



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Uso de modelos matemáticos en el análisis de crecimiento y desempeño comercial de ponedoras marrón**

**Julio Cesar Pinzón López**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Departamento de Ciencias para la  
Producción Animal

Bogotá D.C, Colombia

2021

# **Uso de modelos matemáticos en el análisis de crecimiento y desempeño comercial de ponedoras marrón**

**Julio Cesar Pinzón López**

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Producción Animal**

Director:

PhD, Dr. Germán Afanador Téllez

Codirectora:

PhD, Dra. Liliana Lucía Betancourt López

Línea de Investigación:

Nutrición Animal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Departamento de Ciencias para la  
Producción Animal

Bogotá D.C, Colombia

2021

## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Julio Cesar Pinzón López

10/Febrero/2021

## **Agradecimientos**

Expreso mis sinceros agradecimientos:

A la profesora Liliana Lucía Betancourt López y al profesor Germán Afanador Téllez, cuyo apoyo, tiempo y conocimiento fueron cruciales para el desarrollo de esta tesis.

A mis padres y hermano, por el apoyo durante todo el tiempo de realización de la tesis.

A la empresa avícola que permitió utilizar sus datos en información para el presente trabajo.

A todas aquellas personas que de alguna manera me apoyaron en el desarrollo de la presente maestría.

## Resumen

El uso de modelos matemáticos permitió definir puntos críticos del crecimiento y la producción comercial de huevos marrón. El modelo Gompertz mostró parámetros caracterizados por su precisión y exactitud. La tasa de maduración fue de 0.02 %/día, la cual se relacionó inversamente con el peso corporal adulto. La tasa máxima de crecimiento (14.8-17.3 g/d) fue alcanzada entre 8 y 10 semanas de edad y el peso adulto a las 35 semanas de edad. El modelo matemático para producción fue el modelo logístico de Yang con una definición del punto de inflexión al 50% del pico de producción (parámetro  $d$  del modelo) a una edad de 21 días luego de comenzar la postura, el % de producción ave/día al pico (96.5%) a los 52 días de producción y la tasa de disminución de la producción hasta finalizar el ciclo de vida de 0.0005 huevos/ave/día. La tasa máxima de crecimiento se relacionó con una mayor producción al inicio de la postura, la edad al 50% de producción, el número de huevos por ave alojada y la masa de huevo acumulada (30 y 50 semanas de edad). El valor teta se asoció con la producción de masa de huevo acumulada y el número de huevos por ave alojada durante el ciclo de postura. Maximizar el peso corporal y las uniformidades de los lotes durante el crecimiento (3, 8, 9, 12 y 16 semanas) producen efectos sobre: la edad a la madurez sexual, la edad al 50% y al pico de producción, el pico de producción y el número de huevos por ave alojada (semanas 30, 50 y 80 de edad). La conversión alimenticia a la semana 8 se asoció con la masa de huevo acumulada por ave alojada (30 y 50 semanas de edad).

**Palabras clave:** crecimiento; desarrollo; producción de huevos; gallinas de postura; modelo matemático.

## Abstract

The use of mathematical models made it possible to define critical points for the growth and commercial production of brown egg layers. The Gompertz model showed parameters characterized by their precision and accuracy. The maturation rate was 0.02 %/day, which was inversely related to adult body weight. The maximum growth rate (14.8-17.3 g/d) was reached between 8 and 10 weeks of age and the adult body weight at 35 weeks of age. The mathematical model for production was the Yang logistic model with a definition of the inflection point at 50% of the production peak (parameter d of the model) at 21 days of the beginning of laying cycle, hen/day production (%) at peak (96.5%, 52 days of production) and the rate of decline until the end of the life cycle was 0.0005 eggs/hen/day. The maximum growth rate was related to a higher production at the beginning of the laying, the age at 50% of production, the number of hen housed eggs and the cumulative egg mass (30 and 50 weeks of age). The theta value was associated with the cumulative egg mass production and the number of hen housed eggs during the laying cycle. Maximizing body weight and flock uniformities during growth (3, 8, 9, 12 and 16 weeks) produced effects on: age at sexual maturity, age at both 50% and peak production, peak production (%) and the number of hen housed eggs (30, 50 and 80 weeks of age). Feed conversion at week 8 was associated with cumulative egg mass per hen housed (30 and 50 weeks of age).

**Key words: growth; development; egg production; laying hen; mathematical model.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XI</b>
<b>Introducción general.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Revisión de literatura: Integración funcional del crecimiento y la producción de huevos en ponedoras marrón.....</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción.....	4
1.2. Fundamentos del crecimiento y desarrollo de las aves.....	5
1.3. Características del crecimiento y madurez de las ponedoras.....	6
1.3.1. Periodos de crecimiento en una ponedora comercial.....	8
▪ 0 a 6 semanas de edad.....	8
▪ 6 a 12 semanas de edad.....	8
▪ 12 a 18 semanas de edad.....	9
▪ 19 semanas de edad en adelante.....	10
1.4. Descripción matemática del crecimiento en ponedoras.....	10
1.5. Análisis de las curvas de crecimiento y madurez fisiológica en el levante de ponedoras.....	12
1.5.1. Modelo Logístico.....	15
1.5.2. Modelo de Richards.....	15
1.5.3. Modelo de Gompertz.....	15
1.5.4. Modelo de Von Bertalanffy.....	16
1.5.5. Modelo de la función del valor extremo EVF.....	17
1.5.6. Modelo Morgan-Mercer-Flodin.....	17
1.5.7. Modelo generalizado de Michaelis-Menten.....	17
1.6. Escalamiento genético y madurez de las ponedoras.....	18
1.6.1. Crecimiento y desarrollo prenatal de la ponedora.....	20
1.6.2. El peso adulto como una medida del tamaño genético corporal.....	21
1.6.3. Variables de producción y escalamiento genético.....	22
1.7. Análisis de la curva de producción de huevos.....	24
1.7.1. Modelo de Adams-Bell.....	28
1.7.2. Modelo de Lokhorst.....	28

1.7.3.	Modelo Logístico.....	29
1.7.4.	Modelo de Mc Nally.....	29
1.7.5.	Modelo compartimental.....	29
1.7.6.	Modelo de Yang (compartimental modificado).....	30
1.8.	Métodos estadísticos para la construcción de modelos matemáticos.....	30
1.8.1.	Estadísticas ordinarias.....	30
1.8.2.	Análisis de correlación y regresión.....	31
	▪ Uso y pertinencia de correlaciones para medir una asociación.....	31
	▪ Ajuste n lineal a la curva de crecimiento.....	32
1.9.	Criterios para la selección de modelos matemáticos.....	34
1.9.1.	El cuadrado medio del error (MSE).....	35
1.9.2.	Sesgo medio (Mean Bias).....	35
1.9.3.	Estadístico de eficiencia del modelo (MEF).....	36
1.9.4.	Cuadrado medio del error de predicción (MSEP).....	36
1.9.5.	Coeficiente de determinación del modelo ( $R^2$ ).....	37
1.9.6.	Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ajustado).....	37
1.9.7.	Criterio de información de Akaike (AIC).....	38
1.9.8.	Criterio de información bayesiano (BIC).....	39
<b>2.</b>	<b>Uso de modelos matemáticos de crecimiento y producción de huevos en sistemas de producción comercial de ponedoras marrón.....</b>	<b>41</b>
2.1.	Resumen.....	41
2.2.	Introducción.....	41
2.3.	Materiales y métodos.....	42
2.3.1.	Comparación de las funciones de crecimiento y de producción de huevos en ponedoras marrón.....	43
	▪ Fuente de datos.....	43
	▪ Modelos no lineales.....	46
	▪ Ajuste y comparación de los modelos no lineales.....	48
2.3.2.	Parametrización del mejor modelo matemático de crecimiento y de producción de huevos.....	49
2.3.3.	Correlaciones y regresiones entre parámetros de la etapa de levante y producción de huevos.....	52
2.4.	Resultados y discusión.....	53
2.4.1.	Modelaje de crecimiento en ponedoras marrón.....	53
2.4.2.	Modelaje de la producción de huevos en ponedoras marrón.....	61
2.4.3.	Caracterización del crecimiento y desarrollo de ponedoras marrón....	70
2.4.4.	Caracterización de la producción de huevos de ponedoras marrón....	73
2.4.5.	Asociación entre parámetros de la etapa de levante y producción de ponedoras marrón.....	76
<b>3.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>92</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Diagramas de dispersión de parámetros de las ecuaciones de regresión lineal múltiple (supuesto de linealidad).....</b>	<b>95</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Estadísticas descriptivas de parámetros de crecimiento y producción de huevos de ponedoras marrón.....</b>	<b>98</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>100</b>

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Estándares de rendimiento genética Hy Line Brown.....	26
<b>Tabla 2-1:</b> Número de aves encasetadas por lote.....	43
<b>Tabla 2-2:</b> Modelos de crecimiento comúnmente usados en aves de corral.....	46
<b>Tabla 2-3:</b> Modelos de producción de huevos comúnmente usados en aves de corral....	47
<b>Tabla 2-4:</b> Parámetros de crecimiento y criterios de decisión en modelos matemáticos de crecimiento.....	54
<b>Tabla 2-5:</b> Parámetros de modelos de producción de huevos y criterios de decisión.....	63
<b>Tabla 2-6:</b> Parametrización del modelo de Gompertz en el crecimiento de ponedoras marrón a nivel comercial.....	71
<b>Tabla 2-7:</b> Características de los parámetros de crecimiento de ponedoras marrón.....	72
<b>Tabla 2-8:</b> Parametrización del modelo de Yang (compartimental modificado).....	73
<b>Tabla 2-9:</b> Características de los parámetros de producción de huevos (Modelo de Yang.....	75
<b>Tabla 2-10:</b> Correlaciones entre parámetros de la curva de crecimiento y producción de huevos 1.....	77
<b>Tabla 2-11:</b> Correlaciones entre parámetros de la curva de crecimiento y producción de huevos 2.....	77
<b>Tabla 2-12:</b> Correlación entre pesos corporales a semanas 8, 9, 10 y variables de producción de huevos.....	79
<b>Tabla 2-13:</b> Correlación entre pesos corporales a semanas 12, 16 y variables de producción de huevos.....	79

<b>Tabla 2-14:</b> Correlación entre la uniformidad a semana 9 y variables de producción de huevos.....	80
<b>Tabla 2-15:</b> Correlación entre la uniformidad a semanas 12, 16 y variables de producción de huevos.....	80
<b>Tabla 2-16:</b> Correlación entre la conversión alimenticia a semana 8, uniformidad a semana 9 y variables de producción de huevos.....	81
<b>Tabla 2-17:</b> Correlaciones entre la uniformidad a semana 3 y variables de crecimiento..	82
<b>Tabla 2-18:</b> Correlaciones entre la masa de huevo acumulada y variables de crecimiento.....	83
<b>Tabla 2-19:</b> Correlaciones entre la masa de huevo acumulada y pesos corporales en etapa de levante.....	83
<b>Tabla 2-20:</b> Correlaciones entre conversiones alimenticias y masa de huevo acumulada ave/alojada.....	84
<b>Tabla 2-21:</b> Correlaciones entre masa de huevo acumulada ave/alojada y número de huevos por ave/alojada.....	85
<b>Tabla 2-22:</b> Correlaciones entre conversión alimenticia y parámetros de modelaje matemático en crecimiento y producción.....	85
<b>Tabla 2-23:</b> Correlaciones entre conversión alimenticia y pesos corporales.....	86
<b>Tabla 2-24:</b> Estadísticas de regresión lineal múltiple.....	89

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Curva de producción de huevos de gallinas ponedoras.....	25
<b>Figura 1-2:</b> Tipologías de curvas de crecimiento.....	33
<b>Figura 1-3:</b> Curva de crecimiento sigmoideal y acúmulo de componentes en aves de postura.....	34
<b>Figura 2-1:</b> Parámetros de importancia en el crecimiento de tipo sigmoideo.....	51
<b>Figura 2-2:</b> Curvas de predicción de crecimiento en ponedoras.....	60
<b>Figura 2-3:</b> Curvas de predicción de producción de huevos en ponedoras.....	69
<b>Figura 2-4:</b> Principales correlaciones entre etapas de levante y producción de huevos...88	88



## Introducción general

La producción mundial comercial industrial de huevos representa el 92% de la oferta del producto producido. Estos sistemas de producción industrial produjeron en el año 2018: 1.377.705.343.000 huevos, mientras la cifra para Colombia se situó en 14.606.000.000 unidades, ocupando el lugar número 12 en el ranking mundial. El mayor productor del planeta es China con 465.779.283.000 unidades, seguido de Estados Unidos con 109.192.100.000, y en tercer lugar, la India con 95.217.000.000 huevos producidos. En el ámbito latinoamericano, el mayor productor es México con 57.438.360.000 unidades, seguido de Brasil con 53.312.256.000, mientras que Colombia ocupa el puesto 3 (FAO 2019). Según datos de Fenavi (2020) en el año 2019, Colombia produjo a nivel industrial: 14.383.000.000 huevos.

La importancia de la industria avícola del huevo como fuente de proteína animal muestra que para el año 2018 el consumo per cápita por año posicionó en un primer lugar a Holanda con 700 huevos, seguido de Kwait con 527 y México con 455; Colombia ocupó el puesto 26 con un consumo de 262 huevos, cifra que hace evidente la amplia brecha por cerrar en el consumo de este producto, con un alto valor biológico y cultural. En un contexto latinoamericano, el país ocupa el sexto lugar superado por México con 455, Guatemala con 319, Argentina con 297, Perú con 283 y Paraguay con 263 huevos (FAO, 2019). El inventario poblacional de ponedoras para el 2019 en Colombia fue de 47 millones (Watt, 2020).

En condiciones prácticas, los pequeños y medianos productores de huevo de sistemas industriales cuentan con un gran volumen de datos e información de los diferentes parámetros que son estimados a partir de los registros diarios de producción. Históricamente, este gran volumen de datos e información no son utilizados en los procesos de toma de decisiones y proyección de perspectiva y prospectiva de las

empresas avícolas mediante un análisis sistémico, ya que el productor no cuenta con las suficientes herramientas analíticas y de computación que permitan optimizar el sistema de producción y hacerlo ambientalmente sostenible (Belyavin, 1988). En este sentido, los desarrollos en computación presentan un desafío profesional cotidiano relacionado con el análisis de grandes bases de información, ya que con el transcurso del tiempo cualquier empresa debe agregar conocimiento relacionado con el mercado y con las ventajas comparativas de producción frente a la competencia regional y local (Arcila *et al.*, 2016; Camargo *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2014; Kambatla *et al.*, 2014).

La estructuración y capacidad funcional durante el crecimiento de las estirpes comerciales de ponedoras se expresa a través de los procesos de maduración funcional asociadas con el peso adulto y su interacción con el sistema de producción de huevos. En este sentido, es importante estudiar los efectos fisiológicos de la cría, levante y desarrollo de las pollas sobre la producción y la masa de huevos, proceso que requiere como cualquier sistema biológico de su evaluación en nichos específicos de producción con una valoración efectiva de los efectos de arrastre del crecimiento sobre las características y los valores agregados del producto huevo en mercados locales y regionales.

En la actualidad las estirpes de ponedoras disponibles en el mercado se caracterizan por un mejoramiento significativo en la producción anual de huevos con una selección genética orientada a un óptimo comportamiento y donde el proceso de madurez de la hembra durante su crecimiento se realiza de una manera más temprana, alcanzando el pico de producción unas semanas más tarde (Summers *et al.* 1987). Adicionalmente, las altas tasas de producción y la disminución en el peso adulto han mejorado el comportamiento neto en términos de producción de huevos (Luiting, 1991). Lo anterior afecta el consumo de alimento, tasa de crecimiento, eficiencia en utilización de nutrientes y el desarrollo de tejido muscular y adiposo (Buzala y Janicki, 2016).

De otra parte, los modelos matemáticos utilizados y relacionados para estimar las curvas de producción de huevos sirven como patrón estándar para ser utilizado por el productor para detectar dispersiones significativas de los canales de expresión, establecer el comportamiento en condiciones específicas de producción de los mejores lotes con valores de referencia que deben ajustarse en el tiempo con regularidad para disminuir la variación en producción y masa de huevos (Lokhorst, 1996).

El objetivo general de esta tesis fue evaluar los efectos del monitoreo y del manejo del peso corporal y la uniformidad de los lotes sobre el desempeño en el ciclo de producción de huevos en un contexto específico de producción, como es el clima medio colombiano que muestra a grandes rasgos la expresión de las ponedoras en condiciones de termoneutralidad. Al respecto, Oliveira *et al.* (2018), señala la importancia del punto de vista metodológico de la aplicación de modelos matemáticos para evaluar sistemáticamente el crecimiento y la producción de huevos de ponedoras comerciales, ya que representan de manera simplificada la realidad de la producción. Adicionalmente, Gómez *et al.* (2017) sugieren que este análisis es necesario para adoptar medidas de manejo y de estrategias orientadas a un mejor rendimiento de las ponedoras en condiciones ambientales comerciales de producción.

Los objetivos específicos del estudio se sitúan en el contexto del clima medio colombiano y fueron: definir mediante el análisis de bases de datos disponibles a nivel comercial, el mejor modelo matemático que predice el crecimiento de ponedoras marrón; definir mediante el análisis de datos existentes el mejor modelo matemático de predicción de la producción de huevos de ponedoras marrón a nivel comercial; analizar la madurez del crecimiento y su influencia sobre la longevidad de las ponedoras y relacionar la madurez del crecimiento de las pollitas sobre la productividad en un ciclo comercial de producción de huevos marrón.

La tesis se estructura por capítulos, el capítulo 1 realiza una revisión de literatura sobre la integración funcional del crecimiento y la producción de huevos en ponedoras marrón; el capítulo 2 utiliza modelos matemáticos para la integración funcional del crecimiento y la producción de huevos en ponedoras marrón en el contexto de la producción comercial en Colombia, por último, se establecen conclusiones y recomendaciones de la investigación.

# **1. Revisión de literatura: integración funcional del crecimiento y la producción de huevos en ponedoras marrón**

## **1.1. Introducción**

Los organismos vivos son sistemas complejos, que constan de partes que a menudo crecen a ritmos diferentes y que pueden variar en condiciones naturales con la presentación de diferentes patrones funcionales, en concordancia con el ambiente que los rodea. En particular, una ponedora presenta un patrón de crecimiento sigmoideo si se evalúa desde el punto de vista de su peso corporal con respecto al tiempo (edad). Algunas partes corporales pueden crecer más rápido que otras, otras pueden dejar de crecer en cierta etapa, mientras que otras continúan creciendo, y los órganos pueden crecer durante la regeneración de células y tejidos. Las células de un órgano pueden dividirse de forma continua durante toda la vida en sustitución de las células envejecidas, mientras que el tamaño del cuerpo puede permanecer constante. El fenómeno de crecimiento está coordinado por un programa de desarrollo ontogenético que permite la variabilidad en las tasas de desarrollo y tamaños de las ponedoras, con el propósito de que el organismo pueda adaptarse estratégicamente a condiciones ambientales específicas (Karkach, 2006).

## 1.2. Fundamentos del crecimiento y desarrollo de las aves

El crecimiento y desarrollo son definiciones que algunas veces se intercambian pero que en esencia desde el punto vista biológico describen eventos separados en la organización del proceso de madurez de un organismo vivo, al cual no son ajenas las gallinas ponedoras. El crecimiento se define como el cambio irreversible en el tamaño de las células, tejidos y órganos debido a la división celular y al aumento en su tamaño, es entonces un proceso relacionado con el incremento en el peso (dado el aumento de masa) como producto del número de células mediante la división celular (hiperplasia) y el aumento de su tamaño (hipertrofia) (Solís, 2003). El crecimiento puede ser definido como determinado cuando un órgano, parte de un organismo, o el todo alcanza cierto tamaño y entonces se detiene. De otra parte, un crecimiento indeterminado se caracteriza porque las células continúan dividiéndose indefinidamente y el animal sigue aumentando la masa corporal hasta la muerte. El desarrollo hace referencia a la dinámica de pasar de unos estados tempranos a unos estados tardíos del proceso de maduración e involucra: el crecimiento, la morfogénesis (alcance de forma, estructura y tamaño) y la diferenciación referida a los cambios en forma y composición del organismo. En general, la interacción del ambiente y la capacidad de expresión genética determinan cómo el organismo se desarrolla (Ayala, 2018).

El crecimiento como un incremento en el tamaño se puede medir de diferentes maneras, cada uno con ventajas y desventajas; por ejemplo, un aumento de la masa o volumen a menudo se puede medir fácilmente, pero puede representar sólo indirectamente el crecimiento definido como el aumento de la biomasa. Los organismos pueden cambiar en el contenido de agua o lípidos en términos de masa y volumen, pero esto no es considerado como crecimiento, pero el fenómeno en la realidad ha sido medido teniendo en cuenta el contenido de materia orgánica sin grasa; sin embargo, este tipo de mediciones son invasivas y destructivas, por eso se han postulado otros métodos de medición corporal dentro de los que se encuentran: la métrica de absorción de rayos X, la impedancia eléctrica y las técnicas de imágenes (Heymsfield *et al.*, 2005).

En algunos momentos del ciclo de vida es difícil o casi imposible medir la biomasa ya que se trata de embriones o pequeños organismos, pero las medidas lineales si pueden soportar esta medición en animales superiores como por ejemplo, la envergadura de las

alas de las aves, la cual se utiliza para predecir la biomasa depositada, método complicado debido a que la estimación de la biomasa y el volumen para esta medida requieren del conocimiento de la densidad del cuerpo y del llamado "coeficiente de forma". Sin embargo, la medición del crecimiento y su dinámica con un conjunto de medidas lineales es ampliamente utilizado en la ciencia animal, especialmente en mamíferos (Kooijman, 2000). Otros estudios caracterizan el crecimiento animal mediante el uso de modelos matemáticos aplicados a una gran variedad de contextos de producción, los cuales determinan la relación del peso corporal con la edad de los animales, reconociendo el fenómeno de crecimiento como no lineal y entre estos ampliamente sobresalen los modelos: Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy, los cuales muestran en particular diferentes grados de ajuste a la realidad de la producción de ponedoras y pollos de engorde, describiendo y evaluando la dinámica del crecimiento en asocio con otras mediciones biométricas (Tjørve y Tjørve, 2010).

Emmans (1988) plantea tres reglas fundamentales para la aplicación de un modelo en particular a saber: el modelo debe ser simple en el contexto del propósito de la investigación, en el sentido que su estructura y premisas pueden ser descritas fácilmente por otros actores diferentes a su creador. La segunda se relaciona con el uso de la información para dos propósitos: estimar el valor de las constantes del modelo y probar el modelo considerando las limitantes y el entendimiento del mismo en el contexto específico del estudio. La tercera es valorar si en la aplicación del modelo, la problemática es clara en el tiempo y las soluciones se pueden elaborar desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo.

### **1.3. Características del crecimiento y madurez de las ponedoras**

El crecimiento puede ser continuo o discontinuo, pero en la mayoría de los estudios se asume que el crecimiento es continuo, donde se observa que los animales van a tener un tamaño determinado genéticamente asociado al proceso de madurez fisiológica. En este sentido, la condición de carencia de alimento durante el crecimiento temprano perturba este proceso de maduración, pero de acuerdo con el nivel de restricción alimenticia se puede realizar un proceso de compensación total o parcial, comparado con los animales que no son sometidos a la restricción alimenticia.

Uno de los más importantes conceptos en el diseño y formulación de los sistemas de alimentación para el levante y desarrollo de las ponedoras es implementar esquemas de alimentación de acuerdo con el peso corporal y condición de los lotes, asociados a una edad fisiológica, en contraste con el acercamiento tradicional de alimentar las aves de acuerdo a una edad cronológica, con variaciones individuales entre lotes que en muchos casos no alcanzan el peso corporal ideal. En este sentido, los sistemas tradicionales involucran una dieta de iniciación hasta cerca de seis semanas seguido por dietas de crecimiento y desarrollo, mientras que lo más apropiado es mantener una dieta de alta densidad de nutrientes hasta que las aves más livianas alcancen un blanco de peso deseado. En general, las aves con bajos pesos corporales durante esta fase del crecimiento presentan una madurez tardía y producen huevos que van a tener un tamaño pequeño (Duran, 2009); en consecuencia, es importante alcanzar un peso acorde a la genética del ave en su madurez sexual, lo cual implica que el ave debe contar con unos niveles de gestión alimenticia que le aseguren una composición corporal que permita afrontar objetivamente el reto de la producción de huevos. En el caso que las ponedoras no alcancen estos pesos corporales relacionados con la madurez, las aves serán proclives a sufrir prolapsos o sus huevos van a ser más pequeños respecto a aves más pesadas; en contraste, un ave con el peso corporal ideal expresará su potencial genético a plenitud en la etapa de producción (Durán, 2009; Leeson *et al.*, 2000).

Las mayores tasas de crecimiento se atenúan hasta alcanzar la madurez fisiológica, que en el caso de las ponedoras se establece luego de que el ave alcanza el pico de producción de huevos, momento que se da alrededor de las 30 semanas de edad (Silva *et al.*, 2015). La madurez fisiológica postnatal es de hecho un período muy importante en la vida de cada organismo vivo y está representada por un "punto de inflexión" en los modelos teóricos de la evolución de la vida. Este no puede ser considerado a una sola edad, debido a que la respuesta obedece a procesos de crecimiento y desarrollo que pueden tener un carácter normal o tardar un tiempo considerable, pero que al final converge con un peso corporal adulto, ajustado al grado de perturbación presentado (Hy Line International, 2018).

### **1.3.1. Periodos de crecimiento en una ponedora comercial**

El objetivo estratégico de un productor de huevos durante las fases de cría y recría es el de obtener aves con un peso corporal y uniformidad ajustados a las exigencias definidas por las características genéticas de la estirpe y su capacidad para alcanzar la madurez sexual, a una edad óptima relacionada con su potencial de producción (Dunnington y Siegel, 1984). En este sentido, la pollona se desarrolla de acuerdo a una secuencia de eventos fisiológicos donde el fenómeno biológico está representado por procesos químicos relacionados con la composición del animal representados por la suma de los componentes: proteína, agua, lípidos y cenizas, cuya deposición en el cuerpo y las plumas expresa diferentes tasas de crecimiento y maduración a medida que las aves crecen (Alves *et al.*, 2019). Las pollonas que alcanzan o exceden las metas de peso corporal durante las fases de desarrollo tienen mejor oportunidad de alcanzar su potencial genético como ponedoras, pero si se presenta un crecimiento interrumpido durante alguna de las fases de desarrollo, el resultado será contar con aves que carecen de las suficientes reservas corporales y desarrollos funcionales de los órganos, para el reto de mantener una producción de huevos con altos niveles de persistencia posterior a alcanzar su estado adulto. En ese sentido el crecimiento y desarrollo de las aves de postura puede dividirse en las siguientes etapas (Hy Line International, 2019):

- **0 a 6 semanas de edad**

Durante este período, ocurre la mayor parte del desarrollo de los órganos del tracto digestivo (órganos de oferta de nutrientes) y del sistema inmunológico. Los problemas que ocurren durante este período pueden tener efectos negativos estructurales en la funcionalidad del sistema de producción de huevos durante el resto del ciclo de vida. Las aves estresadas durante este período pueden tener dificultades de por vida en la digestión y absorción de nutrientes. La inmunosupresión también puede conducir al desarrollo de problemáticas de adaptación durante este período, dejando al ave más susceptible a las enfermedades y con una menor respuesta inmunológica a las vacunaciones (Hy Line International, 2019).

- **6 a 12 semanas de edad**

Este es un período de crecimiento rápido y es cuando el ave consolida la mayor parte de los componentes estructurales adultos (músculos, huesos y plumas). Las deficiencias de crecimiento durante este período hacen que la ponedora tenga insuficientes reservas

óseas y de tejido muscular, las cuales son necesarias para sostener un alto nivel de producción de huevo y mantener una buena calidad de la cáscara de huevo. Durante este período de tiempo, las pollitas ganan un promedio de 90 a 110 g de peso corporal por semana, asimismo el 95% del esqueleto está desarrollado al final de las 12 semanas de vida. En este momento, las placas de los huesos largos se calcifican y no puede ocurrir mayor crecimiento posterior en el tamaño del hueso (Hy Line International, 2019). Cualquier crecimiento compensatorio que ocurra después de este período no aumentará el tamaño del esqueleto de la ponedora (Leeson *et al.*, 1993).

La reserva mineral disponible para la formación de la cáscara de huevo está directamente relacionada con el tamaño esquelético del ave, éste se compone de tres clases de huesos: el cortical, el trabecular y el medular, es este último el que sirve como reserva de calcio para la formación de la cáscara del huevo, ya que tiene la capacidad de metabolizar y reabsorber calcio, de manera que es la fuente primaria para movilizar dicho mineral cuando es requerido por el ave durante el ciclo diario de producción. Las vacunaciones reactivas, el despique, la manipulación y otras prácticas de manejo estresantes pueden retrasar el desarrollo durante este período de crecimiento rápido del ave de postura (Hy Line International, 2016).

- **12 a 18 semanas de edad**

Durante este período, la tasa de crecimiento disminuye y el tracto reproductivo madura y se prepara para la producción de huevos. El desarrollo muscular continúa y la proliferación de células de grasa ocurre en este período. La ganancia excesiva de peso corporal durante este período puede resultar en una cantidad excesiva de grasa abdominal. El peso corporal bajo y los eventos estresantes en este momento pueden retrasar el inicio de la producción de huevo. De 7 a 10 días antes de la oviposición del primer huevo, el hueso medular dentro de las cavidades de los huesos largos puede aumentar en estructura, cuando se alimenta las aves con una dieta de pre-postura con altos niveles de calcio (Leeson *et al.*, 1986); en consecuencia, no es aconsejable alimentar el ave con una dieta de prepico antes de la primera oviposición, por tanto, el uso de una dieta de prepostura optimiza una transición entre dietas de desarrollo y prepico, esta dinámica de alimentación ayuda en la preparación del ave hacia la puesta y minimiza el impacto de la disminución en la calcificación del hueso durante tal ciclo, mejorando la calidad de la cáscara (Durán, 2009; Hy Line, 2016).

- **19 semanas de edad en adelante**

Este periodo de vida de la ponedora representa la transición entre la etapa de cría del ave y su producción de huevos. En esta fase la ponedora comienza su producción de huevos, la cual aumenta drásticamente hasta alcanzar un pico de producción sobre el 90% dado alrededor de 6 a 8 semanas luego del inicio de la postura, para luego descender (Jacob *et al.*, 2014). Adicionalmente, la ponedora continúa en crecimiento y éste solo se detendrá entre las 30 y 35 semanas de edad cuando el ave alcanza su peso corporal adulto. Al alcanzar este peso adulto se da una “estabilización” entre la relación lípido:proteína como componentes estructurales, el potencial genético y definición del “fitness” del ave adulta (Taylor, 1985). Durante este periodo, el peso del huevo va en aumento, al igual que el consumo de alimento, el cual tiene que incrementarse en un 40% entre el 5% de producción de huevos y el pico de postura, indicando que el ave previamente debe desarrollar un tracto digestivo con buena capacidad de ingestión de alimento que le permita cumplir tal propósito (Lera, 2018). Al no lograr en esta etapa los consumos energéticos estipulados para la estirpe hará que la ingestión de nutrientes esté por debajo de sus requerimientos, limitando en primer lugar su crecimiento y desarrollo, en segundo lugar, el índice de postura y el peso ideal del huevo (Díaz, 2019).

#### **1.4. Descripción matemática del crecimiento de ponedoras**

La descripción matemática de la dinámica de crecimiento en ponedoras se utiliza estratégicamente en producción animal para: reducir el volumen de datos por obtener y explicar los patrones observados del fenómeno fisiológico y comparar las tasas de crecimiento y patrones dentro y entre estirpes comerciales con una orientación a la predicción y proyección del crecimiento en condiciones específicas de producción. Dos enfoques se han utilizado, a saber: las curvas de crecimiento descriptivas y los modelos matemáticos basados en la aplicación de teorías del crecimiento. France y Thornley (1984) se refieren a estos dos tipos de descripción, señalando a los primeros como modelos empíricos que se establecen principalmente para describir el fenómeno y a los segundos como modelos mecanísticos que intentan proporcionar una descripción integral de la dinámica de composición del animal, con una aplicación a la definición de los requerimientos energéticos y de aminoácidos en sistemas de alimentación.

Las curvas de crecimiento como modelos empíricos son funciones paramétricas, por lo general con unos pocos parámetros relacionados con alguna medida de tamaño y la edad de un organismo, mientras que las funciones matemáticas de la mayoría de las curvas de crecimiento no reflejan la naturaleza y la dinámica de los procesos biológicos subyacentes. Las curvas de crecimiento se ajustan a los datos, y se obtienen estimaciones de sus parámetros, los principales retos que estimulan el desarrollo de las curvas de crecimiento han sido la detección de un crecimiento anormal o enfermedad en las etapas tempranas de la vida y la predicción y comparación del crecimiento de las estirpes comerciales y su importancia económica, con el fin de diseñar y formular sistemas de alimentación que optimicen el proceso de producción de huevos (Karkach, 2006).

