277	19,263	13,73	20,782
<b>Pérdida prod. 3<sup>er</sup> celo</b>	68,056	34,892	38,748	43,634	36,611	48,715
<b>% pérdida 1<sup>er</sup> celo</b>	5,59	0,38	-0,18	1,83	0,36	1,77
<b>% pérdida 2<sup>o</sup> celo</b>	14,64	5,57	5,72	8,24	6,11	9,61
<b>% pérdida 3<sup>er</sup> celo</b>	26,87	15,04	16,7	18,66	16,3	22,52

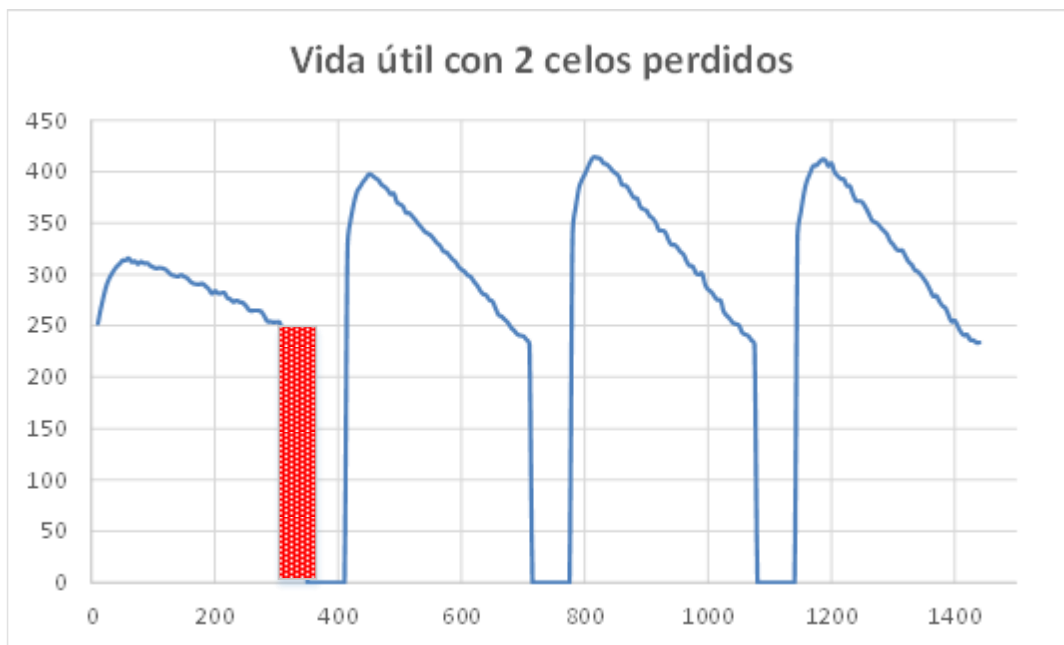
Analizando los datos se puede comprobar que las pérdidas ocasionadas por la pérdida de los celos son muy bajas. En el peor de los casos, correspondiente al tercer celo de la primera lactación, los 68 kg de leche producidos de menos, repartidos entre los 63 días extra que se alarga la lactación, apenas equivalen a un kg de leche menos al día, pérdida totalmente asumible y que en el resto de lactaciones es aún menor.

Pero la cuantificación de las pérdidas de producción por fallos en la detección del celo pueden verse afectadas por las prácticas de gestión de la explotación ganadera en la que se produzcan. Así, si es una explotación en la que solo se utilicen cabezas de ganado de una determinada edad y aquellas vacas que la superen se retiran de la producción, bien por venta o bien por sacrificio, la cuantificación de las pérdidas puede enfocarse desde otro punto de vista. Por ejemplo, si es una explotación en la cual solo se dispone de vacas hasta su cuarta lactación y en la quinta se retiran, la curva de producción de una res durante su vida útil sería similar a la mostrada en la figura 6.27. Es una curva estándar con lactaciones de 305 días y periodos de secado y parto de 60 días.



**Figura 6.27.-** Curva de producción de una cabeza de ganado en una explotación con reses de cuatro lactaciones como máximo y sin pérdida de celo.

Pero si en esa explotación, con los parámetros de gestión indicados, una vaca perdiese dos periodos de celo sin inseminarse en, por ejemplo, la primera lactación, su curva de lactación se prolongaría en 42 días más en producción de una manera similar a la mostrada en la figura 6.28. En este caso, podemos comprobar que la pérdida del celo no produce pérdidas en el total de la vida productiva de la vaca si no que amplía el período de tiempo en el que la res sigue produciendo aumentando de esta manera la producción total. Para que este aumento total de la producción sea económicamente rentable, la producción de las vacas en los días en leche que se aumentan a la lactación, no puede bajar del nivel en el que los ingresos por venta de leche son inferiores a los costes de producción.



**Figura 6.28.-** Curva de producción de una cabeza de ganado en una explotación con reses de cuatro lactaciones como máximo y con la pérdida de dos celos en la primera lactación.

# Capítulo 7

## Aportaciones y futuros trabajos

A lo largo de este capítulo se detallarán las principales aportaciones que se han realizado en el presente trabajo y que, de una u otra manera, ya han sido citadas al final de cada uno de los correspondientes capítulos. El hecho de incluirlas en un único capítulo permite aumentar la perspectiva del trabajo y considerar dichas aportaciones como parte de un todo al que va encaminada la presente Tesis Doctoral. Estas aportaciones quedan enmarcadas sobre el cuadro general de estado de la técnica que se desarrolló al comienzo y que han permitido identificar nichos de trabajo, problemas no resueltos y discusiones abiertas, aspectos todos ellos sobre los que el presente trabajo ha pretendido aportar nuevas informaciones.

En este sentido, si bien las aportaciones constituyen el núcleo esencial del documento por cuanto detallan el cambio que se ha introducido desde el estatus inicial representado por el estado de la técnica hasta la situación a la que se ha llegado, lo cierto es que se pretende abrir un nuevo camino en el que poder continuar esas aportaciones, tanto en aspectos cuantitativos (extensión de los análisis a otros ámbitos y validación de las conclusiones extraídas a esos ámbitos) como en los cualitativos, con pasos posteriores que estudien cómo aplicar las nuevas ideas al mundo real de las explotaciones de vacuno de leche.

## 7.1 Aportaciones

El conjunto de las aportaciones del presente trabajo, así como el trabajo en su conjunto, van encaminados hacia proporcionar herramientas de análisis de información que permitan establecer conclusiones sobre la situación de una explotación, sobre su rendimiento y sobre los principales aspectos relacionados con su resultado económico

Desde este punto de vista, y a raíz de lo que se establece en la documentación y las fuentes bibliográficas consultadas, los factores que más influyen son los relativos a la producción y a los recuentos celulares. En este último caso, el recuento celular está en relación directa con la presencia de la mastitis como enfermedad de elevada prevalencia entre el ganado vacuno de leche. Por tanto, las aportaciones las dividiremos en las relativas al modelo de enfermedad y las que tienen relación con los modelos de producción.

### a) Aportaciones relativas al modelo de enfermedad

La principal aportación es la **generación de un modelo de enfermedad** que permita conocer el estado de salud de un rebaño a partir de muy pocas medidas. Dado que la leche de tanque es analizada muy frecuentemente o que existe la posibilidad de utilizar algún sensor de recuento celular, se ha tratado de definir un conjunto de modelos que permitan conocer el estado de salud a partir del valor BTSCC. Todos estos modelos se han obtenido a partir de los datos disponibles y se han verificado de forma cuantitativa obteniendo su capacidad predictiva real.

La **comparación entre estos modelos** también es una aportación ya que permite seleccionar cuál resulta el más adecuado para la mayoría de los casos. Así, se puede concluir que el modelo M8 es el que mejor representa el comportamiento de una explotación.

Dentro de las aportaciones también es preciso incluir la premisa que guía toda la definición y metodología utilizada para realizar el perfil celular de una explotación: **el perfil tiene que obtenerse a partir de un único valor** fácil de obtener y accesible en el día a día para el gestor de una explotación ganadera: el valor del recuento de células somáticas en el tanque de almacenamiento de la explotación, el BTSCC (*Bulk Tank Somatic Cell Count*). A partir de esta premisa, a lo largo de todo el capítulo 4 se sigue

el proceso de análisis y metodología de los datos de control lechero mensual de las explotaciones ganaderas asturianas para encontrar el modelo que mejor defina dicho perfil celular.

En la **metodología para la realización del cálculo** del perfil celular se han utilizado mecanismos novedosos tales como la agrupación de los controles asociados a una granja para crear una única explotación agregada. Esto cabe considerarlo como una aportación metodológica. Sobre estas agregaciones se ha comprobado la validez de varios modelos de cálculo que, después de la validación con los datos reales del control lechero, han llevado a seleccionar a un único modelo que, aunque presenta buenos resultados sobre valores agregados, ha sido preciso refinar para mejorar su aplicación al nivel de explotaciones individuales.

En este segundo proceso de refinamiento del modelo se utilizaron los valores individuales de los controles para crear una granja virtual con cada uno de esos controles de tal manera que, para realizar el cálculo del perfil celular, se utiliza el método original de crear un gran número de explotaciones independientes en vez de la metodología habitual de seguir un explotación a lo largo del tiempo. Con los datos agrupados y tratados de esta manera, se han propuesto 8 modelos de cálculo del perfil celular de una explotación los cuales han presentado valores teóricos muy altos de ajuste. De esos 8 modelos se han seleccionado los dos que mejor ajuste presentaban para realizar un proceso de validación con todas y cada una de las explotaciones creadas a partir de todos los controles lecheros mensuales disponibles. Este proceso de validación ha llevado a las conclusiones de que los modelos son, desde el punto de vista de la precisión relativa, perfectamente utilizables para la obtención de los perfiles celulares de las explotaciones ganaderas de la región asturiana.