Una aplicación común de las curvas de crecimiento a nivel de granja es establecer un peso asintótico. La gran diversidad de estrategias de crecimiento observadas en los organismos vivos plantea desafíos en la descripción de este fenómeno, en términos de unas cuantas curvas simples (Karkach, 2006). Sin embargo, los objetivos de un enfoque estructural de modelos de crecimiento son encontrar una familia adecuada de funciones de crecimiento que presente fácilmente un conjunto de mediciones longitudinales, para estimar los parámetros de crecimiento mediante el ajuste de una función, para evaluar la bondad de ajuste, y para poder predecir el crecimiento futuro de la especie bajo análisis (Ahmand, 2009; Wang y Zuidhof, 2004). Los modelos mecanísticos y las teorías de crecimiento presentan un segundo enfoque, no sólo para ajustar los datos, sino para desarrollar una descripción sistémica de los procesos de crecimiento que tiene lugar en un componente químico del ave ponedora. Los modelos de crecimiento pueden ser simples y abstractos e implican desde una descripción simplista de acumulación expresada través del peso corporal hasta un análisis de los compuestos y tejidos del organismo, para luego, con cada uno de estos procesos tratar de relacionar el tamaño del ave y sus implicaciones sobre un sistema de producción en particular (Karkach, 2006; Silva *et al.*, 2015).

Un modelo mecanístico se deriva generalmente de una ecuación diferencial que relaciona la tasa de crecimiento ( $dy/dt$ ) con el tamaño ( $y$ ). Esta relación matemática representa el mecanismo que rige el proceso de crecimiento. Este enfoque ha sido usado ampliamente para valorar el crecimiento somático y un gran número de funciones de crecimiento han sido aplicadas, como los modelos: logístico y Gompertz (France y Thornley, 1984). El propósito de los modelos mecanísticos es comprender las similitudes y diferencias en el

crecimiento al interior de las estirpes y poder comparar y explicar estas diferencias entre estirpes, utilizando la composición química del ave, como ha sido descrito previamente. Por lo tanto, las ecuaciones de crecimiento se pueden también derivar a partir de la sumatoria de la dinámica de deposición de los componentes químicos utilizando, los modelos descritos.

Las tasas de crecimiento de los organismos alimentados a voluntad presentan varios patrones. El patrón denominado exponencial que es típico para analizar el crecimiento en determinados períodos de tiempo, por lo general poco después del nacimiento; un patrón de crecimiento asintótico se aplica a la longitud de algunos organismos, el tamaño del cráneo y el cerebro. El crecimiento sigmoideal relacionado con el peso y volumen corporal y de la mayoría de los órganos desde la concepción, marca inicialmente unas tasas de crecimiento bajas, pero luego crecientes hasta alcanzar un máximo que corresponde al punto de inflexión de la curva y luego disminuye lentamente a casi cero, momento en el cual las aves alcanzan el peso corporal adulto. La curva sigmoideal es frecuentemente observada entre los animales con crecimiento determinado y esto ha dado lugar a la aparición de una clase específica de "función sigmoide" que describe el crecimiento (Karkach, 2006).

Las curvas de crecimiento se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de descripción del crecimiento en: determinado o indeterminado. La mayoría de las curvas desarrolladas describen un crecimiento determinado, ya que esto es lo que se observa con mayor frecuencia en los animales domésticos. Dado que el crecimiento determinado se caracteriza por un tamaño máximo que se acerca con una tasa de crecimiento cada vez menor, estas curvas también se llaman asintóticas, ejemplos de ellas son la exponencial (con la tasa de rendimientos decrecientes), la logística, Richards, Gompertz, y Von Bertalanffy. Todas estas curvas a excepción de la exponencial tienen forma sigmoidea.

## **1.5. Análisis de las curvas de crecimiento y madurez fisiológica en el levante de ponedoras**

El crecimiento de un ave tiene dos aspectos importantes, el primero es la eficiencia del proceso de conversión alimenticia y el segundo la velocidad a la que ese proceso ocurre. En este sentido, Emmans (1981) propone un modelo de crecimiento y consumo de

alimento con la idea fundamental de que un ave tiene una tasa potencial de crecimiento normal en un momento dado de la vida y trata de consumir una cantidad de alimento que le permita que esto se alcance, el grado de éxito de ello depende de la cantidad y calidad del alimento ofrecido y del entorno en el cual el animal se mantiene. De tal manera que el potencial de crecimiento de un ave se establece a partir de dos componentes independientes entre sí: un crecimiento normal dado por la retención acumulada de proteínas, cenizas, agua y una cantidad mínima de lípidos; y un crecimiento graso que tiene que ver con el almacenamiento de lípidos por encima de una cantidad mínima. En particular, el desarrollo de una ponedora en la etapa de cría y levante está condicionado por factores ambientales (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fotoperiodo), de manejo, nutricionales, genéticos, de instalaciones (Aggrey, 2002; Vo *et al.*, 1980).

Los modelos matemáticos de crecimiento continuo describen el aumento del peso corporal en el tiempo y difieren de acuerdo con el número de parámetros de la ecuación. Los más utilizados en aves corresponden a las funciones de tres parámetros (Logístico, Gompertz y Von Bertalanffy) y ecuaciones de cuatro parámetros (Richards, Weibull y Morgan-Mercer-Flodin) (Maruyama *et al.*, 1998, 2001). Los parámetros de los modelos se estiman mediante el uso de observaciones empíricas del peso corporal de las aves durante varias semanas (Ahmad, 2009) y el objetivo es ajustar los patrones de crecimiento en el tiempo. A partir de estos parámetros que son biológicamente interpretables se comprende el fenómeno biológico y se establece una base sólida para desarrollar una estrategia de mejoramiento para modificar o cambiar en particular, la trayectoria del crecimiento de una estirpe de ponedoras.

La medición, caracterización y modelación de los parámetros de cada uno de los modelos descritos favorece la implementación de acciones preventivas y correctivas tendientes a ofrecer a las aves un ambiente confortable, disminuyendo así las pérdidas en productividad ocasionadas por los cambios en el comportamiento de las aves y gastos energéticos del metabolismo en respuesta a eventos o factores causantes de estrés biótico y abiótico (Aguilar *et al.*, 2002).

Otra manera de describir el desarrollo de una ponedora es mediante una función de crecimiento multifásico, la cual se basa en la suma de  $n$  curvas sigmoideas y donde cada

una de ellas representa un ciclo de crecimiento descrito por una función logística; allí cada ciclo de crecimiento puede consistir en brotes de crecimiento máximo de estructuras corporales específicas. La función de crecimiento multifásico se puede utilizar para caracterizar el crecimiento inmaduro de una ponedora definiendo el número de fases, edad al máximo crecimiento por fase y la magnitud y duración de cada fase a nivel corporal y de composición química asumiendo que los diferentes períodos de crecimiento de cada uno de estos componentes (proteína, lípidos y minerales) están relacionados con los periodos de crecimiento de la materia seca corporal (Kwakkel *et al.*, 1993). Estos estudios con enfoque multifásico no han sido ampliamente utilizados por los investigadores en animales domésticos debido a la carencia de observaciones detalladas en el tiempo, que permitan determinar las diferentes fases de crecimiento exponencial, lo cual es un requisito previo para la evaluación del crecimiento multifásico (Koops, 1989).

En un análisis multifásico de crecimiento hecho por Kwakkel *et al.* (1993) en ponedoras de huevo blanco encontraron cuatro puntos críticos de crecimiento a las semanas 6.6, 14, 19 y 25.6. Los dos primeros puntos están relacionados con el desarrollo de órganos metabólicos esenciales, músculos, huesos y plumaje. El tercer punto (19 semanas de edad) se relacionó con el desarrollo del tracto reproductivo, mientras que la cuarta fase consistía fundamentalmente en la deposición de grasa corporal. Se observó que después de las 11 semanas de edad la deposición de proteína estuvo relacionada con la madurez sexual, o sea, para el desarrollo del tracto reproductivo. Esta deposición de componentes corporales determina la madurez del ave desde un punto de vista biológico y podría estar asociada funcionalmente con el desempeño en producción de huevos durante el ciclo de postura de la ponedora.

En los sistemas de producción animal, las curvas de crecimiento se utilizan para proporcionar estimaciones de las necesidades diarias de alimento para suplir con requerimientos nutricionales de energía y proteína asociados al potencial de crecimiento. Estas estimaciones se utilizan en el cálculo del consumo de alimento, especialmente cuando los animales son alimentados a voluntad. A continuación, se describen los principales modelos de crecimiento utilizados en gran número de especies de animales domésticos, incluyendo las ponedoras:

### 1.5.1. Modelo logístico

Este modelo describe el crecimiento a través de tres parámetros y tiene la forma de:

$$M = \frac{a}{1 + \exp(-b(x - c))}$$

Donde  $M$  es la masa corporal,  $a$  es la masa corporal asintótica,  $b$  es la tasa de crecimiento constante,  $x$  es la edad, y  $c$  es la edad en el punto de inflexión (Tjørve y Underhill, 2009). Este modelo es bastante inflexible, ya que es simétrico alrededor del punto de inflexión, que se fija en el 50% de la asíntota superior. El valor de  $M$  en el punto de inflexión se encuentra en  $t = c$ . El modelo se reduce al peso al punto de inflexión así:  $a/(1 + \exp(0)) = a/2$ . A pesar de esta limitación, el modelo logístico es utilizado y aplicado ampliamente en diferentes animales. Una aplicación popular del modelo logístico es el ajuste a las curvas de dosis-respuesta utilizadas en la valoración de nutrientes, la eficacia de aditivos alimenticios y el impacto de toxinas.

### 1.5.2. Modelo de Richards

Este modelo es una extensión generalizada del modelo logístico y tiene cuatro parámetros. El modelo de Richards resume varios modelos que exhiben un punto de inflexión fijo del peso adulto, variando el punto de inflexión de acuerdo a la forma de la curva descrita por el parámetro  $d$ . La forma de modelo es:

$$W = a(1 + b * \exp(-c * x))^{-\frac{1}{d}}$$

Donde  $W$  es el peso corporal del ave,  $a$ = peso asintótico del ave,  $b$ = constante de integración,  $c$ = índice de madurez,  $x$ = tiempo y  $d$ : parámetro de forma, determina la posición del punto de inflexión (Narushin y Takma, 2003).

### 1.5.3. Modelo de Gompertz

Este modelo surge a partir de modelos de crecimiento autorregulados, donde la tasa de crecimiento absoluta decrece exponencialmente con el tiempo después de alcanzar el punto de inflexión, mientras que la tasa de crecimiento relativa decrece desde el nacimiento del animal hasta alcanzar el peso adulto. Históricamente, el modelo de Gompertz ha sido

la función de elección para describir el crecimiento en aves de corral, pero tiene como limitante que el punto de inflexión es fijo y se alcanza a  $1/e$  ( $= 0,368$ ) veces del peso adulto (Thornley y France, 2007).

El modelo de Gompertz es expresado de la forma descrita por Winsor (1932):

$$Y = a * \exp(-\exp(b - (c * t)))$$

Donde  $Y$  es el peso del animal a un tiempo  $t$ ,  $a > 0$  es el peso adulto, el parámetro  $c > 0$  describe el índice de madurez o la tasa específica de crecimiento, y el parámetro  $b > 0$  controla la diferencia entre el peso inicial y el peso final a un tiempo  $t$ . El punto de inflexión es el punto en el tiempo donde  $y = a/\exp$ , este da un  $t = b/c$ .

La curva de crecimiento de Gompertz también se puede expresar así (Ricklefs, 1968):

$$Y = a * \exp(-\exp(-b(x - c)))$$

Donde  $Y$  es el peso corporal del animal en un tiempo  $x$ ,  $a$  es el peso adulto del animal,  $b$  es la tasa de maduración y  $c$  es la edad al punto de inflexión. El modelo de Gompertz está relacionado con el modelo logístico, y se comporta de forma bastante similar. En consideración a que el punto de inflexión es fijo, la curva de crecimiento de Gompertz es la más adecuada para los procesos de crecimiento con una tasa máxima temprana comparado con el modelo logístico.

#### **1.5.4. Modelo de Von Bertalanffy**

El modelo Bertalanffy es uno de los modelos clásicos de crecimiento recomendados para su uso en peces y no es muy comúnmente ajustado a los datos de crecimiento de las aves (Tjørve y Tjørve, 2010). Este modelo describe un proceso positivo neto de crecimiento cuando la tasa anabólica (energía requerida derivado principalmente de la oxidación de componentes orgánicos) excede la tasa catabólica (metabolismo destructivo de los tejidos). El modelo Bertalanffy tiene la forma de:

$$Y = a(1 - \exp(-b(x + T)))^3$$

En este modelo el punto de inflexión se localiza en el 29.63% de la asíntota superior y se deriva de:  $a(1 - (1/3))^3 = 8a/27$ . El modelo de Bertalanffy no tiene una asíntota inferior (como los modelos de Gompertz y logístico), pero en lugar de un punto de partida sobre el eje x en  $b = -T$ , el parámetro  $a$  es el peso adulto y  $b$  es la tasa de maduración.

### 1.5.5. Modelo de la función de valor extremo (EVF por sus siglas en inglés)

Este modelo fue desarrollado por Williams (1995) y ha sido probado en pollo de engorde (Tjørve y Tjørve, 2010). El modelo tiene la forma de:

$$M = a(1 - \exp(-\exp(b(x - c))))$$

Este modelo tiene un punto de inflexión fijo en el 63,21% de la asíntota superior. La edad al punto inflexión está definida por el parámetro  $c$ , y por lo que el modelo EVF se reduce a:  $a(1 - \exp(-1)) = a(1 - (1/e))$ . Su forma, por lo tanto, constituye una adición complementaria a los modelos: Logístico y Gompertz. Estos tres modelos y sus comportamientos están relacionados donde  $a$  representa al peso adulto del animal,  $b$  la tasa de maduración y  $c$  la edad al punto de inflexión. El modelo EVF es de esta manera un complemento útil y alternativo para describir el crecimiento de las ponedoras.

### 1.5.6. Modelo Morgan-Mercer-Flodin

Este modelo describe una ley que gobierna la tasa por la cual los procesos corporales están representados por una curva de saturación hiperbólica. La forma del modelo es:

$$Y = \frac{(w_0\gamma + \alpha t^m)}{\gamma} + t^m$$

Donde  $Y$ = peso,  $t$ = tiempo,  $\alpha$ = peso asintótico,  $w_0$ = el valor de  $t=0$ ,  $\gamma$ = parámetro que controla el punto de inflexión,  $m$ = tasa de crecimiento (Khamiz *et al.*, 2005).

### 1.5.7. Modelo generalizado de Michaelis-Menten

Este modelo generalizado fue desarrollado por López *et al.* (2000) y proporciona una amplia flexibilidad para describir patrones sigmoidales y de rendimiento decreciente del

crecimiento. Los parámetros de este modelo no lineal están abiertos a la interpretación biológica y pueden ser utilizados de una manera confiable para calcular las características del crecimiento tales como las tasas máximas o medias de crecimiento postnatal. La forma del modelo es:

$$Y = (a * b^c + d * x^c) / (b^c + x^c)$$

Donde  $Y$  es la talla corporal,  $x$  es la edad,  $a$  y  $d$  son los valores cero e infinito de  $Y$  respectivamente,  $b$  y  $c$  son constantes. Se podrían interpretar como  $a$ = peso al nacimiento,  $d$ = peso adulto,  $c$ =parámetro de ajuste y  $b$ =edad al punto de inflexión.

En el estudio de López *et al.* (2000) se realizan comparaciones de las características matemáticas, estadísticas y biológicas del modelo propuesto y de otros como el de Gompertz y Richards. El modelo se diferenció en algunos rasgos de crecimiento, pero no fueron muy significativos; por lo tanto, dicho modelo, con su punto de inflexión variable, fue capaz de describir adecuadamente el crecimiento de una amplia variedad de animales, adaptándose a una serie de datos que muestran patrones de crecimiento sigmoideo, con estimaciones satisfactorias de rasgos para cuantificar las características de crecimiento de cada tipo de animal.

Este modelo se caracteriza por la flexibilidad, la simplicidad del procedimiento de ajuste, y la interpretabilidad biológica de sus parámetros. En contraste con otros modelos, esta función permite que el punto de inflexión se determina para las curvas de crecimiento sigmoideo desde una expresión algebraica sencilla. La bondad del ajuste basado en el patrón de distribución de los residuos y de la magnitud de la varianza residual fue similar al modelo de Richards, con sólo pequeñas diferencias entre las dos ecuaciones con respecto a su capacidad para adaptarse a una amplia gama de animales, dentro de los cuales se encuentran las aves ponedoras.

## **1.6. Escalamiento genético y madurez de las ponedoras**

El tamaño genético es el factor que controla la tasa de crecimiento desde el estado embrionario hasta alcanzar la madurez y posteriormente determina la tasa de crecimiento

y duración del ciclo de vida de un animal, durante el tiempo restante posterior a la madurez (Taylor, 1980). Aunque el tamaño genético puede ser expresado en diferentes estadios del desarrollo de crecimiento posnatal se visualiza más claramente cuando el animal alcanza el peso adulto. Desde el punto de vista básico, el tamaño genético representa una escala estandarizada del programa de vida de las especies dentro de un grupo taxonómico y este programa determina el diseño del animal desde la concepción hasta la madurez. La introducción de la teoría del escalamiento por tamaño desarrollada por Taylor (1980,1985) permitió establecer que la variación entre animales puede ser explicadas en gran medida por las diferencias en escala, expresada por el factor genético de tamaño del animal. Esta teoría provee las bases para explicar las variaciones genéticas entre y dentro de diferentes niveles taxonómicos de mamíferos o aves (entre individuos, grupos de individuos dentro especies, especies, géneros, familias, etc.).

En este sentido, un mejor entendimiento de las bases de la producción animal en términos de eficiencia señala para el caso de la producción de huevos, un mejoramiento orientado a una mayor producción (Luiting 1991), con indicadores que están positivamente correlacionados con el tamaño genético de la ponedora; sin embargo, no afecta la eficiencia de utilización del alimento para la producción.

Brody (1945) con su obra maestra: "Bioenergética y Crecimiento" constituye la piedra angular del desarrollo conceptual de esta área de la biología, la cual integra el conocimiento que por tendencias hacia la especialización se ha perdido hacia una fragmentación del conocimiento de la ciencia animal, con el concomitante sesgo aplicado a la solución de problemas, sin mantener una profundidad y desarrollo de los conceptos. La madurez sexual no es solamente una medida del comienzo de la producción de huevos, sino también un indicador del crecimiento, del tamaño del huevo y el porcentaje de producción de huevos. Las ponedoras continúan creciendo después de comenzar la producción de huevos, pero este proceso se caracteriza por su desaceleración hasta que se alcanzan el peso adulto. En general, las ponedoras que maduran tempranamente tienden a crecer menos que las que maduran tardíamente. El tamaño de los huevos se incrementa a través del ciclo de producción, pero a una misma edad, las ponedoras que maduran tempranamente tienden a producir más huevos y más pesados comparadas con las que maduran tardíamente (Luiting, 1991). En consecuencia, la variación en la madurez

sexual puede ser cuantificada en algún grado por los ajustes que realiza la ponedora en términos de ganancia de peso corporal y masa de huevos producido.

La selección genética ha sido llevada a cabo por más de una centuria en la industria de producción de huevos con significativos progresos en el mejoramiento de su productividad, lo anterior basados en el uso de técnicas moleculares complementadas con métodos clásicos cualitativos de mejoramiento genético, lo cual ha permitido establecer un éxito comercial de las diferentes estirpes de ponedoras (Emmerson, 1997). La selección genética a través de diferentes comportamientos ha producido considerables diferencias en los mecanismos de crecimiento y desarrollo de las estirpes y por ende en el metabolismo de las aves (Druyan, 2010).

Las ponedoras en particular demuestran una efectividad de esta selección durante las primeras 48 horas de desarrollo embrionario y después de la eclosión (Ho *et al.*, 2011). En general, el mejoramiento ha permitido una mayor intensidad de la producción de huevos, con un rápido crecimiento y considerables diferencias en la eficiencia de producción (Janke *et al.*, 2004). En la actualidad las ponedoras producen más de 320 huevos durante 52 semanas de producción (Druyan, 2010). Sin embargo, los altos niveles de producción de huevos han desarrollado colateralmente enfermedades como el síndrome hemorrágico de hígado graso, el hígado graso, la hepatitis necrótica hemorrágica, osteoporosis o hipocalcemia (Julian, 2005), para lo cual es necesario analizar la relación de la producción con el crecimiento de la ponedora.

### **1.6.1. Crecimiento y desarrollo prenatal de la ponedora**

Durante el desarrollo temprano del embrión aviar depende exclusivamente de los componentes del huevo para su crecimiento y desarrollo (Ho *et al.*, 2011). La yema de huevo y sus múltiples componentes: lípidos, carbohidratos, hormonas y anticuerpos son fisiológicamente relevantes para el desarrollo del embrión (Ho *et al.*, 2011). El crecimiento es el más importante consumidor de energía durante el desarrollo embrionario en la medida que el 80% de la energía contenida en la yema es direccionada hacia el crecimiento del embrión. Las perturbaciones en el ambiente de la yema afectan el desarrollo de los embriones y su tasa de crecimiento y por ende la masa de la yema puede ser un útil predictor del desarrollo embrionario temprano (Ho *et al.*, 2011).

El crecimiento prenatal del embrión de la ponedora se diferencia del embrión del pollo de engorde por la tasa de utilización de la yema. En este sentido, los contenidos del saco de la yema son utilizados más rápidamente en el pollo de engorde y durante las primeras horas del desarrollo embrionario, el peso del saco es mayor en los pollos de engorde, situación que persiste hasta los 14 días de desarrollo embrionario (Sato *et al.*, 2006). Durante los días 17 y 18, los embriones de pollo de engorde y ponedoras no presentan diferencias en el peso del saco de la yema (alrededor de 13 g) (Druyan, 2010). Al nacimiento, el peso residual del saco la yema es menor en pollos de engorde. Los anteriores indicadores de desarrollo se reflejan en el tiempo de la eclosión que en el caso de la ponedora es un día después del pollo de engorde (21 días de edad) (Janque *et al.*, 2004). El peso corporal al nacimiento es mayor en los pollos de engorde comparado con las ponedoras; sin embargo, la relación con la yema es similar y por lo tanto el crecimiento también están relacionados con este grado de madurez.

La edad cronológica es diferente a la edad fisiológica entre especies, razas e individuos y en general las comparaciones genéticas a una misma edad son extremadamente complejas. La composición del animal está relacionada efectivamente con el peso corporal, pero las comparaciones a un mínimo peso corporal requieren de complejas interpretaciones biológicas. Las variaciones estadísticas en el peso adulto y sus correlaciones genéticas con varias variables de producción se asocian con un grado de madurez, el cual es ajustado y subsecuentemente analizado en los parámetros de las curvas de crecimiento.

### **1.6.2.El peso adulto como una medida del tamaño genético corporal.**

El tamaño corporal es usualmente medido en individuos adultos debido a que corresponde al único período de la vida del animal donde el tamaño corporal normalmente o potencialmente se encuentra en un estado de equilibrio. Esta representatividad no refleja un ideal, pero si un mejor parámetro comparado con otros analizados y es así como el peso adulto se encuentra relacionado con los estados tempranos del desarrollo embrionario y diferentes modos de expresión de este tamaño genético puede ser visto en operaciones, en cada estado del crecimiento del ave. La definición del peso adulto es fundamentalmente dependiente de la genética y los sistemas de alimentación, en donde

para algunos investigadores se logra como ha sido descrito un estado de equilibrio, cuando el animal contiene el 15% de composición química como grasa.

En consideración a que el crecimiento es proporcional al peso adulto ( $a^{0.27}$ ) se ha desarrollado la definición de edad metabólica ( $t/a^{0.27}$ ), para el cual todos los eventos de la vida ocurren a la misma edad en términos de días metabólicos, independientemente de las especies. En los mamíferos se estima que el proceso de implantación del embrión ocurre a un promedio de 4 días metabólicos, mientras que el nacimiento ocurre a los 50 días metabólicos. En el período de crecimiento posnatal el destete ocurre a un promedio de 100 días (50 días metabólicos después del nacimiento) es decir que la longitud de la gestación y la longitud de la lactancia son generalmente iguales. La madurez sexual ocurre alrededor de los 120 días metabólicos (45% a 50% del peso adulto). El crecimiento normal cesa a un promedio de 440 días metabólicos, cuando el animal alcanza el 98% de la madurez.

Estos valores globales pueden ser refinados y estandarizados ajustándolos como norma a partir de la cual la desviación de cada especie puede ser expresada (63 especies de mamíferos tienen 48.5 días de edad metabólica con referencia a la longitud de la gestación) (Taylor, 1985).

### **1.6.3. Variables de producción y escalamiento genético**

La segunda regla del escalamiento genético establece que cuando se mide a la misma edad metabólica, las variables acumuladas de entrada y salida del crecimiento del animal son directamente proporcionales al peso adulto, de tal forma que el peso corporal per sé es el ejemplo más simple de variables acumuladas de salida en su relación con el peso adulto y esta relación se define como el grado de madurez del animal; sin embargo otras variables asociadas con el crecimiento también están relacionados con este grado de madurez.

En la teoría y en la práctica, el estado de desarrollo de un animal es más ampliamente representado por su grado de madurez que por su edad metabólica y en consecuencia las comparaciones a un mismo grado de madurez son más exitosas y pueden explicar mejor las diferencias de expresión del potencial genético entre un animal y otro. Estas diferencias están relacionadas con el estatus metabólico y la composición corporal del animal y, en consecuencia, el grado de madurez es seleccionado como base de la comparación, ya que

en condiciones prácticas es una medida fácil de establecer en comparación con otras medidas como la energía metabolizable consumida por la cantidad de proteína depositada.

En la práctica se reconoce que todos los individuos crecen más o menos normalmente y que son alimentados con el mismo tipo de dieta. En general, el grado de madurez está representado entre otras variables por: la tasa de crecimiento, la composición corporal, la producción de calor, los requerimientos de mantenimiento, el consumo voluntario de alimento y la eficiencia de conversión alimenticia (Taylor, 1980). Con respecto a la tasa de crecimiento, la tasa máxima de crecimiento se localiza en mamíferos alrededor del 0.007 kg ganados/cada kg de peso adulto cada día de edad metabólica, lo que se esperaría que ocurriera, cuando los animales están sobre el 25% de la madurez.

El comportamiento en producción de huevos de una ponedora está asociado con el peso corporal a las ocho semanas presentando divergencias en alcanzar la madurez sexual y disminuyendo la producción de huevos (Dunnington, 1985), lo anterior como consecuencia de la correlación negativa entre crecimiento y la producción de huevos. Esta divergencia en la selección de largo plazo se debe a que se enfatiza en el peso corporal estrechamente asociado con los estados de crecimiento de un individuo y su influencia cambia en términos de funcionalidad biológica y locación de recursos, durante otros estados del ciclo de vida de la ponedora.

La madurez sexual y el comienzo de la actividad de producción de huevos tiene profunda importancia tanto desde el punto de vista evolutivo, como económico (Wright *et al.*, 2012). En las ponedoras la madurez sexual es considerada como la edad cuando se da el primer huevo. La madurez sexual es influenciada por la edad cronológica, el peso corporal y la composición corporal (Siegel y Dunnington 1985), lo cual implica una relación asociada a una edad específica mínima, un mínimo peso corporal y composición corporal para una estirpe en particular (Zelenka *et al.*, 1987).

El peso corporal al primer huevo es un peso corporal mínimo necesario para llegar a ser sexualmente maduro (Dunnington *et al.*, 1983). En este sentido, un indicador importante es la relación del peso corporal y la edad al primer huevo que se calcula dividiendo el peso corporal al primer huevo por la edad al primer huevo. Esta relación refleja el crecimiento hacia la madurez sexual y asume que la composición corporal es constante a través del

período de crecimiento hasta alcanzar la madurez sexual. De otra parte, existe una relación entre el mínimo umbral para la edad y peso corporal al cual las pollas alcanzan la madurez sexual que se refleja como ya se indicó, en una respuesta correlacionada con la divergencia de peso corporal a las ocho semanas (Dunnington *et al.*, 1983).

La importancia de estos indicadores es que pueden ser usados para determinar si las pollonas han ganado suficiente peso corporal al alcanzar la madurez sexual. La racionalidad del argumento se establece a través de recomendaciones para alcanzar pesos corporales definidos durante el período de crecimiento y la medida es específica para un lote de ponedoras con un umbral de relación, en donde la madurez sexual ocurre en un contexto específico de producción. En contraste, una relación sobre un umbral inferior puede indicar que la pollona está obesa y que probablemente tienen complicaciones durante la producción tales como: ovulaciones erráticas y el síndrome de huevos defectivos asociadas con desórdenes metabólicos y cardiovasculares. Una madurez temprana también está relacionada con un crecimiento importante en la fase juvenil, el cual está asociado con problemas de postura como anomalías jerárquicas en la formación del huevo (Hocking, 2004). En consecuencia, a nivel comercial los programas de alimentación tienen que promover un blanco de peso corporal óptimo para alcanzar altos niveles de producción en una estirpe específica y para desarrollar este concepto se requiere establecer los patrones de crecimiento desde el nacimiento hasta alcanzar la madurez sexual utilizando modelos no lineales, en una expresión asociada al peso a la madurez sexual (Zelenka *et al.*, 1986).

## **1.7. Análisis de la curva de producción de huevos**

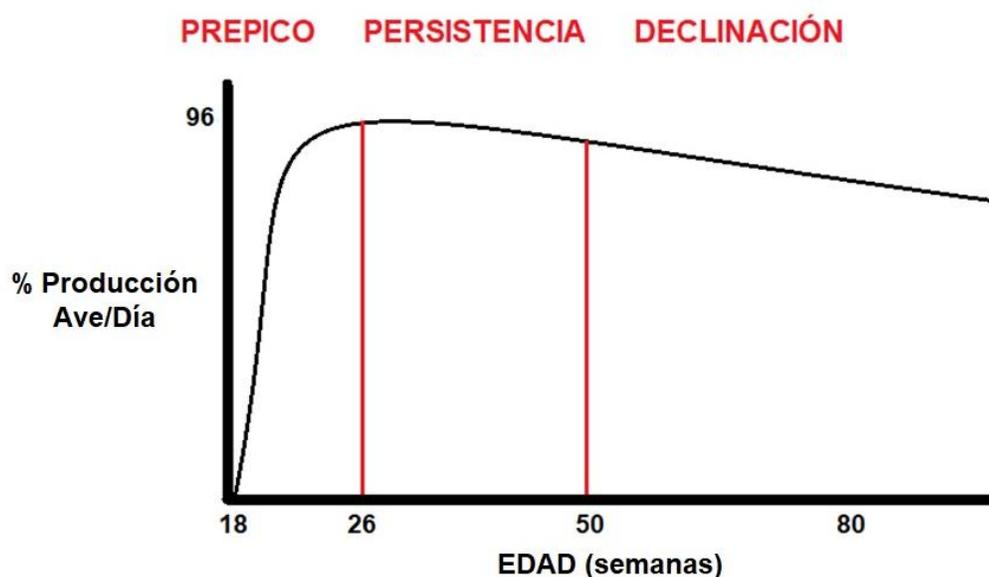
La producción de ponedoras es una actividad reproductiva que representa un alto nivel de recambio de nutrientes que se caracteriza por un incremento en la producción porcentual de huevos hasta un pico para posteriormente disminuir gradualmente (France *et al.*, 2013). Las ponedoras ponen los huevos en secuencias de postura; es decir, se produce un huevo por día durante varios días consecutivos antes de que el ave se detenga por uno o más días de descanso, terminando así la secuencia. El primer huevo de una secuencia se pone temprano en la mañana aproximadamente 8 horas después del inicio de la oscuridad. Cada oviposición posterior ocurre progresivamente más tarde en el día, a intervalos ligeramente

mayores que 24 h, en días sucesivos. El mecanismo responsable de este patrón de puesta secuencial es el ciclo ovulatorio asincrónico (Johnston y Gous, 2007).

El comienzo de la postura está determinado por diversos factores interrelacionados como la edad y el peso corporal de la ponedora como factores limitantes (Brody *et al.*, 1980; Dunnington y Siegel, 1984). Otros factores son: tejido magro (Brody *et al.*, 1980; Zelenka *et al.*, 1986), grasa corporal (Brody *et al.*, 1984) y el estímulo luminoso como factor de manejo (Eitan y Soller, 1992; Unver, 2000). En consecuencia, para que la pollona sea rentable debe alcanzar un mínimo peso corporal combinado con una composición corporal y desarrollo del tracto reproductivo, que le permitan iniciar su postura (Kwakkel *et al.*, 1995).

La curva de producción de huevos comienza aproximadamente a las 18 semanas de edad, seguido por el pico de producción más o menos ocho o nueve semanas luego del comienzo de la puesta, y la posterior persistencia, definida como el número de semanas cuando la producción es constante con posterioridad al pico de producción, a continuación, viene la fase de declive, que se extiende hasta la salida del lote (Figura 1-1). La curva de producción de huevos puede variar entre lotes debido fundamentalmente a diferencias en los patrones de persistencia de las curvas (Grossman *et al.*, 2000).

**Figura 1-1:** Curva de producción de huevos de gallinas ponedoras.



La tasa de postura está determinada por la tasa de ovulación, que varía en el tiempo entre los individuos. La tasa de ovulación, a su vez, se establece mediante una interacción entre la tasa de maduración del folículo y la liberación rítmica de LH. La maduración del folículo se refiere a la competencia del folículo para ovular en respuesta a una oleada de LH, en lugar de un aumento en el peso o el diámetro del folículo (Gous *et al.*, 2006). Esta fase es provocada por una serie de procesos fisiológicos, por ejemplo, las células de la granulosa en los folículos jerárquicos se diferencian de modo que son capaces de secretar progesterona, la hormona necesaria para iniciar y mantener la oleada inductora de ovulación de LH. Antes de la ovulación, el folículo F1 cambia de una fase dominada por FSH a una LH. Es interesante notar que la tasa de maduración de los folículos se ve afectada por el avance de la edad de la ponedora, en consideración a la sensibilidad del folículo en la LH (Johnson *et al.*, 1986) y, por lo tanto, su capacidad para ovular disminuye con la edad (Gous *et al.*, 2006).

Las ponedoras en su dinámica de postura tienen un ciclo interno, definido como el intervalo entre ovulaciones sucesivas. Por ejemplo, si se produce una ovulación el día 1 a las 08:00 y el día 2 a las 10:00, la duración del ciclo interno es de 26 horas. Este intervalo está determinado por la sincronía entre la jerarquía folicular y el ritmo circadiano de la liberación de LH, de tal forma una ponedora que mantiene una jerarquía adecuada para responder al ritmo circadiano de postura tendrá un ciclo interno de 24 horas y pondrá un huevo todos los días a diferentes horas del día. Con el avance de la edad, los folículos tardan más en madurar, con el resultado de que aumenta la duración del ciclo interno y disminuye por ende la producción de huevos (Gous *et al.*, 2006).

A continuación, se presentan los estándares de rendimiento en la etapa de postura para la línea Hy Line Brown (Hy-Line International, 2018):

**Tabla 1-1:** Estándares de rendimiento genética Hy Line Brown.

Estándares de rendimiento	
Porcentaje de pico de producción	95 – 96%
Huevos ave – alojada 60 semanas	253 – 262
Huevos ave – alojada 90 semanas	408 – 421
Huevos ave – alojada 100 semanas	453 – 467

**Tabla 1-1:** (Continuación).

Estándares de rendimiento	
Viabilidad 60 semanas	97%
Días a 50% de producción (desde nacimiento)	140
Masa total de huevo por ave alojada (18 – 100 semanas)	28.40 kg
Peso corporal a las 32 semanas	1.85 – 1.97 kg
Promedio del Consumo de Alimento Diario (18–100 semanas)	105 – 112 g/día por ave
Conversión alimenticia por docena de huevos (semanas 20 – 60)	1.42 – 1.46 kg
Peso del huevo a las 26 semanas	57.30 – 59.70 g / huevo
Peso del huevo a las 32 semanas	60.10 – 62.50 g / huevo
Peso del huevo a las 70 semanas	62.90 – 65.50 g / huevo

Las curvas de producción de huevos se modelan matemáticamente con el objeto de lograr un análisis más detallado del ciclo de producción de huevos y la descripción de las fases de la curva y su duración (Fialho *et al.*, 2001). La curva también facilita la predicción de la producción, la proyección a largo plazo del rendimiento en huevos de una estirpe en particular y la planificación económica de la producción y la toma de decisiones a nivel empresarial (Agudelo *et al.*, 2008; Groen *et al.*, 1998). En este sentido, los modelos matemáticos de producción se configuran a través de dos fases: la primera que corresponde generalmente una función logística que describe el crecimiento de la producción de huevos, mientras la segunda fase muestra el descenso después de alcanzar un pico.

Diferentes funciones han sido aplicadas para simular la curva de producción de huevos así: una función lineal-cuadrática (Adams y Bell, 1980), una función exponencial (Cason, 1990; Yang *et al.*, 1989) o una función polinómica (Lokhorst, 1996). Se ha encontrado que todas las anteriores funciones son muy eficaces en la predicción de la producción de huevos en consideración a los coeficientes de determinación encontrados ( $R^2$ ). Según

Grossman *et al.* (2000) la curva de producción de huevos se caracteriza en general por sucesivos periodos de un lento incremento, rápido incremento, una constante producción, seguidos de un periodo de decremento en la producción.

A continuación, se presenta una descripción de los modelos matemáticos usados para describir la producción de huevos de ponedoras así:

### 1.7.1. Modelo Adams-Bell

Este modelo fue desarrollado por Adams y Bell (1980) donde la producción de huevos se expresa de la forma:

$$y_i = 100 * \left[ \frac{1}{1 + a^{(x-b)}} - c * x + d \right] + \varepsilon_i$$

Donde  $y_i$  es el porcentaje de producción de la semana  $i$ ésima. Los parámetros  $a$  y  $b$  permiten que el modelo se ajuste para el inicio de la producción,  $a$  equivale a una variación en la madurez sexual y  $b$  es el tiempo promedio a la madurez sexual. La tasa posterior semanal de declinación de la producción postpico (%) se determina por el valor del parámetro  $c$ . el intercepto de la disminución final está dada por el factor  $d$ . La variable  $x$  se refiere a la  $i$ ésima edad de la parvada (semanas), y  $\varepsilon_i$  es el efecto residual asociado con el tiempo de la misma.

### 1.7.2. Modelo de Lokhorst

El modelo Lokhorst (1996) está dado por:

$$y_i = \frac{100}{1 + a * b^x} - (c + d * x + e * x^2) + \varepsilon_i$$

Donde  $Y_i$  es el porcentaje de producción, los parámetros  $a$  y  $c$  permiten al modelo ajustar el inicio de la producción,  $b$  es el parámetro que influencia el periodo de tiempo entre el inicio de la producción y el pico de la misma,  $d$  determina la declinación de la curva semanalmente después del pico de producción,  $e$  es la inclinación del decrecimiento final de la curva,  $x$  es la edad de la parvada y  $\varepsilon_i$  es el efecto residual.

Para ambos modelos (Adams-Bell y Lokhorst), la producción se expresa en términos de porcentaje, calculado como la relación entre el número de huevos puestos por semana y el número medio de gallinas por semana.

### 1.7.3. Modelo Logístico

Modelo propuesto por Nelder en 1961, la producción de huevos se expresa de la forma:

$$Y_t = a [1 + e^{(-ct)}]^{-d} e^{-xt}$$

Donde  $Y_t$  = tasa de producción de huevos en  $t$  semanas de puesta;  $a$  = valor asintótico de la producción de huevo en el pico de la puesta de huevos;  $c$  = tasa semanal de aumento de la producción de huevos;  $d$  = media semana inicial de la puesta de huevos;  $x$  = tasa de disminución de la producción después del pico (disminución de huevos/ponedora por semana).

### 1.7.4. Modelo de Mc Nally

Según Mc Nally (1971) la curva de producción de huevos se puede expresar como:

$$y_t = ax^b e^{[-cx + dx^{(0,5)}]}$$

Donde  $y_t$  = tasa de producción de huevos en  $x$  semanas de puesta;  $a$  = es la producción inicial de huevo,  $b$  es la tasa de incremento de la producción hasta el pico de producción,  $c$  es la tasa de decremento postpico y  $d$  es la raíz cuadrada del tiempo.

### 1.7.5. Modelo Compartimental

Propuesto por Mc Millan (1981) y la curva de producción de huevos se puede modelar de la siguiente manera:

$$y_t = a (e^{-xt} - e^{-bt})$$

Donde  $y_t$  = tasa de producción de huevos en  $t$  semanas de puesta;  $a$  = valor asintótico de la producción de huevo en el pico de la puesta de huevos;  $b$  = tasa del incremento semanal

en la puesta;  $x$  = tasa de disminución de la puesta postpico (disminución semanal huevos/ponedora).

### 1.7.6. Modelo de Yang (compartimental modificado)

Según Yang *et al.* (1989) el modelo que predice la curva de producción de huevos es:

$$y_t = \frac{ae^{-bx}}{1 + e^{-c(x-d)}}$$

Donde  $y_t$  = tasa de producción de huevos en  $x$  semanas de puesta;  $a$  = valor asintótico de la producción de huevo en el pico de la puesta;  $c$  = indicador recíproco de la variación en la semana de la producción del primer huevo;  $d$  = promedio de edad a la madurez sexual y  $b$  = tasa de disminución de la producción después del pico (disminución semanal huevos/día/ponedora).

## 1.8. Métodos estadísticos para la construcción de modelos matemáticos

Algunos métodos de extracción de datos y elementos que pueden ser útiles a la hora de la construcción de un modelo matemático han sido descritos por Cox (2005) y se describen a continuación:

### 1.8.1. Estadísticas ordinarias

El uso de estas estadísticas es muy útil al momento de empezar algún proyecto de extracción de datos y generalmente satisface las necesidades de entender la mecánica de las relaciones entre los diferentes datos. En los trabajos de extracción de datos estadísticos, un análisis estadístico completo de los grupos de datos existentes proporciona un profundo conocimiento acerca de cómo se agrupan los mismos, su grado de varianza, la cercanía de las relaciones bidimensionales o tridimensionales existentes que son generalmente expresadas a través de gráficos de dispersión y otras formas de ajuste de curvas.

Para una población de datos, el estadístico debe determinar las principales propiedades, las cuales incluyen: la media o valor promedio, la moda (el valor más frecuente), la mediana

(el valor medio cuando todas las observaciones se clasifican en orden ascendente o descendente), y la desviación estándar (cantidad de varianza alrededor de la media, es decir, una medida de si la distribución de los datos forma una amplia curva de campana alrededor de la media o una curva de campana estrecha alrededor de la misma, lo cual implicaría una mayor o menor uniformidad de los datos).

Un análisis estadístico exhaustivo de grandes bases de datos a menudo permite descubrir muchas relaciones inesperadas e interesantes. Además de las estadísticas descriptivas ordinarias presentadas en el párrafo anterior, un análisis estadístico más extenso permitiría encontrar una amplia gama de sutiles relaciones entre variables. Algunas de las técnicas estadísticas avanzadas utilizadas para un análisis mucho más amplio incluyen: un análisis de varianza, (que encuentra diferencia en el medio de una o más colecciones de datos), análisis de correlación (el cual encuentra el grado en el que los cambios de una variable son reflejados o relacionados por cambios en otra variable) y la regresión lineal (que encuentra la línea de tendencia entre diversas variables y, al hacerlo, proporciona un mecanismo para predecir los valores futuros de las variables relacionadas). En consecuencia, un estudio cuidadoso de los resultados de un análisis estadístico avanzado proporciona un profundo reconocimiento de relaciones estructurales y funcionales presentes en los datos (Di Riezo *et al.*, 2005).

Algunas de las ventajas de la estadística ordinaria son la prueba de métodos matemáticos que tiene muchas herramientas disponibles fáciles de usar y que son diseñadas para trabajar con grandes poblaciones de datos y su sensibilidad a los supuestos de distribución de la población, la formulación de hipótesis, el sesgo de los datos, los valores extremos y las correlaciones estadísticas.

### **1.8.2. Análisis de correlación y regresión**

- **Uso y pertinencia de correlaciones para medir asociación**

En el modelaje matemático, los temas de correlación y predicción están estrechamente relacionados. Las asociaciones entre dos o más variables se determinan mediante el llamado análisis de correlación, de allí surge el coeficiente que permite determinar la fuerza y el sentido de la relación lineal entre variables cuantitativas, dicho coeficiente es el

denominado coeficiente de correlación de Pearson, el cual da un grado de asociación entre las variables en estudio. (Celis De La Rosa y Labrada, 2014).

Una vez determinadas las correlaciones existentes entre las variables se procede a hacer un análisis de regresión lineal, este análisis cuantificara la relación funcional que existe entre dos o más variables, asimismo permite identificar el modelo o función que liga a las variables, estimar sus parámetros y, eventualmente, probar la hipótesis acerca de ellos. Una vez estimado el modelo es posible predecir el valor de la variable denominada variable dependiente en función de la o las otras variables independientes y dar una medida de la precisión, con que esa estimación se ha hecho, en este caso, ya se estima un modelo funcional para las variables (Di Riezo *et al.*, 2005).

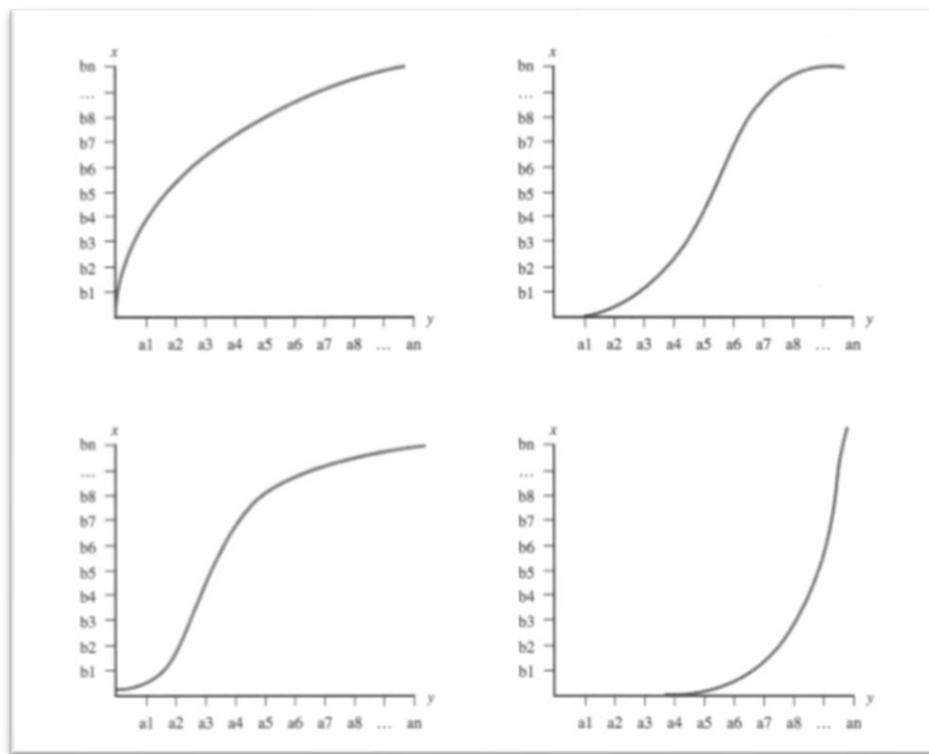
- **Ajuste no lineal de la curva de crecimiento**

A medida que se observa que ocurren cambios en los sistemas naturales que tienen componentes al azar, los cuales exhiben características de variabilidad de la población a largo plazo, o que han reforzado propiedades de retroalimentación, la regresión lineal dejará de proporcionar un modelo preciso del comportamiento del sistema. En estos casos, un modelo más robusto y preciso de los datos puede ser analizado mediante el ajuste de los atributos de una o más plantillas de curvas de crecimiento. El proceso de extracción de datos intenta encontrar los parámetros de coeficientes que mejor describen el espacio de datos. Como muestra la figura 1-2, las curvas de crecimiento son no lineales y presentan diferentes tipologías.

Más exactamente, en el crecimiento de las ponedoras se observan las características sigmoidales, según Ricklefs (1968), la curva resultante de la expresión del crecimiento de las aves puede ser descrita empíricamente por tres parámetros: magnitud, forma y tasa. La magnitud se refiere a que el ave presentará un aumento neto de peso corporal durante su periodo de crecimiento, el cuál debe ser igual al peso corporal adulto, la forma, que es referida a la expresión como un todo del aumento de masa en el tiempo y que presenta características en forma de S, con una pendiente de la curva en crecimiento que aumenta hasta un punto de inflexión y luego disminuye; la ubicación del punto de inflexión en la curva de crecimiento es un índice útil de variación en la forma de las curvas. Por su parte

la tasa, es la velocidad a la que se alcanza el peso adulto y se caracteriza por ser la cualidad más variable en el crecimiento de las aves.

**Figura 1-2:** Tipologías de curvas de crecimiento<sup>1</sup>.

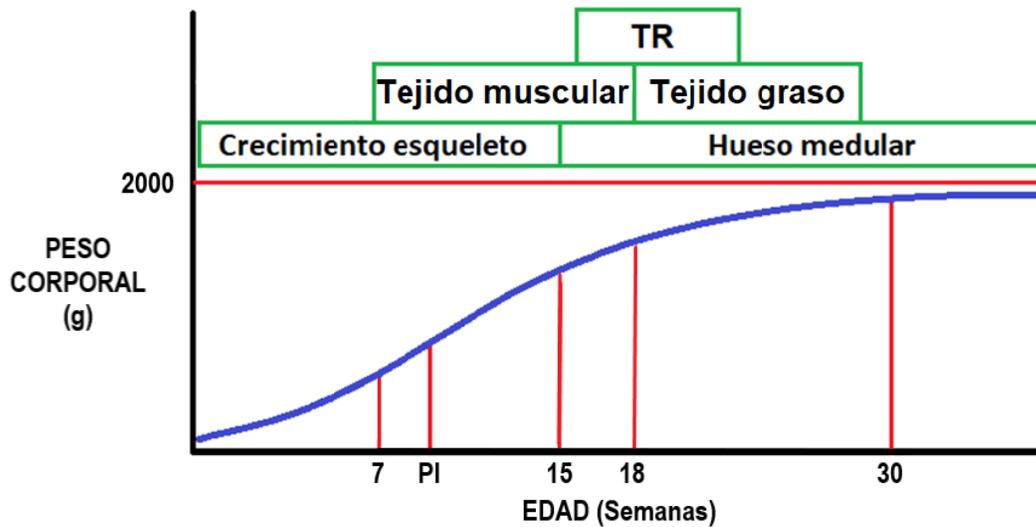


1.Cox, 2005.

Por otra parte, en el crecimiento no lineal visto en función del tiempo se han identificado tres etapas (Aguilar *et al.*, 1983): la primera, como una fase de crecimiento exponencial, caracterizada por procesos multiplicativos (hiperplasia), luego, una etapa intermedia o de transición consistente en un crecimiento tanto hiperplásico como hipertrófico, por último una tercera fase de crecimiento inhibido o amortiguado, donde se observan aumentos en el tamaño celular (hipertofia) y acumulación de materiales extracelulares, con la tendencia de alcanzar un equilibrio o estabilización en la adultez del ave.

En la figura 1-3 se observa una curva de crecimiento sigmoideal y algunas de las características del crecimiento de las ponedoras vistas en este capítulo como el acúmulo de componentes estructurales (tejidos muscular, óseo y graso) que caracterizan el desarrollo del ave de postura.

**Figura 1-3:** Curva de crecimiento sigmoide y acúmulo de componentes en aves de postura.<sup>1</sup>



1. TR: Tracto reproductivo; PI: Punto de inflexión. Adaptado de Hy Line, (2018).

## 1.9. Criterios para la selección de modelos matemáticos

Los modelos, son representaciones matemáticas de mecanismos que gobiernan fenómenos naturales que no son reconocidos, controlados o comprendidos en su totalidad y son una abstracción de la realidad (Tedeschi, 2004). En este contexto, los modelos matemáticos se convierten en herramientas de gran utilidad para comprender y analizar procesos naturales y de la cotidianidad orientados a la toma de decisiones para lograr un objetivo en particular.

Los modelos matemáticos se ponen a prueba para demostrar la exactitud y precisión de sus predicciones para de esta forma promover su aceptación y utilidad; en consecuencia, los análisis estadísticos son un paso indispensable en la fase de evaluación del modelo. La exactitud mide qué tan cerca están los valores predichos a los valores verdaderos u observados en campo, mientras que la precisión mide qué tan cerca están los valores predichos del modelo individual uno dentro del otro; en otras palabras, la exactitud es la

capacidad del modelo para predecir los valores correctos y la precisión es la capacidad del modelo para predecir valores similares de una manera consistente (Tedeschi, 2004).

Existen varias técnicas para la comparación de modelos matemáticos, las cuales se deben combinar para analizar su precisión y exactitud. Es posible realizar un análisis de los valores residuales del modelo matemático mediante pruebas como el coeficiente de correlación ( $r$ ), el cuadrado medio del error (CME o MSE por sus siglas en inglés), el sesgo medio (Mean Bias, MB), el estadístico de eficiencia del modelo (MEF por sus siglas en inglés) el cuadrado medio del error de predicción (MSEP por sus siglas en inglés) además de estadísticos que permiten la comparación entre modelos matemáticos como el coeficiente de determinación del modelo ( $R^2$ ), coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{\text{Ajustado}}$ ), el criterio de información de Akaike (AIC), y el criterio de información Bayesiano (BIC).

### 1.9.1.El cuadrado medio del error (MSE)

El cuadrado medio del error va a expresar la varianza residual originada a partir del ajuste del modelo a tratar y al comparar varios modelos, cuanto menor es su valor, más adecuado es el modelo (Narinc *et al.*, 2017).

$$CME(MSE) = \frac{SSE(\theta)}{n - p}$$

Donde:

$SSE$ : es la suma de cuadrados del error.

$\theta$ : es el vector de las estimaciones de los parámetros de los modelos.

$n$ : es el número de observaciones.

$p$ : es el número de parámetros del modelo.

### 1.9.2.Sesgo medio (Mean bias)

Es un valor que mide la exactitud del modelo, su cálculo se basa entre la diferencia entre los valores observados y los predichos por el modelo matemático; un modelo puede tener un valor bajo de MB si los puntos de datos están distribuidos uniformemente alrededor de la línea  $Y=X$  (Tedeschi, 2004).

$$MB = \frac{\sum(Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)}{n}$$

Donde:

$Y_i$ : es el  $i$ -ésimo valor observado.

$f(X_1, \dots, X_p)_i$ : es el  $i$ -ésimo valor predicho por el modelo.

$n$ : es el número de observaciones.

### 1.9.3. Estadístico de eficiencia del modelo (MEF)

Es la variación explicada por la recta de regresión ajustada dada entre los valores observados y los predichos por el modelo matemático (Medina *et al.*, 2010; Tedeschi, 2004).

$$MEF = 1 - \frac{\sum(Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

Donde:

$Y_i$ : es el  $i$ -ésimo valor observado.

$f(X_1, \dots, X_p)_i$ : es el  $i$ -ésimo valor predicho por el modelo.

$\bar{Y}$ : es el promedio de los valores observados.

### 1.9.4. Cuadrado medio del error de predicción (MSEP)

Este estadístico evalúa la precisión de la regresión lineal entre los valores observados y los valores predichos por el modelo matemático (Tedeschi, 2004).

$$MSEP = \frac{\sum(Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)^2}{n}$$

Donde:

$Y_i$ : es el  $i$ -ésimo valor observado.

$f(X_1, \dots, X_p)_i$ : es el  $i$ -ésimo valor predicho por el modelo.

$n$ : es el número de observaciones.

### 1.9.5. Coeficiente de determinación del modelo ( $R^2$ )

Expresa la proporción de la variación total observada en los datos muestrales que fue explicada por el modelo ajustado, de tal manera que cuando el  $R^2$  tenga un valor más cercano a la unidad, mejor será el ajuste del modelo (Posada y Noguera, 2007; Narinc *et al.*, 2017).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE(\theta)}{TSS}$$

Donde:

$SSE(\theta)$ : es la suma de cuadrados del error.

$TSS$ : es la suma de cuadrados totales.

### 1.9.6. Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ajustado)

Este coeficiente mide el porcentaje de variación de la variable dependiente (al igual que el coeficiente de determinación) en un modelo de regresión lineal, pero teniendo en cuenta el número de variables incluidas en el modelo. Este coeficiente se utiliza en la regresión múltiple para ver el grado de intensidad o efectividad que tienen las variables independientes en explicar la variable dependiente. En palabras más simples, el  $R^2$  ajustado nos dice qué porcentaje de variación de la variable dependiente es explicado colectivamente por todas las variables independientes.

El uso de este coeficiente se justifica en la medida que añadimos variables a un modelo, el coeficiente de determinación sin ajustar tiende a sobreestimar el poder predictivo del modelo (Melillanca, 2018), incluso cuando la contribución marginal de cada una de las nuevas variables añadidas no tiene relevancia estadística. Por lo tanto, al añadir variables al modelo, el coeficiente de determinación podría aumentar y podríamos pensar, equivocadamente, que el conjunto de variables elegido es capaz de explicar una mayor parte de la variación de la variable independiente, este problema es conocido como “sobreestimación del modelo”.

Sabemos que a medida que vamos incluyendo variables en el modelo, el coeficiente de determinación aumenta, aunque las variables que incluyamos no sean significativas. Esto supone un problema, ya que no debemos olvidar que la inclusión de nuevas variables

provee un aumento en el número de parámetros a estimar para el modelo, es allí donde se vuelve útil la validación de este, por medio del coeficiente de determinación ajustado. El coeficiente se expresa de la siguiente manera (Melillanca, 2018):

$$R^2_a = 1 - \left( \left( \frac{n-1}{n-k-1} \right) \right) * (1 - R^2)$$

Donde:

$R^2_a$ : R cuadrado ajustado o coeficiente de determinación ajustado.

$R^2$ : R cuadrado o coeficiente de determinación.

$n$ : Número de observaciones de la muestra.

$k$ : Número de parámetros del modelo.

Teniendo en cuenta que  $1 - R^2$  es un número constante y que  $n$  es mayor que  $k$ , a medida que añadimos parámetros al modelo, el cociente entre paréntesis se hace más grande. Consecuentemente, también el resultado de multiplicar este por  $1 - R^2$ . Con lo cual vemos que la fórmula está construida para ajustar y penalizar la inclusión de coeficientes en el modelo. Además, el ajuste empleado en la fórmula anterior nos permite también comparar modelos con distinto número de variables independientes ya que la fórmula ajusta el número de variables entre un modelo y otro y nos permite realizar una comparación homogénea (Srivastava et al, 1995).

El coeficiente de determinación por sí solo no es aconsejable para elegir modelos matemáticos, ya que tiende a aumentar cuando se aumenta el número de parámetros del modelo (Buchwald, 2007); un modelo con más parámetros siempre resultará en un error residual más bajo (France *et al.*, 2013). Debido a esto el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) permite comparar modelos entre si ya que también penaliza la complejidad del modelo teniendo en cuenta el número de parámetros en su cálculo.

### **1.9.7. Criterio de información de Akaike (AIC)**

Es una medida de la robustez de la calidad de ajuste que estima el valor esperado de la información de Kullback - Leibler (K-L) a través de:

$$AIC = -2L(\theta) + 2P$$

Donde:

$P$ : es el número de parámetros del modelo a ser estimados.

$L(\Theta)$ : es el valor máximo de la función de verosimilitud del modelo en el punto  $\Theta$  (Akaike, 1974).

Cuanto menor sea el valor de AIC mejor es el ajuste de un modelo.

### 1.9.8. Criterio de información Bayesiano (BIC)

$$BIC = K \ln(n) - 2 \ln(L)$$

Donde:

$K$ : es el número de parámetros.

$L$ : es el valor de máxima verosimilitud.

$n$ : es el número de datos.

Igual que el AIC se basa en la máxima verosimilitud como método de medida de la bondad de ajuste. La verosimilitud,  $p(y|\theta K)$  es la probabilidad de los datos condicionada a los  $k$  parámetros del modelo. Aquí vemos que la medida de la complejidad incorpora tanto  $k$  como  $\ln(n)$ . Esto independiza al indicador del tamaño muestral y hace que penalice más la complejidad que el AIC. Al igual que con el AIC, cuanto menores sean los valores de BIC el modelo presentara un mejor ajuste (Juárez *et al*, 2019).

Los anteriores estadísticos nos permiten determinar cuál es el modelo matemático con mayor capacidad de ajuste a los datos y poder así describir algún proceso de interés. Se busca un balance entre la complejidad del modelo y su capacidad de ajuste a los datos, al comparar varios modelos con varios parámetros, la metodología usada para tal comparación es la función de máxima verosimilitud (likelihood), ella permite seleccionar el modelo que se ajusta mejor a los datos pero no penaliza su complejidad (Agudelo *et al.*, 2007), es por ello que se utilizan los criterios de información de Akaike y Bayesiano, que además incorporan una penalización por complejidad, incorporan el log de la máxima verosimilitud (Log-likelihood o log Lik), sustrayendo un término proporcional al número de parámetros ( $k$ ) (Posada y Noguera, 2007).

El coeficiente de determinación por sí solo no es aconsejable para elegir modelos matemáticos debido a su implicación en sobreajuste predictivo a los datos (Buchwald, 2007); un modelo con más parámetros siempre resultará en un error residual más bajo (France *et al.*, 2013). Debido a esto el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) permite comparar modelos entre si ya que también penaliza la complejidad del modelo teniendo en cuenta el número de parámetros en su cálculo. Por otra parte, el cuadrado medio del error de predicción (MSEP) es usado como una medida del grado de discrepancia o error entre los modelos al ajustarse a los datos, López *et al.* (2000) y Torres *et al.* (2012) lo catalogan como unos de los mejores criterios para la selección de modelos no lineales.

## **2. Uso de modelos matemáticos de crecimiento y producción de huevos en sistemas de producción comercial de ponedoras marrón**

### **2.1. Resumen**

Se realizó un modelaje matemático del crecimiento y curva de producción de huevos de quince lotes comerciales de ponedoras de la estirpe Hy Line Brown, ubicadas en el municipio de Choachí Cundinamarca, mediante el procedimiento NLIN de SAS 9.4 se usaron los modelos no lineales de crecimiento: Gompertz, Logístico, EVF, Von Bertalanffy, Richards y la versión generalizada de Michaelis-Menten para describir el crecimiento de las ponedoras, y los modelos de producción de huevos: Yang (Compartimental modificado), Mc Nally, Lokhost, Compartimental y Adams-Bell para describir el periodo de postura de las ponedoras, los modelos que presentaron los mejores ajustes a las curvas de crecimiento y producción de huevos fueron Gompertz y Yang respectivamente, caracterizados por tener menores valores en AIC, BIC, mayores  $R^2_{aj}$ , MEF y menores valores de MSEP Y MSE. Posteriormente se realizó una parametrización de cada modelo seleccionado para describir las características de crecimiento y producción de las ponedoras Hy Line Brown en el contexto comercial y por último se presentan correlaciones de tales características, además de ecuaciones de predicción del comportamiento productivo del ave.

### **2.2. Introducción**

El uso de modelos matemáticos de simulación de las dinámicas de los procesos biológicos de crecimiento y de producción de huevos representa una oportunidad para llevar a cabo

un monitoreo y evaluación sistémica de los sistemas comerciales de producción. El fenómeno biológico de crecimiento y desarrollo de una estirpe de ponedoras representa las bases de la producción de huevos, por tal motivo adquiere una importancia estratégica por los efectos que produce sobre el desempeño en producción de huevos y constituye la base para realizar acciones correctivas orientadas a potencializar el mérito genético de cada estirpe en un contexto específico de producción. La modelación del crecimiento permite también analizar características de interés durante el ciclo de vida de una ponedora a nivel comercial, incluyendo su influencia sobre la producción de huevos y su análisis sistémico mediante la modelación de curvas de producción, procesos que en conjunto contribuyen a la toma de decisiones estratégicas por parte de los productores.

El mejoramiento de la productividad y sostenibilidad de los sistemas de producción de ponedoras requieren de un entendimiento de su funcionalidad, de la predicción de los procesos y su evaluación en el tiempo, para lo cual los modelos matemáticos contribuyen al entendimiento de la complejidad de la relación entre el ave y el ambiente que la rodea. En este sentido, la producción comercial de huevos se realiza de acuerdo a unas curvas de crecimiento recomendadas por la empresa de cría productora de la estirpe, la cual intenta optimizar la respuesta económica de la ponedora durante el proceso de producción de huevos; sin embargo, esta información de referencia tiene que ser verificada y validada en condiciones específicas de producción. En el presente capítulo, se realiza un análisis sistémico mediante el uso de modelos matemáticos para contextualizar los patrones de crecimiento y producción de huevos de una estirpe comercial de huevos marrón.