En el mismo contexto, se pueden considerar aportaciones de menor entidad la **definición de parámetros de calidad** que permitan definir de forma genérica la situación de una explotación:

En los trabajos para realizar los cálculos del modelo de enfermedad se ha definido un nuevo índice, el **Valor de Calidad o QF**, que permite utilizar los datos de control lechero de una manera más intuitiva y eficaz. El Valor de Calidad, tal y como se ha definido en este trabajo, además de ser una medida del nivel de células somáticas en el tanque de una explotación, permite ser utilizado en los cálculos del modelo de enfermedad de una manera más adecuada. A diferencia del índice *Linear Score* o LS, más tradicionalmente utilizado, el Valor de Calidad está actualizado a los valores más típicos de las granjas de hoy en día ya que, en la época en la que se definió el *Linear Score*, la calidad sanitaria de las explotaciones era claramente inferior.

De la misma manera, el uso generalizado del Valor de Calidad entre los ganaderos a cargo de las explotaciones lecheras permitiría una clasificación más natural de la calidad de las mismas en función del recuento celular en el tanque. Así, debido a la definición realizada del Valor de Calidad, sus valores se relacionan de manera inversa con el nivel de recuento celular en el tanque de tal manera que valores crecientes del Valor de Calidad implican descensos progresivos del recuento celular en el tanque. Como los valores bajos de recuento celular sólo son posibles en el caso de una explotación de alta calidad sanitaria la relación entre el Valor de Calidad y la excelencia sanitaria de la explotación son directamente proporcionales. Esta relación entre la calidad de la explotación y el valor posible del *Linear Score* es inversamente proporcional, resultando que valores altos de recuento celular implican valores altos del *Linear Score* lo cual indica explotaciones con bajos niveles de calidad sanitaria.

En el capítulo 4 de este trabajo se presentan los cálculos necesarios para **obtener el perfil celular de una explotación**. La definición del concepto de perfil celular es una aportación original de este trabajo ya que no se encuentran referencias en la literatura científica de la definición o utilización de un concepto similar. El perfil celular, definido como el número de cabezas de ganado de una explotación que se encuentran en cada uno de los segmentos de recuento de células somáticas, surge como un mecanismo más para definir la calidad sanitaria de una explotación, junto con el Valor de Calidad anteriormente comentado.

b) Aportaciones relativas al modelo de producción

El siguiente factor que tiene relación directa con la economía de la explotación En el capítulo 5 se ha propuesto la utilización de los datos disponibles de la cooperativa ASCOL para la obtención de un modelo explicativo de la producción de las explotaciones ganaderas. Para la realización de este modelo se han propuesto métodos originales de filtrado y tratamiento de los datos, tales como la exigencia de disponer de datos de reses a lo largo de un periodo de tiempo mínimo de tres lactaciones y de disponer, al menos, de información suficiente en cada lactación para poder garantizar el seguimiento estadístico de la cabeza de ganado. También, saliéndose de los caminos habituales de la literatura científica, se ha procurado desligar la información disponible de conceptos tales como la genética o la estacionalidad.

A partir de estos datos se ha propuesto **un nuevo modelo explicativo de la producción** de una vaca, que constituye una aportación más del presente trabajo y se ha comparado con el tradicional modelo de Wood, que es uno de los modelos más ampliamente reconocidos como modelo de referencia en la literatura científica. El modelo propuesto en este trabajo es más simple que el modelo de Wood en su concepción ya que, aunque está dividido en dos tramos independientes, los parámetros de cada tramo son más sencillos de calcular que en el caso del modelo de Wood. Respecto al modelo de Wood, en el tramo de 0 a 50 días en leche, el modelo propuesto es más preciso ya que es capaz de seguir la curva de producción más fielmente que el modelo de Wood, ya que este presenta una tendencia a predecir valores inferiores de producción precisamente en el tramo de máxima producción del animal. En el caso del tramo de 50 a 305 días, el modelo de producción propuesto es de una sencillez extrema ya que se compone de una recta de pendiente constante. Pero a pesar de esa sencillez, su precisión no es inferior en ningún caso a la curva de decaimiento que presenta el modelo de Wood.

Se puede indicar que la aportación más importante del modelo de producción es la sencillez que presenta ante el más habitual modelo de Wood u otros modelos basados en curvas spline, a la par que la precisión no es menor que dicho modelo de Wood.

Se puede considerar que la aportación más importante de este trabajo es la que surge al **analizar la relación de la producción con el recuento de células somáticas**. Está generalmente considerado entre los organismos dedicados a dar consejos y directrices sobre la gestión de explotaciones lecheras que un aumento del doble del número de células somáticas por ml de leche en una vaca produce un descenso en la producción de hasta un 4% de leche diario, aunque esas consignas de gestión no se ven reflejadas en la literatura científica de manera concluyente. Uno de los puntos que más controversia producen es el nivel de recuento celular, si es que existe, al que se considera que una vaca está sana y no sufre pérdidas de producción. Es habitual

encontrar como nivel de referencia el valor de 200000 cél/ml, valor a partir del cual se hace presente la denominada mastitis subclínica, que es aquella en la que se sufren pérdidas de producción similares a las obtenidas con valores elevados de recuento celular, pero en la que no se aprecian síntomas de padecer ninguna enfermedad.

En este trabajo se han encontrado resultados que, sin ser completamente contradictorios con los resultados encontrados en la literatura científica, los matizan y se ajustan mejor a los valores reales observados en las explotaciones ganaderas asturianas.

Un primer resultado novedoso de este trabajo es constatar la **práctica independencia de la producción con respecto a los valores de recuento de células somáticas en valores que se podrían denominar como medios**, entre las 100.000 cél/ml y los 2.000.000 cél/ml. Este resultado se ajusta con los valores observados en las explotaciones ganaderas donde vacas con una alta producción de leche no muestran descensos acusados de dicha producción a pesar de mantener niveles elevados de recuento celular. Este resultado presenta una discrepancia importante con las ideas generalmente aceptadas en el mundo de la gestión ganadera de que un incremento constante del recuento celular produce un descenso también constante y lineal de la producción.

El segundo resultado obtenido en este trabajo relacionado con la relación entre la producción y el recuento celular se refiere a los casos en los que se cumple la aceptada relación entre el incremento de recuento celular y el descenso de la producción. En este trabajo se ha encontrado que esa relación se produce únicamente en los extremos de los valores de recuento celular. Así, cuando una cabeza de ganado incrementa su recuento celular en apenas 50.000 cél/ml, se produce un descenso en su producción acusado, de hasta un 5%, que puede llegar a ser un 7% dependiendo de la lactación. Este descenso tan acusado de la producción a límites tan bajos del recuento celular parece apuntar hacia **un nuevo límite para la denominada mastitis subclínica** que es una aportación absolutamente original de este trabajo.

En los extremos más elevados de recuento celular (por encima de los 3.000.000 cél/ml) también se ha encontrado relación entre el descenso de la producción y el recuento celular, pero en este caso, los resultados obtenidos son coincidentes con los valores aceptados tanto en el mundo de la gestión ganadera como en los trabajos científicos publicados.

Para verificar las relaciones entre la producción y el recuento celular se ha ideado en este trabajo la **lactación DEL5 patrón**. Esta lactación patrón está creada a partir de los datos de la curva de producción que se encuentra en cada uno de los controles lecheros disponibles a lo largo de veinte años para cada una de las cabezas de ganado. Es una lactación de referencia que se puede utilizar como estándar de comparación para las vacas productoras de leche de la región asturiana y que puede ser considerada un gran aporte de este trabajo. El valor de referencia de la lactación DEL5 patrón está fuera de toda duda ya que el mecanismo de creación utilizado ha permitido que cada punto de la curva de producción esté calculado a partir de miles de datos disponibles.

Con la curva de lactación DEL5 patrón se ha verificado de manera fehaciente la relación obtenida entre el recuento celular y la producción. A partir de una novedosa clasificación en categorías de SCC se ha podido comprobar con claridad como la producción desciende acusadamente cuando el recuento celular pasa de cero a 50000 cél/ml pero que ese descenso de producción no es tal cuando el recuento celular se mantiene por encima de las 300000 cél/ml, haciéndose independiente en este caso la



producción del número de células somáticas presentes en la leche. Es la constatación de esta relación tan característica entre el recuento celular y la producción de leche sin duda la aportación más novedosa de este trabajo.

Otra de las aportaciones se encuentra en el **estudio de las lactaciones largas** o extendidas. Este mecanismo de gestión no ha sido lo suficientemente estudiado en la literatura científica, ni desde el punto de vista de sus causas ni desde el punto de vista de sus consecuencias. En este trabajo se aportan una serie de posibilidades sobre las razones de la existencia de vacas con lactaciones prolongadas y se caracteriza el tipo de vaca en el que se suele producir. De la misma manera, se ha aportado **un estudio económico basado en la producción sobre la rentabilidad de la extensión de la lactación** y se ha analizado la **incidencia de la pérdida de los períodos de celo** reproductivo en los orígenes de las lactaciones largas.

## 7.2 Trabajos futuros

Una de las características más importantes de los datos con los que se ha trabajado ha sido el hecho de que son datos anónimos, esto es, se sabe que pertenecen a explotaciones ganaderas de Asturias pero no se conoce la zona de Asturias en la que se encuentran. Un posible trabajo futuro sería relacionar los datos disponibles con su localización geográfica para comprobar si la zonificación tiene influencia en los resultados obtenidos.

A partir del modelo de perfil celular obtenido en este trabajo se pueden proponer trabajos de campo sobre las explotaciones ganaderas con la instalación de sistemas automáticos de recuento celular. A partir de un sistema de monitorización automático de recuento celular como los indicados en el capítulo 2 de este trabajo, se podría verificar en tiempo real la precisión de las predicciones y la construcción de un sistema inteligente de identificación de vacas con problemas de recuento celular alto. Este sistema, probablemente basado en inteligencia artificial, podría plantearse la toma de decisiones automatizadas tales como la retirada de partes de la producción o incluso, la retirada de cabezas de ganado del sistema productivo.

El modelo de perfil celular también podría servir de base para un trabajo sobre la caracterización objetiva de la calidad de las explotaciones ganaderas. A partir del Valor de Calidad definido en este trabajo, se puede refinar el modelo utilizando información de campo obtenida de los veterinarios que trabajan en esas explotaciones. A partir de encuestas o índices de valoración se puede validar el Valor de Calidad obtenido a partir de la medida de las células somáticas contenidas en el tanque de la explotación. Por otro lado, el valor de calidad también podría ser modulado con informaciones adicionales: de ese modo, podrían incluirse más factores objetivables que pudieran modificar ligeramente el factor de calidad de la explotación y permitiese mejorar la predicción; en una primera fase, este proceso podría consistir en una estimación subjetiva del técnico o del veterinario o del resultado de un panel de expertos, pero en una fase posterior, se podrían incluir factores realmente medibles y de carácter totalmente objetivos, factores que se basarían en el manejo, el correcto funcionamiento de la plataforma de ordeño, en la corrección de la rutina, el estado de salubridad de la instalación, estado y calidad de las instalaciones, etc.

Los números que aporta el modelo de perfil celular son números genéricos que, aunque globalmente precisos, pueden tener errores en el detalle. Un trabajo sobre la adecuación del modelo a cada una de las explotaciones disponibles con un estudio temporal de la evolución del número de cabezas de ganado en cada una de las categorías sería de gran interés para poder reducir los posibles errores cometidos en cada categoría y para aplicar herramientas de gestión más sofisticadas.

Sobre los resultados obtenidos en el modelo de producción se pueden ampliar los trabajos utilizando los conceptos de la lactación DEL5 patrón sobre la influencia de la genética en la producción u otros factores. Para realizar estos trabajos sería necesario incluir información extra en los controles lecheros o poder acceder a los datos originales sin el proceso de anonimato. En el caso de disponer de esa información de relaciones entre las distintas cabezas de ganado se podría aplicar análisis de datos para buscar relaciones entre las curvas de producción, la genética y las células somáticas para establecer posibles relaciones causa-efecto en las que las herramientas de análisis propuestas en este trabajo serían de gran utilidad.

Con datos extra de cada explotación sobre los contenidos de la ración de alimentación y su evolución se podrían plantear la creación de la lactación DEL5 patrón por explotación incluyendo costes económicos, del mismo modo que se podría analizar la influencia de otros elementos como el confort de las vacas en la modificación de la curva de producción.

Las lactaciones largas plantean posibles trabajos de ampliación en la profundización para conocer sus causas. Aunque en este trabajo se ha comprobado que los costes de la pérdida de un celo desde el punto de vista de la producción no son elevados, sería interesante realizar trabajos que comprobaran si los métodos actuales son adecuados para detectar el celo reproductivo de las vacas y su puesta al día utilizando técnicas más modernas como el análisis del movimiento a partir de imágenes.

# Capítulo 8

## Conclusiones

Una vez concluido el estudio realizado, en este capítulo se establecerán las conclusiones más destacadas del presente trabajo.

La primera conclusión que se puede obtener es que se ha logrado un elevado grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y, además, en el proceso de consecución de dichos objetivos se han podido encontrar resultados adicionales de elevado interés.

En un plano mucho más concreto, se puede concluir lo siguiente:

En el estudio del estado de la técnica se ha efectuado un extenso estudio bibliográfico que resume la situación del conocimiento establecido hasta la fecha y que identifica los diversos factores que influyen en el rendimiento económico de una explotación ganadera de bovino de leche. De este estudio surgen las necesidades de planteamiento de modelos de enfermedad para los rebaños y de producción en función de los diversos factores que intervienen en la misma.

A raíz de lo establecido en el estado de la técnica, se hace necesario disponer de un número suficiente de datos para el establecimiento de reglas, tendencias modelos y para la verificación de cualquier hipótesis que de ellos se extraiga. En este sentido, se dispone de la base de datos de ASCOL que resume la situación ganadera de Asturias a lo largo de veinte años, a través de los datos mensuales de control lechero realizados a las explotaciones ganaderas asturianas.

En un primer análisis, de los datos en su conjunto se puede concluir que la población ganadera asturiana mantiene una alta calidad sanitaria si tomamos como referencia el recuento de células somáticas. El Valor de Calidad definido en este trabajo clasifica a la mayor parte de las explotaciones por encima del aprobado con una gran cantidad de ellas alcanzando el notable e incluso el sobresaliente. Esto indica que las políticas de control instauradas por la administración sanitaria para limitar la presencia de células somáticas en los tanques de las explotaciones han traído como consecuencia que las prácticas de gestión aplicadas en cada granja haya mejorado la calidad sanitaria de las mismas. Esta lucha del productor para reducir el nivel de SCC en su tanque ha llevado a una mejora general de las instalaciones y a una población ganadera en la que la mayor parte de las cabezas de ganado se encuentran por debajo del nivel de 50000 células por mililitro.

En los estudios realizados para la obtención de un modelo de enfermedad se concluye que es posible, a partir de los datos de control lechero mensual, obtener prototipos que representen a las explotaciones ganaderas asturianas con un bajo porcentaje de error. De todos los modelos analizados, aquellos que incluyen una relación logarítmica son los que mejores resultados producen debido a la naturaleza logarítmica de la concentración de células somáticas en la leche, que es la variable que considera el modelo.

Aunque se pueden plantear agregados de explotaciones para facilitar el estudio, en este trabajo se demuestra que los mejores resultados se consiguen cuando se modelan las explotaciones utilizando tamaños similares a los obtenidos de los datos de muestreo de los controles mensuales. Los agregados de explotaciones son adecuados para plantear análisis a largo plazo y en grandes explotaciones pero no son adecuados para utilizarlos como posible herramienta de gestión en una explotación concreta.

Los modelos logarítmicos propuestos para calcular el perfil celular de una explotación a partir de los datos de control lechero mensual podrían ser utilizados como una herramienta adecuada para la gestión de una explotación. Aunque presentan un cierto error en la predicción, el ganadero podría utilizarlos para analizar la evolución de su rebaño y prever posibles problemas de incremento de nivel de recuento celular y, por consiguiente, pérdidas por descenso de producción o por descenso de la calidad de la leche producida.

En este trabajo también se ha propuesto la realización de un modelo de curva de producción y se ha validado frente a uno de los modelos más reconocidos y utilizados como es el modelo de Wood. En este trabajo se ha comprobado que ambos modelos, el propuesto y el de Wood, son prácticamente equivalentes en cuanto a la suma total de producción obtenida cuando se aplican a una lactación completa. Pero a pesar de que la suma total es similar en ambos modelos, el modelo propuesto es superior al modelo de en el tramo inicial de la lactación, aquel que va hasta los 50 días en leche, que coincide con el tramo de máxima producción de la vaca.

En el tramo de la lactación correspondiente de los 50 a los 305 días de una lactación normalizada, ambos modelos presentan una caída progresiva de la producción hasta alcanzar el nivel de los 305 días. En el caso del modelo de Wood, ese decaimiento es menos pendiente y con un factor exponencial que lo hace tender hacia la horizontalidad, a diferencia del modelo propuesto en este trabajo que presenta un descenso progresivo y continuado de la producción siguiendo una línea recta. Esa tendencia a la horizontal que plantea el modelo de Wood es la causa de que sobreestime ligeramente la producción en este tramo de la lactación haciendo que la suma final sea equivalente a la que produce el modelo propuesto en este trabajo.

En cuanto a la facilidad de cálculo y uso, el modelo aquí propuesto, al ser un simple polinomio de segundo orden en su tramo más complejo, permite un fácil cálculo de sus parámetros y una sencilla aplicación del mismo sin apenas complejidad matemática.

En los estudios realizados sobre la influencia del recuento celular sobre la capacidad de producción de las vacas es donde se obtienen las conclusiones más interesantes de este trabajo. La relación entre recuento celular y descenso de producción es directa para valores bajos de SCC. En este trabajo se ha encontrado que se produce un descenso de producción muy intenso cuando los niveles de recuento celular pasan de cero a 75000 células/ml lo cual reduce a menos de la mitad los niveles de SCC habitualmente aceptados como límite para el descenso de la producción. Además este descenso se produce independientemente de la lactación en que se mida por lo que se puede concluir que uno de los condicionantes más importantes para obtener una alta producción es mantener la ganadería en unas óptimas condiciones sanitarias.

El profundo descenso de la producción que se observa a niveles bajos de recuento celular desaparece en la práctica cuando los niveles de SCC se mueven entre los rangos de las 200000 células/ml y los 2000000 células/ml de tal forma que la producción se hace prácticamente independiente del recuento celular. Este resultado desdice los criterios habitualmente aceptados en los organismos de gestión de que aumentos acusados del recuento celular producen pérdidas constantes de producción. Los resultados presentados en este trabajo, basados tanto en agregados de producción como en la lactación DEL5 patrón, demuestran que el nivel de la producción se mantiene independiente una vez se ha superado el

umbral de influencia situado en las 75000 células/ml y hasta que se alcanza un nivel de recuento celular en el que ya no se puede hablar de enfermedades asintomáticas.