### **2.3. Materiales y métodos**

El estudio comprendió dos momentos. El primer momento correspondió a la selección de la información de una empresa comercial de producción de huevos marrón basada en la estirpe Hy line Brown para comparar varios modelos no lineales de crecimiento y producción de huevos y estimar el mejor modelo que describe estas funciones de producción. Una vez seleccionado el mejor modelo de crecimiento y de producción de huevos, se analizaron sus diferentes propiedades biológicas a partir de los parámetros estimados, con una aproximación a los efectos de arrastre del crecimiento, sobre la producción de huevos en ciclos comerciales de producción.

### 2.3.1. Comparación de las funciones de crecimiento y de producción de huevos en ponedoras marrón

- Fuente de datos

Los datos de crecimiento y producción de huevos marrón de la estirpe Hy Line Brown usados en este estudio fueron suministrados por una empresa comercial y comprendieron el análisis de 15 lotes de aves producidos durante el período comprendido entre septiembre de 2008 y octubre de 2018. El número de aves encasetas para cada uno de los lotes se observa en la tabla 2-1. La empresa está ubicada en el municipio de Choachí, Cundinamarca, la altitud promedio de la ubicación de los galpones es de 1826 msnm, y la temperatura ambiental es de 18°C, datos que se ajustan a las expectativas de producción de huevos en un ambiente de termoneutralidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Universidad Nacional de Colombia [UNAL], 2018).

**Tabla 2-1:** Número de aves encasetas por lote.

Lote	Número de aves encasetas	
	Levante	Producción
1	4073	3609
2	8160	7880
3	10200	10078
4	11220	11072
5	11220	11130
6	8160	8128
7	10200	10100
8	8160	8089
9	10197	10042
10	11200	11043
11	8400	8167
12	10200	10026
13	8160	7916
14	10300	10159
15	10200	10000

La empresa origen de la información se caracteriza por realizar el ciclo completo de vida de la ponedora con una tipología de producción avícola en piso con galpones abiertos por los costados. Las pollitas de un día de edad provienen de una incubadora comercial y son alojadas, previo un periodo de desinfección y vaciado sanitario de 1 mes en círculos dentro del galpón de cría. Las criadoras se mantienen durante la primera semana entre 35 - 36 °c

con disminuciones graduales por semana hasta alcanzar los 21°C a los 30 días de edad. Las densidades de las aves por m<sup>2</sup> en todo el periodo de levante y desarrollo se ajustan semanalmente. Se maneja un plan de vacunación con 24 vacunas y el despique realizado a la semana 6 de edad. El traslado de las aves al galpón de producción se realiza entre las semanas 16 y 17.

El control de peso corporal de las pollitas se realiza semanalmente abarcando del 3% al 5% de las aves, las cuales son seleccionadas al azar durante la cría en los círculos, para posteriormente realizar los pesajes al azar en determinadas partes del galpón, cubriendo la totalidad del área ocupada por las aves. La alimentación en la etapa de cría-levante y desarrollo se realiza con cuatro dietas completas suministradas por empresas de balanceados comerciales a saber: semanas 1 y 2 alimento preiniciador de pollitas, semanas 3 –10 con pollitas iniciación, semana 11 – 15 alimento de levante y semanas 16 a 18-alimento prepico. Los primeros días de vida del ave, se suministra alimento varias veces al día, y se va disminuyendo el número de veces hasta alcanzar un solo suministro diario, alrededor de la semana 6 de edad.

En la etapa de producción de huevos, se manejan densidades de 4 – 5 aves por nido y de 9 aves por m<sup>2</sup> en el galpón. En esta etapa se mantienen las aves hasta la semana 80 de vida, momento en el cual son vendidas como aves de descarte. Durante la etapa de producción, el alimento se suministra una vez al día a las 5 de la mañana con dietas comerciales de prepico que van desde el 5% de producción de huevos ave/día hasta que la producción baje del 90%, para seguir con una dieta fase 1 hasta la salida del lote de aves. En esta etapa de producción se vacunan las ponedoras cada 6 semanas contra Newcastle o Bronquitis infecciosa de acuerdo con la serología presentada. Se hace la recolección de huevos 4 veces al día, 3 veces en horas de la mañana y 1 en la tarde, además se realiza un pesaje de las aves quincenalmente nuevamente con un 3 a 5% del total de aves dentro del galpón. La densidad de comederos y bebederos es manejada de acuerdo con los requerimientos de la guía de manejo de la estirpe.

Dado que los datos e información provenían de una fuente secundaria, el criterio para hacer la selección de cada lote se obtuvo de acuerdo con las preguntas de análisis sugeridas por Torres, Paz y Salazar (2019), teniendo en cuenta: la pertinencia de los datos, su actualidad, la veracidad y confianza de la fuente de origen, las cuales permitían

garantizar una adecuada gestión de los datos. La selección de los lotes se realizó mediante un muestreo no probabilístico y éstos se caracterizaban por presentar todos sus datos de crecimiento y producción completos con la temporalidad semanal en la cual el productor siguió las recomendaciones de la empresa productora de la estirpe.

Una vez seleccionados los lotes de ponedoras para el análisis, se procedió a incorporar la dinámica de la información comercial en una base de datos en una hoja electrónica de las siguientes variables:

- Peso corporal semanal, g

Calculado como el promedio de los pesos de las aves pesadas representativamente en cada lote tanto en etapa de levante como de producción.

$$\frac{\sum \text{peso de aves pesadas}}{\# \text{aves pesadas}}$$

- Uniformidad (%):

$$\left(1 - \left(\frac{\# \text{animales}(10\% -)}{\# \text{animales pesados}} + \frac{\# \text{animales}(10\% +)}{\# \text{animales pesados}}\right)\right) \times 100$$

- Consumo de alimento acumulado (kg /ave)

- Conversión alimenticia semanal en levante (kg de alimento/kg de peso):

$$\frac{\text{consumo de alimento semana (kg)}}{\text{ganancia de peso semana (kg)}}$$

- Conversión alimenticia acumulada en producción (Kg de alimento/docena de huevos):

$$\frac{\text{kg de alimento consumido (acumulado)}}{\text{docenas de huevo producido (acumuladas)}}$$

- Porcentaje de producción semanal (%)

$$\frac{\# \text{huevos producidos semana}/7}{\# \text{saldo de aves lote}} \times 100$$

- Masa de huevo acumulada ave/alojada (Kg/ave)  

$$\frac{\#Huevos\ ave\ alojada * Peso\ promedio\ huevo\ (g)}{1000}$$
- Número de huevos ave alojada:  

$$\frac{\# huevos\ acumulados\ (semana\ x)}{\# aves\ encasetadas}$$
- Edad al 50% de producción ave - día
- Edad al pico de producción ave - día.
- Semanas por encima del 90% de producción ave-día.

La base de datos se diseñó y desarrolló usando el programa Microsoft Excel® organizando las variables para su exportación al programa estadístico SAS 9.4®.

- **Modelos no lineales**

Se utilizaron seis (6) modelos matemáticos de crecimiento con características sigmoidales, con tres y cuatro parámetros y con puntos de inflexión fijos y móviles. Los modelos de crecimiento de tres parámetros a evaluar fueron: Gompertz, Logístico, EVF y Von Bertalanffy, los cuales se caracterizan por presentar puntos de inflexión fijos y al 36.7, 50, 63.2 y 29,6% del peso asintótico del animal respectivamente. Los modelos de Richards y Michaelis-Menten fueron incluidos en el estudio y son modelos con 4 parámetros y punto de inflexión móvil, ya que incluyen un parámetro que da forma a la curva sigmoidal, ajustando la posición del punto de inflexión a la dinámica dada por los datos observados. Estos modelos con sus más importantes propiedades se describen en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Modelos de crecimiento comúnmente usados en aves de corral.<sup>1</sup>

Modelo de crecimiento	Ecuación	Edad al punto de inflexión	Peso al punto de inflexión
Logístico	$Y = a / (1 + \exp(-b(x - c)))$	$c$	$a/2$
Gompertz	$Y = a * \exp(-\exp(-b(x - c)))$	$c$	$a/\exp(1)$

**Tabla 2-2:** (Continuación).

Modelo de crecimiento	Ecuación	Edad al punto de inflexión	Peso al punto de inflexión
Von Bertalanffy	$Y = a(1 - \exp(-b(x + c)))^3$	$-c + \left(\frac{\text{Ln}(3)}{b}\right)$	$\left(\frac{8}{27}\right) * a$
EVF	$Y = a(1 - \exp(-\exp(b(x - c))))$	$c$	$a * \left(1 - \left(\frac{1}{e}\right)\right)$
Richards	$Y = a(1 + b * \exp(-c * x)^{-\frac{1}{d}})$	$-\frac{1}{c} * \text{Ln} \frac{d}{b}$	$\frac{a}{\sqrt[d]{d + 1}}$
Michaelis-Menten	$Y = (a * b^c + d * x^c)/(b^c + x^c)$	$b((c - 1)/(c + 1))^{\frac{1}{c}}$	$\left(\left(1 + \frac{1}{c}\right) * a + \left(1 - \frac{1}{c}\right) * d\right)/2$

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

El análisis de la curva de producción de huevos se realizó mediante mediante cinco (5) modelos matemáticos a saber: Yang, Mc Nally, Lokhorst, compartimental y Adams-Bell; los anteriores modelos difieren en el número de parámetros variando desde 3 hasta 5 parámetros, modelos como el compartimental consta de tres parámetros, Yang, Mc Nally y Adams-Bell tienen cuatro parámetros y el modelo de Lokhorst consta de cinco, siendo el modelo más complejo. La descripción de las principales propiedades de estos modelos matemáticos se presenta en la tabla 2-3.

**Tabla 2-3:** Modelos de producción de huevos comúnmente usados en aves de corral.<sup>1</sup>

Modelo de producción	Ecuación
Yang	$Y = (a * \exp(-b * x))/(1 + \exp(-c * (x - d)))$
Mc Nally	$Y = (a * x^b) * \exp(-c * x + d * x^{0.5})$
Adams-Bell	$Y = 100 * \left(\frac{1}{1 + a^{x-b}}\right) - c * x + d$
Lokhorst	$Y = \left(\frac{100}{1 + a * b^x}\right) - (c + d^x + e * x^2)$
Compartimental	$Y = a * (\exp(-c * x) - \exp(-b * x))$

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después

del pico,  $d$ = raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst  $a$  y  $c$  = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta,  $b$ = influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción,  $d$  y  $e$ = son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental  $a$ = pico de producción de huevos,  $b$ = tasa de disminución de la producción de huevos y  $c$ =tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell  $a$ = variación en la madurez sexual,  $b$ = tiempo a la madurez sexual,  $c$ = caída de la puesta y  $d$ = intercepto de la caída.

- **Ajuste y comparación de los modelos no lineales**

El modelaje para cada uno de los modelos no lineales descritos y en cada uno de los 15 lotes se realizó mediante el procedimiento NLIN del programa estadístico SAS 9.4 con el algoritmo de Levenberg-Marquardt; en el caso de los modelos de crecimiento, estos fueron ajustados mediante la utilización de los pesos promedio semanales de las aves de cada uno de los lotes analizados, en cuanto al modelaje de producción de huevos, se ajustaron los modelos matemáticos a los porcentajes de producción semanales presentados en cada lote motivo de estudio. Los criterios de decisión usados para evaluar el desempeño de los modelos matemáticos se realizaron de acuerdo con la técnica de análisis de residuales basados en la premisa de adecuación de modelos matemáticos en términos de exactitud y precisión descrita por Tedeschi, (2004), además de evaluarlos con el criterio de información de Akaike (AIC) y el de información Bayesiano (BIC). Estos comparan la robustez de cada modelo mediante la bondad de ajuste discriminando entre modelos con diferente número de parámetros.

De otra parte, mediante el método recomendado por Tedeschi, (2004) el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{ajs}$ ) ofrece una medida de la varianza de los datos que es explicada por el modelo matemático y ajustado también por el número de parámetros. Igualmente, el análisis de los residuales de la modelación tiene en cuenta los siguientes estadísticos: el cuadrado medio del error de predicción (MSEP), el error cuadrático medio (MSE), el sesgo medio (MB) y el estadístico de eficiencia del modelo (MEF). El MSEP evalúa la precisión de cada modelo determinando la cantidad de error derivado de una regresión lineal entre los datos observados y los predichos por el modelo matemático, mientras que el MSE proporciona un estimado de la varianza que tiene el error de cada modelo. Para hacer que el MSEP más pequeño y sea más fácil de interpretar, se utilizó la raíz cuadrada del MSEP generando el estadístico raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSEP), mientras que con el estadístico MB se evaluó la exactitud de cada modelo en donde valores cercanos a cero presentan mejores aproximaciones a los datos reales,

con valores positivos cuando el modelo subestima los datos y valores negativos cuando los sobreestima. El estadístico MEF estima un valor de la variación ajustada del modelo matemático a la recta de regresión lineal entre los valores observados y los predichos.

### **2.3.2. Parametrización del mejor modelo matemático de crecimiento y de producción de huevos**

Una vez seleccionado el modelo matemático para describir el crecimiento de las ponedoras se procedió a interpretar cada uno de los parámetros del modelo seleccionado. La parametrización permite reconocer puntos críticos de interés zootécnico en el manejo de la producción comercial de ponedoras (Agudelo *et al.*, 2007). Los parámetros utilizados para describir y evaluar el fenómeno de crecimiento fueron:

**Punto de inflexión:** edad en la cual se realiza un cambio de incremento o decrecimiento del peso corporal con respecto a la edad. Allí termina la fase de aceleración e inicia la fase de desaceleración del crecimiento y corresponde al instante donde se logra el mayor incremento de peso corporal por unidad de tiempo es decir se estima la tasa máxima de crecimiento absoluta (Aguilar, 2010).

**Peso adulto:** este parámetro muestra el proceso de maduración funcional postnatal del crecimiento de la ponedora y en general se alcanza cuando el ave se encuentra en el pico de producción y en donde la relación de composición lípido : proteína es constante y está asociada con la expresión de la estirpe en un contexto específico de producción.

El peso adulto es el único período del ciclo de vida del animal donde el tamaño corporal normal o potencialmente no cambia y en consecuencia representa el tamaño corporal genético del animal. Una completa definición del peso adulto provendría de funciones asociadas al consumo de alimento en un amplio rango de pesos corporales adultos (Fitzhugh y Taylor, 1971).

Una definición del peso corporal adulto hace relación al peso corporal que normalmente es alcanzado cuando el esqueleto madura y el ave mantiene un estado de equilibrio, en una zona de termoneutralidad, libre de enfermedades y con una composición corporal de grasa de alrededor del 20% (Fitzhugh y Taylor, 1971)

**Tasa de madurez:** Es el cociente entre el peso en el tiempo  $t$  y el peso adulto, si el valor del mismo se multiplica 100 se obtiene el porcentaje del peso adulto que se ha alcanzado en el tiempo  $t$ . Este parámetro fue propuesto por Taylor (1965).

**Tasa de maduración:** es una fuerza que regula el crecimiento del ave luego del punto de inflexión, esta inversamente relacionada con el peso asintótico del animal.

**Proporción de crecimiento:** es un parámetro con dominio sobre la parte proactiva de la curva de crecimiento, es decir, luego del punto de inflexión y cuando la línea tangente a este punto se separa de la curva de crecimiento. Este parámetro está influenciado por la tasa de maduración y la cuantifica en el tiempo. Se calcula como  $1/b$ , siendo  $b$  la tasa de maduración.

**Fase lag o fase de estructuración (valor delta):** es definida como el intercepto con el eje  $x$  de la tangente que pasa por el punto de inflexión, cuando  $Y=0$  (Perni *et al.*, 2005). Desde un punto de vista biológico, el parámetro está asociado en el tiempo con la culminación de la fase de adaptación al ambiente (fase lag) e indicará que el ave al finalizar esta fase de estructuración tiene la capacidad de expresar su potencial genético con unas mayores tasas de crecimiento (Aguilar, 2010; Martínez *et al.*, 2010).

**Valor teta:** El parámetro surge de determinar las tasas de crecimiento de los animales en condiciones naturales (Kirkwood y Webster, 1984) y su influencia sobre los requerimientos energéticos. El estadístico parte del concepto que, en el crecimiento del ave, los intervalos de maduración son funciones constantes de sus pesos corporales asintóticos o pesos alcanzados a su madurez fisiológica elevados a un coeficiente alométrico de 0.25 ( $A^{0.25}$ ), lo cual permite comparar diferencias inter e intraespecíficas de los animales en el proceso de maduración. El concepto se deriva del concepto de edad metabólica propuesto por Taylor (1968) donde se establece un valor denominado teta ( $\Theta$ ) indicativo de los días metabólicos en el transcurso de vida de un animal desde su concepción y que nos darán entonces una noción de la edad metabólica del mismo; la cual va relacionada con el tiempo ( $t$ ) medido como los días transcurridos desde la concepción del animal hasta algún estado de madurez denominada  $u$  y hasta su peso asintótico, donde  $u = W/A$ . dando la expresión:

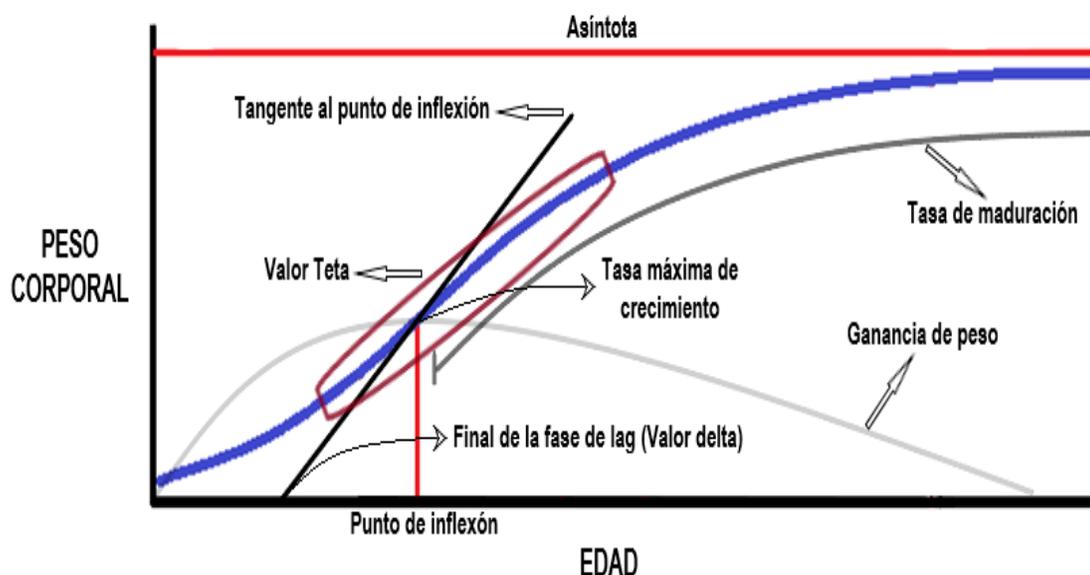
$$\theta = t.A^{-1/4}$$

Kirkwood y Webster (1984) proponen dos expresiones para medir un índice de madurez postnatal independientes de la talla del animal: la edad metabólica ( $\Theta$ ), y el tiempo metabólico transcurrido desde el 25% hasta el 75% de madurez de cualquier animal ( $\Theta_{25-75}$ ). Esto dado a que los tiempos de maduración están relacionados alométricamente con el peso adulto ( $A^{0.25}$ ) debido a la existencia de restricciones en las tasas metabólicas, las cuales por el contrario están relacionadas con el peso metabólico que se cuantifica alométricamente con el coeficiente de 0.75.

El tiempo transcurrido desde el 25 al 75% de madurez es elegido debido a que cubre un periodo de rápido crecimiento postnatal, en el cual las ganancias diarias de peso corporal son prácticamente constantes y el rango de maduración está relacionado con la funcionalidad del animal. Este estadístico permite determinar qué tan precoz es un animal respecto a otro, valores numéricos menores en tal comparación significarían una mayor precocidad (Kirkwood, 1991).

En la figura 2-1 se observan los algunos de los parámetros de crecimiento característicos de una curva de tipo sigmoideo.

**Figura 2-1:** Parámetros de importancia en el crecimiento de tipo sigmoideo.



Los parámetros utilizados para describir y evaluar el fenómeno de producción fueron:

**Pico de producción:** es el valor más alto en porcentajes de producción que es alcanzado por las aves en su etapa de puesta, luego de este nivel de producción empieza a decrecer la curva de postura.

**Tasa de disminución de la puesta:** son el número de huevos puestos que empiezan a disminuir semanalmente tras haber alcanzado el máximo nivel de producción o pico de producción (France *et al.*, 2013).

**Persistencia:** es un indicador no muy bien definido hasta ahora, está relacionado con el mantenimiento de un alto nivel de producción de huevos luego del pico de producción y la longevidad del ave, algunos autores lo definen como: el número de semanas en las cuales la producción permanece constante luego de alcanzar el pico de producción (Grossman *et al.*, 2000), se ha asociado a nivel de campo con niveles de producción de huevos por encima del 90 % y O'shea (2019) localiza este nivel de producción generalmente hasta la semana 50 de vida de las ponedoras, para luego disminuir constantemente; por su parte Monzo (2018) establece un indicador de la persistencia del pico de puesta como el promedio del porcentaje semanal de las diez semanas posteriores a la semana en que se ha alcanzado el pico máximo de producción.

### **2.3.3. Correlaciones y regresiones entre parámetros de la etapa de levante y de producción de huevos**

Se tomaron un total de 61 variables de producción provenientes de los 15 lotes analizados a saber: pesos semanales, conversiones alimenticias, consumos acumulados, huevos por ave alojada, masas de huevo, porcentajes de producción semanales y variables de crecimiento y producción derivadas de la modelación matemática, luego, mediante el programa estadístico SAS 9.4 usando el método de correlaciones de Pearson se realizaron matrices de correlación para determinar que variables del crecimiento tienen alguna asociación con la expresión productiva de la ponedora; posteriormente se realizaron regresiones lineales múltiples para establecer ecuaciones de predicción de parámetros de la producción de huevos de las ponedoras, las regresiones lineales múltiples se llevaron a cabo mediante el método stepwise para selección de variables, asimismo fueron comprobados los supuestos del modelo a saber: a) linealidad mediante análisis gráfico

(Anexo A), b) independencia de los residuales mediante el estadístico Durbin-Watson, c) homocedasticidad mediante un análisis gráfico evaluando la tendencia de los datos residuales y que su variación sea constante, d) supuesto de normalidad de los residuos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y gráficos de normalidad tipo QQ y e) el supuesto de no colinealidad mediante el factor de inflación de la varianza y la tolerancia.

## **2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.4.1. Modelaje de crecimiento en ponedoras marrón**

Los resultados del modelaje de cada lote en relación con los modelos de crecimiento evaluados, con sus parámetros y su significancia de acuerdo con los criterios de decisión estadístico se observan en la tabla 2-4, los pesos corporales utilizados para el ajuste de los modelos presentan una temporalidad semanal extraída de registros de la etapa de levante y convertida en días para tal ajuste.

Tres modelos de crecimiento se caracterizaron por obtener los valores más bajos de AIC y BIC, presentar los más altos  $R^2_{aj}$ , los más bajos errores del modelaje (RMSEP y MSE), tener los menores sesgos y mayores valores MEF. Tales modelos fueron Gompertz y Von Bertalanffy con 3 parámetros y el modelo de Richards con 4 parámetros.

Al analizar los criterios AIC y BIC y la significancia de los parámetros modelados, el modelo de Richards se ajustó mejor en los lotes número 3, 4, 5, 7, 9, 10, 14 y 15; mientras que Gompertz tuvo mejor ajuste en los lotes 1, 2, 6, 11, 12 y 13 y el modelo de Von Bertalanffy se ajustó mejor en el lote número 8.

**Tabla 2-4:** Parámetros de crecimiento y criterios de decisión en modelos matemáticos de crecimiento.

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS				AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d							
01	Gompertz	1968***	0.024***	58.423***		275.879	280.911	0.999	41.786	1891.644	0.765	0.996
	Logístico	1930***	0.035***	76.833***		277.848	282.880	0.999	43.399	2040.458	-0.755	0.996
	EVF	1850***	0.026***	91.318***		294.334	299.366	0.998	59.589	3846.827	-8.884	0.991
	Von Bertalanffy	2154***	0.017***	11.066**		284.956	289.988	0.997	49.757	2682.016	3.342	0.994
	Richards	1990***	2.452	0.027***	0.381.	274.301	280.592	0.999	39.009	1648.565	-1.516	0.997
	Michaelis Menten	117**	87.425***	2.383***	2227***	287.670	293.961	0.994	51.274	2848.139	-0.079	0.994
02	Gompertz	2156***	0.020***	70.682***		260.249	265.282	0.999	30.939	1036.99	-1.222	0.998
	Logístico	2003***	0.033***	86.240***		288.746	293.778	0.998	53.519	3102.982	-8.094	0.993
	EVF	1905***	0.024***	101.200***		309.788	266.783	0.996	80.214	6970.527	-12.693	0.985
	Von Bertalanffy	2328***	0.015***	11.983***		261.750	266.783	0.999	31.961	1106.625	4.504	0.998
	Richards	2236***	-0.459	0.017***	-0.141	260.893	267.183	0.999	30.213	988.876	-1.735	0.998
	Michaelis Menten	56*	105.7***	2.087***	2554***	263.050	269.341	0.998	31.461	1072.273	-0.265	0.998
03	Gompertz	2047***	0.021***	67.948***		233.374	238.407	0.999	18.456	358.991	-1.418	0.999
	Logístico	1935***	0.033***	84.719***		282.361	283.393	0.999	47.336	2427.426	-7.776	0.994
	EVF	1838***	0.025***	99.371***		307.806	312.838	0.996	77.214	6458.789	-11.755	0.985
	Von Bertalanffy	2246***	0.015***	12.526***		233.856	238.888	0.999	18.637	376.271	1.057	0.999
	Richards	2170***	-0.525**	0.017***	-0.169*	229.685	235.975	0.999	16.722	302.914	2.353	0.999
	Michaelis Menten	56***	104.200***	2.069***	2469***	232.306	238.596	0.999	17.525	332.712	-0.648	0.999

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*' p < 0.001 '\*\*' p < 0.01 '\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

Tabla 2-4: (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS				AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d							
04	Gompertz	1912***	0.021***	62.931***		279.081	282.113	0.999	44.449	2140.446	-3.032	0.995
	Logístico	2057***	0.027***	92.523***		297.927	302.959	0.997	63.854	4417.083	-7.643	0.989
	EVF	1925***	0.021***	108.500***		310.277	315.309	0.995	80.971	7102.696	-10.462	0.983
	Von Bertalanffy	2528***	0.012***	27.454***		273.959	278.992	0.999	40.286	1758.175	-1.749	0.996
	Richards	2642***	-0.849**	0.010***	-4.443*	229.685	235.975	0.999	39.947	1728.736	1.290	0.996
	Michaelis Menten	52	156.600***	1.572***	3369***	276.453	282.744	0.995	40.679	1792.744	-0.157	0.996
05	Gompertz	1937***	0.023***	60.233***		237.621	242.654	0.999	20.026	434.452	-1.585	0.999
	Logístico	1947***	0.033***	81.466***		283.021	288.053	0.999	47.940	2489.769	-7.596	0.994
	EVF	1857***	0.024***	96.888***		306.886	311.918	0.996	75.861	6234.400	-11.730	0.986
	Von Bertalanffy	2226***	0.015***	15.348***		235.648	240.680	0.999	19.400	407.722	-1.105	0.999
	Richards	2166***	-0.546**	0.017***	-0.192*	233.521	239.811	0.999	17.918	347.813	-2.044	0.999
	Michaelis Menten	67**	101.200***	1.982***	2481***	244.086	250.377	0.999	22.211	534.416	-1.186	0.999
06	Gompertz	2129***	0.022***	62.479***		276.388	281.421	0.999	42.199	1929.238	-0.012	0.996
	Logístico	2055***	0.035***	80.296***		289.285	294.317	0.998	54.076	3167.861	-6.638	0.994
	EVF	1963***	0.025***	95.061***		307.298	312.330	0.997	76.462	6333.612	-10.742	0.987
	Von Bertalanffy	2323***	0.016***	11.866***		282.272	287.305	0.999	47.279	2421.553	4.153	0.995
	Richards	2187***	0.355	0.022***	0.083	233.521	239.822	0.999	42.046	1915.190	-2.202	0.996
	Michaelis Menten	96*	93.764***	2.238***	2461***	284.376	290.666	0.995	47.766	2471.689	-2.129	0.995

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

Tabla 2-4: (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS				AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d							
07	Gompertz	1990***	0.023***	60.609***		241.739	246.771	0.999	21.674	508.893	-0.704	0.999
	Logístico	1959***	0.034***	79.911***		277.648	282.680	0.999	43.235	2025.042	-6.774	0.996
	EVF	1873***	0.025***	94.999***		294.333	309.298	0.997	72.119	5634.603	-11.115	0.987
	Von Bertalanffy	2221***	0.016***	13.143***		253.795	258.828	0.999	27.336	809.554	2.675	0.998
	Richards	2110***	-0.034**	0.020***	-0.009*	239.821	240.851	0.999	21.771	513.485	-2.489	0.999
	Michaelis Menten	89***	94.618***	2.172***	2374***	257.359	263.649	0.998	28.832	900.567	-2.049	0.998
08	Gompertz	1933***	0.023***	59.455***		244.143	249.175	0.999	22.722	559.292	-1.749	0.999
	Logístico	2000***	0.031***	83.757***		286.118	291.150	0.998	50.882	2804.668	-7.605	0.994
	EVF	1898***	0.023***	99.542***		308.333	313.365	0.996	77.999	6590.967	-11.519	0.985
	Von Bertalanffy	2331***	0.012***	19.823***		234.730	239.763	0.999	19.043	392.873	2.062	0.999
	Richards	2298***	-0.669***	0.015***	-0.270***	236.015	242.306	0.999	18.698	378.760	0.511	0.999
	Michaelis Menten	71**	111.800***	1.839***	2696***	243.640	249.931	0.999	22.067	527.549	-1.598	0.999
09	Gompertz	1977***	0.022***	62.168***		232.139	237.172	0.999	18.056	353.173	-2.042	0.999
	Logístico	1992***	0.032***	84.190***		281.217	286.249	0.999	46.304	2322.749	-7.480	0.995
	EVF	1832***	0.024***	99.433***		306.221	311.253	0.996	74.896	6076.817	-11.737	0.986
	Von Bertalanffy	2316***	0.014***	16.332***		232.697	237.729	0.999	18.249	360.779	-0.099	0.999
	Richards	2236***	-0.497**	0.017***	-0.169*	228.427	234.727	0.999	16.168	283.185	-1.104	0.999
	Michaelis Menten	71***	106.700***	1.979***	2584***	240.836	247.127	0.989	20.991	477.337	-1.600	0.999

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*' p < 0.001 '\*\*' p < 0.01 '\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

Tabla 2-4: (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS				AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d							
10	Gompertz	1969***	0.022***	63.227***		232.139	237.172	0.999	16.213	284.751	-1.389	0.999
	Logístico	1940***	0.033***	83.259***		281.217	286.249	0.999	45.496	2241.406	-7.463	0.995
	EVF	1846***	0.029***	98.493***		306.221	311.253	0.996	102.420	11364.44	15.918	0.974
	Von Bertalanffy	2241***	0.015***	15.020***		232.697	237.729	0.999	16.893	309.180	1.222	0.999
	Richards	2163***	-0.482**	0.017***	-0.160*	230.527	236.722	0.999	14.535	228.868	2.008	0.999
	Michaelis Menten	69***	103.500***	2.022***	2475***	247.127	240.836	0.999	18.568	373.505	-1.033	0.999
11	Gompertz	2147***	0.021***	65.808***		253.287	258.319	0.999	27.069	793.813	-1.175	0.998
	Logístico	2153***	0.031***	88.146***		283.472	288.505	0.999	48.358	2533.380	-7.459	0.995
	EVF	2034***	0.023***	103.100***		305.469	310.501	0.997	73.819	5903.424	-11.392	0.988
	Von Bertalanffy	2553***	0.015***	16.807***		258.236	263.269	0.999	30.038	977.485	5.005	0.998
	Richards	2407***	-0.275	0.017***	-0.083	254.740	261.031	0.999	26.826	779.592	0.723	0.999
	Michaelis Menten	80**	113***	2.014***	1825***	263.284	269.575	0.998	32.002	1109.435	-1.098	0.998
12	Gompertz	2053***	0.022***	63.444***		226.594	231.626	0.999	16.225	285.201	-1.541	0.999
	Logístico	2036***	0.032***	84.431***		277.933	282.965	0.999	43.471	2047.172	-7.174	0.996
	EVF	1933***	0.024***	99.490***		304.315	309.347	0.997	72.199	5647.175	-11.166	0.988
	Von Bertalanffy	2370***	0.014***	16.122***		236.251	241.284	0.999	19.603	416.299	-0.472	0.999
	Richards	2260***	-0.329 .	0.018***	-0.102	226.207	232.498	0.999	15.542	261.703	-1.839	0.999
	Michaelis Menten	81***	105.800***	2.029***	2607***	243.279	249.569	0.999	22.102	529.204	-1.272	0.999

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*' p < 0.001 '\*\*' p < 0.01 '\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

Tabla 2-4: (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS				AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d							
13	Gompertz	2020***	0.022***	62.359***		251.896	256.928	0.999	26.361	752.816	-1.877	0.998
	Logístico	2051***	0.032***	85.147***		286.025	291.058	0.998	50.790	2794.631	-7.657	0.994
	EVF	1947***	0.023***	100.500***		307.945	312.978	0.996	77.422	6493.619	-11.696	0.986
	Von Bertalanffy	2396***	0.014***	100.500***		252.575	257.697	0.999	26.722	773.608	2.118	0.998
	Richards	2306***	-0.481.	0.016***	-0.163	251.460	264.358	0.999	25.148	685.051	-0.831	0.999
	Michaelis Menten	75**	108.600***	1.976***	2673***	258.068	264.358	0.998	28.978	909.701	-1.722	0.998
14	Gompertz	2074***	0.022***	62.903***		249.493	254.526	0.999	25.172	686.456	-0.315	0.999
	Logístico	2017***	0.033***	81.792***		280.809	285.842	0.999	45.942	2286.586	-7.007	0.995
	EVF	1927***	0.024***	97.111***		305.809	310.842	0.997	73.308	5821.883	-11.522	0.988
	Von Bertalanffy	2302***	0.015***	13.696***		258.864	263.897	0.999	30.142	984.269	3.091	0.998
	Richards	2183***	-0.066	0.019***	-0.018	251.460	257.751	0.999	25.211	688.565	1.232	0.999
	Michaelis Menten	89**	97.804***	2.149***	2471***	261.908	268.198	0.998	31.280	1060.016	-1.936	0.998
15	Gompertz	2057***	0.022***	62.214***		231.359	236.391	0.999	17.758	341.641	-1.733	0.999
	Logístico	2051***	0.032***	83.672***		281.485	286.517	0.999	46.547	2347.159	-7.362	0.995
	EVF	1946***	0.023***	98.974***		306.437	311.469	0.997	75.206	6127.292	-11.310	0.987
	Von Bertalanffy	2383***	0.014***	17.727***		231.939	236.972	0.999	18.118	355.632	-1.339	0.999
	Richards	2301***	-0.488**	0.016***	-0.170*	227.169	233.560	0.999	15.950	275.602	1.724	0.999
	Michaelis Menten	79***	107.100***	1.949***	2671***	241.235	247.526	0.999	21.175	485.723	-1.688	0.999

1. Para los modelos Gompertz, logístico y EVF los parámetros a= peso adulto, b= tasa de crecimiento o de maduración y c= edad al punto de inflexión, modelo de Von Bertalanffy a=peso adulto, b= tasa de maduración c= coeficiente de proporcionalidad, modelo de Richards a= peso adulto, b= constante de integración, c= índice de madurez, d= parámetro que controla el punto de inflexión, modelo de Michaelis-Menten a= peso al nacimiento, b= edad al punto de inflexión o máximo crecimiento, c= parámetro que controla el punto de inflexión y d= peso adulto.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

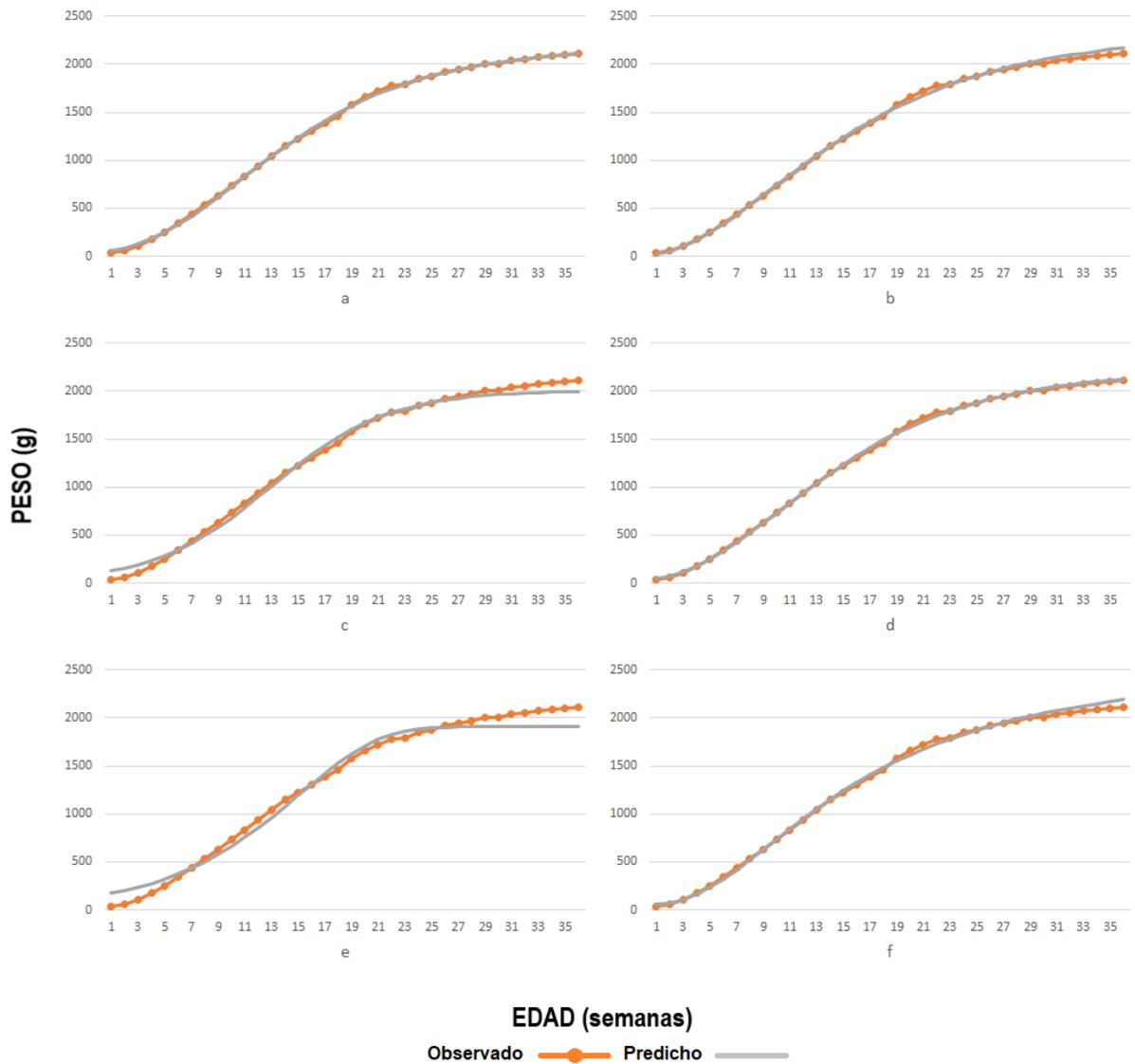
Los modelos de Gompertz y Von Bertalanffy en todos los lotes evaluados presentaron parámetros altamente significativos ( $p < 0.0001$ ), mientras que en los lotes 1, 2, 6, 11, 12 y 13, el modelo de Richards presentó parámetros no significativos o con significancias al 10% ( $p < 0.1$ ). Todos los modelos evaluados presentaron coeficientes de determinación ajustados mayores a 0.98, los modelos EVF y el Logístico presentaron los mayores sesgos con un MB máximo de -12.6 y -8.1 respectivamente, indicando una sobreestimación de los datos y haciéndolos menos exactos, el modelo que llegó a subestimar más los datos fue Von Bertalanffy con un valor MB de 4.5. Cabe destacar que el modelo de Michaelis-Menten presentó en la mayoría de los lotes un menor sesgo reflejando su exactitud (el valor mínimo de sesgo para este modelo presentó un estadístico con un MB de -0.07 para el lote número 1). El estadístico MEF presentó valores por encima de 0.98 a excepción del modelo EVF en el lote 10, con un MEF de 0.97.

Los modelos más imprecisos fueron EVF y logístico con los valores más altos de RMSEP (102.4 para el modelo EVF en el lote 10 y 63.8 en el modelo Logístico en el lote 4), mientras que modelos más precisos fueron: Gompertz y Richards con los valores más bajos de RMSEP (16.2 en los lotes 10 y 12, y 14.5 en el lote 10, respectivamente).

En la figura 2-2 se presentan los gráficos de predicción de cada uno de los modelos de crecimiento evaluados.

El modelo de Gompertz sobreestimó los pesos corporales en etapas tempranas de crecimiento postnatal (semanas 1, 2 y 3), para luego obtener buenas predicciones y volver a dar pesos corporales predichos ligeramente más altos en las semanas 15 a 18. Los pesos corporales a las semanas 19 y 22 fueron ligeramente subestimados, para finalmente converger con buenas predicciones de la curva de crecimiento hasta finalizar el período estudiado de 35 semanas.

El modelo logístico al tener un punto de inflexión fijo al 50% del peso adulto no se ajusta bien al crecimiento observado en los lotes comerciales evaluados y pasa de sobreestimar los pesos corporales en las primeras semanas de vida de las pollitas (hasta semana 6), para luego subestimarlos (hasta semana 14), nuevamente sobreestimarlos entre semanas 15 y 20, y, finalmente termina con un peso adulto menor al real observado en las ponedoras.

**Figura 2-2:** Curvas de predicción de crecimiento en ponedoras.<sup>1</sup>

1. Modelos de crecimiento: a= Gompertz, b= Von Bertalanffy, c= Logístico, d= Richards, e= EVF, f= Michaelis-Menten.

El modelo EVF presentó fluctuaciones entre sobre y subestimaciones de los pesos corporales de las pollitas durante el crecimiento. Al comienzo del crecimiento se sobreestiman los valores observados de peso corporal y al final subestima estos valores con un peso adulto alcanzado mucho antes del tiempo real e inferior al observado.

El modelo de Von Bertalanffy presentó muy buenos ajustes en la primera mitad del periodo de crecimiento de las pollitas, pero con subestimaciones de peso corporal en las primeras

dos semanas de vida del ave, al final del periodo crecimiento hacia la semana 28 se sobreestimaron los valores predichos convergiendo con proyecciones de ponedoras más pesadas al alcanzar el peso adulto.

El modelo de Richards estima muy buenos ajustes a los datos observados con adecuadas predicciones de peso corporal en las primeras semanas de vida de la ponedora, pero estos fueron subestimados entre las semanas 15 y 19, seguido sobreestimaciones entre las semanas 20 y 24, para converger con buenas predicciones de peso corporal a las 35 semanas de edad.

El modelo de Michaelis-Menten presenta una predicción de pesos corporales más altos en la semana 1 y 2, seguido de buenas predicciones hasta la semana 14, donde empieza a sobrestimar los pesos corporales hasta la semana 19 y allí sigue un crecimiento que termina con valores por encima a los datos observados, dando un peso adulto predicho superior al observado.

Los modelos de crecimiento de Gompertz y de Richards se caracterizan por tener una buena interpretación biológica y además en el caso de Gompertz sus parámetros fueron en su totalidad significativos, para así tener validez estadística (Karkach, 2006). Entre estos dos modelos se destaca el modelo de Gompertz por su sencillez en la aplicación del fenómeno biológico de crecimiento, con una estabilidad mayor en el tiempo y con menores sesgos (Agudelo *et al.*, 2007); de otra parte, entre más parámetros tenga un modelo matemático se tiende a “sobreajustar” los datos, ya que aunque se mejora la flexibilidad del modelo y se ajusta mejor a la curva de regresión, esto puede ser excesivo y no necesariamente responder a la dinámica biológica descrita sino a la variación al azar de datos atípicos (outliers) (Tjørve y Tjørve 2010), por tales características el modelo de Gompertz, fue seleccionado para predecir el crecimiento de ponedoras marrón en el contexto del estudio.

#### **2.4.2. Modelaje de la producción de huevos en ponedoras marrón**

Los resultados obtenidos de la modelación de las curvas de producción de huevo para cada uno de los 15 lotes evaluados se observan en la tabla 2-5, en la cual se describen los parámetros dados por cada modelo, su nivel de significancia y los criterios de decisión

estadísticos, el modelaje se llevó a cabo con promedios semanales de producción de huevos (%ave/día) y tal temporalidad se reconfiguró a días para su ajuste en cada ecuación.

En el análisis del modelaje de la producción de huevos se destacaron dos modelos matemáticos: Yang y Adams-Bell, ya que presentaron los más bajos valores de AIC y BIC y teniendo en cuenta la significancia de los parámetros de sus ecuaciones (Karkach, 2006), las mejores predicciones se obtuvieron para los lotes: 1, 5, 6, 9, 12 y 14 con el modelo de Yang, para los lotes 2, 3, 4, 7, 8, 10, 13 y 15 en el modelo de Adams-Bell y para el lote 11 en el modelo de Lokhorst.

El modelo de Yang se caracterizó por presentar parámetros altamente significativos en cada uno de los lotes evaluados ( $p < 0.0001$ ), a su vez presentó altos valores de  $R^2_{ajs}$ , mientras que los modelos de Adams-Bell y Lokhorst en algunos casos presentaron parámetros sin significancia estadística o con una tendencia ( $p < 0.1$ ). En particular, el modelo de Adams-Bell presentó parámetros no significativos en los lotes 5, 6, 9, 11, 12 y 14, mientras que el modelo de Lokhorst presentó esta característica para los lotes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14 y 15. Cabe destacar que éste modelo es el más complejo de los cinco evaluados y se esperaba un mejor ajuste a los datos, aunque se evidenció lo contrario, tan solo hubo una excepción con el lote 11, en el cual el modelo de Lokhorst sí presentó los mejores ajustes, con los más bajos valores de AIC (167.7) y BIC (179.5), además de tener sus cinco parámetros altamente significativos ( $p < 0.001$ ).

El análisis de residuales mostró a los modelos de Yang y Adams-Bell como los más precisos, con valores de RMSEP menores en los lotes evaluados, con un RMSEP de 1.10 para Yang en el lote número 7 y un RMSEP de 1.09 para Adams-Bell en el lote 7. Los modelos Compartimental, Mc Nally y Lokhorst presentaron valores generalmente más altos de RMSEP, dando precisiones menores en los lotes analizados, el modelo Compartimental fue el de menor precisión llegando a tener un MSEP de 9.72 en el lote 4. Estos resultados redundan en efectos sobre los valores de MEF caracterizando a los modelos descritos con menor ajuste a la recta de regresión lineal entre valores observados y predichos, afectando la varianza de tal ajuste. En este sentido, los menores valores de MEF fueron para los modelos Compartimental, Mc Nally y Lokhorst, con 0.83, 0.86 y 0.84, respectivamente.

**Tabla 2-5:** Parámetros de modelos de producción de huevos y criterios de decisión.

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS					AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d	e							
01	Yang	97.556***	0.0004***	0.158***	16.365***		194.112	203.964	0.999	1.374	1.936	-0.012	0.989
	Mc Nally	3.738***	1.733***	-0.011***	-0.584***		280.472	290.323	0.999	3.105	10.017	-0.014	0.946
	Lokhorst	-141.9***	0.943***	-2.952	0.088***	-0.0001*	231.717	243.539	0.978	1.923	3.843	0.002	0.979
	Compartimental	-101***	0.001***	0.052***			287.249	295.130	0.989	3.372	11.816	-0.189	0.936
	Adams-Bell	0.858***	15.83***	0.001***	-0.026***		194.203	204.055	0.989	1.375	1.966	0.007	0.989
02	Yang	99.622***	0.001***	0.179***	24.538***		184.806	194.658	0.999	1.259	1.647	-0.009	0.995
	Mc Nally	0.504*	2.635***	-0.015***	-0.838***		330.883	340.734	0.997	5.018	26.162	-0.621	0.923
	Lokhorst	-158.7***	0.952***	-0.039	0.094 .	-0.00006	307.217	319.039	0.952	7.255	54.701	6.104	0.848
	Compartimental	-109.4***	0.001***	0.033***			352.305	360.186	0.995	6.229	40.323	-0.521	0.888
	Adams-Bell	0.839***	24.232***	0.001***	-0.007 .		176.700	186.552	0.996	1.166	1.413	-0.004	0.996
03	Yang	97.449***	0.0004***	0.197***	26.449***		215.994	225.845	0.999	1.689	2.966	-0.061	0.993
	Mc Nally	0.189 .	3.181***	-0.019***	-1.035***		344.956	354.807	0.996	5.735	34.175	-0.779	0.922
	Lokhorst	-169.1***	0.955***	-10.3	0.149*	-0.0002	328.809	340.631	0.937	4.854	24.481	0.503	0.944
	Compartimental	-106.5***	0.001***	0.031***			374.674	382.555	0.992	7.693	61.499	-0.704	0.860
	Adams-Bell	0.831***	25.874***	0.001***	-0.028***		212.149	222.001	0.993	1.629	2.759	-0.011	0.994

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después del pico, d= raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst a y c = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta, b= influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción, d y e= son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental a= pico de producción de huevos, b= tasa de disminución de la producción de huevos y c=tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell a= variación en la madurez sexual, b= tiempo a la madurez sexual, c= caída de la puesta y d= intercepto de la caída.

AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

**Tabla 2-5:** (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS					AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d	e							
04	Yang	98.958***	0.0004***	0.184***	37.698***		212.753	222.605	0.999	1.639	2.790	-0.065	0.996
	Mc Nally	0.004	4.734***	-0.026***	-1.435***		357.301	367.152	0.995	6.409	42.681	-0.272	0.938
	Lokhorst	-179.6***	0.974***	-30.012	0.258	-0.0004	367.254	379.076	0.918	6.913	49.666	-0.229	0.928
	Compartimental	-127.7***	0.0013***	0.018**			399.528	407.409	0.987	9.725	98.290	-0.974	0.857
	Adams-Bell	0.839***	37.300***	0.0004***	-0.011*		207.083	216.935	0.996	1.553	2.507	-0.007	0.996
05	Yang	99.591***	0.0005***	0.234***	19.415***		294.349	304.201	0.998	3.538	13.009	-0.028	0.961
	Mc Nally	1.436*	2.226***	-0.014***	-0.741***		348.312	358.164	0.996	5.966	36.986	-1.045	0.889
	Lokhorst	-174.1***	0.935***	-5.748	-0.096*	-0.0001	367.254	379.076	0.926	4.486	20.916	-0.115	0.937
	Compartimental	-106.4***	0.0007***	0.042***			359.589	367.471	0.994	6.672	46.264	-0.437	0.862
	Adams-Bell	0.794***	19.196***	0.0004***	-0.008		293.659	303.612	0.955	3.519	12.865	-0.000	0.962
06	Yang	100.5***	0.0005***	0.176***	19.141***		219.301	229.152	0.999	1.743	3.157	-0.076	0.987
	Mc Nally	1.808***	2.061***	-0.012***	-0.672***		305.794	315.646	0.998	3.998	16.612	0.439	0.934
	Lokhorst	-161.6***	0.937***	-3.959*	0.067***	-0.0001	231.425	243.246	0.985	1.935	3.889	-0.187	0.985
	Compartimental	-107.2***	0.0007***	0.042***			319.088	326.969	0.997	4.553	21.547	0.329	0.914
	Adams-Bell	0.837***	19.012***	0.0004***	-0.002		215.836	225.688	0.988	1.687	2.957	0.007	0.988

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después del pico, d= raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst a y c = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta, b= influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción, d y e= son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental a= pico de producción de huevos, b= tasa de disminución de la producción de huevos y c=tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell a= variación en la madurez sexual, b= tiempo a la madurez sexual, c= caída de la puesta y d= intercepto de la caída. AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '\*' p < 0.1.

**Tabla 2-5: (Continuación)**

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS					AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d	e							
07	Yang	98.687***	0.0004***	0.198***	22.287***		171.088	180.939	0.999	1.106	1.271	-0.011	0.996
	Mc Nally	0.671*	2.606***	-0.017***	-0.866***		325.678	335.529	0.997	4.755	23.495	-0.203	0.928
	Lokhorst	-167.4***	0.947***	-9.183*	0.133**	0.0002*	294.247	306.068	0.959	3.470	12.516	0.081	0.961
	Compartimental	-105.4***	0.0007***	0.038***			352.579	360.461	0.995	6.245	40.533	-0.522	0.875
	Adams-Bell	0.825***	21.938***	0.0004***	-0.015***		169.941	179.792	0.996	1.094	1.244	0.009	0.996
08	Yang	99.012***	0.0004***	0.181***	17.954***		187.251	197.103	0.999	1.288	1.725	-0.029	0.993
	Mc Nally	2.649***	1.864***	-0.011***	-0.609***		302.319	312.171	0.998	3.886	15.691	0.525	0.935
	Lokhorst	-157.3***	0.932***	-1.100	0.047**	0.000001	223.432	235.254	0.985	1.778	3.287	0.006	0.986
	Compartimental	-104.6***	0.0006***	0.046***			307.549	315.429	0.998	4.084	17.331	-0.306	0.929
	Adams-Bell	0.834***	17.638***	0.0004***	-0.013**		180.364	190.215	0.993	1.207	1.525	-0.007	0.994
09	Yang	98.254***	0.0004***	0.190***	18.407***		306.916	316.768	0.998	3.984	16.491	-0.009	0.939
	Mc Nally	2.234*	2.016***	-0.013***	0.681***		348.506	358.358	0.996	5.963	36.954	-0.906	0.864
	Lokhorst	-162.7***	0.932***	-2.944	0.079 .	-0.00009	323.934	335.756	0.909	4.594	21.934	-0.147	0.919
	Compartimental	-102.4***	0.0006***	0.048***			352.103	359.984	0.995	6.217	40.169	-0.323	0.852
	Adams-Bell	0.831***	18.015***	0.0004***	-0.019		306.793	316.644	0.932	3.979	16.452	-0.005	0.939

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después del pico, d= raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst a y c = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta, b= influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción, d y e= son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental a= pico de producción de huevos, b= tasa de disminución de la producción de huevos y c=tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell a= variación en la madurez sexual, b= tiempo a la madurez sexual, c= caída de la puesta y d= intercepto de la caída. AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*' p < 0.001 '\*\*' p < 0.01 '\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

**Tabla 2-5:** (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS					AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d	e							
10	Yang	99.443***	0.0004***	0.236***	20.839***		177.832	187.682	0.999	1.179	1.444	-0.029	0.996
	Mc Nally	1.087*	2.332***	-0.012***	-0.765***		339.357	349.209	0.996	5.419	30.519	0.066	0.901
	Lokhorst	-172.9***	0.938***	-4.622	0.075*	0.0001	297.206	309.028	0.957	3.569	13.242	-0.102	0.960
	Compartimental	-106.9***	0.0007***	0.039***			353.791	361.673	0.995	6.317	41.471	-0.506	0.876
	Adams-Bell	0.793***	20.636***	0.0004***	-0.008*		171.698	181.549	0.996	1.112	1.286	0.000	0.996
11	Yang	99.849***	0.0006***	0.155***	15.287***		275.689	285.541	0.999	2.967	9.149	-0.058	0.955
	Mc Nally	6.284***	1.316***	-0.006***	-0.395***		291.456	301.307	0.998	3.443	12.319	-0.088	0.939
	Lokhorst	-149.2***	0.913***	7.155***	-0.035***	0.0002***	167.657	179.479	0.993	1.051	1.147	-0.001	0.994
	Compartimental	-105.6***	0.0009***	0.049***			275.910	283.791	0.999	3.030	9.541	-0.114	0.953
	Adams-Bell	0.855***	14.965***	0.0006***	-0.008		270.656	280.507	0.952	2.829	8.319	0.007	0.959
12	Yang	100.30***	0.0005***	0.194***	16.879***		221.162	231.014	0.999	1.774	3.270	-0.044	0.986
	Mc Nally	3.135***	1.820***	-0.011***	-0.605***		307.647	317.500	0.998	4.045	17.016	-0.592	0.927
	Lokhorst	-165.2***	0.926***	-2.921	0.062***	-0.00002	230.981	242.803	0.982	1.927	3.859	0.194	0.983
	Compartimental	-105.5***	0.0007***	0.049***			311.875	319.756	0.998	4.254	18.806	-0.249	0.919
	Adams-Bell	0.823***	16.708***	0.0004***	-0.002		218.769	228.621	0.985	1.734	3.126	0.003	0.987

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después del pico, d= raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst a y c = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta, b= influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción, d y e= son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental a= pico de producción de huevos, b= tasa de disminución de la producción de huevos y c=tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell a= variación en la madurez sexual, b= tiempo a la madurez sexual, c= caída de la puesta y d= intercepto de la caída. AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

Tabla 2-5: (Continuación)

LOTE	MODELO <sup>1</sup>	PARÁMETROS					AIC	BIC	R <sup>2</sup> <sub>ajs</sub>	RMSEP	MSE	MB	MEF
		a	b	c	d	e							
13	Yang	98.990***	0.0004***	0.228***	21.040***		235.851	245.703	0.999	2.038	4.314	-0.052	0.987
	Mc Nally	0.846*	2.507***	-0.016***	-0.838***		336.643	346.495	0.997	5.345	29.691	-0.977	0.909
	Lokhorst	-174.9***	0.942***	-8.629*	0.120**	-0.0002*	301.633	313.455	0.999	3.719	14.373	-0.009	0.956
	Compartimental	-105.8***	0.0006***	0.039***			358.622	366.504	0.995	6.612	45.427	-0.479	0.861
	Adams-Bell	0.800***	20.768***	0.0003***	-0.013 .		234.309	244.162	0.987	2.008	4.191	-0.003	0.987
14	Yang	100.30***	0.0009***	0.338***	18.964***		216.517	226.368	0.999	1.698	2.996	-0.000	0.990
	Mc Nally	1.457*	2.268***	-0.014***	-0.768***		357.056	366.908	0.994	6.401	42.583	-0.502	0.860
	Lokhorst	-186.2***	0.928***	-4.758	0.116**	-0.00007	318.100	329.922	0.931	4.345	19.619	0.066	0.936
	Compartimental	-107.3***	0.001***	0.440***			365.151	373.033	0.993	7.032	51.383	-0.437	0.832
	Adams-Bell	0.718***	18.765***	0.0008***	-0.005		208.667	218.518	0.991	1.577	2.583	-0.001	0.992
15	Yang	98.94***	0.0004***	0.260***	23.139***		241.200	251.112	0.999	2.144	4.778	-0.056	0.989
	Mc Nally	0.588 .	2.597***	-0.016***	-0.838***		361.592	371.443	0.994	6.695	46.574	-0.749	0.888
	Lokhorst	-173.7***	0.944***	-3.574	0.062	-0.00002	332.644	344.466	0.929	4.983	25.803	0.007	0.938
	Compartimental	-108.1***	0.0007***	0.035***			374.908	382.789	0.993	7.709	61.769	-0.543	0.852
	Adams-Bell	0.777***	22.885***	0.0004***	-0.013 .		237.653	247.504	0.988	2.072	4.463	0.000	0.989

1. Modelo de Yang a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta, c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves; modelo Mc Nally a=producción inicial, b= tasa de incremento de la producción hasta el pico, c= tasa de decremento de la producción después del pico, d= raíz cuadrada del tiempo; modelo Lokhorst a y c = determinan la producción de huevos al comienzo de la puesta, b= influencia el tiempo entre el comienzo de la puesta y el pico de producción, d y e= son parámetros de decrecimiento de la puesta; modelo compartimental a= pico de producción de huevos, b= tasa de disminución de la producción de huevos y c=tasa de aumento en la producción de huevos; modelo Adams-Bell a= variación en la madurez sexual, b= tiempo a la madurez sexual, c= caída de la puesta y d= intercepto de la caída. AIC: Criterio de información de Akaike; BIC: Criterio de información Bayesiano; R<sup>2</sup><sub>ajs</sub>: Coeficiente de determinación ajustado; RMSEP: Cuadrado medio del error de predicción; MSE: Error cuadrático medio; MB: Sesgo medio; MEF: Estadístico de eficiencia del modelo. Códigos de significancia: p < 0.0001 '\*\*\*\*' p < 0.001 '\*\*\*' p < 0.01 '\*\*' p < 0.05 '.' p < 0.1.

El estadístico del sesgo medio (MB) permitió destacar al modelo de Adams-Bell como un modelo insesgado, que incluso llegó a obtener un MB de -0.0001 y 0.0000 para los lotes 5 y 15 respectivamente. Otro modelo con un bajo sesgo fue el modelo de Yang, cuyo valor más bajo de MB fue -0.0004 en el lote número 14, demostrando así la exactitud de ambos modelos en su ajuste a los datos de campo. En contraste, los modelos de Mc Nally y Compartimental presentaron valores más altos de MB: -0,97 en los lotes 13 y 4 respectivamente, haciéndolos menos exactos comparativamente con los demás modelos utilizados en el presente estudio.

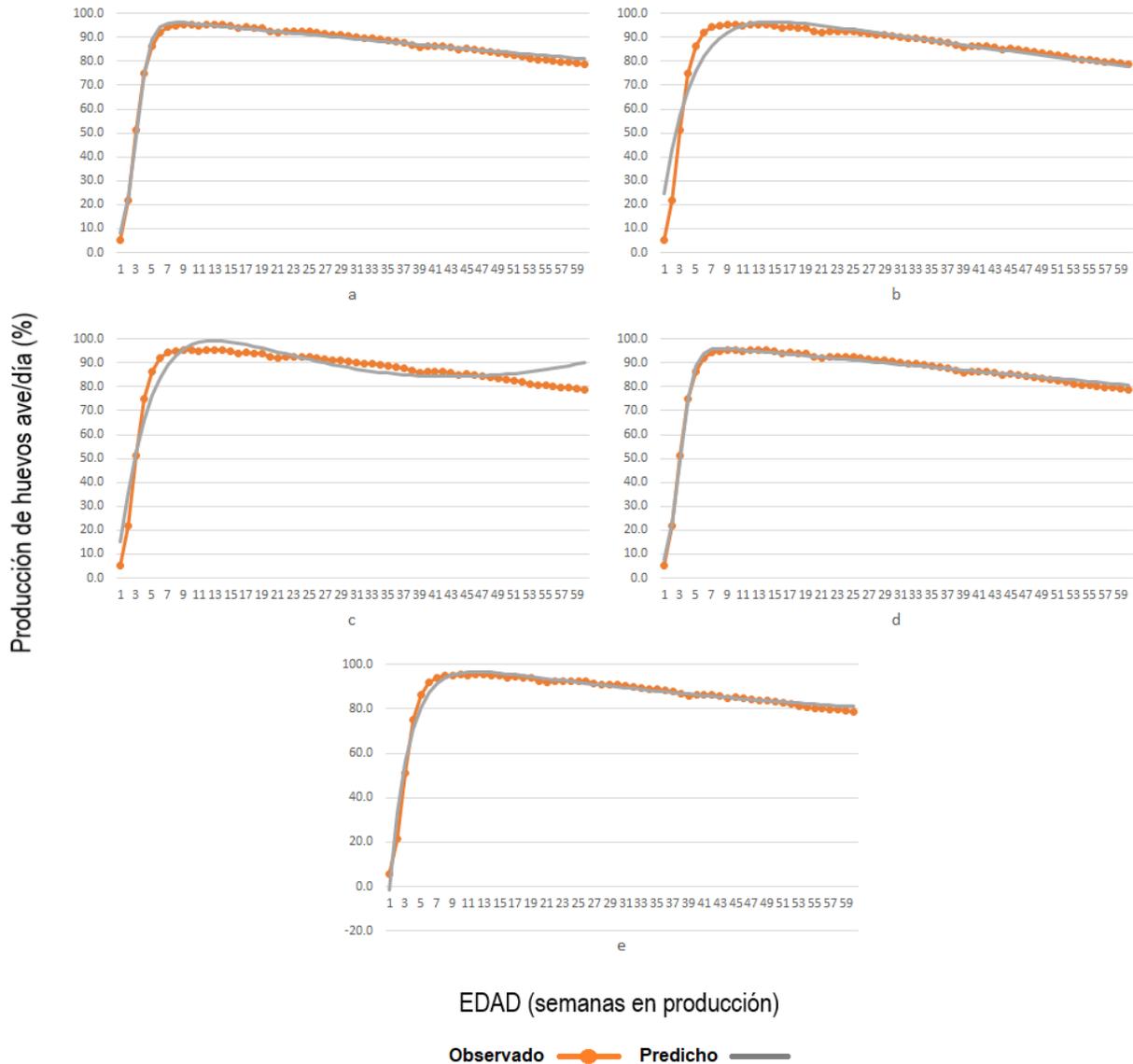
El análisis de las curvas de producción de huevos (Figura 2-3) en un período de 420 días de producción (60 semanas) de todos los lotes, permite inferir los siguientes resultados por modelo:

El modelo de Yang presentó un buen ajuste sobresaliendo su exactitud en la fase de pre-pico, con un adelantamiento al alcanzar el pico de producción, pero luego con buenos ajustes en la fase post pico. Los valores de producción de huevos fueron subestimados a partir de la semana 52.