A partir de los 2000000 células/ml se entiende que el nivel de SCC es tan elevado porque hay algún problema grave sanitario que está afectando a la vaca y los resultados que se han encontrado en este trabajo demuestran que la producción vuelve a verse afectada por ese nivel tan alto de recuento celular, aunque no al nivel tan elevado que prevén los criterios tradicionalmente aceptados y publicados.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el trabajo presentado, una conclusión importante es la proposición de modificar los criterios habitualmente aceptados para considerar a un animal en buen estado de salud. Actualmente, el nivel de concentración de células somáticas que se admite como aceptable en un animal sano se establece en las 200000 células/ml. Este nivel, tal y como demuestran los resultados que se han obtenido, ya presentaría unas pérdidas de producción excesivamente altas para ser considerado un límite válido que, además, presenta el inconveniente de que a partir de él la pérdida de producción no está ligada a posibles incrementos del recuento celular. En este trabajo se propone descender el límite que define un animal sano de uno con problemas de salud que afectan a su producción a las 50000 células/ml de leche producida. Este límite, aun a pesar de ser bajo para los estándares habituales, tiene la ventaja de que una cabeza de ganado que se mantenga por debajo de él producirá a su máximo nivel (en igualdad del resto de condicionantes tales como alimentación adecuada, confort suficiente, etc) y que, al superar ese nivel de recuento celular, la producción caerá de manera proporcional al incremento de SCC hasta llegar al punto próximo a las 150000 células/ml en el que la producción ya no se verá afectada por el incremento de SCC.

En cuanto a la metodología para obtener los resultados de la relación entre producción y recuento celular, la creación de la lactación DEL5 patrón es una herramienta muy adecuada para observar las tendencias de evolución de las curvas de producción en un conjunto lo suficientemente grande de reses. A partir de la creación de la lactación DEL5 patrón se pueden observar fenómenos que habitualmente en la literatura científica han sido difíciles de demostrar. En concreto, el problema más importante que soluciona la lactación DEL5 patrón es el de la referencia de producción para evaluar posibles pérdidas o ganancias de producción de una vaca. Habitualmente, se han utilizado estrategias consistentes en la creación de pares de cabezas de ganado que tenían genética similar, edad similar y comportamiento parejo para comparar la producción de una vaca con su par y extrapolar a partir de ahí las posibles pérdidas o ganancias de producción cuando una de las vacas de ese par se veía afectada por el factor a medir, por ejemplo un incremento en el recuento celular. Otra estrategia consiste en la comparación de la producción de una vaca con la producción de esa misma vaca antes y después de verse afectada por el factor a medir. El problema de estas estrategias es que, en el primer caso, los pares tienen que estar perfectamente realizados y es muy difícil de garantizar que seguirían siendo pares si la vaca de estudio no sufriera el cambio en observación y, en la segunda aproximación, la curva de producción de una vaca concreta sufre una evolución constante a lo largo de una lactación y además, se producen cambios de lactación en lactación, por lo que es difícil garantizar qué porcentaje de la evolución es debido a factores naturales y qué porcentaje se debe al factor en estudio.

Cuando se tiene el número suficiente de datos para construir la lactación DEL5 patrón, ésta se convierte en la referencia perfecta puesto que cada uno de los puntos de la curva de lactación

construida está formado por todos aquellos valores de todas aquellas vacas que se encuentran en exactamente el mismo DEL5 de la misma lactación y con exactamente el mismo valor de la propiedad a estudiar. Esta referencia funciona como los pares de reses con la diferencia de que la res que se utiliza como par no es real si no que está creada como la media de todos los posibles pares en ese momento de la lactación. De esta manera, cuando se ha construido la lactación DEL5 patrón para cada una de las categorías de recuento celular que se han analizado en este trabajo, esas lactaciones patrón se convirtieron en la referencia perfecta sobre la que realizar comparaciones ya que su evolución a lo largo de la lactación es la evolución esperable de una cabeza de ganado promedio con el recuento celular indicado.

Una vez se han construido las lactaciones DEL5 patrón para cada uno de los valores de recuento celular, la mera comparación entre ellas mostrará la variación que se produce en la producción a causa de la variación del SCC, ya que una lactación DEL5 patrón es un par de cualquiera de las otras lactaciones DEL5 patrón en las que solo se modifica la propiedad del recuento celular.

Esta estructura aportada de la lactación DEL5 patrón tiene potencial suficiente para ser considerada una referencia de comparación para otras características de la producción lechera, con la única salvedad de que hay que disponer del suficiente número de datos para su construcción y que sea lo suficientemente significativa.

Las últimas conclusiones hacen referencia al análisis realizado sobre las lactaciones extendidas en las explotaciones ganaderas asturianas; se ha observado que más del 60% de las cabezas de ganado han tenido una lactación superior a los 305 días en leche que configura la lactación de duración más estandarizada y que sobre un 20% han sobrepasado esa duración por más de 90 días. Con el trabajo realizado se puede concluir que uno de los principales factores para la existencia de estas lactaciones largas es la propia voluntad del ganadero ya que el perfil de producción encontrado a las vacas de lactación extendida es un perfil de alta producción, siempre por encima de la media. Otro factor que no se debe descartar para la existencia de las lactaciones largas es la posible pérdida del celo reproductivo de las vacas ya que se considera que las vacas de alta producción tienen un éxito reproductivo menor que las vacas con nivel de producción más bajo..

Para modelar las lactaciones largas, se incluyó un nuevo tramo de la curva de producción, el tramo de los 305 a los 610 días en leche ya que ni el modelo de Wood ni el modelo desarrollado en este trabajo para el segmento 0-305 días en leche satisfacían en ninguna media los resultados reales. Este nuevo tramo tiene una pendiente sensiblemente menor que la anterior sección y se ajusta razonablemente bien a los datos reales.

Con los modelos creados se ha analizado la posibilidad de que un animal tenga una lactación del doble de la duración habitual, mediante el análisis de la producción. Con los modelos generados y analizando los resultados calculados se ha obtenido que la lactación extendida es siempre menos rentable, desde el punto de vista de la producción lechera, que la secuencia estándar de lactación + secado + parto + lactación.

Por otro lado, el modelo de lactaciones largas ha permitido realizar una valoración económica, desde el punto de vista de la producción de leche, de la situación en la que la lactación se alarga, no por el deseo expreso del ganadero, si no por el hecho de que se ha producido un fallo en los intentos de fecundar a la vaca y se ha perdido un celo, bien porque la fecundación no ha tenido éxito, bien porque el celo no se ha manifestado de forma conspicua y no ha sido



posible su detección. En este caso, el estudio se ha enfrentado a la dificultad de establecer el punto de referencia sobre el que realizar la comparativa para conocer la extensión de las posibles pérdidas. Para establecer la referencia se ha utilizado la producción en el día 305 de la lactación, último día de producción de una lactación considerada estándar. Tomando como referencia ese valor y utilizando los modelos calculados se ha llegado a la conclusión de que en el peor de los casos, la pérdida de producción producida por la pérdida de tres celos reproductivos de una vaca, se puede estimar en 68 kg de leche y, en el mejor de los casos que ocurriría en la lactación número 2, la pérdida de producción sería inferior a 35 kg de leche. Teniendo en cuenta que la pérdida de 3 celos equivale a unos 63 días en leche de promedio, la pérdida de un celo se puede cuantificar en menos de un kg de leche en el peor de los casos y de medio kg en el mejor de ellos. Se puede concluir, por lo tanto, que la pérdida de un celo es un problema económicamente menor, si se consideran las pérdidas de producción asociadas.

## **Bibliografía**

# Bibliografía

- (DHIA), M. D. H. I. A. (2011). Interpretation and Use of Laboratory Culture Results and the Characteristics of Various Mastitis Pathogens. 10. Retrieved from <http://www.ansci.umn.edu/prod/groups/cfans/@pub/@cfans/@ansci/documents/asset/ansci-dairydiag-fact-7.pdf>
- A monograph on bovine mastitis.* (1971). International Dairy Federation.
- Ali, A. K. A., & Shook, G. E. (1978). OPTIMUM TRANSFORMATION FOR SOMATIC-CELL CONCENTRATION (SCC) IN MILK. [Meeting Abstract]. *Journal of Dairy Science*, 61, 78-79.
- Ali, T. E., & Schaeffer, L. R. (1987). ACCOUNTING FOR COVARIANCES AMONG TEST DAY MILK YIELDS IN DAIRY-COWS. [Article]. *Canadian Journal of Animal Science*, 67(3), 637-644.
- Apparao, D., Oliveira, L., & Ruegg, P. L. (2009). Relationship between results of in vitro susceptibility tests and outcomes following treatment with pirlimycin hydrochloride in cows with subclinical mastitis associated with gram-positive pathogens. *Javma-Journal of the American Veterinary Medical Association*, 234(11), 1437-1446.
- Bade, R. D., Reinemann, D. J., Zucali, M., Ruegg, P. L., & Thompson, P. D. (2009). Interactions of vacuum, b-phase duration, and liner compression on milk flow rates in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92(3), 913-921.
- Barkema, H. W., Deluyker, H. A., Schukken, Y. H., & Lam, T. (1999). Quarter-milk somatic cell count at calving and at the first six milkings after calving. *Preventive Veterinary Medicine*, 38(1), 1-9.
- Barkema, H. W., Schukken, Y. H., Lam, T., Beiboer, M. L., Benedictus, G., & Brand, A. (1998). Management practices associated with low, medium, and high somatic cell counts in bulk milk. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 81(7), 1917-1927.
- Barkema, H. W., Schukken, Y. H., Lam, T., Beiboer, M. L., Wilmink, H., Benedictus, G., et al. (1998). Incidence of clinical mastitis in dairy herds grouped in three categories by bulk milk somatic cell counts. *Journal of Dairy Science*, 81(2), 411-419.
- Baro, J. A., Roldan, P., Carleos, C. E., Grillo, G. J., & Perez, M. A. (2005). Video microscopy as an alternative method for somatic cell count in milk. *Journal of Dairy Research*, 72(1), 93-100.
- Bartlett, P. C., Miller, G. Y., Anderson, C. R., & Kirk, J. H. (1990). MILK-PRODUCTION AND SOMATIC-CELL COUNT IN MICHIGAN DAIRY HERDS. *Journal of Dairy Science*, 73(10), 2794-2800.