El modelo de McNally no se ajustó bien a la producción de huevos y fluctuó sobre ajustando y sub ajustando los datos, al comienzo del periodo de postura realizó sobreestimaciones para luego retrasar la producción a partir de la semana 4, después incrementarla en la semana 9 y producir un pico de producción más alto y tardío que el observado. El modelo generó luego una disminución de la puesta de manera curvilínea que se terminó incrementando en estados finales de la fase de producción, lo cual no corresponde al comportamiento productivo normal de una ponedora.

El modelo Lokhorst presentó valores de producción de huevos negativos al comienzo del periodo de postura, lo que no es biológicamente aceptable, luego sobreestimó la fase inicial de producción hasta la semana 4 para pasar a subestimar los datos y retrasar el pico de producción hasta la semana 11, de ahí en adelante presentó una buena exactitud de las predicciones hasta la semana 52 y terminó sobrestimando la producción de huevos hasta el final del ciclo.

**Figura 2-3:** Curvas de predicción de producción de huevos en ponedoras.<sup>1</sup>



1. Modelos de producción de huevos: a= Yang, b=Compartimental, c= Mc Nally, d= Adams-Bell, e= Lokhorst.

El modelo Compartimental consta de tres parámetros siendo el más simple de los modelos analizados, se obtuvieron buenos ajustes a los datos observados a partir de la semana 26 de producción y terminó con una ligera subestimación de los datos. En los estadios de prepico y pico de producción es donde denota sus falencias, ya que comenzó con una muy marcada sobrestimación de los datos hasta la semana 3 y luego predijo por debajo de la curva real de producción hasta la semana 12 donde alcanzó una predicción del pico de producción de una manera tardía.

El modelo de Adams-Bell describió muy bien la producción de huevos, pero con una ligera sobrestimación de los porcentajes de postura en el periodo de pico de la producción y luego de la semana 52 hasta finalizar el ciclo.

Los anteriores resultados permiten destacar a los modelos de Yang y Adams-Bell en términos de exactitud y precisión; sin embargo, el modelo de Adams-Bell presentó falencias en la significancia de sus parámetros en algunos lotes, en contraste con el modelo de Yang, que se caracterizó por proveer parámetros altamente significativos en cada uno de los lotes donde se evaluó, concluyendo así que el modelo de Yang fue el mejor modelo matemático para predecir la curva de producción de huevos de ponedoras marrón en el contexto del presente estudio.

### **2.4.3. Caracterización del crecimiento y desarrollo de ponedoras marrón**

Los parámetros derivados de la ecuación de crecimiento de Gompertz ajustados a los 15 lotes comerciales se presentan en la tabla 2-6.

El peso adulto máximo fue 2156 g correspondiente al lote 2 y el mínimo de 1912 para el lote 4, este parámetro concuerda con otros estudios en donde el peso asintótico o adulto para la estirpe Hy Line Brown fue de 2060 g (Sakomura *et al.*, 2011) y 1900.3 g (Dos Santos *et al.*, 2017). Valores de la tasa de maduración (%/día) oscilaron entre 0.0200 para el lote 2 y 0.0235 para el lote 1 con una diferencia en el parámetro sobre el tercer decimal estadístico, que muestra el % de crecimiento diario después del punto de inflexión. Desde el punto de vista de expresión del potencial genético de la estirpe y en el contexto del estudio se observaron unas menores tasas de maduración relacionadas con unos mayores pesos adultos ( $r: -0.57, p < 0.05$ ), lo cual sugiere una mejor adaptación de los lotes con menores pesos adultos a las condiciones locales comerciales de producción. Al respecto, Alves *et al.* (2019) encontraron tasas de madurez de 0.024%/día para las estirpes Lohman Brown y Dekalb Brown, mientras que Dos Santos *et al.* (2017) en ponedoras en la estirpe Hy Line Brown observaron tasas de madurez entre 0.0226 y 0.0229%/día, mientras que Sakomura *et al.* 2011 reportaron una tasa de madurez de 0.0230%/día. Aproximadamente en el presente estudio el 27% de los lotes (4) presentaron valores superiores a 0.0226.

Las tasas máximas de crecimiento fluctuaron entre 14.8 g/día para el lote 4 y 17.3 g/día para el lote 6, siendo estos valores similares a los encontrados por Dos santos *et al.* (2017) de 15.6 g/día y 16.4 g/día para la estirpe Hy Line Brown. Alves *et al.* (2019) reportan una tasa máxima de 16.5 g/día para la estirpe Lohman Brown y de 15.9 g/día para la estirpe Dekalb Brown. Las tasas máximas de crecimiento dentro de los lotes analizados fueron alcanzadas entre los 58 días (8.3 semanas, lote 1) y los 71 días (10.14 semanas, lote 2), están relacionadas de acuerdo con la parametrización del modelo de Gompertz por el producto de la tasa de maduración por el peso adulto, representado el mayor valor en el lote 6 (2129 g y 0.0221 %/día), mientras el menor valor se observó en el lote 4 (1912 g y 0.0211%/día).

El valor delta (final de fase de estructuración) de los diferentes lotes mostró un patrón similar con un máximo valor a los 21 días para el lote 2 y un mínimo de 16 días para el lote 1. Este rango de respuesta refleja la dinámica adaptación de la estirpe en este periodo de tiempo a las condiciones ambientales y a la calidad de la pollita al nacimiento.

El valor teta corresponde al periodo comprendido entre el 25 y el 75% de madurez del ave, cuantificando así una madurez funcional con implicaciones a nivel de producción de huevos. Este valor fluctuó entre 56 y 65 con una asociación negativa entre el valor y la tasa de maduración ( $r: -0.975, p < 0.001$ ). La duración del crecimiento postnatal entendida como la edad en la cual el ave alcanza su peso adulto fluctuó entre los 224 y 266 días, mientras que en el estudio de Dos Santos *et al.* (2017) para la estirpe Hy Line Brown se observó alrededor de los 224 días de edad.

**Tabla 2-6:** Parametrización del modelo de Gompertz en el crecimiento de ponedoras marrón a nivel comercial.<sup>1</sup>

LOTE	a (g)	b (%/día)	c (Días)	Proporción de crecimiento	Tiempo desde c hasta a (Días)	Duración crecimiento posnatal (Días)	Tasa máxima de crecimiento (g/día)	Valor Delta (Días)	Valor Teta (Días)
1	1968	0.0235	58	42.6	166	224	17.0	16	56
2	2156	0.0200	71	50.0	195	266	15.9	21	65
3	2047	0.0208	68	48.1	188	256	15.7	20	63
4	1912	0.0211	63	47.4	185	248	14.8	16	63

**Tabla 2-6:** (Continuación).

LOTE	a (g)	b (%/día)	c (Días)	Proporción de crecimiento	Tiempo desde c hasta a (Días)	Duración de crecimiento posnatal (Días)	Tasa máxima de crecimiento (g/día)	Valor Delta (Días)	Valor Teta (Días)
5	1937	0.0230	60	43.5	170	230	16.4	17	58
6	2129	0.0221	62	45.2	177	239	17.3	17	59
7	1990	0.0228	61	43.9	171	232	16.7	17	58
8	1933	0.0228	59	43.9	171	231	16.2	16	58
9	1977	0.0224	62	44.6	174	236	16.3	18	59
10	1969	0.0219	63	45.7	178	241	15.9	18	61
11	2147	0.0213	66	46.9	183	249	16.8	19	61
12	2053	0.0217	63	46.1	180	243	16.4	17	61
13	2020	0.0223	62	44.8	175	237	16.6	18	59
14	2074	0.0218	63	45.9	179	242	16.6	17	60
15	2057	0.0218	62	45.9	179	241	16.5	16	60

1. Modelo de Gompertz  $Y = a \cdot \exp(-\exp(-b \cdot (x-c)))$  donde: a= Peso adulto, b= Tasa de maduración, c= Edad al punto de inflexión. Proporción de crecimiento=  $1/b$ . Días del punto de inflexión (PI) al peso adulto= proporción de crecimiento\*3.9020. Duración de crecimiento postnatal= edad al punto de inflexión + días desde el PI al peso adulto. Tasa máxima de crecimiento=  $(a \cdot b) / \exp(1)$ . Valor Delta=  $1413.15 / \text{tasa máxima de crecimiento}$ . Valor Teta=  $(\text{Días } 25 - 75\% \text{ madurez}) / a^{0.25}$ .

En la tabla 2-7 se pueden observar características de los parámetros de crecimiento de las ponedoras tales como los valores máximos y mínimos, así como su promedio y coeficiente de variación; cabe destacar en este sentido que los coeficientes de variación para cada uno de los parámetros en estudio se caracterizaron por ser bajos, dentro de ellos la variable con menor dispersión es la tasa máxima de crecimiento (TMC) con un coeficiente de variación de 3.55% mientras que el coeficiente de variación con mayor valor se observó para el valor delta con un 8.30%; por lo tanto, los valores predichos en el modelaje matemático son bastante homogéneos y el comportamiento en crecimiento y desarrollo de los lotes analizados no presenta dispersiones significativas y concuerda con literatura relacionada como se mencionó en párrafos anteriores.

**Tabla 2-7:** Características de los parámetros de crecimiento de ponedoras marrón.

Variable	a (g)	b (%/día)	c (días)	Proporción de crecimiento	Tiempo desde c hasta a	Duración de crecimiento postnatal (días)	Tasa máxima de crecimiento (g/día)	Valor Delta (Días)	Valor teta (Días)
Mínimo	1912	0.0200	58.00	42.60	166.00	224.00	14.80	16.00	56.00
Máximo	2156	0.0235	71.00	50.00	195.00	266.00	17.30	21.00	65.00

**Tabla2-7:** (Continuación).

Variable	a (g)	b (%/día)	c (días)	Proporción de crecimiento	Tiempo desde c hasta a	Duración de crecimiento postnatal (días)	Tasa máxima de crecimiento (g/día)	Valor Delta (Días)	Valor teta (Días)
Promedio	2025	0.0219	63.00	45.63	178.00	241.00	16.34	18.00	60.00
CV <sup>1</sup> (%)	3.75	4.0200	5.13	4.08	4.10	4.29	3.55	8.30	3.77

1. Coeficiente de variación.

### 2.4.4. Caracterización de la producción de huevos de ponedoras marrón

A continuación, se muestran los parámetros derivados de la ecuación de producción de huevos de Yang ajustados a los 15 lotes comerciales:

**Tabla 2-8:** Parametrización del modelo de Yang (Compartimental modificado).<sup>1</sup>

LOTE	a	b (huevos ave día/semana)	c	d (días)	Días al pico de producción	Pico de producción (%)
1	97.6	0.0004	0.16	16.34	54	95.2
2	99.6	0.0006	0.18	24.54	56	96.0
3	97.4	0.0004	0.19	26.45	58	95.0
4	98.9	0.0004	0.18	37.69	71	96.0
5	99.6	0.0005	0.23	19.42	46	97.1
6	100.5	0.0005	0.18	19.14	52	97.6
7	98.7	0.0004	0.19	22.29	54	96.4
8	99.0	0.0004	0.18	17.95	52	96.8
9	98.3	0.0004	0.19	18.41	51	96.1
10	99.4	0.0004	0.24	20.83	48	97.4
11	99.8	0.0006	0.16	15.23	51	96.6
12	100.3	0.0005	0.19	16.88	48	97.7
13	98.9	0.0004	0.23	21.04	49	96.9

**Tabla 2-8:** (Continuación).

LOTE	a	b (huevos ave día/semana)	c	d (días)	Días al pico de producción	Pico de producción (%)
14	100.3	0.0009	0.34	18.96	36	96.8
15	98.9	0.0004	0.26	23.14	48	96.9

1. Modelo de Yang  $Y = (a \cdot \exp(-b \cdot x)) / (1 + \exp(-c \cdot (x - d)))$ , donde: a= valor asintótico de la producción de huevos, b= tasa de disminución de la puesta (huevos/ave/día semanal), c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual y d= edad media a la madurez sexual de las aves (días luego del inicio de postura). Días al pico de producción=  $d + (\ln(c-b) - \ln(b)) / c$ . Pico de producción = calculado ajustando los días al pico de producción en la ecuación de Yang.

El modelo estableció un valor asintótico medio de 99.14, que generó un valor en pico de producción promedio de 96.5% de los 15 lotes estudiados, destacándose el lote número 12 con un pico de producción predicho de 97,7% siendo el más elevado, mientras que el lote 3 tan solo alcanzó el 95% de producción de huevos ave día. La edad media a la madurez sexual del lote de aves fue de 21.2 días luego del inicio de la puesta, siendo el lote más tardío el número 4 con 37.69 días y el más prolífico el lote número 11 con 15.23 días; en cuanto al tiempo tardado en los lotes para alcanzar el pico de producción se presentó un tiempo medio de 51.6 días, con un máximo de 71 días para el lote número 4 y un mínimo de 36 días para el lote 14.

Luego de alcanzar el pico de producción, el modelo estableció una caída de la producción de entre 0.0004 y 0.0009 huevos ave/día semanales; teniendo en cuenta que la numeración de los lotes está relacionada con la temporalidad en que éstos fueron encasetados, el lote número 1 corresponde a un lote encasetado en 2008 mientras que el lote 15 a uno encasetado en 2018, se observa en la tabla 2-6 que hay una tendencia en una reducción en el tiempo estimado para alcanzar el pico de producción, pero la caída de la curva de producción ha sido más constante a través de los años, esto concuerda con los parámetros de producción establecidos para la genética Hy line Brown, donde se observa que en el tiempo, el ave pone más huevos en su ciclo de producción pero esto más asociado hacia un comienzo de la puesta más temprano y no a una reducción en la caída de la puesta (Hy Line International, 2009, 2011, 2014, 2015, 2016, 2018); a su vez se observó en un estudio de Yang *et al.* (1989) que la caída de la curva presenta valores de 0.009 para líneas de ponedoras White Leghorn, pero cabe destacar que presumiblemente por el avance genético

las líneas de ponedoras de hoy en día presentan curvas de producción con menores caídas, dato que se puede corroborar en el estudio de Savegnago *et al.* (2012), donde 23 años después, ponedoras de tipo White Leghorn presentan caídas de la curva de 0.0053, es decir un 41.2 % menos caída en la curva de puesta.

La valoración de la dispersión de los parámetros observados en el modelaje de producción de huevos (Tabla 2-9) permite inferir que los valores de coeficientes de variación obtenidos fueron menores a un 30%; igualmente, el porcentaje del pico de producción de huevos fue homogéneo entre los lotes analizados, con un coeficiente de variación de 0.80%. La caída de la curva de producción de huevos luego de alcanzar el pico de producción (Parámetro b) presentó el mayor coeficiente de variación con un valor de 27.04%, seguido de la edad en la cual el lote de aves alcanzó su madurez sexual (Parámetro d). Lo anterior sugiere que la selección genética de la estirpe está relacionada con la búsqueda de una madurez sexual más temprana y una mayor persistencia en la curva de producción de huevos (Bedetti y Van de Braak, 2021). Sin embargo, el parámetro de la edad a la madurez sexual presentó un valor mucho mayor de 37.69 días, que, aunque permite al modelo matemático ajustarse muy bien a los datos de campo, consigue desplazar la media de los datos hacia un valor superior y aumentar su coeficiente de variación.

**Tabla 2-9:** Características de los parámetros de producción de huevos (Modelo de Yang).

Variable	a <sup>2</sup>	b <sup>3</sup>	c <sup>4</sup>	d <sup>5</sup>	Días al pico de producción	Pico de producción (%)
Mínimo	97.40	0.0004	0.16	15.23	36.00	95.00
Máximo	100.50	0.0009	0.34	37.69	71.00	97.70
Promedio	99.15	0.0005	0.21	21.22	52.00	96.57
CV <sup>1</sup> (%)	0.90	27.64	22.04	25.07	13.88	0.80

1. Coeficiente de variación.

2. a= valor asintótico de la producción de huevos.

3. b= tasa de disminución de la puesta (huevos/ave/día semanal).

4. c= indicador recíproco de la variación en la madurez sexual.

5. d= edad media a la madurez sexual de las aves (días luego del inicio de postura).

### **2.4.5. Asociación entre parámetros de la etapa de levante y producción de ponedoras marrón**

La elaboración de correlaciones entre los parámetros de crecimiento y de producción permitió dilucidar varias asociaciones que permiten reconocer puntos clave de la etapa de levante con influencia positiva en parámetros de la producción de huevos, las estadísticas descriptivas para cada una de las variables analizadas en los siguientes párrafos se encuentran en el anexo B.

Como se observó en los apartados 2.4.1 y 2.4.2 del modelaje de la curva de crecimiento del ave se derivan parámetros con importancia en la descripción de tal proceso en el desarrollo de la ponedora, estos parámetros a su vez también influyen en el desempeño productivo de la misma. En este sentido, cabe destacar la tasa de maduración de la ponedora, la cual está correlacionada y presenta efectos positivos en el número de huevos por ave alojada a las semanas 30 ( $r: 0.51, p < 0.05$ ), semana 50 ( $r: 0.52, p < 0.05$ ) y semana 80 ( $r: 0.59, p < 0.05$ ). A su vez estos resultados se relacionan con la proporción de crecimiento, la cual, al reducirse tiende a tener efecto en mayor número de huevos por ave alojada a las edades descritas con coeficientes de correlación significativos ( $-0.51, -0.53$  y  $-0.59 p < 0.05$ ) (Tabla 2-10).

Otros parámetros que afectan la producción de huevos fueron la tasa máxima de crecimiento (TMC) y el valor teta (Tabla 2-11), la TMC al maximizarse repercute en mayores producciones de huevo a semana 19 ( $r: 0.51, p < 0.05$ ), menor edad al 50% de producción de huevos ( $r: -0.78, p < 0.01$ ), mayor producción de huevos por ave alojada a semana 30 ( $r: 0.77, p < 0.01$ ) y semana 50 ( $r: 0.81, p < 0.01$ ), un menor valor teta ( $r: -0.70, p < 0.01$ ) y menores días al pico de producción de huevos ( $r: -0.60, p < 0.05$ ). Este conjunto de resultados demuestra la importancia de maximizar las ganancias de peso corporal de la ponedora en la fase exponencial de crecimiento, que culminará en el punto de inflexión con una ganancia de peso corporal máxima con notables efectos en la etapa de producción de la ponedora.

Por su parte el valor teta se correlacionó positivamente con la edad al 50% de producción de huevos ( $r: 0.58, p < 0.05$ ) y negativamente con el mayor número de huevos por ave alojada a las semanas 30 ( $r: -0.63, p < 0.05$ ), 50 ( $r: -0.66, p < 0.05$ ) y 80 ( $r: -0.63, p < 0.05$ ) indicando que una disminución del periodo comprendido entre el 25 y 75% de madurez de

la ponedora tendrá también un impacto relevante en el comportamiento productivo, haciendo de la ponedora un ave de mayor producción de huevos durante su ciclo comercial.

**Tabla 2-10:** Correlaciones entre parámetros de la curva de crecimiento y producción de huevos 1.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5
1. Peso adulto	2024.60	78.59					
2. Tasa de madurez	0.02	0.00	-.57*				
3. PC	45.63	1.93	.57*	-1.00**			
4. HAA Sem 30	62.46	5.26	.20	.51*	-.51*		
5. HAA Sem 50	127.74	5.47	.22	.52*	-.53*	.97**	
6. HAA Sem 80	357.85	11.90	-.17	.59*	-.59*	.75**	.71**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

HAA= número de huevos por ave alojada, PC= Proporción de crecimiento. El peso adulto es expresado en gramos, la tasa de madurez en %/día, Sem=semana. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

**Tabla 2-11:** Correlaciones entre parámetros de la curva de crecimiento y producción de huevos 2.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. TMC	16.34	0.60							
2. Valor Teta	60.15	2.27	-.70**						
3. P semana 19	5.43	5.28	.51*	-.42					
4. Edad 50% P	20.80	0.86	-.78**	.58*	-.74**				
5. Días al pico	51.60	7.41	-.60*	.43	-.09	.52*			
6. HAA Sem 30	62.46	5.26	.77**	-.63*	.61*	-.93**	-.61*		
7. HAA Sem 50	127.74	5.47	.81**	-.66**	.57*	-.91**	-.69**	.97**	
8. HAA Sem 80	357.85	11.90	.49	-.63*	.18	-.59*	-.29	.75**	.71**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

TMC= Tasa máxima de crecimiento (g/día), P=producción de huevos (%ave/día), Sem= semana, HAA= número de huevos por ave alojada. El valor teta es expresado en días, la edad al 50% de producción se expresa en semanas. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

En las tablas 2-12 y 2-13 se observan las principales asociaciones entre diferentes pesos de las pollitas en la etapa de levante con los parámetros de la etapa de producción de huevos. El análisis muestra que los pesos a las semanas 8 ( $r: -0.54$ ,  $p < 0.05$ ) y 9 ( $r: -0.58$ ,  $p < 0.05$ ) presentan asociaciones negativas con la edad media a la madurez sexual de las ponedoras, una reducción en la edad al 50% de producción de huevos (peso corporal a semana 8  $r: -0.56$  y peso corporal a la semana 9  $r: -0.59$ ,  $p < 0.05$ ). Igualmente, un mayor

número de huevos por ave alojada a la semana 50 se relacionó con un mayor peso corporal a la semana 8 ( $r: 0.57, p < 0.05$ ) y con relación al peso corporal a la semana 9, se relacionó con mayores huevos por ave alojada a las semanas 30 ( $r: 0.54, p < 0.05$ ) y 50 ( $r: 0.60, p < 0.05$ ).

El análisis del peso corporal a la semana 10 presentó correlaciones negativas ( $r: -0.68, p < 0.01$ ) con la edad a la madurez sexual y la edad al 50% de producción de huevos ( $r: -0.61, p < 0.05$ ). Adicionalmente, este peso corporal se relacionó con la dinámica de número de huevos por ave alojada a las semanas de edad 30, 50 y 80 ( $r: 0.65, 0.75$  y  $0.57$ , respectivamente,  $p < 0.05$ ). Los anteriores datos concuerdan con los obtenidos por Carrizo *et al.* (2007), a la semana 10, aunque las correlaciones fueron más altas en el presente estudio. En el estudio de referencia se observaron correlaciones con el peso corporal a la semana 5. En el presente estudio, los pesos corporales a las semanas 8, y 9 muestran las edades a las cuales las ponedoras alcanzan el punto de inflexión y como fue descrito previamente esta correlacionado con la TMC. En consecuencia, alcanzar el máximo crecimiento en el ciclo de vida tiene notables efectos sobre la productividad del ave en el ciclo de postura.

El peso corporal a las 12 semanas de edad se correlacionó negativamente con una reducción de la edad media a la madurez sexual ( $r: -0.67, p < 0.01$ ), mientras que una menor edad al 50% de producción de huevos se correlacionó negativamente con el peso corporal a las 16 semanas de edad ( $r: -0.72, p < 0.01$ ). Una duración menor del tiempo tomado por la ponedora para alcanzar su pico de producción estuvo asociada negativamente con el peso corporal a las 12 semanas de edad ( $r: -0.52, p < 0.05$ ). Los pesos corporales a la semana 16 de edad se asociaron positivamente con un mayor número de huevos por ave alojada a las semanas 30 ( $r: 0.71, p < 0.01$ ), 50 ( $r: 0.70, p < 0.01$ ) y 80 ( $r: 0.68, p < 0.01$ ). Los anteriores resultados muestran la importancia de alcanzar los umbrales superiores de crecimiento descritos en la guía de manejo de la ponedora, ya que reflejan el acumulado de componentes estructurales representados mayormente en el tejido muscular y desarrollo del tracto gastrointestinal con implicaciones sobre el desarrollo esquelético y de maduración del tracto reproductivo, balance que permite a la ponedora contar con las reservas corporales suficientes para expresar su potencial genético para la producción de huevos.

**Tabla 2-12:** Correlación entre pesos corporales a semanas 8, 9, 10 y variables de producción de huevos.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. Peso Sem 8	631.91	34.22							
2. Peso Sem 9	745.59	38.14	1.00**						
3. Peso Sem 10	834.27	39.86	.84**	.86**					
4. MS	21.22	5.51	-.54*	-.58*	-.68**				
5. Edad 50% P	20.80	0.86	-.56*	-.59*	-.61*	.93**			
6. HAA Sem 30	62.46	5.26	.50	.54*	.65**	-.96**	-.93**		
7. HAA Sem 50	127.74	5.47	.57*	.60*	.75**	-.97**	-.91**	.97**	
8. HAA Sem 80	357.85	11.90	.43	.45	.57*	-.57*	-.59*	.75**	.71**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

P=producción de huevos (%ave/día), Sem= semana, HAA= número de huevos por ave alojada, MS=Madurez sexual (días luego del inicio de postura). La edad al 50% de producción se expresa en semanas, los pesos se expresan en gramos. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$   
\*\*  $p < 0.01$ .

**Tabla 2-13:** Correlación entre pesos corporales a semanas 12, 16 y variables de producción de huevos.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. Peso Sem 12	1077.14	45.13							
2. Peso Sem 16	1429.78	50.97	.77**						
3. MS	21.22	5.51	-.67**	-.61*					
4. Edad 50% P	20.80	0.86	-.68**	-.72**	.93**				
5. Días al pico	51.60	7.41	-.52*	-.19	.73**	.52*			
6. HAA Sem 30	62.46	5.26	.63*	.71**	-.96**	-.93**	-.61*		
7. HAA Sem 50	127.74	5.47	.69**	.70**	-.97**	-.91**	-.69**	.97**	
8. HAA Sem 80	357.85	11.90	.47	.68**	-.57*	-.59*	-.29	.75**	.71**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

P= producción de huevos (%ave/día), Sem= semana, HAA= número de huevos por ave alojada, MS= Madurez sexual (días luego del inicio de postura). La edad al 50% de producción se expresa en semanas, los pesos se expresan en gramos. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$   
\*\*  $p < 0.01$ .

La variable uniformidad de las pollitas tomó mayor relevancia a las semanas 9, 12 y 16 de edad; ya que éstas se correlacionaron con algunos indicadores de la etapa de producción de huevos. Una mayor uniformidad a la semana 9 se asoció negativamente con una disminución de la edad al 50% de producción de huevos ( $r: -0.51$ ,  $p < 0.05$ ), mayor producción de huevos al pico de la postura ( $r: 0.72$ ,  $p < 0.01$ ), y mayor producción de huevos a la semana 30 ( $r: 0.80$ ,  $p < 0.01$ ) (Tabla 2-14). La uniformidad a la semana 12 de edad

estuvo correlacionada negativamente y con una disminución en los días al pico de producción ( $r: -0.73, p < 0.01$ ), mientras que correlaciones positivas fueron observadas para la producción al pico de postura ( $r: 0.60, p < 0.05$ ) y producción de huevos a la semana 30 ( $r=0.53, p < 0.05$ ); mientras que la uniformidad a la semana 16 de edad se asoció solamente con una mayor producción de huevos al pico de producción ( $r: 0.53, p < 0.05$ ) (Tabla 2-15). Al comparar los resultados con los encontrados por Carrizo *et al.* (2007) se resalta la correlación de la uniformidad a la semana 16 de edad en ponedoras de la estirpe Hisex, con mayores producciones de huevos hasta la semana 72 de vida del ave, pero no se destacaron cómo se obtuvo en la presente investigación, las uniformidades a las semanas 9 y 12 de edad de la ponedora.

**Tabla 2-14:** Correlación entre la uniformidad a semana 9 y variables de producción de huevos.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. UNF Sem 9	86.20	8.09							
2. MS	21.22	5.51	-.53*						
3. Edad 50% P	20.80	0.86	-.51*	.93**					
4. Días al pico	51.60	7.41	-.64**	.73**	.52*				
5. P al pico	96.03	0.67	.72**	-.28	-.32	-.30			
6. P Sem 30	95.43	1.40	.80**	-.66**	-.64**	-.53*	.83**		
7. HAA Sem 30	62.46	5.26	.55*	-.96**	-.93**	-.61*	.34	.74**	
8. HAA Sem 50	127.74	5.47	.54*	-.97**	-.91**	-.69**	.35	.71**	.97**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

UNF= Uniformidad (%), P= producción de huevos (%ave/día), Sem= semana, HAA= número de huevos por ave alojada, MS= Madurez sexual (días luego del inicio de postura). La edad al 50% de producción se expresa en semanas. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

**Tabla 2-15:** Correlación entre la uniformidad a semanas 12, 16 y variables de producción de huevos.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4
1. UNF Sem 12	89.87	7.24				
2. UNF Sem 16	90.20	6.29	.70**			
3. Días al pico	51.60	7.41	-.73**	-.48		
4. P al pico	96.03	0.67	.60*	.53*	-.30	
5. P Sem 30	95.43	1.40	.53*	.47	-.53*	.83**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

UNF= Uniformidad (%), P= producción de huevos (%ave/día), Sem= semana. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

Desde el punto de vista de la conversión alimenticia toma relevancia esta variable a la semana 8 de edad en el sentido que se observaron las mejores conversiones con efectos positivos en la reducción de la edad al 50% de producción de huevos ( $r: 0.66, p < 0.01$ ), los días para alcanzar el pico de producción ( $r: 0.83, p < 0.01$ ) y la edad al pico de postura ( $r: 0.62, p < 0.05$ ). La conversión alimenticia en la semana 8 también se asoció negativamente con la producción de huevos a la semana 30 ( $r: -0.71, p < 0.01$ ), mayores huevos por ave alojada a semana 30 y 50 de edad ( $r: -0.75, p < 0.01$ ). De la misma manera, la conversión alimenticia a la semana 8 de edad se asoció negativamente con la uniformidad del lote a la semana 9 de edad ( $r: -0.66, p < 0.01$ ) (Tabla 2-16). Estos resultados muestran la relevancia de alcanzar umbrales superiores de crecimiento a la semana 8 de edad, los cuales están relacionadas directamente con el uso de sistemas de alimentación que permitan asegurar de una manera objetiva estos blancos de crecimiento, de acuerdo con la guía de manejo de cada estirpe en particular.

**Tabla 2-16:** Correlación entre la conversión alimenticia a semana 8, uniformidad a semana 9 y variables de producción de huevos.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. CA Sem 8	3.65	1.35							
2. UNF Sem 9	86.20	8.09	-.66**						
3. Edad 50% P	20.80	0.86	.66**	-.51					
4. Días al pico	51.60	7.41	.83**	-.64**	.52*				
5. Edad al pico	28.60	2.41	.62*	-.16	.20	.65**			
6. P Sem 30	95.43	1.40	-.71**	.80**	-.64**	-.53*	-.06		
7. HAA Sem 30	62.46	5.26	-.75**	.55*	-.93**	-.61*	-.34	.74**	
8. HAA Sem 50	127.74	5.47	-.75**	.54*	-.91**	-.69**	-.37	.71**	.97**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

CA= Conversión alimenticia (kg/kg), UNF= Uniformidad (%), P= producción de huevos (%ave/día), Sem= semana, HAA= número de huevos por ave alojada. La edad al 50% de producción se expresa en semanas. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

La uniformidad del lote de aves a la semana 3 presentó asociaciones significativas ( $p < 0.05$ ) con la tasa de madurez ( $r: 0.59$ ), la proporción de crecimiento ( $r: -0.61$ ), los días desde el punto de inflexión al peso adulto ( $r: -0.61$ ), los días al punto de inflexión ( $r: -0.60$ ) la duración de crecimiento post natal ( $r: -0.61$ ) y el valor teta ( $r: -0.56$ ) (Tabla 2-17). Estos resultados en conjunto indican que una alta uniformidad a la semana 3, tiempo en el cual termina la fase de estructuración del ave, generará efectos positivos en parámetros de crecimiento de la ponedora que tienen gran influencia en su desempeño productivo.