- Bartlett, P. C., Van Wijk, J., Wilson, D. J., Green, C. D., Miller, G. Y., Majewsky, G. A., et al. (1991). Temporal patterns of lost milk production following clinical mastitis in a large Michigan Holstein herd. *Journal of Dairy Science*, 74, 1561-1572.
- Bayer, & Ceballos, A. La "fiebre" de leche no es fiebre. *Bayer HealthCare* Retrieved 10-7-2014, 2014, from <http://www.sanidadanimal.bayerandina.com/documentos/LaFiebredeLechenoesFiebre.pdf>
- Biosure. (2014). Propidium Iodide Staining Solution. Retrieved 12-6-2014, 2014, from <http://www.biosure.com/rpages/propidiumB.html>
- Blosser, T. H. (1979). Economic losses from and the national research program on mastitis in the United States. *Journal Dairy Science*, 62, 119-127.
- Boonyayatra, S., Fox, L. K., Gay, J. M., Sawant, A., & Besser, T. E. (2012). Discrimination between *Mycoplasma* and *Acholeplasma* species of bovine origin using digitonin disc diffusion assay, nisin disc diffusion assay, and conventional polymerase chain reaction. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 24(1), 7-13.
- Box, G. E. P., & Tidwell, P. W. (1962). TRANSFORMATION OF INDEPENDENT VARIABLES. [Article]. *Technometrics*, 4(4), 531-&.
- Braem, G., De Vliegher, S., Verbist, B., Heyndrickx, M., Leroy, F., & De Vuyst, L. (2012). Culture-independent exploration of the teat apex microbiota of dairy cows reveals a wide bacterial species diversity. *Veterinary Microbiology*, 157(3-4), 383-390.
- Braem, G., De Vliegher, S., Verbist, B., Piessens, V., Van Coillie, E., De Vuyst, L., et al. (2013). Unraveling the microbiota of teat apices of clinically healthy lactating dairy cows, with special emphasis on coagulase-negative staphylococci. *Journal of Dairy Science*, 96(3), 1499-1510.
- Bramley, A. J., & Dodd, F. H. (1984). Review of the progress of dairy science: mastitis control-progress and prospects. *Journal of Dairy Research*, 51, 481-512.
- Britten, A., Britten, J., Hanson, N., Andre, D., & Cerar, J. (2009). *The Detection of Acholeplasma sp. in Individual Cow Milk Samples as "false positive" growth in Mycoplasma Culture.* <div data-angle="0" data-canvas-width="49.66181755065918" data-font-name="Times" dir="ltr" style="font-size: 19.9987px; font-family: serif; left: 553.267px; top: 230.751px; transform: rotate(0deg) scale(0.992905, 1); transform-origin: 0% 0% 0px;">Bellingham, WA, USA.
- Brody, S., Turner, C. W., & Ragsdale, A. C. (1924). The relation between the initial rise and the subsequent decline of milk secretion following parturition. *Journal of General Physiology*, 6(5), 541-545.

- Brotherstone, S., White, I. M. S., & Meyer, K. (2000). Genetic modelling of daily milk yield using orthogonal polynomials and parametric curves. *Animal Science*, 70, 407-415.
- Brown, T. A. (2002). Genomes. 2nd edition. In O. Wiley-Liss (Eds.) Available from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK21114/figure/A8389/>
- Buddle, B. M., Tagg, J. R., & Ralston, M. J. (1988). USE OF AN INHIBITOR TYPING SCHEME TO STUDY THE EPIDEMIOLOGY OF STREPTOCOCCUS-UBERIS MASTITIS. *New Zealand Veterinary Journal*, 36(3), 115-119.
- Buelow, K., & Nordlund, K. (1999). *Factors affecting sensitivity and specificity of microbiological culture for Staphylococcus aureus*. Paper presented at the 38th Annual Meeting National Mastitis Council, Arlington, Virginia.
- Buswell, J. (1995). Simple Mastitis Bacteriology for the Practice. *Veterinary Record*, Oct.(supplement *In Practice*), 426-432.
- Cankaya, S., Unalan, A., & Soydan, E. (2011). Selection of a mathematical model to describe the lactation curves of Jersey cattle. *Archiv Tierzucht*, 1, 27-35.
- Capuco, A. V., Mein, G. A., Nickerson, S. C., Jack, L. J. W., Wood, D. L., Bright, S. A., et al. (1994). INFLUENCE OF PULSATIONLESS MILKING ON TEAT CANAL KERATIN AND MASTITIS. *Journal of Dairy Science*, 77(1), 64-74.
- Capítulo 4. Enfermedades de los bovinos - Mastitis bovina. *Enciclopedia Bovina*, 2014, from [http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e\\_bovina/04MastitisBovina.pdf](http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e_bovina/04MastitisBovina.pdf)
- Chalupa, W., Galligan, D. T., & Cornell, U. (1990). METABOLIC MODIFIERS AND THE NUTRITIONAL-REQUIREMENTS OF LACTATING DAIRY-CATTLE. *Proceedings 1990 : Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers*, 10-17.
- Chilliard, Y., Ferlay, A., & Doreau, M. (2001). Effect of different types of forages, animal fat or marine oils in cow's diet on milk fat secretion and composition, especially conjugated linoleic acid (CLA) and polyunsaturated fatty acids. *Livestock Production Science*, 70(1-2), 31-48.
- Congleton, W. R., & Everett, R. W. (1980). ERROR AND BIAS IN USING THE INCOMPLETE GAMMA-FUNCTION TO DESCRIBE LACTATION CURVES. *Journal of Dairy Science*, 63(1), 101-108.
- Cornell. (2014). *Diagnosis of mastitis and diagnostic methods fpr investigating Udder Health problems*. Veterinary College: Cornell University.

DairyCo. Mastitis in dairy cows. *Technical information* Retrieved 4-7-2014, 2014, from <http://www.dairyco.org.uk/technical-information/animal-health-welfare/mastitis/#.U7biYLFir2o>

Davis, M. A., Reinemann, D. J., & Mein, G. A. (2000). *Effect of liner age on milking characteristics*. Paper presented at the 39th Annual Meeting of the National Mastitis Council

Retrieved from  
[http://128.104.248.62/uwmril/pdf/MilkMachine/Liners/00\\_NMC\\_Liner\\_Abstract.pdf](http://128.104.248.62/uwmril/pdf/MilkMachine/Liners/00_NMC_Liner_Abstract.pdf)

De Vliegher, S., Laevens, H., Devriese, L. A., Opsomer, G., Leroy, J. L. M., Barkema, H. W., et al. (2003). Parturition teat apex colonization with *Staphylococcus chromogenes* in dairy heifers is associated with low somatic cell count in early lactation. *Veterinary Microbiology*, 92(3), 245-252.

deGraaf, T., & Dwinger, R. H. (1996). Estimation of milk production losses due to sub-clinical mastitis in dairy cattle in Costa Rica. [Article]. *Preventive Veterinary Medicine*, 26(3-4), 215-222.

Deluyker, H. A., Gay, J. M., & Weave, L. D. (1993). Interrelationships of Somatic Cell Count, Mastitis, and Milk Yield in a Low Somatic Cell Count Herd. *Journal of Dairy Science*, 76(11), 3445 - 3452.

Dematawewa, C. M. B., Pearson, R. E., & VanRaden, P. M. (2007). Modeling extended lactations of Holsteins. *Journal of Dairy Science*, 90(8), 3924-3936.

Dentine, M. H., & McDaniel, B. T. (1983). Evidence for non-linearity in the relationship between milk and fat yields and the logarithm of the geometric mean of somatic cell counts. *Journal of Dairy Science*, 66(suppl. 1).

Dijkstra, J., France, J., Dhanoa, M. S., Maas, J. A., Hanigan, M. D., Rook, A. J., et al. (1997). A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of Dairy Science*, 80(10), 2340-2354.

Dijkstra, J., Lopez, S., Bannink, A., Dhanoa, M. S., Kebreab, E., Odongo, N. E., et al. (2010). Evaluation of a mechanistic lactation model using cow, goat and sheep data. [Article]. *Journal of Agricultural Science*, 148, 249-262.

Dinsmore, R. P., English, P. B., Gonzalez, R. N., Sears, P. M., & Schulte, H. F. (1991). EVALUATION OF METHODS FOR THE DIAGNOSIS OF STREPTOCOCCUS-AGALACTIAE INTRAMAMMARY INFECTIONS IN DAIRY-CATTLE. *Journal of Dairy Science*, 74(5), 1521-1526.

Dobbins, C. N. (1977). MASTITIS LOSSES. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 170(10), 1129-1132.

- Dohoo, I. (2001). *Setting SCC cutpoints for cow and herd interpretation*. Paper presented at the National Mastitis Council; 40th Annual meeting, Reno, NV.
- Dohoo, I. R., & Leslie, K. E. (1991). EVALUATION OF CHANGES IN SOMATIC-CELL COUNTS AS INDICATORS OF NEW INTRAMAMMARY INFECTIONS. *Preventive Veterinary Medicine, 10*(3), 225-237.
- Dohoo, I. R., Meek, A. H., & Martin, S. W. (1984). SOMATIC-CELL COUNTS IN BOVINE-MILK - RELATIONSHIPS TO PRODUCTION AND CLINICAL EPISODES OF MASTITIS. [Article]. *Canadian Journal of Comparative Medicine- Revue Canadienne De Medecine Comparee, 48*(2), 130-135.
- Dohoo, I. R., & Meek, A. H. (1982). Somatic cell counts in bovine milk. *Can Vet J, 23*, 119-125.
- Druet, T., Jaffrezic, F., Boichard, D., & Ducrocq, V. (2003). Modeling lactation curves and estimation of genetic parameters for first lactation test-day records of French Holstein cows. *Journal of Dairy Science, 86*(7), 2480-2490.
- Economics of mastitis and mastitis contro. (1993). *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract., 9*, 21-34.
- Edwards, J. P., O'Brien, B., Lopez-Villalobos, N., & Jago, J. G. (2013). Overmilking causes deterioration in teat-end condition of dairy cows in late lactation. *Journal of Dairy Research, 80*(3), 344-348.
- Erskine, R. J., Eberhart, R. J., Hutchinson, L. J., Spencer, S. B., & Campbell, M. A. (1988). INCIDENCE AND TYPES OF CLINICAL MASTITIS IN DAIRY HERDS WITH HIGH AND LOW SOMATIC-CELL COUNTS. [Article]. *Journal of the American Veterinary Medical Association, 192*(6), 761-765.
- Forsback, L., Lindmark-Mansson, H., Andren, A., Akerstedt, M., Andree, L., & Svennersten-Sjaunja, K. (2010). Day-to-day variation in milk yield and milk composition at the udder-quarter level. *Journal of Dairy Science, 93*(8), 3569-3577.
- Foulley, J. L., Gianola, D., Cristobal, M. S., & Im, S. (1990). A METHOD FOR ASSESSING EXTENT AND SOURCES OF HETEROGENEITY OF RESIDUAL VARIANCES IN MIXED LINEAR-MODELS. [Article]. *Journal of Dairy Science, 73*(6), 1612-1624.
- Fry, P. R., Middleton, J. R., Dufour, S., Perry, J., Scholl, D., & Dohoo, I. (2014). Association of coagulase-negative staphylococcal species, mammary quarter milk somatic cell count, and persistence of intramammary infection in dairy cattle. *Journal of Dairy Science, 97*(8), 4876-4885.

- Giannechini, R., Concha, C., Rivero, R., Delucci, I., & Lopez, J. M. (2002). Occurrence of clinical and sub-clinical mastitis in dairy herds in the West Littoral Region in Uruguay. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 43(4), 221-230.
- Gill, R., Howard, W. H., Leslie, K. E., & Lissemore, K. (1990). ECONOMICS OF MASTITIS CONTROL. *Journal of Dairy Science*, 73(11), 3340-3348.
- Gleeson, D. E., & O'Callaghan, E. J. (1998). A note on the effect of ageing on teatcup liner performance. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 37(1), 93-95.
- Golebiewski, M., Brzozowski, P., & Golebiewski, L. (2011). Analysis of lactation curves, milk constituents, somatic cell count and urea in milk of cows by the mathematical model of Wood. *Acta Veterinaria Brno*, 80(1), 73-80.
- Graber, H. U., Naskova, J., Studer, E., Kaufmann, T., Kirchhofer, M., Brechbuehl, M., et al. (2009). Mastitis-related subtypes of bovine *Staphylococcus aureus* are characterized by different clinical properties. *Journal of Dairy Science*, 92(4), 1442-1451.
- Green, L. E., Hedges, V. J., Schukken, Y. H., Blowey, R. W., & Packington, A. J. (2002). The impact of clinical lameness on the milk yield of dairy cows. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 85(9), 2250-2256.
- Grillo, G. J., Anton, J. C., Ferrero, F., Perez, M. A., & Ieee, I. (2001, 2001 May 21-23). *Low-cost video-microscopy system for evaluation of fresh cow milk somatic cell concentration*. Paper presented at the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/2001), Budapest, Hungary.
- Grindal, R. J., & Hillerton, J. E. (1991). INFLUENCE OF MILK FLOW-RATE ON NEW INTRAMAMMARY INFECTION IN DAIRY-COWS. *Journal of Dairy Research*, 58(3), 263-268.
- Grossman, M., & Koops, W. J. (1988). MULTIPHASIC ANALYSIS OF LACTATION CURVES IN DAIRY-CATTLE. *Journal of Dairy Science*, 71(6), 1598-1608.
- Hagnestam-Nielsen, C., Emanuelson, U., Berglund, B., & Strandberg, E. (2009). Relationship between somatic cell count and milk yield in different stages of lactation. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 92(7), 3124-3133.
- Halasa, T., Huijps, K., Osteras, O., & Hogeveen, H. (2007). Economic effects of bovine mastitis and mastitis management: A review. *Veterinary Quarterly*, 29, 18-31.



- Halasa, T., Nielen, M., De Roos, A. P. W., Van Hoorne, R., de Jong, G., Lam, T., et al. (2009a). Production loss due to new subclinical mastitis in Dutch dairy cows estimated with a test-day model. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 92(2), 599-606.
- Halasa, T., Nielen, M., De Roos, A. P. W., Van Hoorne, R., de Jong, G., Lam, T., et al. (2009b). Production loss due to new subclinical mastitis in Dutch dairy cows estimated with a test-day model (vol 92, pg 599, 2009). [Correction]. *Journal of Dairy Science*, 92(3), 1315-1315.
- Hamann, J., & Mein, G. A. (1988). RESPONSES OF THE BOVINE TEAT TO MACHINE MILKING - MEASUREMENT OF CHANGES IN THICKNESS OF THE TEAT APEX. *Journal of Dairy Research*, 55(3), 331-338.
- Hamann, J., Mein, G. A., & Wetzel, S. (1993). TEAT TISSUE-REACTIONS TO MILKING - EFFECTS OF VACUUM LEVEL. *Journal of Dairy Science*, 76(4), 1040-1046.
- Hamann, J., Nipp, B., & Mein, G. A. (1988). IMPROVING MILK QUALITY BY IMPROVING TEAT CONDITION - A NEW METHOD FOR MEASURING TEAT TISSUE-REACTIONS TO MILKING. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 43(10), 651-653.
- Harmon, R. J. (1994). SYMPOSIUM - MASTITIS AND GENETIC EVALUATION FOR SOMATIC-CELL COUNT - PHYSIOLOGY OF MASTITIS AND FACTORS AFFECTING SOMATIC-CELL COUNTS. *Journal of Dairy Science*, 77(7), 2103-2112.
- Harmon, R. J. (2001). *Somatic cell counts: a primer*. Paper presented at the National Mastitis Council, 40th Annual Meeting, Reno, NV.
- Heinrichs, A. J., Jones, C. M., Gray, S. M., Heinrichs, P. A., Cornelisse, S. A., & Goodling, R. C. (2013). Identifying efficient dairy heifer producers using production costs and data envelopment analysis. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 96(11), 7355-7362.
- Hoblet, K. H., Bailey, J. S., & Pritchard, D. E. (1988). COAGULASE-POSITIVE STAPHYLOCOCCAL MASTITIS IN A HERD WITH LOW SOMATIC-CELL COUNTS. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 192(6), 777-780.
- Hoblet, K. H., Schnitkey, G. D., Arbaugh, D., Hogan, J. S., Smith, K. L., Schoenberger, P. S., et al. (1991). Costs associated with selected preventive practices and with episodes of clinical mastitis in nine herds with low somatic cell count. *Journal Am. Vet. Med. Ass.*, 199, 190-196.
- Hortet, P., Beaudeau, F., Seegers, H., & Fourichon, C. (1999). Reduction in milk yield associated with somatic cell counts up to 600 000 cells/ml in French Holstein cows without clinical mastitis. *Livestock Production Science*, 61(1), 33-42.

- Hortet, P., & Seegers, H. (1998a). Calculated milk production losses associated with elevated somatic cell counts in dairy cows: review and critical discussion. [Article]. *Veterinary Research*, 29(6), 497-510.
- Hortet, P., & Seegers, H. (1998b). Loss in milk yield and related composition changes resulting from clinical mastitis in dairy cows. *Preventive Veterinary Medicine*, 37, 1-20.
- Houben, E. H. P., Dijkhuizen, A. A., Van Arendonk, J. A. M., & Huirne, R. B. M. (1993). Short- and long-term production losses and repeatability of clinical mastitis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 76, 2561-2578.
- Huijps, K., Lam, T., & Hogeveen, H. (2008). Costs of mastitis: facts and perception. *Journal of Dairy Research*, 75(1), 113-120.
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299-314. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1390807>. doi:10.2307/1390807
- Ingvarstsen, K. L. (1994). MODELS OF VOLUNTARY FOOD-INTAKE IN CATTLE. [Article; Proceedings Paper]. *Livestock Production Science*, 39(1), 19-38.
- Janzen, J. J. (1970). Economic losses resulting from mastitis. A review. *Journal of Dairy Science*, 53, 1151-1161.
- Jones, G. M., & Bailey, T. L. J. (2009). Understanding the Basics of Mastitis. Retrieved from <http://pubs.ext.vt.edu/404/404-233/404-233.html>
- Jones, G. M., Pearson, R. E., Clabaugh, G. A., & Heald, C. W. (1984). RELATIONSHIPS BETWEEN SOMATIC-CELL COUNTS AND MILK-PRODUCTION. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 67(8), 1823-1831.
- Jones, T. (1997). Empirical Bayes prediction of 305-day milk production. *Journal of Dairy Science*, 80(6), 1060-1075.
- jperraud, & hmansell. (2010). RDoNet (Version 1.5.13). <https://rdo.net/codeplex.com/>.
- Kaliwal, B. B., Sadashiv, S. O., Kurjogi, M. M., & Sanakal, R. D. (2011). Prevalence and Antimicrobial Susceptibility of Coagulase-Negative Staphylococci isolated from Bovine Mastitis. *Vet World*, 4(4), 158-161.
- Kebreab, E., France, J., Beaver, D. E., & Castillo, A. R. (2001). Nitrogen pollution by dairy cows and its mitigation by dietary manipulation. [Article]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1-3), 275-285.