Una variable de producción con gran utilidad en la comprensión del desempeño productivo de un lote de ponedoras es la masa de huevos acumulada por ave alojada (MHA), la cual permite identificar la cantidad de kg de huevo que ha producido la ponedora a una edad determinada de su ciclo de postura. Esta variable presentó asociaciones con variables del crecimiento del ave especialmente en las semanas 30 y 50 de vida donde se asoció positivamente con la tasa de maduración ( $r: 0.58, p < 0.05$ ), la tasa máxima de crecimiento ( $r: 0.67$  y  $0.61$ , respectivamente,  $p < 0.05$ ) y negativamente con el valor teta ( $r: -0.67$  y  $-0.65$ , respectivamente,  $p < 0.01$ ) y con la edad al 50% de producción de huevos ( $r: -0.88$  y  $-0.78$ , respectivamente,  $p < 0.01$ ) (Tabla 2-18). Estos resultados muestran la influencia sobre la producción de huevos dadas por los incrementos en la ganancia diaria de peso corporal de las pollitas durante el proceso de maduración alrededor del punto de inflexión y durante la madurez sexual temprana de la ponedora.

**Tabla 2-17:** Correlaciones entre la uniformidad a semana 3 y variables de crecimiento.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6
1. UNF Sem 3	80.27	11.15						
2. Tasa de madurez	0.02	0.00	.59*					
3. Edad al PI	62.99	3.17	-.60*	-.94**				
4. PC	45.63	1.93	-.61*	-1.00**	.95**			
5. Días PI al peso adulto	178.03	7.55	-.61*	-1.00**	.95**	1.00**		
6. CPN	241.03	10.60	-.61*	-.99**	.97**	1.00**	1.00**	
7. Valor Teta	60.15	2.27	-.56*	-.98**	.89**	.98**	.98**	.96**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

UNF= Uniformidad (%), PI= Punto de inflexión, PC= Proporción de crecimiento, CPN= Crecimiento postnatal (días), Sem= semana. Tasa de madurez se expresa en %/día, el valor teta en días. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

Los pesos corporales del ave en la etapa de levante presentaron correlaciones positivas entre la MHA en la semana 30 con los pesos corporales a las semanas 9 ( $r: 0.53, p < 0.05$ ) y 12 ( $r: 0.59, p < 0.05$ ), mientras que la MHA a las semanas 30 y 50 se correlacionó con los pesos corporales a las semanas 10 ( $r: 0.58$  en ambas semanas) y semana 16 ( $r: 0.67$  y  $0.61$ , respectivamente,  $p < 0.05$ ). La MHA en la semana 80 de edad no presentó ninguna asociación significativa con los pesos corporales del ave, tan solo se correlacionó con el peso corporal a semana 16 ( $r: 0.51, p < 0.05$ ) (Tabla 2-19). El análisis muestra la importancia de maximizar el crecimiento de las pollitas especialmente en las semanas anteriormente descritas, las cuales, a su vez, tienen relación con estadios claves en el desarrollo de la

ponedora como: la edad al punto de inflexión donde se estima la TMC y el desarrollo del sistema esquelético el cual está prácticamente culminado en términos de tamaño a la semana 12 de edad.

**Tabla 2-18:** Correlaciones entre la masa de huevo acumulada y variables de crecimiento.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6
1. MHA Sem 30	3.77	0.33						
2. MHA Sem 50	8.01	0.35	.88**					
3. MHA Sem 80	22.91	1.06	.66**	.76**				
4. b	0.02	0.00	.58*	.58*	.42			
5. TMC	16.34	0.60	.67**	.61*	.22	.53*		
6. Valor Teta	60.15	2.27	-.67**	-.65**	-.40	-.98**	-.70**	
7. Edad 50% P	20.80	0.86	-.88**	-.78**	-.39	-.45	-.78**	.58*

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

MHA= Masa de huevo acumulada/ave alojada (Kg/ave), b= Tasa de madurez (%/día), TMC= Tasa máxima de crecimiento (g/día), P= producción de huevos (%ave/día), Sem= semana. El valor Teta se expresa en días, la edad al 50% de producción se expresa en semanas. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

**Tabla 2-19:** Correlaciones entre la masa de huevo acumulada y pesos corporales en etapa de levante.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6
1. MHA Sem 30	3.77	0.33						
2. MHA Sem 50	8.01	0.35	.88**					
3. MHA Sem 80	22.91	1.06	.66**	.76**				
4. Peso Sem 9	745.59	38.14	.53*	.46	.18			
5. Peso Sem 10	834.27	39.86	.58*	.58*	.26	.86**		
6. Peso Sem 12	1077.14	45.13	.59*	.51	.18	.98**	.91**	
7. Peso Sem 16	1429.78	50.97	.67**	.61*	.51*	.69**	.70**	.77**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

MHA= Masa de huevo acumulada/ave alojada (Kg/ave), Sem= semana. Los pesos corporales se expresan en gramos. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

Desde el punto de vista de la conversión alimenticia, la semana 8 de edad de la ponedora toma importancia ya que la conversión en tal semana se asoció negativamente con la MHA en las semanas 30 ( $r: -0.72, p < 0.01$ ) y 50 ( $r: -0.64, p < 0.05$ ), pero positivamente con la conversión alimenticia en la semana 80 de edad ( $r: 0.63, p < 0.05$ ) (Tabla 2-20). En consecuencia, una mayor eficiencia en el uso del alimento por parte del ave a la semana 8

de edad, contribuirá con una mayor masa de huevos hasta la semana 50 de edad y también se relaciona con una menor conversión alimenticia al final del ciclo comercial de producción de la ponedora. En la etapa de producción de huevo, la MHA a la semana 30 se asoció de manera altamente significativa con la conversión alimenticia en la misma semana ( $r: -0.72$ ,  $p < 0.01$ ) y la semana 80 ( $r: -0.64$ ,  $p < 0.05$ ). Igualmente, la conversión alimenticia a las 30 semanas de edad se correlacionó con la conversión alimenticia a la semana 80 ( $r: 0.87$ ,  $p < 0.01$ ) (Tabla 2-20). La MHA a la semana 30 se asoció con los HAA en la misma semana ( $r: 0.93$ ,  $p < 0.01$ ), semana 50 ( $r: 0.88$ ,  $p < 0.01$ ) y semana 80 ( $r: 0.82$ ,  $p < 0.01$ ) (Tabla 2-21). Los resultados muestran la importancia de la conversión alimenticia a lo largo de toda la etapa productiva de la ponedora, ya que contribuirá a una mayor cantidad de huevos producidos (número de huevos por ave alojada y la masa de huevos por ave alojada).

**Tabla 2-20:** Correlaciones entre conversiones alimenticias y masa de huevo acumulada ave/alojada.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5
1. CA Sem 8	3.65	1.35					
2. CA <sup>P</sup> Sem 30	1.77	0.16	.74**				
3. CA <sup>P</sup> Sem 50	1.56	0.15	.59*	.19			
4. CA <sup>P</sup> Sem 80	1.63	0.06	.63*	.87**	.27		
5. MHA Sem 30	3.77	0.33	-.72**	-.93**	-.15	-.84**	
6. MHA Sem 50	8.01	0.35	-.64*	-.85**	-.11	-.82**	.88**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

CA= Conversión alimenticia (kg/kg), CA<sup>P</sup>= Conversión alimenticia (Kg/Docena de huevos), MHA= Masa de huevo acumulada/ave alojada (Kg/ave), Sem= semana. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

Las correlaciones entre las conversiones alimenticias en la etapa de producción (kg de alimento por docena de huevos) con parámetros del modelaje matemático del crecimiento y producción de huevos en los lotes analizados se observan en la tabla 2-22. Se destaca la tasa de maduración en su asociación altamente significativa con la conversión alimenticia a la semana 80 ( $r: -0.71$ ,  $p < 0.01$ ), la TMC asociada a reducciones en la conversión alimenticia a las semanas 30 y 80 de edad ( $r: -0.71$  y  $-0.65$ ,  $p < 0.01$ ). El valor teta se relacionó también con la conversión alimenticia a las semanas 30 y 80 de edad ( $r: 0.60$  y  $0.77$ , respectivamente,  $p < 0.05$ ); a su vez, la edad media a la madurez sexual de las ponedoras presentó correlaciones altamente significativas ( $p < 0.01$ ) con las conversiones alimenticias a las semanas 30 ( $r: 0.89$ ) y 80 ( $r: 0.80$ ) (Tabla 2-22). Estos resultados muestran

que las ponedoras que alcanzan más rápidamente su madurez sexual, madurez fisiológica o peso adulto y tienen mejores ganancias de peso corporal, tendrán efectos positivos en uso eficiente del alimento durante el ciclo de producción. De otra parte, la persistencia de la curva de producción de huevos se asoció con una menor conversión alimenticia a la semana 80 de edad ( $r: -0.62, p < 0.05$ ).

**Tabla 2-21:** Correlaciones entre masa de huevo acumulada ave/alojada y número de huevos por ave/alojada.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5
1. MHA Sem 30	3.77	0.33					
2. MHA Sem 50	8.01	0.35	.88**				
3. MHA Sem 80	22.91	1.06	.66**	.76**			
4. HAA Sem 30	62.46	5.26	.93**	.88**	.54*		
5. HAA Sem 50	127.74	5.47	.88**	.86**	.47	.97**	
6. HAA Sem 80	357.85	11.90	.82**	.78**	.83**	.75**	.71**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

MHA= masa de huevo acumulada/ave alojada (Kg/ave), HAA= número de huevos por ave alojada, Sem= semana. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

**Tabla 2-22:** Correlaciones entre conversión alimenticia y parámetros de modelaje matemático en crecimiento y producción.

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7
1. CAP Sem 30	1.77	0.16							
2. CAP Sem 50	1.56	0.15	.19						
3. CAP Sem 80	1.63	0.06	.87**	.27					
4. b	0.02	0.00	-.50	-.19	-.71**				
5. TMC	16.34	0.60	-.71**	-.43	-.65**	.53*			
6. Valor Teta	60.15	2.27	.60*	.28	.77**	-.98**	-.70**		
7. MS	21.22	5.51	.89**	.48	.80**	-.49	-.81**	.62*	
8. Persistencia	21.96	4.85	-.39	.34	-.62*	.48	.11	-.45	-.12

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

CAP= Conversión alimenticia (Kg/Docena de huevos), b= Tasa de madurez (%/día), TMC= Tasa máxima de crecimiento (g/día), MS= madurez sexual (días luego del inicio de postura), Sem= semana. El valor Teta se expresa en días, la persistencia de la producción de huevos esta expresada como el número de semanas en etapa de postura con porcentajes de producción mayores al 90% de producción de huevo/ave/día. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$  \*\*  $p < 0.01$ .

Las correlaciones entre los pesos corporales del ave y la conversión alimenticia en etapa de producción de huevos (Tabla 2-23) permitieron identificar asociaciones negativas entre la conversión alimenticia a la semana 30 con los pesos corporales a las semanas 10 ( $r: -$

0.58,  $p < 0.05$ ) y 12 ( $r: -0.56$ ,  $p < 0.05$ ), mientras que la conversión alimenticia a la semana 80 se asoció con los pesos corporales a las semanas 8, 9, 10 y 12 con coeficientes de correlación de  $-0.59$ ,  $-0.61$ ,  $-0.71$  y  $-0.63$  respectivamente ( $p < 0.05$ ). Los resultados permiten destacar que son las mismas edades que presentaron correlaciones con la MHA, tomando importancia entonces la expresión del crecimiento especialmente en su fase exponencial y el tiempo transcurrido entre el 25 y 75% de madurez fisiológica, donde el ave expresa las mayores ganancias diarias de peso corporal.

**Tabla 2-23:** Correlaciones entre conversión alimenticia y pesos corporales

Variable	M <sup>1</sup>	SD <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6
1. CA <sup>p</sup> Sem 30	1.77	0.16						
2. CA <sup>p</sup> Sem 50	1.56	0.15	.19					
3. CA <sup>p</sup> Sem 80	1.63	0.06	.87**	.27				
4. Peso Sem 8	631.91	34.22	-.44	-.36	-.59*			
5. Peso Sem 9	745.59	38.14	-.48	-.37	-.61*	1.00**		
6. Peso Sem 10	834.27	39.86	-.58*	-.50	-.71**	.84**	.86**	
7. Peso Sem 12	1077.14	45.13	-.56*	-.42	-.63*	.96**	.98**	.91**

1. M: Media; SD: Desviación estándar.

CA<sup>p</sup>= Conversión alimenticia (Kg/Docena de huevos), Sem= semana. Los pesos corporales se expresan en gramos. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación. Códigos de significancia: \*  $p < 0.05$   
\*\*  $p < 0.01$

Un resumen gráfico de las principales correlaciones que se encontraron entre pesos corporales, conversiones de alimento y uniformidades en edades clave en el crecimiento y desarrollo de la ponedora se observa en la figura 2-4. Cabe destacar entonces que las edades cercanas al punto de inflexión del crecimiento de la ponedora (semanas 8 y 9), y la edad en que se alcanza el desarrollo esquelético (semana 12) y la semana 16, edad cercana al inicio del periodo de producción de huevos y cuando se realiza el traslado de las ponedoras hacia el galpón de postura deben garantizar pesos corporales y uniformidades conforme a las recomendaciones de la estirpe, las cuales están relacionadas con la correcta conformación (tamaño y forma) de la ponedora con el objeto de maximizar su rendimiento productivo.

Ecuaciones de regresión múltiple fueron estimadas para la predicción del número de huevos por ave alojada, masa de huevo acumulada por ave alojada y gramos de alimento por huevo a diferentes semanas de la etapa productiva de la ponedora y se destacan

además de las uniformidades, las conversiones alimenticias y los pesos corporales en las semanas mencionadas en el párrafo anterior. Igualmente, los parámetros del crecimiento de la ponedora, en particular, el valor teta, como importante característica a determinar para la predicción de los eventos descritos, los cuales además se relacionan con la productividad del sistema de producción de huevos. En cuanto a la predicción del número de huevos por ave alojada a la semana 30 de edad se determinó la ecuación número 1:

$$\begin{aligned} HAA30 = & 174.792 - (1.312 \times \text{Conversión alimenticia semana 8}) \\ & - (0.153 \times \text{Uniformidad semana 16}) - (4.507 \times \text{Edad al 50\% de producción de huevos}) \end{aligned}$$

El número de huevos por ave alojada a la semana 50 de edad esta dado por la ecuación número 2:

$$\begin{aligned} HAA50 = & 184.664 - (0.139 \times \text{Peso corporal semana 3}) \\ & + (0.067 \times \text{Peso corporal semana 10}) - (4.334 \times \text{Edad al 50\% de producción de huevos}) \end{aligned}$$

La ecuación número 3 predice el número de huevos por ave alojada a la semana 80 de vida:

$$\begin{aligned} HAA80 = & 764.184 + (0.597 \times \text{Uniformidad semana 9}) - (6.007 \times \text{Valor teta}) \\ & - (0.377 \times \text{Peso corporal semana 12}) + (0.217 \times \text{Peso corporal semana 16}) \end{aligned}$$

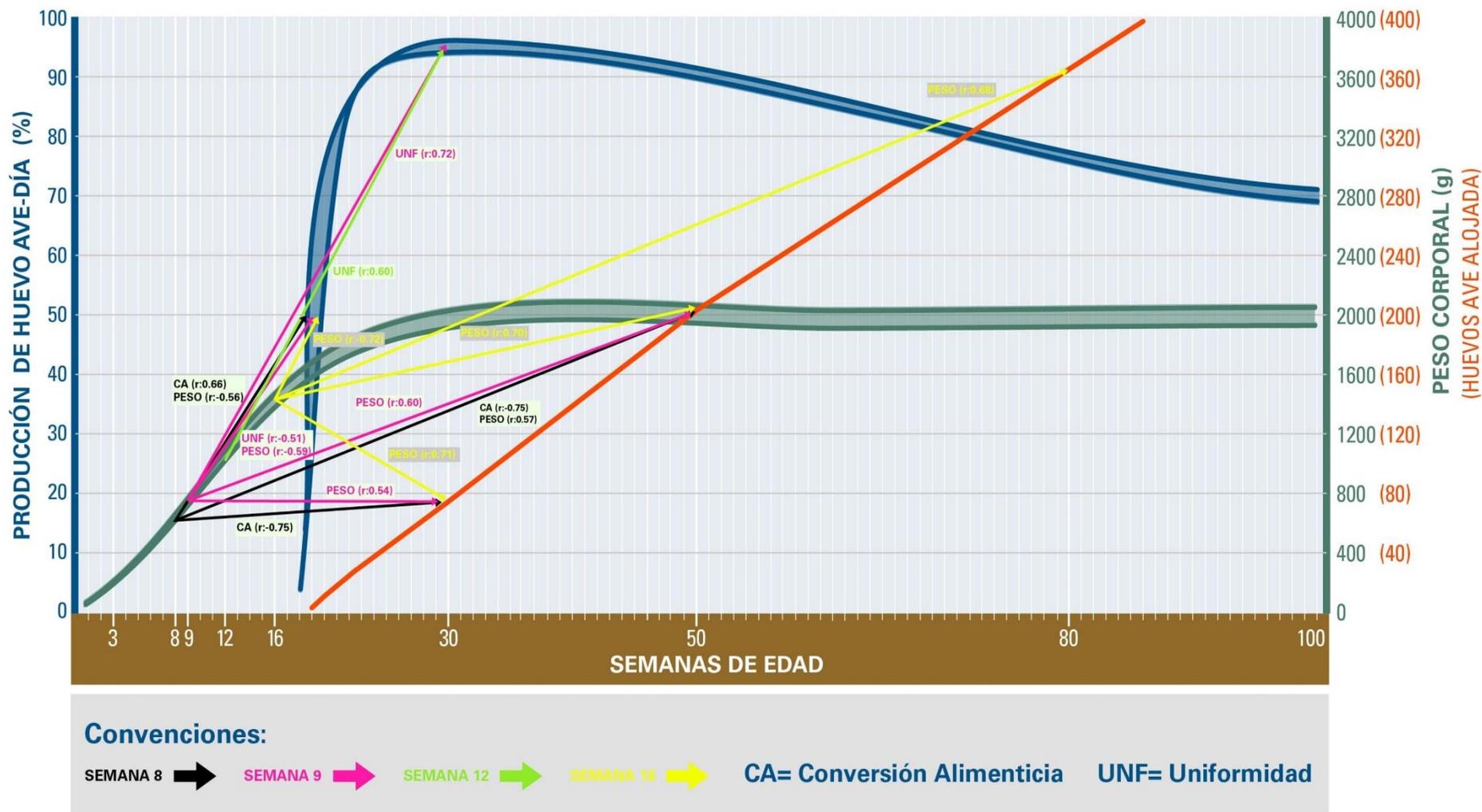
La masa de huevo acumulada (Kg) por ave alojada a la semana 30 de vida está dada por la ecuación 4:

$$\begin{aligned} MHA30 = & 21.595 - (0.118 \times \text{Valor teta}) - (0.306 \times \text{Edad al 50\% de producción de huevos}) \\ & - (0.006 \times \text{Peso corporal semana 9}) \end{aligned}$$

Los gramos de alimento por huevo producido por ave alojada a la semana 80 de vida están dados por la ecuación 5 así:

$$\begin{aligned} GPH = & -131.971 + (2.189 \times \text{Valor Teta}) + (0.097 \times \text{Peso corporal semana 7}) \\ & +(0.398 \times \% \text{ Producción de huevo semana 19}) \\ & +(4.030 \times \text{Edad al 50\% de producción de huevos}) \end{aligned}$$

Figura 2-4: Principales correlaciones entre etapas de levante y producción de huevos.<sup>1</sup>



1. Modificado de Hy Line International, 2018.

Las anteriores ecuaciones cumplen con los supuestos de la regresión lineal múltiple, para el caso de la linealidad en el estudio exploratorio de los datos mediante diagramas de dispersión se presentaron tendencias en tal aspecto, a su vez mediante el análisis gráfico de la dispersión de valores predichos versus residuales se observó que la variación de los residuos es uniforme en el rango de los valores pronosticados corroborando homocedasticidad, la normalidad del error también se corroboró mediante graficas de tipo QQ.

De otra parte, la tabla 2-24 muestra los demás estadísticos que permiten comprobar los supuestos de independencia de errores, no colinealidad y normalidad, aparte de registrar la significancia de los modelos de regresión múltiple, significancia de sus regresores, y el coeficiente de determinación ajustado.

**Tabla 2-24:** Estadísticos de regresión lineal múltiple.

Ecuación			Regresores	Sig	Beta estandarizados	Colinealidad		Residuales	
#	R <sup>2</sup> <sub>Ajs</sub>	Sig				Tolerancia	VIF <sup>1</sup>	DW <sup>2</sup>	KS <sup>3</sup>
1	0.90	0.000	Constante	0.000				2.533	0.200
			CA Sem 8	0.021	-0.336	0.460	2.175		
			UNF Sem16	0.082	-0.183	0.791	1.265		
			Edad 50%P	0.000	-0.739	0.580	1.824		
2	0.91	0.000	Constante	0.000				2.303	0.200
			Peso Sem 3	0.027	-0.263	0.615	1.626		
			Peso Sem 10	0.002	0.491	0.419	2.387		
			Edad 50%P	0.00	-0.683	0.615	1.627		
3	0.82	0.000	Constante	0.000				2.684	0.021
			UNF Sem 9	0.011	0.406	0.745	1.343		
			Valor teta	0.011	-1.146	0.249	4.016		
			Peso Sem 12	0.001	-1.431	0.148	6.768		
			Peso Sem 16	0.000	0.928	0.395	2.531		
4	0.87	0.000	Constante	0.000				2.044	0.200
			Valor teta	0.004	-0.823	0.181	5.522		
			Edad 50%P	0.000	-0.814	0.640	1.563		
			Peso Sem 9	0.012	-0.691	0.176	5.673		

**Tabla 2-24:** (Continuación).

Ecuación			Regresores	Sig	Beta estandarizados	Colinealidad		Residuales	
#	R <sup>2</sup> <sub>Ajs</sub>	Sig				Tolerancia	VIF <sup>1</sup>	DW <sup>2</sup>	KS <sup>3</sup>
5	0.82	0.000	Constante	0.030				2.007	0.196
			Valor teta	0.002	1.067	0.189	5.280		
			Peso Sem 7	0.032	0.619	0.206	4.844		
			% P Sem 19	0.032	0.418	0.453	2.207		
			Edad 50%P	0.002	0.746	0.369	2.711		

1.VIF: Factor de inflación de la varianza.

2.DW: Estadístico de Durbin-Watson.

3.KS: Estadístico de Kolmogorov-Smirnov.

UNF: Uniformidad (%); P: producción de huevos (%ave/día); CA: Conversión Alimenticia (kg/kg); Sem: semana.

Los modelos de regresión lineal múltiple para la predicción de variables de la etapa de predicción de huevos en las ponedoras de tipo marrón fueron todos altamente significativos ( $p < 0.01$ ) indicando así su validez en la predicción de la respectiva variable dependiente, a su vez, se observaron coeficientes de determinación ajustados por encima de 0.80 por lo tanto los modelos explican más de un 80% de la varianza de la variable respuesta. Cabe destacar el modelo número 2, que predice el número de huevos por ave alojada a la semana 50 de edad, el cual presentó un coeficiente de determinación ajustado de 0.91 permitiendo explicar gran variación de tal parámetro productivo.

En cuanto a los regresores obtenidos en los modelos fueron significativos a un nivel del 5% ( $p < 0.05$ ) a excepción de la uniformidad a la semana 16 en la ecuación número 1, la cual fue significativa al 10% con una significancia de 0.082. Teniendo en cuenta los coeficientes beta estandarizados, la variable “edad al 50% de producción de huevos ave/día” es la que mayor influencia tiene sobre el número de huevos por ave alojada a las semanas 30 y 50 con valores absolutos de 0.739 y 0.683 (ecuaciones 1 y 2, respectivamente); el peso corporal a la semana 12 y el valor teta influyeron de mayor manera en el número de huevos por ave alojada a la semana 80 con coeficientes beta estandarizados de 1.431 y 1.146, respectivamente (ecuación 3). Por otra parte, el factor más influyente en la masa de huevo por ave alojada a la semana 30 (ecuación 4) fue el valor teta con un coeficiente beta estandarizado de 0.823; dicho parámetro también es el de mayor influencia en los gramos de alimento consumidos por la ponedora para producir un huevo calculado a la finalización del ciclo comercial (semana 80), ya que presentó un coeficiente beta estandarizado en la ecuación 5 de 1.067.

El supuesto de no colinealidad implica que no existan relaciones lineales o altas correlaciones entre las variables independientes de las ecuaciones, esto se observa cuando se dan valores de tolerancia mayores a 0.1, o su recíproco que serían valores del factor de inflación de la varianza menores a 10 para los regresores de la ecuación; en tal sentido se observó que para todas las 5 ecuaciones de regresión lineal múltiple descritas, se cumplen tales aspectos permitiendo descartar la colinealidad.

Según el análisis de los residuales en las diferentes ecuaciones de regresión, el estadístico de Durbin-Watson fluctuó entre 1.5 y 2.5 para las ecuaciones 1, 2, 4 y 5, permitiendo verificar el supuesto de independencia de los residuos, la ecuación número 3 presentó un valor de 2.68 un tanto alto pudiendo indicar autocorrelación negativa entre los residuales, sin embargo, Field (2009) refiriéndose al artículo original de Durbin y Watson indica que valores entre 1 y 3 también pueden ser aceptables, por lo tanto este supuesto también se corroboró en la ecuación 3.

Los errores también presentaron una distribución normal para las ecuaciones 1, 2, 4 y 5, ya que en la prueba de Kolmogorov-Smirnov se obtuvieron valores superiores a 0.05 aceptando la hipótesis nula de distribución tipo normal. En el caso de la ecuación 3 se presentó un valor de 0.021 indicativo de rechazo de la hipótesis de distribución normal de los errores, esto debido a problemas de asimetría y curtosis en la distribución de los errores, tal distribución presentó un valor de asimetría de 0.530 indicando un desplazamiento hacia la izquierda pero dentro de un rango de simetría, y un coeficiente de curtosis de -1.012 revelando una forma platicúrtica, lo anterior puede deberse a la naturaleza de los datos debido a que son datos de campo, donde sería normal encontrar este tipo de muestras asimétricas, a su vez, el tamaño de la muestra analizada podría influir en la determinación de la normalidad, y la apariencia de no normalidad no indicaría necesariamente el no cumplimiento de tal supuesto (Field, 2009; Lara, 2000).

### 3. Conclusiones y recomendaciones

El uso de modelos matemáticos permitió identificar claramente la dinámica de los comportamientos y expresiones biológicas y la definición de puntos críticos de los procesos de crecimiento y producción de huevos de una estirpe comercial en condiciones específicas de producción. En general, los modelos matemáticos aplicados permiten explicar y describir satisfactoriamente el ciclo de vida de una ponedora en condiciones comerciales de producción.

El modelo de crecimiento de Gompertz fue el mejor predictor del crecimiento de ponedoras marrón, ya que, a pesar de tener un punto de inflexión fijo, los parámetros evaluados fueron altamente significativos y su interpretación biológica se caracterizó por su precisión y exactitud.

El anterior modelo permite inferir que la dinámica de crecimiento y desarrollo de la ponedora tiene un patrón sigmoideal presentando tasas de maduración de 0.02 %/día y una relación inversa entre ésta y el peso adulto. La ponedora obtiene una tasa máxima de crecimiento entre 14.8 y 17.3 gramos al día, el cual es alcanzado entre las 8 y las 10 semanas de edad. Asimismo, las ponedoras alcanzan el peso adulto o madurez fisiológica alrededor de las 35 semanas del ciclo de vida.

El modelo matemático más adecuado para expresar la producción de huevos de ponedoras marrón en condiciones comerciales fue el modelo de Yang, el cual se caracteriza por su exactitud y precisión, con unos parámetros altamente significativos en todos los lotes evaluados. Este modelo permite describir y analizar las diferentes fases de la curva de producción de huevos, la edad al pico de producción, el % de producción ave/día en el pico

de producción y la tasa a la cual disminuye la producción de huevos desde el pico hasta fases tardías del ciclo.

La ponedora marrón presenta una madurez sexual alrededor de 21 días luego de iniciada la postura (+/- 50% producción ave/día), alcanzando picos de producción ave/día de más del 95% a los 52 días de comenzar la producción de huevos. De otra parte, la calidad en la curva de producción de huevos fue prácticamente constante entre los lotes de ponedoras evaluados y las variables que más fluctuaciones presentó ante el ciclo fueron los días que el ave tarda en llegar a su madurez sexual y la disminución de producción de huevos desde el pico de producción.

El parámetro de crecimiento que más influyó en la producción de huevos fue la tasa máxima de crecimiento, debido a que se asoció con una mayor producción al inicio de la postura, la disminución de la edad al 50% de producción, un mayor número de huevos por ave alojada y masa de huevo acumulada a las semanas 30 y 50 de edad.

Reducciones en el tiempo transcurrido entre el 25 y 75% de madurez de la ponedora y sus pesos corporales asintóticos o pesos alcanzados a su madurez fisiológica elevados a un coeficiente alométrico de 0.25 ( $A^{0.25}$ ) (valor teta) harán al ave más productiva, puesto que tal parámetro influyó al asociarse con la producción de masa de huevo acumulada, los gramos de alimento por huevo producido y el número de huevos por ave alojada durante el ciclo de postura.

Maximizar el peso corporal y las uniformidades de los lotes durante el crecimiento y desarrollo de la ponedora (semanas 3, 8, 9, 12 y 16) producen efectos estratégicos sobre la producción de huevos en variables como: la reducción en la edad de la madurez sexual, la disminución de la edad al 50% de producción y al pico de producción, mayores picos de producción y mayores huevos por ave alojada a las semanas 30, 50 y 80 de edad.

El peso corporal de la ponedora a la semana 16 de edad se asoció con la masa de huevo acumulada por ave/alojada a las semanas 30, 50 y 80 de del ciclo de vida de la ponedora. La conversión alimenticia la semana 8 de edad adquiere importancia durante levante de la ponedora ya que se asocia con la masa de huevo acumulada por ave alojada en las semanas 30 y 50 de edad.

Parámetros de producción avícola tales como huevos por ave alojada, masa de huevo acumulado y consumo de alimento por huevo producido pueden ser pronosticados satisfactoriamente mediante los modelos de regresión lineal múltiple descritos en este trabajo y en condiciones de clima medio colombiano.

Requiere ser verificado un estudio de este tipo en otras condiciones de producción de aves de postura de estirpes marrón, en términos de estrés térmico utilizando modelos multifásicos.

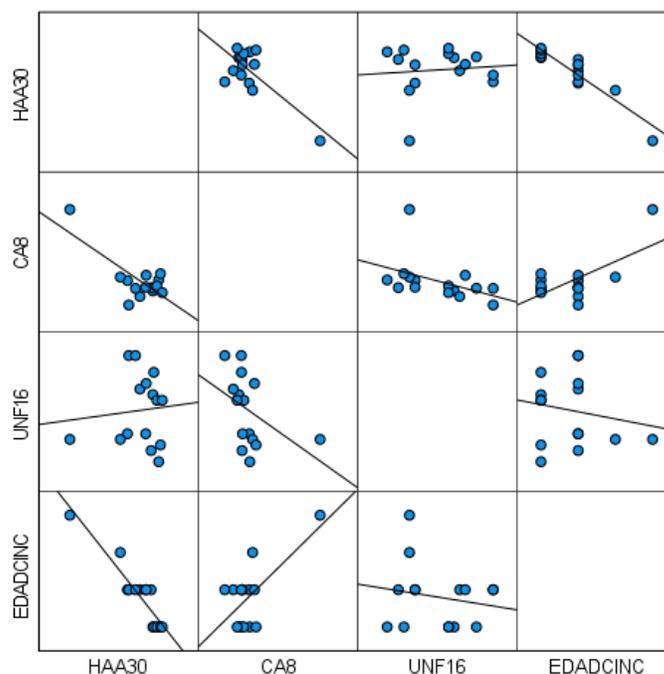
Incursionar en un análisis bioeconómico de los efectos del desempeño del crecimiento sobre los parámetros productivos en la etapa de postura de las gallinas ponedoras, en contextos comerciales específicos de producción de ponedoras marrón.

Los modelos matemáticos no lineales tanto de crecimiento animal como de producción requieren ser además comprobados en bondad de ajuste para condiciones de estrés de frío o calor en sistemas de producción de gallinas ponedoras en Colombia.

Los hallazgos descritos en el presente documento sugieren ser tomados para desarrollos tanto académicos como de transferencia de tecnologías blandas, a pequeños, medianos y grandes avicultores.