- Kelton, D. F., & Godkin, M. A. (2000). *Matitis Culture programs for Dairy Herds*. Paper presented at the Proceedings of the Annual Meeting of the National Mastitis Council, Atlanta, Georgia.
- Kirkpatrick, M., Lofsvold, D., & Bulmer, M. (1990). ANALYSIS OF THE INHERITANCE, SELECTION AND EVOLUTION OF GROWTH TRAJECTORIES. *Genetics*, 124(4), 979-993.
- Kossaibati, M. A., & Esslemont, R. J. (1997). The costs of production diseases in dairy herds in England. [Article]. *Veterinary Journal*, 154(1), 41-51.
- Kramer, E., Stamer, E., Spilke, J., Thaller, G., & Krieter, J. (2009). Analysis of water intake and dry matter intake using different lactation curve models. *Journal of Dairy Science*, 92(8), 4072-4081.
- Krizsan, S. J., Sairanen, A., Hojer, A., & Huhtanen, P. (2014). Evaluation of different feed intake models for dairy cows. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 97(4), 2387-2397.
- Laevens, H., Deluyker, H., Schukken, Y. H., De Meulemeester, L., Vandermeersch, R., De Muelenaere, E., et al. (1997). Influence of parity and stage of lactation on the somatic cell count in bacteriologically negative dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 80(12), 3219-3226.
- Landete-Castillejos, T., & Gallego, L. (2000). Technical note: The ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. [Article]. *Journal of Animal Science*, 78(12), 3010-3013.
- Lescourret, F., & Coulon, J. B. (1994a). Modeling the Impact of Mastitis on Milk Production by Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 77(8), 2289 - 2301.
- Lescourret, F., & Coulon, J. B. (1994b). MODELING THE IMPACT OF MASTITIS ON MILK-PRODUCTION BY DAIRY-COWS. *Journal of Dairy Science*, 77(8), 2289-2301.
- Lucey, S., & Rowlands, G. J. (1984). The association between clinical mastitis and milk yield in dairy cows. *Anim. Prod.*, 39, 165-175.
- Lucey, S., Rowlands, G. J., & Russell, A. M. (1986). SHORT-TERM ASSOCIATIONS BETWEEN DISEASE AND MILK-YIELD OF DAIRY-COWS. *Journal of Dairy Research*, 53(1), 7-15.
- Luquet, F., Calavas, D., & Bugnard, F. (1992). Incidences de mammites cliniques sur les courbes de lactation des vaches laitières. *Epidémiol. Santé Anim.*, 22, 121-127.

- Macciotta, N. P. P., Dimauro, C., Rassa, S. P. G., Steri, R., & Pulina, G. (2011). The mathematical description of lactation curves in dairy cattle. *Italian Journal of Animal Science*, 10(4).
- Macciotta, N. P. P., Vicario, D., & Capplo-Borlino, A. (2005). Detection of different shapes of lactation curve for milk yield in dairy cattle by empirical mathematical models. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 88(3), 1178-1191.
- Macmillan, K. L., Duirs, G. F., & Duganzich, D. M. (1983). ASSOCIATIONS BETWEEN DRY COW THERAPY, CLINICAL MASTITIS, AND SOMATIC-CELL COUNT SCORE WITH MILK AND FAT PRODUCTION IN 10 NEW-ZEALAND DAIRY HERDS. *Journal of Dairy Science*, 66(2), 259-265.
- Makovec, J. A., & Ruegg, P. L. (2003). Results of milk samples submitted for microbiological examination in Wisconsin from 1994 to 2001. *Journal of Dairy Science*, 86(11), 3466-3472.
- Manafiazar, G., McFadden, T., Goonewardene, L., Okine, E., Basarab, J., Li, P., et al. (2013). Prediction of residual feed intake for first-lactation dairy cows using orthogonal polynomial random regression. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 96(12), 7991-8001.
- McDermott, M. P., Erb, H. N., & Natzke, R. P. (1982). PREDICTABILITY BY SOMATIC-CELL COUNTS RELATED TO PREVALENCE OF INTRA-MAMMARY INFECTION WITHIN HERDS. *Journal of Dairy Science*, 65(8), 1535-1539.
- Mein, G. A. (2012). The Role of the Milking Machine in Mastitis Control. [Article]. *Veterinary Clinics of North America-Food Animal Practice*, 28(2), 307-+.
- Miller, G. Y., Bartlett, P. C., Lance, S. E., Anderson, J., & Heider, L. E. (1993). Costs of clinical mastitis and mastitis prevention in dairy herds. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 202, 1230.
- Miller, R. H., Pearson, R. E., Weinland, B. T., & Fulton, L. A. (1976). GENETIC PARAMETERS OF SEVERAL MEASURES OF MILK FLOW-RATE AND MILKING TIME. *Journal of Dairy Science*, 59(5), 957-964.
- Mungube, E. O., Tenhagen, B. A., Regassa, F., Kyule, M. N., Shiferaw, Y., Kassa, T., et al. (2005). Reduced milk production in udder quarters with subclinical mastitis and associated economic losses in crossbred dairy cows in Ethiopia. *Tropical Animal Health and Production*, 37(6), 503-512.
- Myllys, V., & Rautala, H. (1995). CHARACTERIZATION OF CLINICAL MASTITIS IN PRIMIPAROUS HEIFERS. *Journal of Dairy Science*, 78(3), 538-545.

- Nasri, M. H. F., France, J., Odongo, N. E., Lopez, S., Bannink, A., & Kebreab, E. (2008). Modelling the lactation curve of dairy cows using the differentials of growth functions. [Article]. *Journal of Agricultural Science*, 146, 633-641.
- Ng-Kwai-Hang, K. F., Hayes, J. F., Moxley, S. E., & Monardes, H. G. (1984). Variability of test-day milk production and composition and relation of somatic cell counts with yield and composition changes of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 67, 361-366.
- NMC. (1999). *Laboratory handbook on bovine mastitis*: National Mastitis Council.
- Nousiainen, J., Shingfield, K. J., & Huhtanen, P. (2004). Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic of protein feeding. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 87(2), 386-398.
- Oba, M., & Allen, M. S. (1999). Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: Effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 82(3), 589-596.
- Olori, V. E., Brotherstone, S., Hill, W. G., & McGuirk, B. J. (1999). Fit of standard models of the lactation curve to weekly records of milk production of cows in a single herd. *Livestock Production Science*, 58(1), 55-63.
- Ortega, R., Perez, M. A., Muniz, R., & Fernandez, R. (2008). Milking machine tuning to improve udder health and to reduce teat end hyperkeratosis in dairy cows. *Mastitis Control: from Science to Practice*, 333-340.
- Ott, S. L. (1999). *Costs of herd-level production losses associated with subclinical mastitis in U.S. dairy cows*. Paper presented at the National Mastitis Council 38th Annual Meeting.
- Palmquist, D. L., Beaulieu, A. D., & Barbano, D. M. (1993). FEED AND ANIMAL FACTORS INFLUENCING MILK-FAT COMPOSITION. *Journal of Dairy Science*, 76(6), 1753-1771.
- Pedraza, C. G. (1991). Efecto de la mastitis clínica sobre la producción de leche. *Agricultura Técnica*, 4, 298-305.
- Peeler, E. J., Green, M. J., Fitzpatrick, J. L., Morgan, K. L., & Green, L. E. (2000). Risk factors associated with clinical mastitis in low somatic cell count British dairy herds. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 83(11), 2464-2472.
- Perez, M. A., Ortega, R., Muniz, R., & Coya, M. B. (2008). A new method for mastitis diagnosis based on hysteresis threshold of somatic cell count. *Mastitis Control: from Science to Practice*, 235-242.

- Perz, W. P., Sobek, Z., & Fl'ak, P. (2008). Usefulness of regression models for 100-day milk yield estimation in dairy cows. *Slovak J. Anim. Sci.*, *41*, 126-132.
- Philpot, W. N. (1967). Influence of subclinical mastitis on milk production and milk composition. *Journal of Dairy Science*, *50*, 978.
- Pollott, G. E. (2000). A biological approach to lactation curve analysis for milk yield. *Journal of Dairy Science*, *83*(11), 2448-2458.
- Pyorala, S., & Taponen, S. (2009). Coagulase-negative staphylococci-Emerging mastitis pathogens. *Veterinary Microbiology*, *134*(1-2), 3-8.
- Quinn, P., Markey, B., Carter, M., & Carter, G. R. (2004). *Clinical Veterinary Microbiology*: Ed Mosby.
- R., F., Baro, J. A., Pérez, M. A., & Ortega, R. (2006). Luces y sombras del RCS en el diagnóstico de mastitis. *Albéitar. Revista veterinaria independiente*, *101*, 8-12.
- Rajala-Schultz, P. J., Grohn, Y. T., & McCulloch, C. E. (1999). Effects of milk fever, ketosis, and lameness on milk yield in dairy cows. [Article]. *Journal of Dairy Science*, *82*(2), 288-294.
- Rasmussen, M. D. (2004). *Overmilking an teat condition*. Paper presented at the National Mastitis Council Annual Meeting Proceedings. Retrieved from <http://nmconline.org/articles/over.pdf>
- Raubertas, R. F., & Shook, G. E. (1982). RELATIONSHIP BETWEEN LACTATION MEASURES OF SOMATIC-CELL CONCENTRATION AND MILK-YIELD. *Journal of Dairy Science*, *65*(3), 419-425.
- Real Decreto 1679/1994 de 22 julio por el que se establece las condiciones sanitarias aplicables a la producción y comercialización de leche cruda, leche tratada térmicamente y productos lácteos, 229 C.F.R. (1994).
- Reinemann, D. J., Bade, R., Zucali, M., Spanu, C., & Ruegg, P. L. (2008). Understanding the influence of machine milking on teat defense mechanisms. *Mastitis Control: from Science to Practice*, 323-331.
- Reinemann, D. J., Rasmussen, M. D., & Mein, G. A. (2001). Instrument requirements and methods for measuring vacuum in milking machines. [Article]. *Transactions of the Asae*, *44*(4), 975-981.

- Robert-Granie, C., Foulley, J. L., Maza, E., & Rupp, R. (2004). Statistical analysis of somatic cell scores via mixed model methodology for longitudinal data. [Article]. *Animal Research*, 53(4), 259-273.
- Rodriguez-Zas, S. L., Gianola, D., & Shook, G. E. (2000a). An approximate Bayesian analysis of somatic cell score curves in Holsteins. [Article]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a-Animal Science*, 50(4), 291-299.
- Rodriguez-Zas, S. L., Gianola, D., & Shook, G. E. (2000b). Evaluation of models for somatic cell score lactation patterns in Holsteins. [Article]. *Livestock Production Science*, 67(1-2), 19-30.
- Ruegg, P. Premiums, Production and Pails of Discarded Milk. How Much Money Does Mastitis Cost You? Retrieved from <http://milkquality.wisc.edu/wp-content/uploads/2011/09/how-much-money-does-mastitis-cost.pdf>
- Ruegg, P. L., & Reinemann, D. J. (2002). Milk quality and mastitis tests. [Proceedings Paper]. *Bovine Practitioner*, Vol 36, No 1, 36(1), 41-54.
- Saeman, A. (1983). *The New DHIA Linear Score for Somatic Cell Count*. Paper presented at the NMC annual meeting.
- Schaeffer, L. R. (2004). Application of random regression models in animal breeding. *Livestock Production Science*, 86(1-3), 35-45.
- Schaeffer, L. R., Jamrozik, J., Kistemaker, G. J., & Van Doormaal, B. J. (2000). Experience with a test-day model. *Journal of Dairy Science*, 83(5), 1135-1144.
- Schakenraad, M. H. W., & Dijkhuizen, A. A. (1990). Economic losses due to mastitis in Dutch dairy herds. *Neth. J. Agric. Sci.*, 38, 89-92.
- Schepers, A. J., Lam, T., Schukken, Y. H., Wilmink, J. B. M., & Hanekamp, W. J. A. (1997). Estimation of variance components for somatic cell counts to determine thresholds for uninfected quarters. *Journal of Dairy Science*, 80(8), 1833-1840.
- Schepers, J. A., & Dijkhuizen, A. A. (1991). The economics of mastitis and mastitis control in dairy cattle: a critical analysis of estimates published since 1970. *Prev. Vet. Med.*, 10, 213-224.
- Schroeder, J. W. (2012). *Bovine mastitis and milking management*. North Dakota State University: U.S. Department of Agriculture
- Noth Dakota State University.

- Schukken, Y. H., Smit, J. A. H., Grommers, F. J., Vandegeer, D., & Brand, A. (1989). EFFECT OF FREEZING ON BACTERIOLOGIC CULTURING OF MASTITIS MILK SAMPLES. *Journal of Dairy Science*, 72(7), 1900-1906.
- Scott, T. A., Yandell, B., Zepeda, L., Shaver, R. D., & Smith, T. R. (1996). Genetics, breeding, and modeling. Use of lactation curves for analysis of milk production data. *Journal of Dairy Science*, 79, 1885-1894.
- Sears, P. M., Smith, B. S., English, P. B., Herer, P. S., & Gonzalez, R. N. (1990). SHEDDING PATTERN OF STAPHYLOCOCCUS-AUREUS FROM BOVINE INTRAMAMMARY INFECTIONS. *Journal of Dairy Science*, 73(10), 2785-2789.
- Sears, P. M., Wilson, D. J., Gonzalez, R. N., & Hancock, D. D. (1991). MICROBIOLOGICAL RESULTS FROM MILK SAMPLES OBTAINED PREMILKING AND POSTMILKING FOR THE DIAGNOSIS OF BOVINE INTRAMAMMARY INFECTIONS. *Journal of Dairy Science*, 74(12), 4183-4188.
- Seegers, H., Fourichon, C., & Beaudeau, F. (2003). Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. *Veterinary Research*, 34, 475-491.
- Sharif, A., & Muhammad, G. (2008). SOMATIC CELL COUNT AS AN INDICATOR OF UDDER HEALTH STATUS UNDER MODERN DAIRY PRODUCTION: A REVIEW. *Pakistan Veterinary Journal*, 28(4), 194-200.
- Sherchand, L., McNew, R. W., Kellogg, D. W., & Johnson, Z. B. (1995). Selection of a mathematical model to generate lactation curves using daily milk yields of Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 78(11), 2507-2513.
- Shook, G. (1982). *Approaches to summarizing somatic cell count which improve interpretability*. Paper presented at the Proc. Nat'l. Mastitis Council.
- Shook, G. (2014). <http://nmconline.org/>. Retrieved from <http://nmconline.org/articles/SCSReview.htm>
- Shook, G. E. (1993). Genetic improvement of mastitis through selection on somatic cell count. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, 9, 563-581.
- Silvestre, A. M., Martins, A. M., Santos, V. A., Ginja, M. M., & Colaco, J. A. (2009). Lactation curves for milk, fat and protein in dairy cows: A full approach. [Article]. *Livestock Science*, 122(2-3), 308-313.
- Silvestre, A. M., Petim-Batista, F., & Colaco, J. (2005). Genetic parameter estimates of Portuguese dairy cows for milk, fat, and protein using a spline test-day model. *Journal of Dairy Science*, 88(3), 1225-1230.



- Silvestre, A. M., Petim-Batista, F., & Colaco, J. (2006). The accuracy of seven mathematical functions in modeling dairy cattle lactation curves based on test-day records from varying sample schemes. *Journal of Dairy Science*, 89(5), 1813-1821.
- Spiegel, M. R. (1971). *Advanced mathematics for engineers and scientists*. New York: McGraw-Hill.
- Supre, K., Haesebrouck, F., Zadoks, R. N., Vaneechoutte, M., Piepers, S., & De Vliegher, S. (2011). Some coagulase-negative Staphylococcus species affect udder health more than others. *Journal of Dairy Science*, 94(5), 2329-2340.
- Tamminga, S. (1992). NUTRITION MANAGEMENT OF DAIRY-COWS AS A CONTRIBUTION TO POLLUTION-CONTROL. *Journal of Dairy Science*, 75(1), 345-357.
- Tancin, V., Ipema, B., Hogewerf, P., Koerkamp, P. G., Mihina, S., & Bruckmaier, R. M. (2002). Milk flow patterns at the end of milking at the whole udder or quarter levels: relationship to somatic cell counts. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 57(6), 306-309.
- Taponen, S., & Pyorala, S. (2009). Coagulase-negative staphylococci as cause of bovine mastitis-Not so different from Staphylococcus aureus? *Veterinary Microbiology*, 134(1-2), 29-36.
- ten Napel, J., de Haas, Y., de Jong, G., Lam, T. J. G. M., Ouweltjes, W., & Windig, J. J. (2009). Characterization of distributions of somatic cell counts. *Journal of Dairy Science*, 92(3), 1253-1264.
- Timms, L. L., & Schultz, L. H. (1987). DYNAMICS AND SIGNIFICANCE OF COAGULASE-NEGATIVE STAPHYLOCOCCAL INTRAMAMMARY INFECTIONS. *Journal of Dairy Science*, 70(12), 2648-2657.
- Vargas, B., Koops, W. J., Herrero, M., & van Arendonk, J. A. M. (2000). Modeling extended lactations of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 83(6), 1371-1380.
- Warnick, L. D., Janssen, D., Guard, C. L., & Grohn, Y. T. (2001). The effect of lameness on milk production in dairy cows. [Article]. *Journal of Dairy Science*, 84(9), 1988-1997.
- Watts, J. L. (1990). *Bovine Mastitis*. Paper presented at the *Diagnostic Procedures in Veterinary Bacteriology and Mycology* 5 edition, Londres.
- White, I. M. S., Thompson, R., & Brotherstone, S. (1999). Genetic and environmental smoothing of lactation curves with cubic splines. *Journal of Dairy Science*, 82(3), 632-638.

- Wiggans, G. R., & Shook, G. E. (1987). A LACTATION MEASURE OF SOMATIC-CELL COUNT. *Journal of Dairy Science*, 70(12), 2666-2672.
- Williams, D. M., & Mein, G. A. (1985). THE ROLE OF MACHINE MILKING IN THE INVASION OF MASTITIS ORGANISMS AND IMPLICATIONS FOR MAINTAINING LOW INFECTION-RATES. *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte*, 37(4), 415-425.
- Williams, D. M., Mein, G. A., & Brown, M. R. (1981). BIOLOGICAL RESPONSES OF THE BOVINE TEAT TO MILKING - INFORMATION FROM MEASUREMENTS OF MILK FLOW-RATE WITHIN SINGLE PULSATION CYCLES. *Journal of Dairy Research*, 48(1), 7-&.
- Wilmink, J. B. M. (1987). ADJUSTMENT OF TEST-DAY MILK, FAT AND PROTEIN YIELD FOR AGE, SEASON AND STAGE OF LACTATION. *Livestock Production Science*, 16(4), 335-348.
- Wood, P. D. P. (1967). ALGEBRAIC MODEL OF LACTATION CURVE IN CATTLE. *Nature*, 216(5111), 164-&.
- Wood, P. D. P., & Booth, J. M. (1983). Variations in milk cell counts during lactation of British Friesian cattle. *Anim. Prod.*, 36, 335-339.
- Woodward, W. D., Besser, T. E., Ward, A. C. S., & Corbeil, L. B. (1987). INVITRO GROWTH-INHIBITION OF MASTITIS PATHOGENS BY BOVINE TEAT SKIN NORMAL FLORA. *Canadian Journal of Veterinary Research-Revue Canadienne De Recherche Veterinaire*, 51(1), 27-31.
- Woodward, W. D., Ward, A. C. S., Fox, L. K., & Corbeil, L. B. (1988). TEAT SKIN NORMAL FLORA AND COLONIZATION WITH MASTITIS PATHOGEN INHIBITORS. *Veterinary Microbiology*, 17(4), 357-365.
- Youl, B. S., & Nicholls, T. J. (1987). THE RELATIONSHIP BETWEEN SOMATIC-CELL COUNTS AND LACTATION YIELD OF DAIRY-COWS. *Australian Journal of Dairy Technology*, 42(3-4), 68-70.