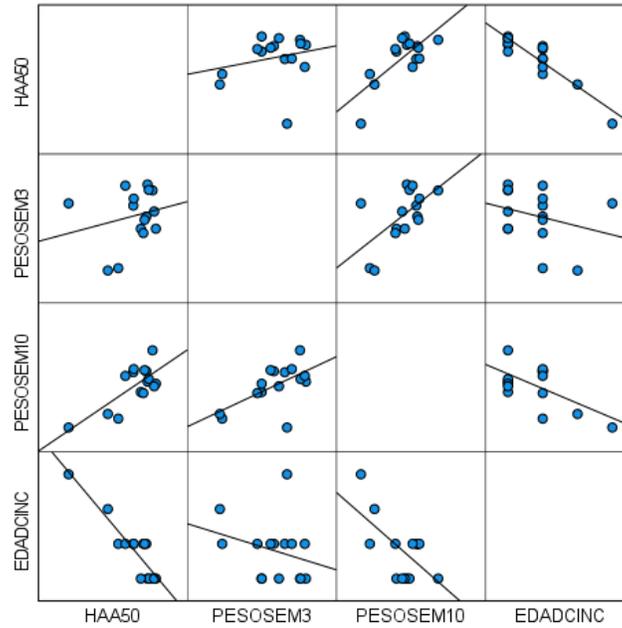
## A. ANEXO: DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN DE PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE (SUPUESTO DE LINEALIDAD).

Supuesto de linealidad ecuación 1:



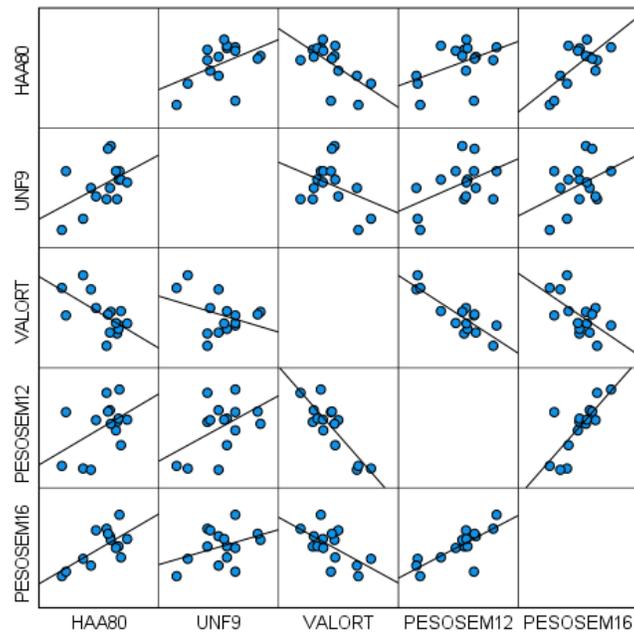
HAA30: huevos por ave alojada a semana 30 de vida; CAB: conversión alimenticia en semana 8 (kg/kg); UNF16: uniformidad del lote en semana 16 (%); EDADCINC: edad al 50% de producción de huevos (%ave/día).

Supuesto de linealidad ecuación 2:



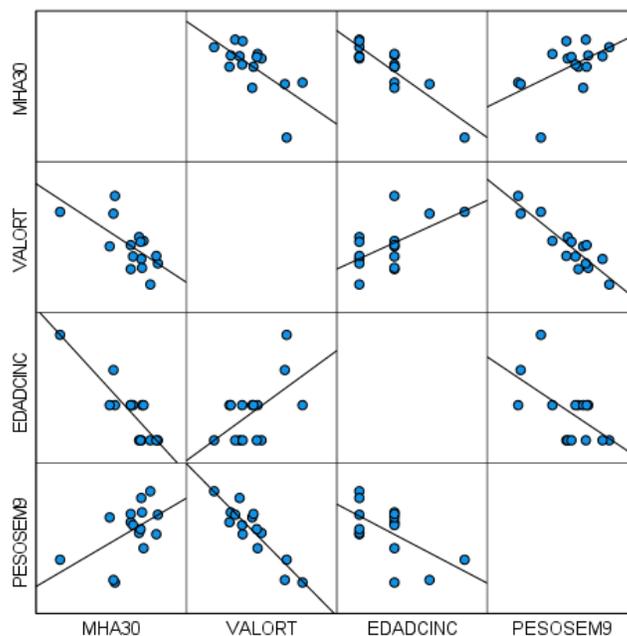
HAA50: huevos por ave alojada a semana 50 de vida; PESOSEM3: peso corporal a semana 3 (g); PESOSEM10: peso corporal a semana 10(g); EDADCINC: edad al 50% de producción de huevos (%ave/día).

Supuesto de linealidad ecuación 3:



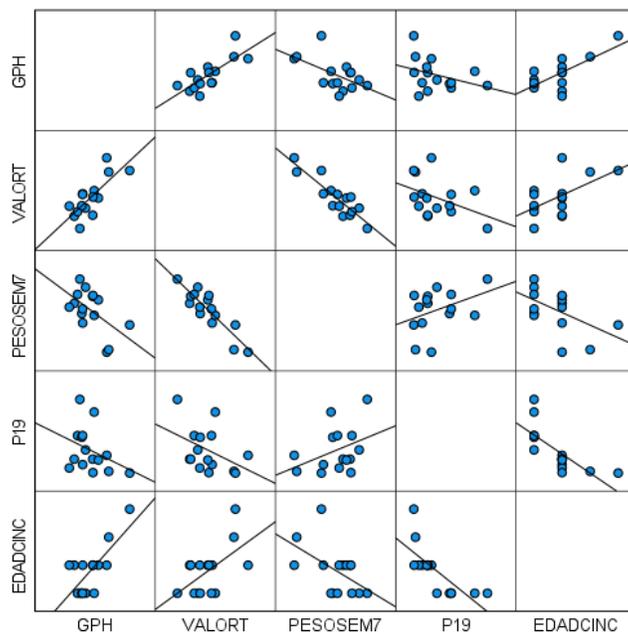
HAA80: huevos por ave alojada a semana 80 de vida; UNF9: uniformidad del lote en semana 9 (%); VALORT: valor teta (días); PESOSEM12: peso corporal a semana 12 (g); PESOSEM16: peso corporal a semana 16(g).

Supuesto de linealidad ecuación 4:



MHA30: masa de huevos acumulada ave alojada a semana 30 de vida (kg); VALORT: valor teta (días); EDADCINC: edad al 50% de producción de huevos (%ave/día); PESOSEM9: peso corporal a semana 9 (g).

Supuesto de linealidad ecuación 5:



GFH: gramos de alimento consumido por huevo producido a semana 80 de vida; VALORT: valor teta (días); PESOSEM7: peso corporal a semana 7(g); P19: producción de huevos a semana 19 de vida (%ave/día); EDADCINC: edad al 50% de producción de huevos (%ave/día).

## B. ANEXO: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE HUEVOS DE PONEDORAS MARRÓN.

Estadísticas descriptivas						
Variable	Mínimo	Máximo	Media	Error estándar	Rango intercuartil	Coeficiente de variación (%)
Peso adulto (g)	1912.000	2156.000	2024.600	20.292	106.000	3.882
Tasa de madurez (%/día)	0.020	0.024	0.022	0.000	0.000	4.136
Edad al punto de inflexión (días)	58.000	71.000	62.867	0.861	2.000	5.305
Proporción de crecimiento	426.000	500.000	456.333	4.974	30.000	4.221
Tiempo desde PI hasta a (días)	166.000	195.000	178.067	1.953	12.000	4.248
Duración de crecimiento postnatal (días)	224.000	266.000	241.000	2.764	16.000	4.441
Tasa máxima de crecimiento (g/día)	14.800	17.300	16.340	0.155	0.800	3.678
Valor delta (días)	16.000	21.000	17.533	0.389	2.000	8.587
Valor teta (días)	56.000	65.000	60.067	0.605	3.000	3.903
Huevos por ave alojada a semana 30	46.600	67.300	62.460	1.357	6.300	8.415
Huevos por ave alojada a semana 50	111.900	132.800	127.740	1.412	5.600	4.282
Huevos por ave alojada a semana 80	333.040	371.980	357.847	3.073	16.430	3.325
Producción de huevos semana 19 (%ave/día)	0.000	17.500	5.427	1.363	7.700	97.301
Edad al 50% de producción ave/día (semana)	20.000	23.000	20.800	0.223	1.000	4.144
Madurez sexual (días luego de comenzar la postura)	15.230	37.690	21.221	1.422	5.190	25.947
Días al pico de producción (%ave/día)	36.000	71.000	51.600	1.914	6.000	14.369
producción de huevos al pico de postura (%ave/día)	95.000	97.700	96.567	0.206	1.100	0.824
Producción de huevos a semana 30 (%ave/día)	91.800	97.100	95.427	0.363	1.400	1.472
Persistencia (semanas por encima del 90% de producción ave/día)	11.860	30.000	21.962	1.253	8.140	22.104
Masa de huevo acumulada a semana 30 (kg/ave)	2.820	4.160	3.765	0.085	0.380	8.722
Masa de huevo acumulada a semana 50 (kg/ave)	11.070	12.680	11.948	0.111	0.560	3.596
Masa de huevo acumulada a semana 80 (kg/ave)	20.250	24.300	22.915	0.274	1.200	4.635
Peso corporal semana 8 (g)	563.960	682.870	631.910	8.836	44.880	5.416
Peso corporal semana 9 (g)	671.970	801.820	745.591	9.846	48.720	5.115

Estadísticas descriptivas						
Variable	Mínimo	Máximo	Media	Error estándar	Rango intercuartil	Coefficiente de variación (%)
Peso corporal semana 10 (g)	754.000	902.000	834.267	10.292	42.000	4.778
Peso corporal semana 12 (g)	1000.120	1143.550	1077.138	11.652	60.130	4.190
Peso corporal semana 16 (g)	1340.520	1523.340	1429.783	13.160	74.810	3.565
Conversión alimenticia semana 8 (kg/kg)	2.170	8.150	3.654	0.348	0.870	36.864
Uniformidad semana 3 (%)	55.000	93.000	80.267	2.879	15.000	13.893
Uniformidad semana 9 (%)	70.000	100.000	86.200	2.089	10.000	9.386
Uniformidad semana 12 (%)	80.000	100.000	89.867	1.869	14.000	8.056
Uniformidad semana 16 (%)	81.000	100.000	90.200	1.625	10.000	6.977
Gramos de alimento por huevo producido a semana 80	129.800	147.800	136.133	1.206	5.500	3.430
Conversión alimenticia semana 30 (kg/docena de huevos)	1.600	2.270	1.773	0.042	0.170	9.183
Conversión alimenticia semana 50 (kg/docena de huevos)	1.050	1.770	1.557	0.040	0.070	9.923
Conversión alimenticia semana 80 (kg/docena de huevos)	1.560	1.770	1.634	0.014	0.070	3.418

## Bibliografía

Aguilar, F. *Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (oreochromis spp.) y tilapia nilótica (oreochromis niloticus var. chitralada) alimentadas con dietas peletizadas o extruidas*. Tesis de maestría. Bogotá DC. Universidad Nacional de Colombia. 2010. 135p.

Adams, C. J., y Bell, D. D. (1980). Predicting poultry egg production. *Poultry Science*, 59(4), 937–938.

Aggrey, S. E. (2002). Comparison of three nonlinear and spline regression models for describing chicken growth curves. *Poultry Science*, 81(12), 1782-1788.

Agudelo, D. A., Cerón, M. F., y Restrepo, L. F. (2007). Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 157-173.

Agudelo, D., Cerón, M., y Restrepo, L. (2008). Modelación de las funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 21(1), 39-58.

Aguilar, C., Cortés, H., y Allende, R. (2002). Los modelos de simulación. Una herramienta de apoyo a la gestión pecuaria. *Archivos latinoamericanos de producción animal*, 10(3), 226-231.

Aguilar, C., Friedli, C., & Canas, R. (1983). The growth curve of animals. *Agricultural Systems*, 10(3), 133-147.

Ahmad, H. A. (2009). Poultry growth modeling using neural networks and simulated data. *The Journal of Applied Poultry Research*, 18(3), 440-446.

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.

Alves, W. J., Malheiros, E. B., Sakomura, N. K., da Silva, E. P., da Silva Viana, G., de Paula Reis, M., ... y Suzuki, R. M. (2019). In vivo description of body growth and chemical components of egg-laying pullets. *Livestock Science*, 220, 221-229.

Arcila, C., Barbosa, E., y Cabezuelo, F. (2016). Técnicas big data: análisis de textos a gran escala para la investigación científica y periodística. *El profesional de la información*, 25(4), 623-631.

Ayala, C. (2018). Crecimiento y desarrollo de los mamíferos domésticos. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(ESPECIAL), 34-42.

Bedetti, I., y Van de Braak, T. (2021). Una visión general de 60 años de pruebas "North Carolina Random Sample Layer Test" del desempeño de ponedoras. *Avinews*. 46. 21-25.

Belyavin, C.G. (1988) Application of computer technology in poultry houses. *World's Poultry Science Journal* 44(3), 217-218.

Brody, T. B., Eitan, Y., Soller, M., Nir, I., y Nitsan, Z. (1980). Compensatory growth and sexual maturity in broiler females reared under severe food restriction from day of hatching. *British Poultry Science*, 21(6), 437-446.

Brody, T. B., Siegel, P. B., y Cherry, J. A. (1984). Age, body weight and body composition requirements for the onset of sexual maturity of dwarf and normal chickens. *British Poultry Science*, 25(2), 245-252.

Brody, S. (1945). *Bioenergetics and growth; with special reference to the efficiency complex in domestic animals*. Reinhold.

Buchwald, P. (2007). A general bilinear model to describe growth or decline time profiles. *Mathematical biosciences*, 205(1), 108-136.

Buzala, M., y Janicki, B. (2016). Effects of different growth rates in broiler breeder and layer hens on some productive traits. *Poultry Science*, 95(9), 2151–2159.

Camargo, J. J., Camargo, J. F., y Joyanes, L. (2015). Conociendo Big Data. *Facultad de Ingeniería*, 24(38), 63-77.

Carrizo, J., Lozano, J. M., y Universonal, S. S. (2007). Alimentación de las pollitas e inicio de puesta. *XXIII Cursos de especialización FEDNA, Madrid, 25 y 26 octubre*.

Cason, J. A. (1990). Comparison of linear and curvilinear decreasing terms in logistic flock egg production models. *Poultry Science*, 69(9), 1467–1470.

Celis De La Rosa, A., y Labrada, V. (2014). *Bioestadística*, Bogotá, Colombia, El Manual Moderno, S.A. de C.V.

Cox, E. (2005). *Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration*. New York, USA: Morgan Kaufmann Publishers.

Di Riezo, J., Casanoves, F., Gonzales, L., Tablada E., Díaz, M., Robledo, C., y Balzarini, M. (2005). *Estadística para las ciencias agropecuarias*, Córdoba, Argentina, Brujas.

Díaz, G. (2019). La crisis de las 18 a las 35 semanas en ponedoras comerciales. *Nutrinews América Latina*. Recuperado de <https://issuu.com/grupoagrnews/docs/revista-nutrinews-latam-4trimestre2019>

Dos Santos, A. L., de Faria, D. E., De Oliveira, R. P., Pavesi, M., Y Silva, M. F. R. (2017). Growth and Body Composition of Laying Hens under Different Feeding Programs up to 72 Weeks. *Journal of Animal Science and Research*, 1(1), 1-6.

Druyan, S. (2010). The effects of genetic line (broilers vs. layers) on embryo development. *Poultry Science*, 89(7), 1457-1467.

Dunnington, E. A., Siegel, P. B., Cherry, J. A., y Soller, M. (1983). Relationship of age and body weight at sexual maturity in selected lines of chickens. *Archiv fuer Gefluegelkunde (Germany, FR)*. 47, 85–89.

Dunnington, E. A., y Siegel, P. B. (1984). Age and body weight at sexual maturity in female White Leghorn chickens. *Poultry Science*, 63(4), 828-830.

Dunnington, E. A., y Siegel, P. B. (1985). Long-term selection for 8-week body weight in chickens-direct and correlated responses. *Theoretical and applied genetics*, 71(2), 305-313.

Durán, Felipe., (2009). *Manejo y nutrición en aves de corral*. Bogotá, Colombia:Grupo latino editores. Lesson, Steve., Summers, John y Diaz, Gonzalo., (2000). *Nutrición aviar comercial*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. ISBN:958-33-1300-9

Eitan, Y., y Soller, M. (1992, September). Effect of light and selection on weight and age at first egg. *Proceedings of the 19th World's Poultry Congress, World's Poultry Science Association* (pp. 413-416).

Emmans, G. C. (1981). A model of the Growth and Feed Intake of Ad Libitum Fed Animals, Particularly Poultry. *BSAP Occasional Publication*, 5, 103-110.

Emmans, G.C. y Oldham, J.D.(1988) Modelling of growth and nutrition in different species. *Modelling of Livestock Production Systems* (Eds Korver, S. and van Arrendonk, J.A.M.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 13-21.

Emmerson, D. A. (1997). Commercial approaches to genetic selection for growth and feed conversion in domestic poultry. *Poultry Science*, 76(8), 1121-1125.

Federación Nacional de Avicultores de Colombia FENAVI. (2020). *Producción avícola mensual*. Programa de estudios económicos.

Fialho, F. B., Ledur, M. C., y Avila, V. S. (2001). Mathematical Model to Compare Egg Production Curves. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 3(3), 211-217.

Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS*. 3ra Edición. Sage Publications Ltd., Londres.

Fitzhugh, H. A., y Taylor, S. C. (1971). Genetic analysis of degree of maturity. *Journal of Animal Science*, 33(4), 717-725.

France, J., López, S., Kebreab, E., y Dijkstra, J. (2013). Interpreting experimental data on egg production-Applications of dynamic differential equations. *Poultry Science*, 92(9), 2498–2508.

France, J., y Thornley, J. (1984). *Mathematical Models in Agriculture*. London, England: Butterworths.

Gómez, J., Fraga, L., Pedraza, R., Montes de Oca, R., Guerra, L., y Valdivié, M. (2017). Modelación de curvas de puesta de los tres últimos años en gallinas White Leghorn en la provincia Ciego de Ávila. *Revista de Producción Animal*, 29(2), 42-49.

Gous, R. Morris, T. Fisher, C. (2006). *Mechanistic modelling in pig and poultry production*. Massachusetts, USA: CABI.

Groen, A. F., Jiang, X., Emmerson, D. A., y Vereijken, A. (1998). A deterministic model for the economic evaluation of broiler production systems. *Poultry Science*, 77(7), 925-933.

Grossman, M., Gossman, T., y Koops, W. (2000). A Model for Persistency of Egg Production. *Poultry Science*, 79(12), 1715–1724.

Heymsfield, S., Lohman, T., Wang, Z., y Going, S. (2005). *Human Body Composition* (2a ed). United States: Human Kinetics Publishers.

Ho, D. H., Reed, W. L., y Burggren, W. W. (2011). Egg yolk environment differentially influences physiological and morphological development of broiler and layer chicken embryos. *Journal of Experimental Biology*, 214(4), 619-628.

Hocking, P. M. (2004). Roles of body weight and feed intake in ovarian follicular dynamics in broiler breeders at the onset of lay and after a forced molt. *Poultry Science*, 83(12), 2044-2050.

Hu, H., Wen, Y., Chua, T., y Li, X. (2014). Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial. *IEEE Access*, 2, 652-687.

Hy Line International. (2009-2011). Ponedoras comerciales Hy Line Brown guía de manejo. [Archivo PDF]. <https://www.hyline.com/>

Hy Line International. (2014). Ponedoras comerciales Hy Line Brown guía de manejo. [Archivo PDF]. <https://www.hyline.com/>

Hy Line International. (2015). Ponedoras comerciales Hy Line Brown guía de manejo. [Archivo PDF]. <https://www.hyline.com/>

Hy Line International. (2016). Boletín técnico: entendiendo la función del esqueleto en la producción dl huevo. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://www.hyline.com/spanish/recursos>

Hy Line International. (2016). Ponedoras comerciales Hy Line Brown guía de manejo. [Archivo PDF]. <https://www.hyline.com/>

Hy Line International. (2018). Ponedoras comerciales Hy Line Brown guía de manejo. [Archivo PDF]. Recuperado de [https://www.hyline.com/userdocs/pages/BRN\\_COM\\_SPN.pdf](https://www.hyline.com/userdocs/pages/BRN_COM_SPN.pdf)

Hy Line International. (2019). Boletín de manejo de las aves comerciales durante el crecimiento. [Archivo PDF]. Recuperado de [https://www.hyline.com/userdocs/pages/TU\\_PULLET\\_MGMT\\_SPN.pdf](https://www.hyline.com/userdocs/pages/TU_PULLET_MGMT_SPN.pdf)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., y Universidad Nacional de Colombia. (2018). *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*, Bogotá, Colombia: Backroom Designers S.A.S.

IDEAM – UNAL (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C.

Jacob, J. P., Wilson, H. R., Miles, R. D., Butcher, G. D., y Mather, F. B. (2014). *Factors affecting egg production in backyard chicken flocks*. US Department of Agriculture, UF/IFAS Extension Service, University of Florida, IFAS, Florida A & M University Cooperative Extension Program, and Boards of County Commissioners Cooperating. Nick T. Place, dean for UF/IFAS Extension (FACT SHEET PS-35) <http://edis.ifas.ufl.edu>. Retrieved On, 25(4), 15.

Janke, O., Tzschentke, B., y Boerjan, M. (2004). Comparative investigations of heat production and body temperature in embryos of modern chicken breeds. *Avian and Poultry Biology Reviews*. 15,191–196.

Johnson, P. A., Dickerman, R. W., y Bahr, J. M. (1986). Decreased granulosa cell luteinizing hormone sensitivity and altered thecal estradiol concentration in the aged hen, *Gallus domesticus*. *Biology of Reproduction*, 35(3), 641–646.

Johnston, S., y Gous, R. (2007). A mechanistic, stochastic, population model of egg production. *British Poultry Science*, 48(2), 224– 232.

Juárez, A., Delgado, I., Gutiérrez, E., Salas, G., Rodríguez, R. O., y Correa, J. (2019). Descripción de la curva de crecimiento de pavos locales usando modelos no lineales. *Revista MVZ Córdoba*, 24(1), 7104-7107.

Julian, R. J. (2005). Production and growth related disorders and other metabolic diseases of poultry—a review. *The Veterinary Journal*, 169(3), 350-369.

Kambatla, K., Kollias, G., Kumar, V., y Grama, A. (2014). Trends in big data analytics. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 74(7), 2561–2573.

Karkach, S. (2006). Trajectories and models of individual growth. *Demographic Research*, 15, 347-400.

Khamis, A., Ismail, Z., Muhammad, A. (2005). Nonlinear growth models for modeling oil palm yield growth. *Journal of mathematics and statistics*, 1(3), 225-233.

Kirkwood, J. K. (1991). Energy requirements for maintenance and growth of wild mammals, birds and reptiles in captivity. *The Journal of nutrition*, 121(suppl\_11), 29-34.

Kirkwood, J. K., y Webster, A. J. F. (1984). Energy-budget strategies for growth in mammals and birds. *Animal Science*, 38(2), 147-155.

Kooijman, S. (2000). *Dynamic energy and mass budgets in biological systems*. (2a ed). Cambridge university press.

KOOPS, W. *Multiphasic Analysis of Growth*. Tesis de doctorado. Wageningen Holanda. Wageningen Agricultural University. 1989.121p.

Kwakkel, R., Ducro, B., y W, Koops. (1993). Multiphasic analysis of growth of the body and its chemical components in white leghorn pullets. *Poultry Science*, 72(8), 1421-1432.

Kwakkel, R., Van Esch, J., Ducro, B., y Koops, W. (1995). Onset of Lay Related to Multiphasic Growth and Body Composition in White Leghorn Pullets Provided Ad Libitum and Restricted Diets. *Poultry Science*, 74(5), 821-832.

Lara, A. (2000). *Diseño estadístico de experimentos, análisis de la varianza y temas relacionados: tratamiento informático mediante SPSS*. Proyecto Sur de Ediciones.

Leeson, S., Julian, R., y Summers, J. (1986). Influence of prelay and early-lay dietary calcium concentration on performance and bone integrity of Leghorn pullets. *Canadian Journal of Animal Science*, 66(4), 1087-1095.

Leeson, S., Summers, J. D., y Caston, L. J. (1993). Growth response of immature brown egg strain pullets to varying nutrient density and lysine. *Poultry Science*, 72(7), 1349-1358.

Leeson, S., Summers, J., y Diaz, G., (2000). *Nutrición aviar comercial*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. ISBN:958-33-1300-9

Lera, R. (2018). El inicio de la puesta un periodo clave para el éxito de un lote de ponedoras. *Avinews*, 29, 85-94.

Lokhorst, C. (1996). Mathematical Curves for the Description of Input and Output Variables of the Daily Production Process in Aviary Housing Systems for Laying Hens. *Poultry Science*, 75(7), 838-848.

López, S., France, J., Gerrits, W., Dhanoa, M., Humphries, D., y Dijkstra, J. (2000). A generalized Michaelis-Menten equation for the analysis of growth. *Journal of Animal Science*, 78(7), 1816–1828.

Luiting, P. (1991). *The value of feed consumption data for breeding in laying hens* (tesis de doctorado). Universidad de Wageningen, Holanda.

Martínez, C., Rodríguez, A., Jiménez, A., y Manrique, C. (2010). Descripción matemática de la función Gompertz aplicada al crecimiento de animales. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 57(1), 76-80.

Maruyama, K., Potts, W., Bacon, W., y Nestor, K. (1998). Modeling turkey growth with the relative growth rate. *Growth, Development and Aging*, 62(4), 123–139.

Maruyama, K., Vinyard, B., Akbar, M. K., Shafer, D. J., y Turk, C. M. (2001). Growth curve analyses in selected duck lines. *British Poultry Science*, 42(5), 574–582.

Mc Millan, I. (1981). Compartmental model analysis of poultry egg production curve. *Poultry Science*, 60(7), 1549–1551.

Mc Nally, D. (1971). Mathematical model for poultry egg production. *Biometrics*, 27(3), 735–738.

Medina, S., Vargas, L., Navarro, J., Canul, C., y Peraza, S. (2010). *Comparación de medidas de desviación para validar modelos sin sesgo, sesgo constante o proporcional*. *Universidad y ciencia*, 26(3), 255-263.

Melillanca, E. (2018). Coeficiente de determinación corregido o R-cuadrado ajustado: Welcome to the Jungle. Recuperado el 22 de Septiembre de 2020, disponible en <http://www.ericmelillanca.cl/content/coeficiente-determinacion-corregido-o-r-cuadrado-ajustado>

Monzo, J.F. (Junio de 2018). ¿Cómo lograr la persistencia del pico de puesta en ponedoras?. *Avinews*. Recuperado de <https://avicultura.info/download/pico-puesta.pdf>

Nariņç, D., Nariņç, N. Ö., y Aygün, A. (2017). Growth curve analyses in poultry science. *World's Poultry Science Journal*, 73(2), 395-408.

Narushin, V., y Takma, C. (2003). Sigmoid Model for the Evaluation of Growth and Production Curves in Laying Hens. *Biosystems Engineering* 84(3), 343–348.

Nelder, J. (1961). The fitting of a generalization of the logistic curve. *Biometrics*, 17(1), 89–110.

O'Shea, C. (Junio de 2019). Focus on extended laying cycles. En A. Rutkowski (Presidencia). 22° European Symposium on Poultry Nutrition. Simposio llevado a cabo en Gdańsk, Polonia.

Oliveira, C., Tavares, J., Correa, G., Vieira, B. Barbosa, S., Correa, A., y Lima, C. (2018). Mathematical models to describe the growth curves of white-egg layers. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(3), 1327-1334.

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. (2019). FAOSTAT. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QL>

Perni, S., Andrew, P. W., y Shama, G. (2005). Estimating the maximum growth rate from microbial growth curves: definition is everything. *Food microbiology*, 22(6), 491-495.

Posada, S. L., y Noguera, R. R. (2007). Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en la evaluación de alimentos para animales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 141-148.

Ricklefs, R. E. (1968). Patterns of growth in birds. *International Journal of Avian Science*, 110(4), 419-451.

Sakomura, N. K., Hauschild, L., Silva, E. P., y Araujo, J. A. (2011). Factorial model to estimate poultry nutritional requirements. En *Proc. III International Symposium on Nutritional Requirements of Poultry and Swine. Vicosa, Brazil* (pp. 45-76).

SAS Institute. (2015). *Base SAS 9.4 procedures guide*. SAS Institute.

Sato, M., Tachibana, T., y Furuse, M. (2006). Heat production and lipid metabolism in broiler and layer chickens during embryonic development. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 143(3), 382-388.

Savegnago, R. P., Cruz, V. A. R., Ramos, S. B., Caetano, S. L., Schmidt, G. S., Ledur, M. C., ... y Munari, A. D. (2012). Egg production curve fitting using nonlinear models for selected and nonselected lines of White Leghorn hens. *Poultry science*, 91(11), 2977-2987.

Siegel, P. B., y E. A. Dunnington. (1985). *Reproductive complications associated with selection for broiler growth*. En W. G. Hill, J. M. Manson, y D. Hewitt (Ed.), *Poultry Genetics and Breeding* (pp. 59–72). British Poultry Science Ltd, Longman Group, Harlow, UK.

Silva, E. P., Malheiros, E. B., Sakomura, N. K., Venturini, K. S., Hauschild, L., Dorigam, J. C. P., y Fernandes, J. B. K. (2015). Lysine requirements of laying hens. *Livestock Science*, 173, 69–77.

Solís, M. E. P. (2003). Crecimiento y desarrollo de las especies pecuarias. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 3(1), 213-220.

Srivastava, A. K., Srivastava, V. K., & Ullah, A. (1995). The coefficient of determination and its adjusted version in linear regression models. *Econometric reviews*, 14(2), 229-240.

Summers, J. D., Leeson, S., y D. Spratt. (1987). Rearing early maturing pullets. *Poultry Science*, 66(11), 1750-1757.

Taylor, C. S. (1965). A relation between mature weight and time taken to mature in mammals. *Animal Science*, 7(2), 203-220.

Taylor, C. S. (1968). Time taken to mature in relation to mature weight for sexes, strains and species of domesticated mammals and birds. *Animal Science*, 10(2), 157-169.

Taylor, S. C. (1980). Genetic size-scaling rules in animal growth. *Animal Production*, 30, 161-165.

Taylor, S. C. (1985). Use of genetic size-scaling in evaluation of animal growth. *Journal of Animal Science*, 61(suppl\_2), 118-143.

Tedeschi, L. (2004). Assessment of the Adequacy of Mathematical Models. Workshop on Mathematical Model Analysis and Evaluation. Sassari Italia.

Thornley J, France J. (2007). *Mathematical models in agriculture: quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences* (2aed). Walling-ford, UK: CABI.

Tjørve, K. M., y Tjørve, E. (2010). Shapes and functions of bird growth models: how to characterise chick postnatal growth. *Zoology*, 113(6), 326-333.

Tjørve, K. M., y Underhill, L. (2009). Growth, sibling rivalry and their relationship to fledging success in African black oystercatchers *Haematopus moquini*. *Zoology*, 112(1), 27-37.

Torres, M. Paz, K. Salazar, F. (2019). *Métodos de recolección de datos para una investigación*. Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar. Boletín Electrónico No. 03.

Torres, V., Barbosa, I., Meyer, R., Noda, A., & Sarduy, L. (2012). Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 46(4), 345-350.

Unver, Y. (2000). *Parameter estimations of partial egg production records in layers* (tesis de maestría). Universidad del Geoeo. Turquía.

Vo, K. V., Boone, M. A., Hughes, B.L., y Knechtges, J. F. (1980). Effects of ambient temperature on sexual maturity. *Poultry Science*, 59(11), 2532-2537.

Wang, Z., y Zuidhof, M. (2004). Estimation of Growth Parameters Using a Nonlinear Mixed Gompertz Model. *Poultry Science*, 83(6), 847–852.

Watt, G. (2020). Producción avícola a nivel nacional 2019. *Revista Industria Avícola*, 67(3), 8. Recuperado de <https://www.industriaavicola-digital.com/industriaavicola/april2020/MobilePagedReplica.action?pm=1&folio=8#pg10>

Williams, M.R. (1995). An extreme value function model of the species incidence and species–area relations. *Ecology*, 76(8), 2607–2616.

Winsor, C. P. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 18(1), 1-7.

Wright, D., Rubin, C., Schutz, K., Kerje, S., Kindmark, A., Brandström, H., ... y Jensen, P. (2012). Onset of sexual maturity in female chickens is genetically linked to loci associated with fecundity and a sexual ornament. *Reproduction in domestic animals*, 47, 31-36.

Yang, N., Wu, C., y McMillan, I. (1989). New mathematical model of poultry egg production. *Poultry Science*, 68(4), 476–481.

Zelenka, D. J., Jones, D. E., Dunnington, E. A., y Siegel, P. B. (1987). Selection for Body Weight at Eight Weeks of Age: 18. Comparisons Between Mature and Immature Pullets at the Same Live Weight and Age. *Poultry science*, 66(1), 41-46.

Zelenka, D. J., Siegel, P. B., Dunnington, E. A., y Cherry, J. A. (1986). Inheritance of traits associated with sexual maturity when populations of chickens reach 50% lay. *Poultry Science*, 65(2), 233-240.